



Institución Universitaria

**Desarrollo de placas divisorias livianas elaboradas a partir
del aprovechamiento sostenible de residuos de construcción
y demolición de yeso**

Daniela López Rugeles

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas
Medellín, Colombia

2023

Desarrollo de placas divisorias livianas elaboradas a partir del aprovechamiento sostenible de residuos de construcción y demolición de yeso

Daniela López Rugeles

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Desarrollo Sostenible

Director (a):

Nicolás Steven Pardo Álvarez

Magíster en Ingeniería de Materiales, Ingeniero de Materiales

Codirector (a):

Harlem Acevedo Agudelo

Doctor en Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, Mg, Esp, Ingeniero Civil

Línea de Investigación:

Construcción Sostenible

Instituto Tecnológico Metropolitano
Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas
Medellín, Colombia

2023

A mi familia por apoyarme en todo momento.

Agradecimientos

A mi director y codirector de trabajo de grado Nicolás Steven Pardo Álvarez y Harlem Acevedo Agudelo por su compromiso, acompañamiento permanente y entrega; al laboratorio CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia por permitirme hacer los ensayos iniciales con el residuo de placa de yeso, al laboratorio de Mineralurgia de la Universidad de Antioquia, al laboratorio de Construcción del ITM y al laboratorio de Suelos del Colegio Mayor de Antioquia por el apoyo en cada etapa.

Resumen

En el ámbito internacional se está presentando una problemática considerable debido al gran volumen que ocupan los residuos que resultan como producto de la construcción, reforma y demolición de edificaciones. De este modo, la búsqueda de alternativas sostenibles para la reincorporación de éstos a los procesos y sistemas constructivos, se convierte en una necesidad de la industria de la construcción. Los sistemas livianos, y con éstos, la placa de yeso, se presentan como tendencia actual por su velocidad de ejecución y versatilidad dentro de las edificaciones. Sin embargo, los residuos de placa de yeso, además de su volumen presentan otras problemáticas adicionales para el medio ambiente, ya que contaminan el suelo, fuentes hídricas y otros residuos de construcción y demolición. La presente investigación tiene el objetivo de desarrollar placas livianas a partir del aprovechamiento sostenible de residuos de placa de yeso resultantes de la fase de instalación en obra, mediante un proceso basado en economía circular.

Para esto, se hizo una revisión bibliográfica, se planteó un diseño experimental y se llevó a cabo el análisis, la evaluación y las propuestas de implementación a partir de los resultados. Para el diseño experimental se definieron los materiales que hicieron parte del estudio, se llevaron a cabo procesos de trituración y molienda en los que se logró separar el núcleo de la placa de la celulosa que lo recubre y disminuir su tamaño de partícula. Posteriormente, se hizo la caracterización de los materiales empleados, se plantearon tres condiciones de los diseños de mezcla, entre los cuales se consideró una placa de referencia con 0% yeso reciclado (0YR), una segunda condición, en la que se plantearon tres alternativas con 50% de yeso reciclado con diferentes tamaños de partícula (50YR-P elaborada con yeso pasante de malla 50, 50YR-R con yeso retenido de malla 50 y 50YR-PR con el yeso en estado de entrega, anterior al tamizaje) y la tercera condición con el 100% de yeso reciclado con los tamaños de partícula de la condición anterior respectivamente (100YR-P, 100YR-R y 100YR-PR). Seguidamente, se definió el proceso de mezclado y fraguado; asimismo, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas,

entre ellas la resistencia a flexión como la principal propiedad a evaluar en este tipo de elementos. Finalmente, se calculó el impacto ambiental asociado a la categoría de calentamiento global y se describió el impacto económico y social asociado al supuesto de la implementación de una industria de aprovechamiento y desarrollo de placas livianas a partir de residuos de yeso.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la condición 100YR-PR (100% yeso reciclado en estado de entrega) obtuvo el mejor rendimiento en resistencia a flexión, alcanzando el 74,2% de 0YR (100% yeso virgen) y el 52,3% de P-C (placa comercial). Con relación al impacto ambiental, dicha condición redujo considerablemente las emisiones por metro cuadrado, con 73,0% respecto a 0YR y 42,2% respecto a P-C, por lo que resulta importante tener en cuenta el aprovechamiento sostenible de residuos de yeso para la elaboración de placas livianas, dada su resistencia a la flexión y su impacto ambiental.

Palabras clave: economía circular, placas de yeso, RCD, resistencia a la flexión, impacto ambiental.

Abstract

Internationally, the large volume of waste resulting from building construction, renovation and demolition is becoming a significant problem. Therefore, the construction industry needs to find sustainable alternatives to reincorporate this waste into construction processes and systems. Lightweight systems, including gypsum board, are a current trend due to their speed of execution and versatile applications. However, gypsum board waste, in addition to its volume, represents additional environmental issues, due to soil, water, and construction site contamination. The main objective of this research project is to develop lightweight panels from gypsum board waste resulting from on-site installation, using circular economy principles.

For this purpose, this project involves a bibliographic review, an experimental design, and the analysis, evaluation and implementation of proposals based on the results. The experimental design includes definition of the materials, and evaluation of size reduction operations (i.e., crushing and grinding) to separate the core of the plate from the cellulose-based cover. For material characterization, three board compositions were evaluated, including, 0% recycled gypsum (0YR, reference plate), 50% recycled gypsum with different particle sizes, and 100% recycled gypsum different particle sizes. Three different particle sizes were considered for the boards containing 50% and 100% recycled gypsum, including 50 mesh passing gypsum (50YR-P, 100YR-P), retained gypsum of 50 mesh (50YR-R, 100YR-R), and gypsum in the delivered state, prior to screening (50YR-PR, 100YR-PR). Mixing and setting conditions were defined and the physical and mechanical properties were determined, including flexural strength as the main property to be evaluated. Finally, this project discusses the environmental impact associated with the global warming category, as well as the economic and social consequences of implementing an industry that uses and manufactures lightweight panels from gypsum.

According to the results, the 100YR-PR condition (100% recycled gypsum in delivery state) obtained the best performance in flexural strength, equivalent to 74,2% of 0YR (100% virgin gypsum, reference panel) and 52,3% of P-C (commercial board). Regarding the environmental impact, this condition considerably reduced emissions per square meter by 73,0% compared to 0YR and by 42,2% compared to P-C. In conclusion, gypsum waste is

an alternative for the, production of lightweight construction panels, due to their flexural strength resistance and their environmental impact.

Keywords: circular economy, gypsum board, construction and demolition waste, flexural strength resistance, environmental impact.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract	VII
Contenido	IX
Introducción	1
1. Marco de referencia	6
1.1 Marco teórico	6
1.1.1 Economía circular.....	6
1.1.2 Análisis de ciclo de vida	9
1.1.3 Residuos de Construcción y Demolición - RCD.....	10
1.2 Marco normativo	10
1.2.1 Estrategia Nacional de Economía Circular	10
1.2.2 CONPES 3874. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos.	11
1.2.3 CONPES 3934. Política de crecimiento verde	12
1.2.4 Resolución 1257 de 2021 “Por la cual se modifica la resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones”	13
1.2.5 ICONTEC - NTC 6159:2017 Placas de yeso. Requisitos.....	14
1.3 Estado del Arte	14
2. Metodología	21
2.1 Descripción del diseño experimental.....	22

2.1.1 Aprovechamiento del residuo de placa de yeso y caracterización de la materia prima	22
2.1.2 Planteamiento de diseños de mezcla	24
2.1.3 Determinación de propiedades físicas y mecánicas	27
2.2 Determinación del impacto ambiental, económico y social.....	29
2.2.1 Impacto ambiental	29
2.2.2 Impacto económico y social.....	30
3. Análisis, evaluación y propuestas de aprovechamiento	31
3.1 Aprovechamiento del residuo de placa de yeso y caracterización de la materia prima	31
3.1.1 Trituración	31
3.1.2 Caracterización de materiales	33
3.2 Elaboración de placas y determinación de propiedades físicas y mecánicas	35
3.2.1 Elaboración de placas	37
3.2.2 Determinación de propiedades físicas y mecánicas	38
3.3 Evaluación del impacto ambiental.....	41
3.4 Análisis del impacto económico y social	43
4. Conclusiones y recomendaciones	50
4.1 Conclusiones	50
4.2 Recomendaciones	51
Bibliografía	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama del sistema de economía circular asociado al reciclaje de materiales. Modificado a partir de Ellen MacArthur Foundation, 2013.	8
Figura 2-1: Fases de la estructura metodológica. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 2-2: Equipos utilizados para la trituración y molienda de los residuos de placa de yeso. a) Trituradora de rodillos y b) Molino de bolas. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 2-3: a). Equipo usado para fallar las placas a flexión. b). Detalle de montaje. Elaboración propia.	28
Figura 3-1: Separación de materiales posterior a la trituración primaria. Fuente: Fotografía propia.	32
Figura 3-2: Distribución granulométrica para a) residuo de yeso molido y b) yeso virgen. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 3-3: Análisis morfológico para: a) y b) 0YR, c) y d) 50YR-P, e) y f) 50YR-R, g) y h) 50YR-PR, i) y j) 100YR-P, k) y l) 100YR-R, m) y n) 100YR-PR.	35
Figura 3-4: Placas de yeso fabricadas. Fuente: Fotografía propia.....	38
Figura 3-5: Resistencia a la flexión (MPa) para las condiciones evaluadas. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 3-6: Resumen gráfico en función de resistencia y del indicador de sostenibilidad Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 3-7: Proceso de fabricación de las placas a partir de residuos de yeso a nivel industrial. Modificado a partir de (DAPcons & KNAUF, 2020).....	45

Lista de tablas

Tabla 2-1: Descripción de las condiciones planteadas	25
Tabla 2-2: Consumo eléctrico de los equipos utilizados para la trituración y molienda de los residuos de placa de yeso	30
Tabla 3-3: Relación de material resultante de la trituración.	32
Tabla 3-4: Datos técnicos placa KNAUF Standard.	34
Tabla 3-5: Propiedades físicas de las condiciones evaluadas.	39
Tabla 3-6: Fases para la fabricación del prototipo de placa liviana	41
Tabla 3-7: Emisiones por metro cuadrado para las mejores condiciones encontradas y la placa comercial	42

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Término
μm	Micrómetro
Mt	Megatonelada
MPa	Megapascal
N	Newton
ft	Pie
lbf	Libra-fuerza
r.p.m	Revoluciones por minuto
Hz	Hercio o Hertz

Abreviaturas

Abreviatura	Término
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
DAP	Declaración Ambiental de Producto
PIB	Producto Interno Bruto
GEI	Gases Efecto Invernadero
Kg CO ₂ e	kilogramos de dióxido de carbono equivalente
ACV	Análisis de Ciclo de Vida

Introducción

El sector de la construcción tiene una alta relevancia a nivel mundial, ya que es transversal a una gran cantidad de procesos productivos y económicos. Es un sector que genera aproximadamente un 6% de los empleos en los países en vía de desarrollo y en Colombia consume el 60% de los materiales extraídos de la tierra (CCCS et al., 2020). El 95% de la producción total de yeso a nivel mundial, lo consume este sector (Pedreño-Rojas et al., 2020a), ya que se emplea tanto en acabados con pasta de yeso (estuco) como en el emplacado de estructuras con placas prefabricadas livianas (sistema de construcción liviano). En adición, el yeso es uno de los materiales de revestimiento menos perjudiciales para el medio ambiente comparado con morteros de cemento y su proceso de obtención aún puede depurarse considerablemente para reducir los impactos que se generan (Pedreño-Rojas et al., 2020b). El sistema de construcción en seco es cada vez más utilizado en el sector de la construcción por ser liviano, de rápida instalación, más limpio que los sistemas tradicionales y por su versatilidad frente a las reformas. Dentro de este sistema se encuentra uno de los elementos principales que lo componen: la placa de yeso, que en los últimos años viene tomando fuerza para la instalación de muros, cielos, revoque sobre muros de mampostería e incluso para la fabricación de mobiliario. Su producción a nivel mundial ha alcanzado cifras considerables, tomando como ejemplo que sólo en los Estados Unidos se produjeron 2.300 millones de metros cuadrados en 2017 (Erbs et al., 2021). Todo esto, acompañado de un aumento en la actividad edificatoria de las ciudades, ha significado un incremento grave en la cantidad de residuos de placa de yeso generados en las obras, que alcanzan alrededor de 15 millones de toneladas por año en el mundo (Geraldo et al., 2017). En Norteamérica se desperdicia aproximadamente el 12% de las placas durante el proceso de construcción debido a los cortes durante la instalación inicial y en Brasil ese desperdicio corresponde al 5% (Erbs et al., 2018). Dicho residuo suele ser de gran volumen, no es compactable y es de difícil disposición final, ya que, si se dispone en canteras a cielo abierto, puede contaminar el suelo alterando su alcalinidad, contaminar fuentes hídricas y generar sulfuro de hidrógeno al entrar en contacto con residuos

orgánicos, el cual puede llegar a ser fatal en grandes proporciones. Además, no se debe mezclar con otros residuos del sector constructor ya que los contamina e impide su reciclaje (Erbs et al., 2021). Desde otro punto de vista, el yeso tiene gran potencial de reciclaje por dos razones fundamentales: composición química y factor económico. A nivel de composición química el yeso no presenta cambios significativos a lo largo de varios ciclos de reciclaje consecutivos (Geraldo et al., 2017; Pedreño-Rojas et al., 2019) y a nivel económico el costo del reciclaje es menor que el costo de su disposición final en vertederos. Dentro de las ventajas relacionadas con el aprovechamiento de los residuos de placas de yeso, además de disminuir los impactos ambientales anteriormente mencionados, reduce la extracción de yeso natural (Geraldo et al., 2017). Además, se han hecho estudios en los que se muestran mejoras de más del 40% en todas las categorías de impacto ambiental evaluadas dentro de un análisis de ciclo de vida para la producción de yeso reciclado a partir de residuos de placa de yeso y polvo, frente a la producción de yeso natural (Pedreño-Rojas et al., 2020b). Diversos autores han estudiado el aprovechamiento de residuos de placa de yeso, evaluando diferentes grados de molienda del material, temperaturas de calcinación del residuo e inclusión de aditivos y adiciones, y analizando su influencia en las propiedades físicas y mecánicas finales (Atkins et al., 2008; Claisse & Ganjian, 2006; Erbs et al., 2018, 2021; Ganjian et al., 2011; Geraldo et al., 2017; Jaramillo Castro & Restrepo Baena, 2020; Jiménez-Rivero & García-Navarro, 2017; Papailiopolou et al., 2017; Pedreño-Rojas et al., 2019, 2020; Suárez Silgado & Roca, 2014).

En función de la producción y uso de placas de yeso actual, y la cantidad de residuos generados a partir de cortes durante el proceso de instalación, la presente investigación busca desarrollar placas livianas a partir del aprovechamiento sostenible de residuos de placa de yeso resultantes de la fase de instalación en obra, partiendo de establecer el proceso de aprovechamiento de los residuos y analizar las propiedades mecánicas los impactos ambientales en la categoría de calentamiento global (huella de carbono) de las placas desarrolladas. Este proceso se enmarca en un modelo de economía circular, en el cual se aprovecha un residuo que actualmente se destina a los vertederos, causando un impacto ambiental que tiene el potencial de ser reducido, debido al potencial de reciclaje del yeso. Además de la reducción en el impacto ambiental, se busca contribuir con

beneficios sociales y económicos encaminados hacia la generación de nuevas industrias para el aprovechamiento de residuos.

Con este trabajo se busca ofrecer al sector constructor colombiano una alternativa al aprovechamiento de este tipo de residuos, buscando mediante la fabricación de nuevas placas de yeso contribuir al compromiso de Colombia de la reducción de los GEI y el cumplimiento de la Resolución 1257 de 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), normativa colombiana relacionada con la gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD), en la que aumentan las metas y porcentajes de aprovechamiento efectivo de los RCD producidos en obra. Esta reducción no sólo daría respuesta al compromiso de Colombia frente a las cumbres del cambio climático, sino que también ayudaría con la preocupación ambiental de la disposición de este tipo de residuos. Esta investigación se direcciona hacia al cumplimiento de una serie de objetivos de desarrollo sostenible: con la implementación de nuevas industrias busca poner fin a la pobreza por la generación de empleos (ODS 1 Fin de la pobreza); al generar espacios de capacitación y desarrollo de nuevas habilidades se centra en garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje para todos (ODS 4 Educación de calidad); busca promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos (ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico) promueve nuevas tecnologías inclusivas y sostenibles que permiten un uso más eficiente del recurso partiendo de que la innovación y el progreso tecnológico son claves para descubrir soluciones económicas y ambientales (ODS 9 Industria, innovación e infraestructura); tiene como objetivo reducir la desigualdad dentro y entre los países (ODS 10 Reducción de las desigualdades); promueve políticas y planes para incentivar el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a este (ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles) y promueve las modalidades de consumo y producción sostenibles para reducir la huella ecológica, gestión eficiente de los residuos naturales, partiendo del hecho de que las industrias y los consumidores deben apuntar a reciclar y reducir los desechos (ODS 12. Producción y consumo responsables) (Organización de las Naciones Unidas, 2023).

Este informe se ha dividido en cuatro capítulos distribuidos de la siguiente manera: en el capítulo I se presenta el soporte teórico y el estado del arte de la temática desarrollada, en el capítulo II se detalla la metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos

propuestos, en el capítulo III se presentan los resultados y el análisis, abordando la caracterización de las materias primas, los diseños de mezcla, las condiciones evaluadas en términos de propiedades físicas y mecánicas y los impactos ambientales, económicos y sociales analizados, y en el capítulo IV se presentan las conclusiones y recomendaciones para la implementación de este tipo de materiales.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar placas divisorias livianas a partir del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición de yeso, que cumplan con los lineamientos de economía circular.

Objetivos Específicos

- Establecer el proceso para el aprovechamiento de residuos de yeso y la fabricación de placas a partir de éstos.
- Definir los diseños de mezcla para la construcción de la placa de yeso reciclado según estándares técnicos y de economía circular.
- Evaluar las propiedades mecánicas y la huella de carbono de las muestras de placas de yeso elaboradas a partir de yeso reciclado.

Pregunta de investigación

¿Qué procesos físicos, químicos y técnicos son necesarios para la fabricación de una placa de yeso a partir de la sustitución parcial o completa de materia prima virgen por yeso reciclado, que permita el cumplimiento de los estándares técnicos para su aprovechamiento mediante lineamientos de economía circular?

Hipótesis

La placa liviana elaborada a partir del reciclaje de residuos de construcción y demolición de yeso, cumple con la NTC 6159.

1. Marco de referencia

1.1 Marco teórico

1.1.1 Economía circular

Es un modelo económico reparador y regenerativo con importantes beneficios económicos, ambientales y sociales; se enfoca en optimizar los sistemas teniendo en cuenta todos sus componentes y pretende lograr que los productos, componentes y recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento (Gobierno de la República de Colombia, 2019).

En los inicios de la definición de economía circular con la fundación Ellen MacArthur, este modelo estableció que los bienes actuales se conviertan en los recursos del mañana, propone eliminar los patrones tradicionales de consumo lineal que, por un lado, hace un uso insostenible de los recursos y por el otro tiene un límite por la disponibilidad de estos. El modelo hace una crítica a los límites que presenta una economía lineal en la que producimos, consumimos y desechamos; no se presta mucha atención a una fase de diseño desde la cual se pueden eliminar impactos negativos a lo largo de toda la cadena, además con el aumento de la población que se está presentando y su tendencia a continuar, la extracción de recursos también continuará en ascenso, lo cual representará menor disponibilidad y mayor precio para la extracción (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

La economía circular es un sistema que pretende un cambio desde la etapa de diseño y se basa en ciertos principios: los residuos no existen, es decir, los productos se diseñan para un ciclo de desmonte y reutilización; debe existir una diferencia entre los componentes consumibles, que pueden devolverse a la biosfera y los duraderos que se deben diseñar para la reutilización; además, la energía requerida para alimentar el ciclo debe ser proveniente de fuentes renovables, cumpliendo tales principios los productos de la

economía circular deben maximizar el número de ciclos consecutivos y diversificar la reutilización a lo largo de toda la cadena de valor. A partir de ejemplos actuales, se ha hecho evidente que reutilizar y contemplar mejor la etapa de diseño puede reducir el costo invertido en extracción, transformación de materias primas y también en gastos de eliminación posteriores al consumo, por lo que, la economía circular se convierte en un proceso rentable en cuanto a inversión por materiales, mano de obra y emisiones de carbono que se reducen a lo largo de toda la cadena, y a su vez, se rompe la cadena de dependencia frente a los recursos, por lo que debe convertirse en un motor para la innovación (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

La reutilización de materiales no ha sido, por muchos años, la prioridad de nuestra economía por la facilidad de obtener nuevas materias primas, pero dada la situación actual se evidencia que se pueden evitar pérdidas innecesarias de recursos, el vertido de un producto genera la pérdida de toda la energía residual mientras que la reutilización ahorra más energía, y nuestra sociedad está reduciendo el capital natural de nuestro planeta. Una economía circular requiere un pensamiento previo a la creación de los productos, requiere que estos sean diseñados con la intención de que sus partes sean aptas para el desmonte y la restauración, todo diseñado para volver a usarse, invirtiendo poca energía y reteniendo la calidad de estos, la modularidad, versatilidad y adaptabilidad son características prioritarias en este modelo. El concepto de economía circular requiere un menor uso de energía a la hora de transformación de residuos por lo que el material inicial, debería estar concebido para esto, mientras que durante un proceso de reciclaje se pierden grandes cantidades de mano de obra y de energía, por lo que es una estrategia válida, pero se debe cambiar el modelo desde la concepción de los productos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

En la Figura 1-1 se evidencia el diagrama general de los flujos mejorados de bienes y servicios, flujos presentes en una economía circular, resaltando principalmente el reciclaje, la renovación y la nueva manufacturación de materiales que, aun teniendo en cuenta la inversión necesaria para llevar a cabo dichos procesos, será el proceso que se llevará a cabo en la presente investigación.

aumentar su valor, desde una perspectiva de sostenibilidad el reciclaje de RCD puede producir beneficios económicos, sociales y ambientales (Ding et al., 2023).

1.1.2 Análisis de ciclo de vida (ACV)

Es una metodología empleada para evaluar de manera objetiva los impactos que generan sobre el medio ambiente, un producto o servicio durante todas las etapas de su ciclo de vida: extracción de materias primas, fabricación, transporte, instalación y uso, desmonte, reutilización, reciclaje y disposición final. El objetivo de la metodología es identificar oportunidades de mejora y tomar decisiones para aumentar el desempeño ambiental a lo largo de las etapas del ciclo de vida del producto o servicio estudiado y su marco normativo es la ISO 14040 (ISO 14040:2006(es), 2006) y la ISO 14044 (ISO 14044:2006(es), 2006). Según la ISO 14040 (ISO 14040:2006(es), 2006) hay cuatro fases a estudiar en un ACV, siendo estas, la definición de objetivos y alcances, en la que se establece el propósito y el nivel de detalle a evaluar, la segunda fase es el inventario de ciclo de vida, en la que se hace la identificación y se cuantifican las entradas y salidas que causan impactos a lo largo del ciclo de vida, las entradas hace referencia al consumo de recursos o materiales y las salidas a las emisiones y residuos generados, la tercera fase es la evaluación de los impactos del ciclo de vida, en esta se relaciona el inventario realizado con posibles impactos sobre el medio ambiente o la salud humana para valorar la importancia que generan los impactos potenciales y la cuarta fase es la interpretación de resultados en la cual se pretende plantear conclusiones y recomendaciones que permitan tomar decisiones. En el caso de los materiales de construcción la norma UNE-EN 15804:2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto (Asociación Española de Normalización, 2012) permite evaluar el impacto ambiental que ocasionan los materiales y sistemas constructivos gracias a la Declaraciones ambientales de Producto DAP, de esta forma se puede hacer la selección de materiales o procesos que consumen menos recursos y generan menos impactos de acuerdo con parámetros ambientales, económicos y sociales.

1.1.3 Residuos de Construcción y Demolición - RCD

En la actualidad se reconoce que el sector constructor es uno de los mayores generadores de impactos ambientales y esto se encuentra directamente relacionado a la generación de residuos de construcción. En general, los residuos de construcción y demolición son definidos como una mezcla de diferentes materiales, incluyendo residuos inertes y peligrosos generados de diferentes actividades como construcción, renovación y demolición. Además, estos pueden incluir materiales generados en desastres naturales. La cantidad y composición varía entre regiones en función de la población, las leyes, la planeación y los materiales y tipos de construcciones (Ghisellini et al., 2018; Menegaki & Damigos, 2018). Cada año se generan aproximadamente 500 millones de toneladas de RCD en los Estados Unidos, 800 Mt en la Unión Europea y 2.000 Mt en China. Se estima que los RCD representan entre el 25% y el 40% del volumen total de todos los residuos depositados en rellenos, lo que contribuye significativamente a la ocupación del suelo (Revilla-Cuesta et al., 2022). Para Colombia, se estima una generación de un total de 22 millones de toneladas de RCD al año, siendo Bogotá la ciudad que más genera este tipo de residuos, con un estimado de 13 millones de toneladas anuales (Sierra Perdomo, 2020; Soto-Paz et al., 2023). Para Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, según las cifras del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) en el 2017 se generaron aproximadamente 9.000 toneladas diarias de RCD y se estima que, de estas, el 1% corresponde a derivados de producto de yeso posconsumo (Jaramillo Castro & Restrepo Baena, 2020).

1.2 Marco normativo

1.2.1 Estrategia Nacional de Economía Circular

Este plan busca fortalecer el desarrollo económico, ambiental y social del país sobre la base de “producir conservando y conservar produciendo”, se desarrolló partiendo de la concertación entre actores estratégicos de diversos sectores inclinados a buscar la transformación de las cadenas productivas para lograr ciudades sostenibles. Es una de las vías para lograr el aumento de la tasa de reciclaje y reúso de los residuos sólidos a nivel nacional, pretende construir un modelo de crecimiento y de bienestar, utilizando menos

recursos, generando mayor valor y además, logrando con la implementación de modelos de economía circular, beneficios económicos, por la valorización de los recursos a lo largo de sus ciclos de uso, reducción en costos de producción, apertura de nuevos mercados, nuevas dinámicas, fuentes de financiación, entre otros, beneficios ambientales, por la reducción en los impactos por extracción de materias primas, transición energética, reducción de residuos y de gases de efecto invernadero, uso eficiente de recursos, entre otros, y beneficios sociales, por el cambio cultural en modelos de producción y consumo, generación de nuevos empleos, por el cambio de conciencia y responsabilidad frente a la situación presente (Gobierno de la República de Colombia, 2019)

La estrategia hace un diagnóstico del metabolismo de la economía colombiana, identifica las actividades económicas con mayor participación en el aumento de la economía nacional y su PIB y establece seis líneas de acción prioritarias, entre las cuales se encuentra la de “flujos de materiales de construcción”. El sector de la construcción consume una gran cantidad de recursos no renovables y de energía, genera un alto porcentaje de emisiones y residuos, además, se estima que un 30% de los residuos por demolición se disponen de manera ilegal en vertederos, lo cual constituye una serie de problemáticas importantes y el aprovechamiento de estos RCD es sólo del 2% aun teniendo potencial de ser aprovechados y revalorizados en un porcentaje mayor. De los 100 millones de toneladas de materiales de construcción consumidos a nivel nacional, el 7% de los materiales son considerados RCD. En esta vía se plantea el objetivo de fortalecer el aprovechamiento de materias primas, productos y RCD, y la meta de un aumento en la tasa de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (Gobierno de la República de Colombia, 2019).

1.2.2 CONPES 3874. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos

Esta política se encuentra comprendida para implementarse entre los periodos 2016 y 2030 y se encuentra articulada con el propósito nacional de avanzar gradualmente hacia una economía circular, buscando mantener durante el mayor tiempo posible el valor de los materiales y productos en el ciclo productivo. En su primer eje estratégico busca, entre otros objetivos, adoptar medidas para promover la reutilización, el aprovechamiento y el

tratamiento de los residuos sólidos, en cuanto a los RCD menciona que la generación de estos residuos supone una cantidad importante debido a que la construcción es uno de los principales motores de la economía nacional, además de considerar que son de gran volumen; por lo tanto, su manejo inadecuado puede reducir la capacidad de los rellenos sanitarios, en los cuales no habrá capacidad para otros residuos según proyecciones nacionales ya que se está generando presión sobre los rellenos sanitarios y desperdiciando materia prima y energía (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

La política busca apoyar la implementación de esquemas de aprovechamiento apuntando a la separación en la fuente y al aumento en tasas de aprovechamiento, la cual se espera sea de un 30%, se busca que los sitios de disposición final, se conviertan en centros de aprovechamiento, tratamiento y valorización, lo cual mejora el desempeño ambiental y reduce la emisión de GEI, además tiene tres metas principales: acabar con formas inadecuadas de disposición final, lograr articulación institucional para implementar un aprovechamiento inclusivo e implementar esquemas de tratamiento de residuos que permitan su valorización, para incorporarlos como una solución ambiental, empresarial y social (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

1.2.3 CONPES 3934. Política de crecimiento verde

Esta política busca reducir los impactos ambientales que generan las actividades productivas del país a través de la búsqueda de fuentes de crecimiento económico que sean sostenibles, la política se compone de cinco ejes estratégicos, entre ellos, el cuarto, establece acciones estratégicas necesarias para avanzar hacia cambios en los sectores productivos y encontrar procesos, tecnologías e insumos de mayor eficiencia que generen un valor agregado al modelo económico actual. El concepto de economía circular aparece como clave para el modelo de crecimiento verde y al mismo tiempo se expone que en el país es insuficiente la recuperación y el retorno de materiales desde la etapa de posconsumo, que para el caso de los materiales de construcción es apenas del 2% (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

En el documento se evidencia las barreras a intervenir por parte de la política como son: la coordinación institucional, brechas entre la generación de residuos y su aprovechamiento, ya que en la etapa de diseño y planificación de los productos se genera

hasta el 80% de los impactos ambientales; falta monitorear los procesos de economía circular y existe poca infraestructura para el tratamiento de los residuos. Si bien el CONPES 3934 no se enfoca en el aprovechamiento de RCD, si busca la promoción de sistemas sostenibles y reconoce la importancia de la transición hacia modelos de economía circular y define líneas de acción para lograr la transición, entre ellas se encuentran: desarrollo de instrumentos de planeación y técnicos para la economía circular, el desarrollo de instrumentos de infraestructura y logística, la promoción de un consumo responsable y sostenible, y el fortalecimiento de la gestión de la información (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

1.2.4 Resolución 1257 de 2021 “Por la cual se modifica la resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones”

La gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el territorio nacional está regulada por la Resolución 1257 de 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Esta norma establece la necesidad de articular los planes y actividades de constructores, gestores de residuos, municipios y autoridades ambientales con el fin de garantizar un adecuado manejo y disposición de este tipo de residuos, además, plantea un reto adicional, como lo es el reciclaje. La recuperación y reutilización de RCD se centra en la generación de materia prima para el desarrollo de nuevos materiales. Inicialmente, la Resolución 0472 de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) con sus políticas de reutilización, gestión integral, prevención, reducción y aprovechamiento, tuvo la meta de regular el porcentaje de RCD que se debía aprovechar y reincorporar a los procesos constructivos. Buscaba prevenir o reducir la generación de RCD, implementar su aprovechamiento y como última opción su correcta disposición final. Establecía actividades puntuales para la gestión integral de RCD en las cuales se encontraban la recolección y el transporte, su correcto almacenamiento, separación y control de factores externos que pudiesen afectarlos para propender por su aprovechamiento y reciclaje, presentaba obligaciones para los generadores, los gestores de RCD, los municipios y distritos, y para

las autoridades ambientales competentes, a fin de lograr alcanzar gradualmente un porcentaje mínimo del 30% en peso de RCD aprovechables, teniendo como base el peso total de los materiales usados en cada obra .

Sin embargo, la Resolución 1257 de 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021) modifica las metas de aprovechamiento efectivo de un porcentaje del peso total de los RCD generados en obra de acuerdo a la categoría del municipio, con porcentajes de aprovechamiento entre el 5% y el 25% para 2023, entre el 20% y el 50% para 2026 y entre el 40% y el 75% para 2030; estos porcentajes se consideran de obligatorio cumplimiento y no se pueden considerar en ellos los productos de excavación ni sobrantes por adecuación del terreno. El aumento en la rigurosidad de porcentajes de aprovechamiento lleva a plantear innovaciones para el reciclaje y aprovechamiento en todas las categorías de residuos de construcción y demolición.

1.2.5 ICONTEC - NTC 6159:2017 Placas de yeso. Requisitos

A nivel normativo en Colombia, la NTC 6159:2017 (ICONTEC, 2017) establece los requisitos que deben cumplir las placas de yeso. Entre estos requisitos se encuentra la dureza del núcleo, que no debe ser inferior a 66,72 N o a 48,93 N dependiendo del método por el cual se ensayen. Las placas no deben contener más de 10 ppm de cicloctasulfuro ortorrómbico (S_8), y deben cumplir con una resistencia a la flexión establecida, a una deflexión por humedad, y algunas características físicas determinadas como el espesor, el ancho y la perpendicularidad de los bordes.

1.3 Estado del Arte

La industria de la construcción es una de las que más contribuyen con las emisiones de CO_2 debido a su alto consumo energético y de materias primas, consume el 40% de la energía, emite un tercio de las emisiones de CO_2 y genera un 35% de los residuos industriales a nivel mundial que en su mayoría no se gestionan de la mejor manera. A nivel académico los primeros artículos que comienzan a evidenciar la problemática de los residuos de construcción y demolición, mencionando incluso los residuos de placa de yeso es la investigación de Al-Ansary & El-Haggar, (2005) donde se propuso la aplicación de

un concepto de ecología industrial, una idea que buscaba encaminar las operaciones industriales a que se llevaran a cabo como ecosistemas naturales, para ayudar a la industria de la construcción a mejorar en términos de responsabilidad y sustentabilidad, buscaba utilizar los desechos como materia prima para otros procesos o aplicaciones y evitar el proceso de disposición en vertederos, además se proponían técnicas para el aprovechamiento de los residuos de la placa de yeso, luego de ser triturado, como acondicionador de suelos para plantaciones, debido a su contenido de calcio y azufre; reincorporar el residuo a la producción de yeso nuevo o de yeso granular y agregar los residuos a sistemas de muros, para apoyar elementos ya construidos a nivel acústico y térmico.

En relación con los desperdicios de placas de yeso Claisse & Ganjian (2006) mencionaron que pueden ser una fuente secundaria para la producción de las mismas, pero también evidenciaron una serie de problemas que limitan su reincorporación a la línea de producción, por lo que buscaban encontrar otros usos para dichos residuos. Hamm et al., (2007) afirmaron que la disposición final de residuos de placa de yeso es de un costo bastante elevado para los usuarios por lo que se debía buscar su reincorporación al sistema de producción de la industria del yeso, al tiempo que se debían redefinir las especificaciones técnicas para la aceptación de yeso reciclado como materia prima.

Atkins et al., (2008) hicieron mención de la problemática específica de la disposición de residuos de placa de yeso en vertederos, relacionada con el volumen de ocupación y de la emisión de gas sulfuro de hidrógeno que termina siendo un problema para la salud de las personas que viven cerca a los vertederos. En la misma línea de investigación Ganjian et al., (2011) comenzaron a considerar todos estos residuos como alternativa para reemplazar otros productos en la industria de la construcción, por su potencial para ser utilizado en cementos, como aglutinante, mezclado con otros minerales para la adecuación de cimentaciones viales, bases de carreteras, sub-bases, entre otros.

El reciclaje de yeso se ha presentado como una alternativa a la problemática de los Residuos de Construcción y demolición, reemplazando el yeso natural en varios procesos como en la producción de cemento portland, morteros e incorporándolo a productos cerámicos. Suárez Silgado & Roca (2014) realizaron el análisis del ciclo de vida del yeso extraído de canteras y del yeso reciclado. De este estudio concluyeron que el proceso de

cocción con gas natural es determinante para la afectación al calentamiento global, contribuyendo con el 92% del impacto en las categorías de calentamiento global y energía no renovable para el yeso natural y con el 99% en las mismas categorías para la producción de yeso reciclado. El yeso reciclado presenta menores impactos respecto al yeso natural en las categorías de calentamiento global y energía no renovable, se compararon la producción de yeso (caso 1), el reciclaje de yeso correctamente separado de otros residuos de construcción y demolición RCD (caso 2) y reciclaje de yeso mezclado con otros RCD (caso 3), el cual requiere un proceso adicional de separación, para la categoría de calentamiento global para cada uno de los casos, el consumo fue de 0,0725, 0,036184 y 0,03618404 kg CO₂e/kg respectivamente. El reciclaje de yeso resulta viable, permite un ahorro del 49,8% en la categoría de calentamiento global y ayuda a reducir impactos en el medio ambiente, se evita la extracción de materias primas, el uso de explosivos para su extracción, la restauración de canteras y el impacto por la disposición del residuo.

La investigación de Jiménez-Rivero & García-Navarro (2017) planteó un estudio para identificar las mejores prácticas para la gestión de los residuos de yeso y poder adoptar una economía circular con respecto al reciclaje y aprovechamiento de este material, para evitar las pérdidas de recursos de materias primas secundarias potenciales y alcanzar las cifras establecidas de recuperación, lograr el cierre del ciclo y mejorar el desempeño ambiental. Los autores plantearon una economía del desempeño relacionada con la preservación de los recursos naturales, la optimización de los rendimientos y la efectividad del sistema, basados en las tres mejores prácticas reportadas: establecimiento de criterios claros de aceptación de los residuos, la separación in situ de los residuos de yeso y el establecimiento de criterios claros de calidad del yeso reciclado.

Al evaluar la reciclabilidad de los residuos de yeso mediante ciclos de deshidratación / hidratación y comparar las características físicas, químicas y mecánicas después de cada ciclo, Geraldo et al., (2017) afirmaron que a nivel de composición química las muestras evaluadas no presentaron diferencias significativas, en cuanto a las propiedades físicas la densidad aparente del yeso reciclado fue inferior a la establecida por las normas brasileñas y se aumentó el módulo de finura debido al proceso de trituración y molienda. El residuo de yeso se recogió, se secó al sol, se trituró en un molino de martillos y se calcinó durante una hora a 150°C ± 5°C, este material se sometió nuevamente a dos ciclos consecutivos

para evaluar una segunda muestra del material y nuevamente se sometió a otros 2 ciclos para conseguir la tercera muestra, las pastas se prepararon usando una relación agua/yeso de 0,7 aunque la tercera muestra se elaboró con una relación 0,8 para mantener la trabajabilidad en todas las pastas, se crearon cubos de 50x50x50mm y viguetas de 40x40x160mm que se dejaron secar a temperatura ambiente hasta su ensayo. Las propiedades mecánicas de los elementos elaborados con yeso reciclado hidratado fueron mejores que las del yeso comercial original la cual no alcanzó el valor mínimo requerido por el estándar brasileño de 8,4MPa para resistencia a compresión, mientras que las muestras del primer y segundo ciclo obtuvieron valores superiores al mínimo establecido. Los resultados evidenciaron que el residuo de yeso se puede reciclar de forma continua sin cambios significativos en la composición por lo que se mostró un alto potencial de reciclaje.

Luego de estudiar el comportamiento del yeso proveniente de residuos de placa de yeso durante cinco ciclos de reciclaje, Erbs et al. (2018) identificaron que técnicamente es viable el proceso hasta el tercer ciclo, en el cual se presentaron resultados similares al yeso original y se cumplió con los requisitos de las normas técnicas brasileñas, las muestras del cuarto y quinto ciclo no obtuvieron el valor mínimo de resistencia a la compresión axial, además mencionan que el exceso de agua en la mezcla crea mayor cantidad de burbujas de aire, lo cual contribuye a disminuir la resistencia de las muestras. En el proceso de aprovechamiento se utilizó un cilindro manual para separar el núcleo de la placa de su revestimiento y se procedió a pasar el material por un cilindro electromecánico para reducir el tamaño de las partículas, luego se calcinó a 180°C durante 24 horas, se hicieron composiciones con 100% yeso reciclado y mezclas con 25%, 50% y 75% las mezclas se produjeron a lo largo de 5 ciclos de reciclaje. Se evaluó resistencia a la compresión axial y a la tracción en flexión, la relación agua yeso fue del 0,7. En el primer ciclo Las muestras con 100% yeso comercial y 100% yeso reciclado, no alcanzaron a los 28 días el valor mínimo establecido por la norma brasilera de 8,4MPa para resistencia a compresión y ninguna de las muestras alcanzó dicho valor en el cuarto y quinto ciclo. Todas las muestras evaluadas estuvieron de acuerdo con el valor mínimo de dureza superficial de 30N/mm².

En la investigación de Jaramillo Castro & Restrepo Baena (2020) se presentaron las problemáticas ambientales de los residuos de yeso producto de la generación de placas y de la etapa de posconsumo, donde mencionaron su potencial de ser recuperado para ser

reincorporado a placas laminadas, en la industria de morteros y para usos agrícolas. En cuanto a las placas de yeso afirmaron que están compuestas en un 91% de yeso (mezcla de yesos con diferentes proporciones de dihidrato entre 0 y 10%, hemihidratos entre 54,8 y 96,2% y anhidrita entre 0 y 19%), 7% de cartón y el 2% restante son sustancias inertes que acompañan al yeso natural desde su origen y algunos aditivos que se agregan en la manufactura de la placa, además presentan la posibilidad de reciclado de sus residuos como una opción viable a nivel técnico y económico. En cuanto al consumo de agua resaltan que el yeso reciclado requiere grandes cantidades de agua, la cual aumenta la porosidad reduciendo sus propiedades mecánicas como aglutinante, sin embargo, el yeso reciclado es más fácil de moler que los minerales de yeso natural por lo que también representa un ahorro energético.

De acuerdo con Pedreño-Rojas et al., (2019) someter los residuos de yeso a un proceso de calentamiento, implica un alto consumo de energía por lo que se reducen los beneficios ambientales del proceso de reciclaje y confirmaron luego de evaluar la influencia de varios procesos de calentamiento en la calcinación de residuos de yeso, que es posible sustituir el yeso comercial por residuos de yeso sin necesidad de tratamientos térmicos manteniendo un buen rendimiento, además se hizo un análisis de ciclo de vida en el que se concluyó que adicionar residuos de placa de yeso en las mezclas, redujo los impactos ambientales del material aunque también requirió un mayor consumo de agua, además de los beneficios en términos de impactos ambientales, también se obtuvo una mejora en la densidad del 27% y en las propiedades mecánicas del 17%.

En cuanto a la elaboración de placas, Erbs et al. (2021) desarrollaron placas de yeso elaboradas exclusivamente a partir de residuos, reciclaron el núcleo de la placa de yeso y también el papel de revestimiento de manera independiente para volver a crear cada una de las partes, el proceso que llevaron a cabo incluyó la recolección de placas de yeso estándar (12,5 mm de espesor), trituración manual, molienda mediante molino de bolas, calcinación, rehidratación, formación de las placas y finalmente el fallo de éstas, las placas producidas cumplieron con los requisitos físicos y mecánicos mínimos de la normativa técnica brasileña, obtuvieron 3,09 MPa y 2,62 MPa en los ensayos de resistencia a la flexión longitudinal y transversal respectivamente y la resistencia a la compresión axial fue de 14,37 MPa.

Para el aprovechamiento de los residuos, Geraldo et al., (2017) recolectaron residuos de yeso, lo secaron al sol, pasaron por un proceso de triturado en un molino de martillos hasta que el 80% de las partículas pasaron por un tamiz de 297 μm ; mientras que Erbs et al., (2021) realizaron un proceso con residuos de placa de yeso en el que pasaron por tres etapas: primero separaron el núcleo de yeso del papel de revestimiento, cortando el residuo en franjas de 3 cm y pasando el material por una prensa manual de cilindros ajustados a una distancia de 1 cm lo que permitió la separación de las dos partes por la compresión ejercida por los cilindros; en segundo lugar los residuos de yeso se dirigieron a una trituración electromecánica para reducir el tamaño de partículas por medio de la fricción generada entre dos cilindros de aluminio, el material se tamizó a través de un tamiz de 290 μm y el retenido se reprocesó disminuyendo la distancia entre los cilindros; luego realizaron una tercera etapa de molienda pasando por un molino de bolas con esferas de ágata de 2 cm de diámetro y finalizaron el proceso con la calcinación del residuo, la relación agua yeso utilizada para las probetas fue de 0,6, confirmaron que el yeso reciclado tiene un aspecto más pastoso al momento de la preparación de la pasta mientras que con el yeso comercial el aspecto es más fluido, por lo tanto afirman que las pastas con yeso reciclado requieren mayor contenido de agua para su hidratación. Para la formación de las placas se utilizó un marco metálico de 0,30x0,40m y 12,4 mm de espesor, el cual se situó sobre una de las capas del papel, se vació la mezcla, se quitó el material sobrante y sobre el material aún fresco se colocó la segunda capa de papel y se dejó reposar por 4 horas para el proceso de curado, luego se llevó a un horno por 3 horas a 105°C para eliminar el exceso de agua.

Luego de investigar el impacto de la reincorporación de yeso reciclado para la elaboración de placas de yeso, teniendo en cuenta todas las etapas del proceso productivo y como lugar de estudio, cinco plantas productoras de placa de yeso en Europa. Papailiopolou et al., (2017) concluyeron que los efectos de la reincorporación dependen de las características y condiciones de la manera en la que cada planta lleva a cabo los procesos, a pesar de la diferencia de resultados afirman que el uso de yeso reciclado ofrece ahorros significativos de energía generando un interés en una idea de economía circular.

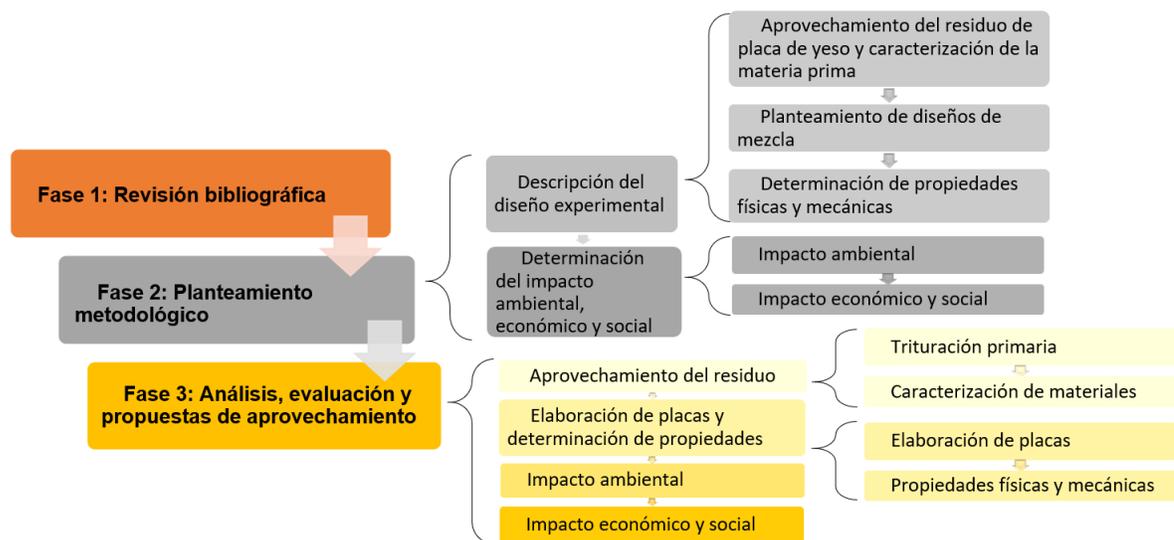
Con respecto a la dimensión económica de los residuos de construcción y demolición, Soto-Paz et al., (2023) encuentran escasos los estudios que incluyen esta dimensión del reciclaje de RCD y reportan que los resultados son variables, dependen de factores físicos,

económicos y sociales del lugar de estudio, reportan plantas de reciclaje inviables para inversionistas, otras con ganancias significativas y mencionan la importancia de apoyar estos procesos con normativa y reducción de impuestos para promover su introducción en los mercados. Resulta clave implementar estrategias de reducción, reutilización y reciclaje para lograr la transición de la economía lineal acompañado de políticas gubernamentales que establezcan requisitos de calidad para los materiales reciclados y regulen la producción y uso de RCD a lo largo de toda la cadena de valor.

2. Metodología

Este capítulo tiene como objetivo describir las fases empleadas para desarrollar placas divisorias livianas elaboradas a partir del aprovechamiento sostenible de residuos de construcción y demolición de yeso. Para ello, el trabajo se dividió en tres fases. La primera consistió en una revisión bibliográfica como sustento teórico del proyecto; la segunda, se basó en el diseño experimental y abordó el aprovechamiento del residuo de placa de yeso, la caracterización de la materia prima, el planteamiento de los diseños de mezcla, la elaboración de las placas, la determinación de las propiedades físicas y mecánicas, el cálculo del impacto ambiental y la descripción del impacto económico y social; y la tercera en la cual se llevó a cabo el análisis, la evaluación y las propuestas de implementación a partir de los resultados obtenidos. En la Figura 2-1 se presenta un resumen de la metodología propuesta.

Figura 2-1: Fases de la estructura metodológica. Fuente: Elaboración propia.



2.1 Descripción del diseño experimental

En esta etapa se definieron los materiales que hicieron parte del estudio para la fabricación de las placas: yeso virgen, yeso reciclado y cartulina. Luego, se delimitaron las características del residuo empleado y el proceso de aprovechamiento a partir de la trituración y molienda y finalmente se determinaron los materiales a caracterizar, los cuales incluyeron la placa de yeso de referencia usada en el proceso de aprovechamiento, el yeso virgen y el yeso reciclado en función de su granulometría.

2.1.1 Aprovechamiento del residuo de placa de yeso y caracterización de la materia prima

2.1.1.1 Materiales de estudio

Como materiales de estudio se utilizó yeso virgen comercial, cartulina comercial y residuos de placa de yeso.

El yeso virgen utilizado corresponde a escayola comercial de la empresa Corona. La cartulina utilizada presentó un grosor de 180 g/m². Por su parte, los residuos de placas de yeso recolectados fueron fruto de las reformas del bloque 41 de la Universidad Nacional de Colombia, Campus El Volador de la ciudad de Medellín. Para dicha obra se suministraron placas de la marca KNAUF, referencia Standard (KNAUF, 2023). Es de mencionar que los residuos fueron el sobrante posterior a la instalación inicial de las placas, por lo cual no se encontraba contaminado con masillas, cintas ni pintura. Para la capa de celulosa se hicieron ensayos con diferentes tipos y gramajes de material como cartón paja, papel acuarela, opalina, entre otros, los cuales no presentaron buena adherencia a la mezcla luego del secado. Finalmente, no fueron contemplados aditivos ni adiciones.

2.1.1.2 Trituración y molienda

El proceso de trituración de las placas de yeso recicladas se llevó a cabo en dos etapas, correspondientes a trituración y molienda. En la Figura 2-2 se presentan los equipos de laboratorio utilizados para la trituración del residuo de placa de yeso.

- Trituración

La trituración se realizó en la Universidad de Antioquia, laboratorio de mineralurgia, en una trituradora de rodillos marca Consolidated Strutevant Mill Co, del tipo KT916, con revoluciones del motor de 835 r.p.m y una frecuencia de 60 Hz. Antes de comenzar el proceso se hizo necesario tener los residuos de placa de yeso partidos en franjas de máximo 5 cm de ancho, para que el material ingresara por la tolva de alimentación. La trituración se llevó a cabo en 2 etapas: se hizo una trituración inicial con una apertura de 1cm entre los rodillos, teniendo en cuenta que el espesor de una placa comercial y por lo tanto también de sus residuos es de ½ pulgada (12,7 mm), este proceso permitió la separación entre el papel y el núcleo de yeso de las placas; a pesar de haber separado gran cantidad del material, un porcentaje del núcleo quedó adherido al papel, por lo que se procedió a una segunda etapa de trituración ya con la apertura mínima de los rodillos, que corresponde a 0,1 cm, en la que únicamente se insertaron los residuos de papel, lo cual permitió recuperar mayor cantidad de material reciclado.

- Molienda

Posterior al proceso de trituración, se llevó a cabo la separación entre la celulosa y el núcleo de la placa (yeso y aditivos) mediante el tamiz de la serie Tyler de 1 pulgada, correspondiente a 25,0 mm. Para la molienda del núcleo de la placa se utilizó un molino de bolas metálico de la Universidad de Antioquia, laboratorio de mineralurgia, con motor marca Siemens sinamics G110 AC, utilizando una frecuencia de trabajo de 60 Hz durante 10 minutos por cada serie de molienda y un porcentaje del 40% de llenado del molino equivalente a 750 g.

Figura 2-2: Equipos utilizados para la trituración y molienda de los residuos de placa de yeso. a) Trituradora de rodillos y b) Molino de bolas. Fuente: Elaboración propia.

a)



b)



2.1.1.3 Caracterización de materiales

- Caracterización física del yeso reciclado y del yeso virgen

Para el yeso reciclado obtenido luego del proceso de molienda y el yeso virgen, el análisis granulométrico se llevó a cabo mediante tamizado con los tamices de la serie Tyler: 30, 50 y 100, correspondientes a las aberturas 0,6, 0,3 y 0,15 mm respectivamente.

- Caracterización de la placa comercial de referencia

La caracterización fue tomada de la ficha técnica de la placa marca KNAUF, referencia Standard.

2.1.2 Planteamiento de diseños de mezcla

En esta etapa se establecieron las condiciones de las placas que hicieron parte del estudio, teniendo tres condiciones principales en función del contenido de yeso reciclado y tres condiciones de tamaño de partícula para este último. Además, se definió para las placas elaboradas: geometría, dimensiones, contenido de agua, condiciones de vaciado, mezclado y fraguado, finalizando con la determinación y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas.

2.1.2.1 Definición de las condiciones de los diseños de mezcla y elaboración de placas

Condiciones

En función de los resultados del análisis granulométrico, se plantearon tres condiciones generales, correspondientes a una placa de referencia elaborada con yeso virgen 0-100, la condición 50-50, en la que se reemplazó el 50% del material virgen, y la condición 100-0 en la que se reemplazó el 100% del material virgen por material reciclado. Estas condiciones surgieron a partir de la investigación de Erbs et al. (2018), en la que se analizaron diferentes porcentajes de sustitución de yeso reciclado y su influencia en las propiedades mecánicas.

Con el fin de implementar la mayor cantidad de material reciclado molido posible en la fabricación de nuevas placas, y tomando como base lo reportado por Geraldo et al., (2017) donde trabajaron con tamaños de partícula de 290 μm sin tener en cuenta el material que no cumplía con dicho tamaño, se definieron las condiciones específicas en las que varía la granulometría utilizada, que evaluaron la influencia del tamaño de partícula en las propiedades físicas y mecánicas de las placas. La descripción de cada una de las condiciones se describe en la Tabla 2-1.

Para cada condición específica se prepararon cuatro probetas.

Tabla 2-1: Descripción de las condiciones planteadas

Condición	Descripción	Condiciones específicas	Nomenclatura
0-100	Corresponde a la placa elaborada con el 100% de yeso virgen, sin presencia alguna de yeso reciclado.	0% yeso reciclado + 100% yeso virgen	(0YR).
50-50	Dentro de dicha condición se elaboraron placas con 50% de yeso virgen y 50% de yeso reciclado, considerando para este último, 3 variaciones: pasante malla 50, retenido malla 50 y el yeso reciclado en estado de entrega luego del proceso de molienda (mezcla de pasante más retenido).	50% yeso reciclado pasante malla 50 + 50% yeso virgen	(50YR-P).
		50% yeso reciclado retenido malla 50 + 50% yeso virgen	(50YR-R).
		50% yeso reciclado en estado de entrega + 50% yeso virgen	(50YR-PR).

100-0	En esta condición no hubo presencia de yeso virgen, sino que el 100% de la placa fue elaborada a partir de yeso reciclado, considerando las mismas variaciones que en la condición anterior: pasante malla 50, retenido malla 50 y yeso reciclado en estado de entrega posterior al proceso de molienda	100% yeso reciclado pasante malla 50 + 0% yeso virgen	(100YR-P).
		100% yeso reciclado retenido malla 50 + 0% yeso virgen	(100YR-R).
		100% yeso reciclado en estado de entrega + 0% yeso virgen	(100YR-PR).

- Análisis morfológico de las condiciones en seco (previo a la adición de agua)

Para el análisis morfológico del yeso virgen y reciclado se utilizó un microscopio estereoscópico Zeiss stemi 508 con zoom 8:1 con lente Apo 1.5x FWD 53mm y software de microscopia ZEN.

- Geometría y dimensión de las placas desarrolladas

Para la fabricación de las placas se elaboraron cuatro moldes en acrílico rectangulares cortados a láser de 16 cm de largo por 4 cm de ancho y 1,27 cm ($\frac{1}{2}$ ") de espesor.

- Definición del contenido de agua y condiciones de vaciado

Para la definición de la cantidad de agua se partió de una relación de 40 g de agua por cada 100 g de material para el yeso virgen. No obstante, utilizando esta cantidad de agua para las demás mezclas se observaron consistencias muy variables. Por lo tanto, se continuó adicionando agua a las mezclas hasta que todas tuvieran consistencias similares; en este sentido, la cantidad de agua para cada una de las condiciones se estableció en función del tiempo de llenado del molde, ya que el molde, el embudo y el tiempo se mantuvieron constantes. Así, por cada 100 g de materia prima se utilizaron 40 g de agua para la condición 0-100, 124 g para 50-50 y 62 g para 100-0.

Para el vaciado se utilizó un embudo de diámetro 2,54 cm y un tiempo de 10 segundos. Inicialmente se colocó el papel en la parte inferior y se procedió con el vaciado. Luego se pasó una regla metálica sobre la superficie para eliminar material sobrante y se instaló la segunda capa de papel. Finalmente se puso un vidrio sobre la superficie para la compactación del material.

- Definición del proceso de mezclado

Con el fin de homogeneizar el proceso de mezclado se utilizó una batidora casera marca BLACK & DECKER de 250 watts modelo MX1200 (The Black & Decker Corporation, 2017). El proceso se llevó a cabo para todas las mezclas durante 30 segundos a una frecuencia de 60 Hz.

- Condiciones de fraguado

La ficha técnica del yeso virgen sugiere que el tiempo que fraguado debe ser al menos de 30 minutos. Sin embargo, para garantizar que el fraguado ocurriera completamente, se dejaron secar al ambiente las tres condiciones de placa simultáneamente y se midió el peso de manera diaria hasta que fuera constante, condición que se logró a partir de las 2 semanas de vaciado.

2.1.3 Determinación de propiedades físicas y mecánicas

2.1.3.1 Tamaño, espesor y densidad

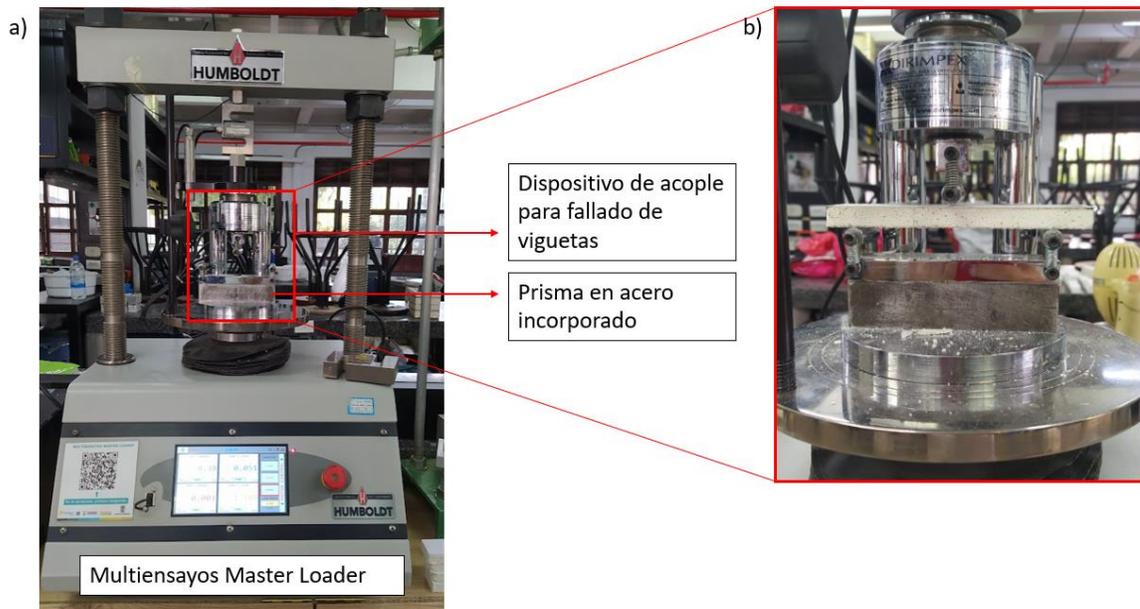
Se midieron las dimensiones de cada placa con un pie de rey y se tomaron los pesos en una balanza analítica METTLER TOLEDO.

2.1.3.2 Resistencia a la flexión

Para la evaluación de las placas a flexión se tomó como referencia la norma ASTM C473 “Métodos de prueba estándar para pruebas físicas de productos de paneles de yeso” (ASTM C473-19, 2019) la cual indica que la flexión se evalúa apoyando la placa cerca de los extremos y aplicando una carga transversal en el medio entre los soportes, aunque la normativa indica que la velocidad debe ser 4,45 N/s, que la placa a fallar debe ser de 305

x 406 mm y extraída de una placa completa. Por la disponibilidad de equipos en el laboratorio, se utilizó un equipo multiensayos con un dispositivo de acople para fallado de viguetas de 16 x 4 x 4 cm, presente en la Figura 2-3, con una velocidad de 1 N/s para poder extraer la mayor cantidad de puntos para el análisis. Las placas que se fallaron tenían el espesor de una placa comercial 1/2" por lo que se incorporó al dispositivo, un prisma en acero para suplir el espacio sobrante con respecto a la vigueta estándar, de esta manera las placas falladas tenían una dimensión de 16 x 4 x 1,27 cm. Todas las placas se fallaron bajo los mismos parámetros incluyendo la placa comercial, con el fin de comparar los valores entre sí y no con respecto a los valores establecidos por la norma.

Figura 2-3: a). Equipo usado para fallar las placas a flexión. b). Detalle de montaje. Elaboración propia.



Para el cálculo de resistencia a la flexión se utilizó la ecuación (1).

$$R = \frac{3FL}{2ab^2} \quad (1)$$

En donde:

R = Resistencia a flexión (MPa)

F = Fuerza máxima en el instante de la rotura (N)

L = Separación entre los apoyos (mm)

a = Ancho de la placa (mm)

b = Espesor de la placa (mm)

2.2 Determinación del impacto ambiental, económico y social

2.2.1 Impacto ambiental

En esta etapa se llevó a cabo el cálculo del impacto ambiental asociado a las condiciones que alcanzaron los valores más altos de resistencia. De manera adicional, se incluyó como referencia la información disponible para la placa Standard de KNAUF (DAPcons & KNAUF, 2020) en su declaración ambiental de producto. Para esto, se definió la unidad funcional, se delimitaron los módulos de cálculo en función de la metodología disponible y se seleccionó el indicador ambiental a evaluar. Por último, se establecieron las fuentes de los factores de emisión utilizados para el cálculo.

2.2.1.1 Definición de unidad funcional, delimitación de los módulos de cálculo y selección de indicador ambiental a evaluar

Se utilizó la metodología de la norma UNE-EN 15804:2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto (Asociación Española de Normalización, 2012) para la comparación ambiental entre las condiciones planteadas. La unidad funcional se estableció en 1 m² de placa de yeso y se evaluaron los módulos A1 y A3, el módulo A2 correspondiente a transportes entre etapas no fue tenido en cuenta debido a la alta incertidumbre con los supuestos.

Como referencia de comparación adicional se empleó la declaración ambiental de producto de la placa Standard de KNAUF mediante los módulos A1, A2 y A3 de la etapa de fabricación de materiales. La categoría de impacto ambiental será únicamente el calentamiento global (kg CO₂e).

2.2.1.2 Determinación de factores de emisión

Para los consumos energéticos se utilizó el factor de emisión de la energía eléctrica colombiana más reciente (UPME, 2022). Para el yeso virgen y el agua se utilizaron los factores de emisión de Pardo Álvarez et al., (2021). Finalmente, para el papel se utilizó el factor de emisión presentado por Ta Thi & Thi Anh, (2020). Para el yeso reciclado se calculó el factor de emisión a partir de la cantidad de material procesado y los consumos eléctricos presentados en la Tabla 2 de las máquinas de trituración y molienda.

Tabla 2-2: Consumo eléctrico de los equipos utilizados para la trituración y molienda de los residuos de placa de yeso

Actividad	Tipo de energía	Consumo
Trituración	Eléctrica	0,05 kWh/Kg
Molienda	Eléctrica	0,47 kWh/Kg
Total		0,52 kWh/kg

2.2.2 Impacto económico y social

En esta etapa se llevó a cabo el análisis del impacto económico y social asociado al supuesto de la implementación de una planta de aprovechamiento de este tipo de residuos para la fabricación de placas de yeso. Se tuvo en cuenta el proceso de fabricación (módulo A3) de la placa Standard de KNAUF (DAPcons & KNAUF, 2020) en su declaración ambiental de producto, se incluyeron los aspectos asociados a la recolección en obra, el transporte hasta la planta y los procesos de trituración de los residuos y se plantearon las principales condiciones asociadas a establecer y operar una empresa de mediano tamaño.

En el impacto económico se analizó la creación del empleo directo e indirecto, la estimulación de la economía local, la innovación y el desarrollo tecnológico asociado, la reducción de los costos de disposición de los residuos y el desarrollo de mercados y la exportación. En el impacto social se analizó la influencia en la generación de empleo local, la inclusión social y equidad, la capacitación y el desarrollo de habilidades, la mejora en la calidad de vida y la sensibilización y la conciencia ambiental.

3. Análisis, evaluación y propuestas de aprovechamiento

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de los materiales, la elaboración de las placas, el cálculo del impacto ambiental y la determinación del impacto económico y social. Para ello, el trabajo se dividió en cuatro etapas: la primera, referente al aprovechamiento del residuo de placa de yeso y la caracterización de la materia prima; la segunda parte, referente a la elaboración de placas y la determinación de las propiedades físicas y mecánicas, la tercera parte, en donde se calculó el impacto ambiental de las placas y finalmente, la cuarta parte, en la cual se describió el impacto social y económico bajo el supuesto de un escalamiento industrial.

3.1 Aprovechamiento del residuo de placa de yeso y caracterización de la materia prima

3.1.1 Trituración

En la Tabla 3-3 y la Figura 3-1 se presenta la cantidad resultante de celulosa y núcleo de la placa. Se pudo observar que el proceso presentó una tasa de recuperación de yeso del 80,5%. Tomando en cuenta que la placa comercial está compuesta en un 93% en peso de yeso y otros materiales y el porcentaje restante en celulosa, se observa que en el proceso se pierde 12,5% de material con potencial de aprovechamiento.

Tabla 3-3: Relación de material resultante de la trituración.

Tipo	Cantidad (kg)	Porcentaje
Celulosa + yeso y otros componentes adheridos	6,92	19,5%
Yeso reciclado (incluye otros componentes no separables físicamente)	28,52	80,5%

Fuente: Elaboración propia.

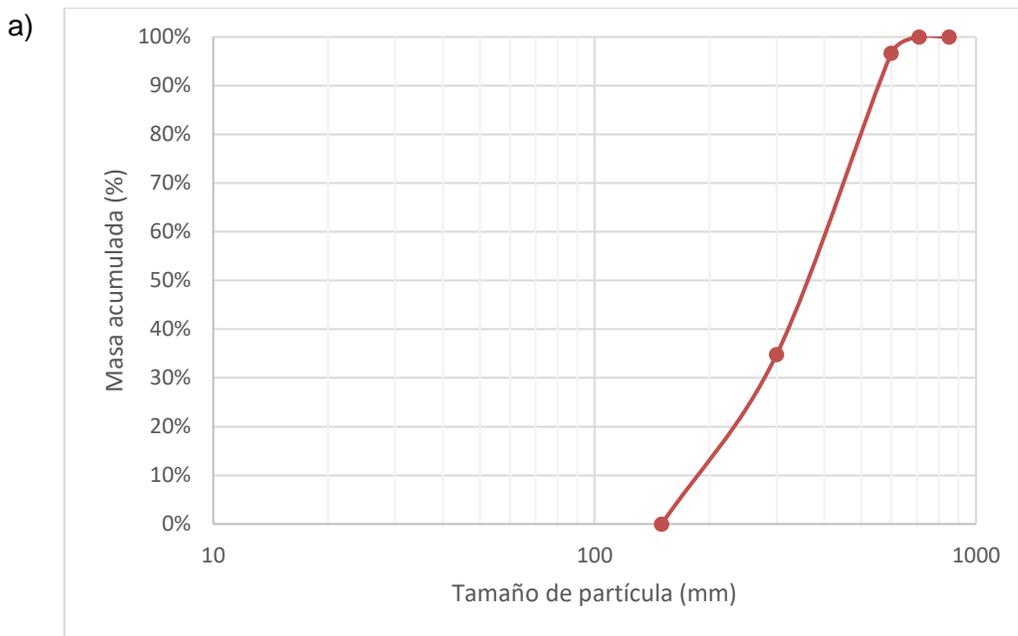
Figura 3-1: Separación de materiales posterior a la trituración. Fuente: Fotografía propia.

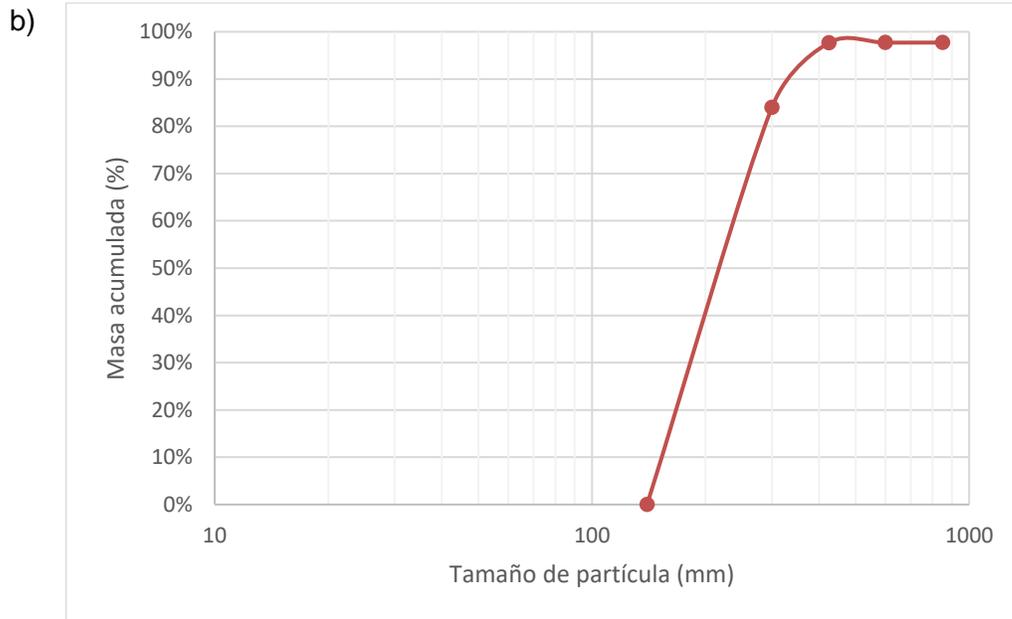
3.1.2 Caracterización de materiales

3.1.2.1 Caracterización física del yeso molido y del yeso virgen

En la Figura 3-2a se muestra la distribución granulométrica del residuo de yeso molido y en la Figura 3-2b del yeso virgen. Se puede observar que ambos son materiales muy finos, con distribuciones de tamaños de partículas uniformes. Para el caso del yeso molido el 35% de las partículas pasan el tamiz 50, y para el caso del yeso virgen el 84% de las partículas pasan el mismo tamiz, lo cual permite inferir que el yeso virgen es mucho más uniforme.

Figura 3-2: Distribución granulométrica para a) residuo de yeso molido y b) yeso virgen. Fuente: Elaboración propia.





3.1.2.3 Caracterización de la placa comercial de referencia

En la Tabla 3-4 se muestra la caracterización de la placa de yeso KNAUF Standard. La placa consta de un núcleo de yeso incombustible, recubierto con cartón reforzado (KNAUF, 2023). De acuerdo con los datos presentados, la resistencia a la flexión longitudinal de la placa debe ser mayor a 160 N con una densidad comprendida entre 500 y 550 kg/m³.

Tabla 3-4: Datos técnicos placa KNAUF Standard.

Datos técnicos	
Tamaño	Dureza del núcleo
122 cm x 244 cm (4ft x 8ft)	> 49 N
Espesor	Carga de rotura por flexión longitudinal
1,27 cm (1/2")	> 160 N (36 lbf)
Peso	Densidad
20 kg ± 1 kg	500 – 550 kg/m ³

Fuente: (KNAUF, 2023).

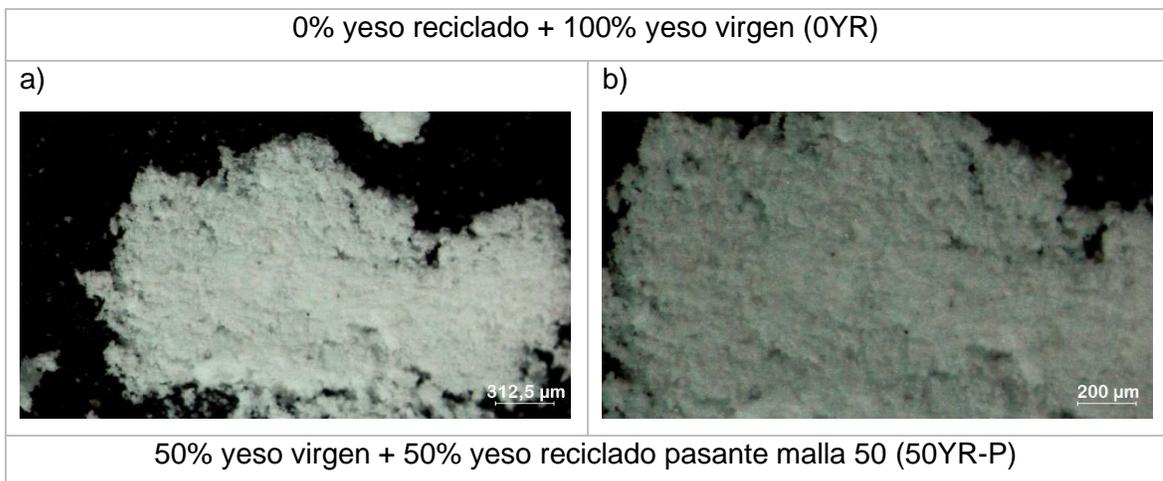
3.2 Elaboración de placas y determinación de propiedades físicas y mecánicas

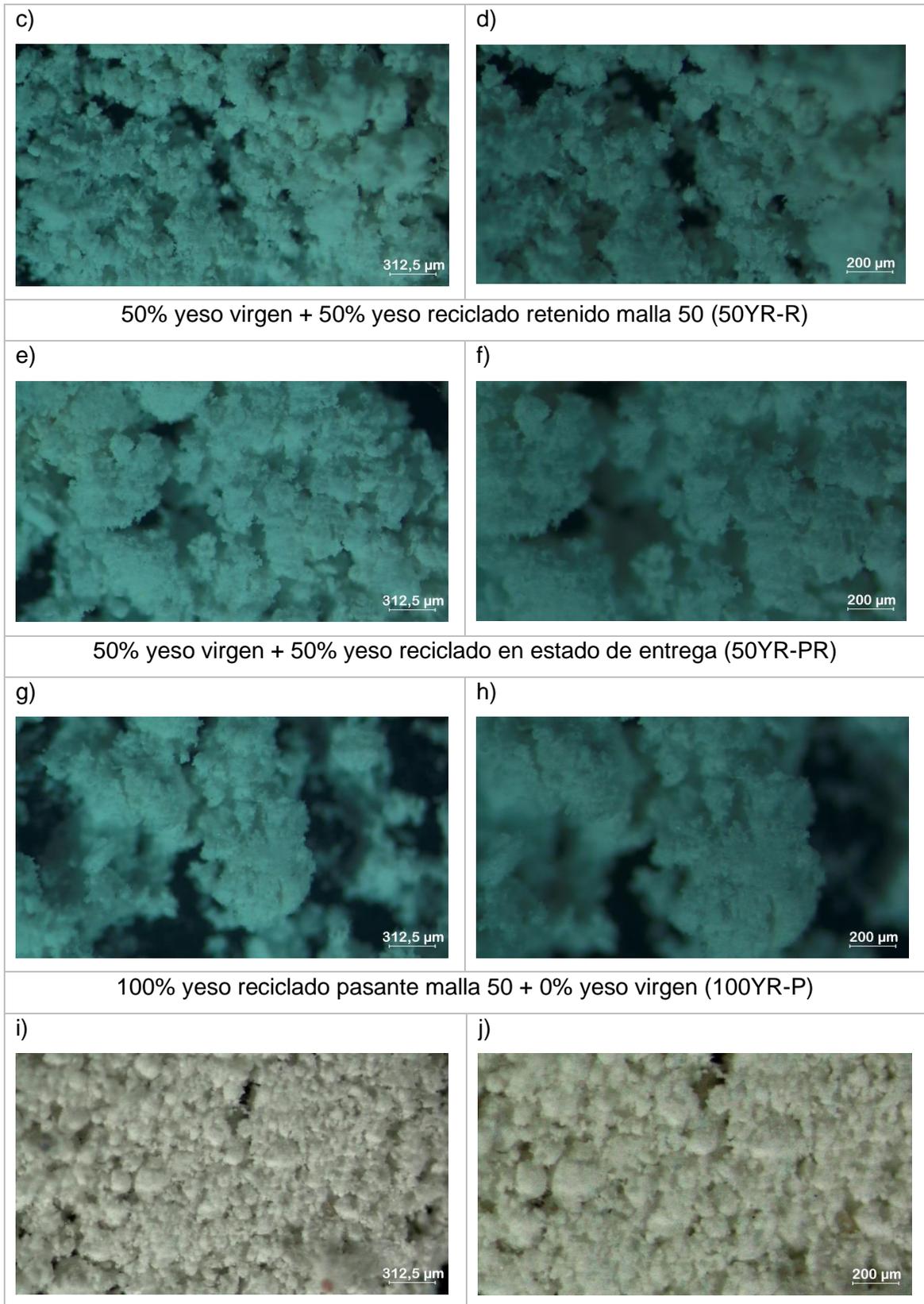
3.2.1 Caracterización morfológica de las condiciones planteadas

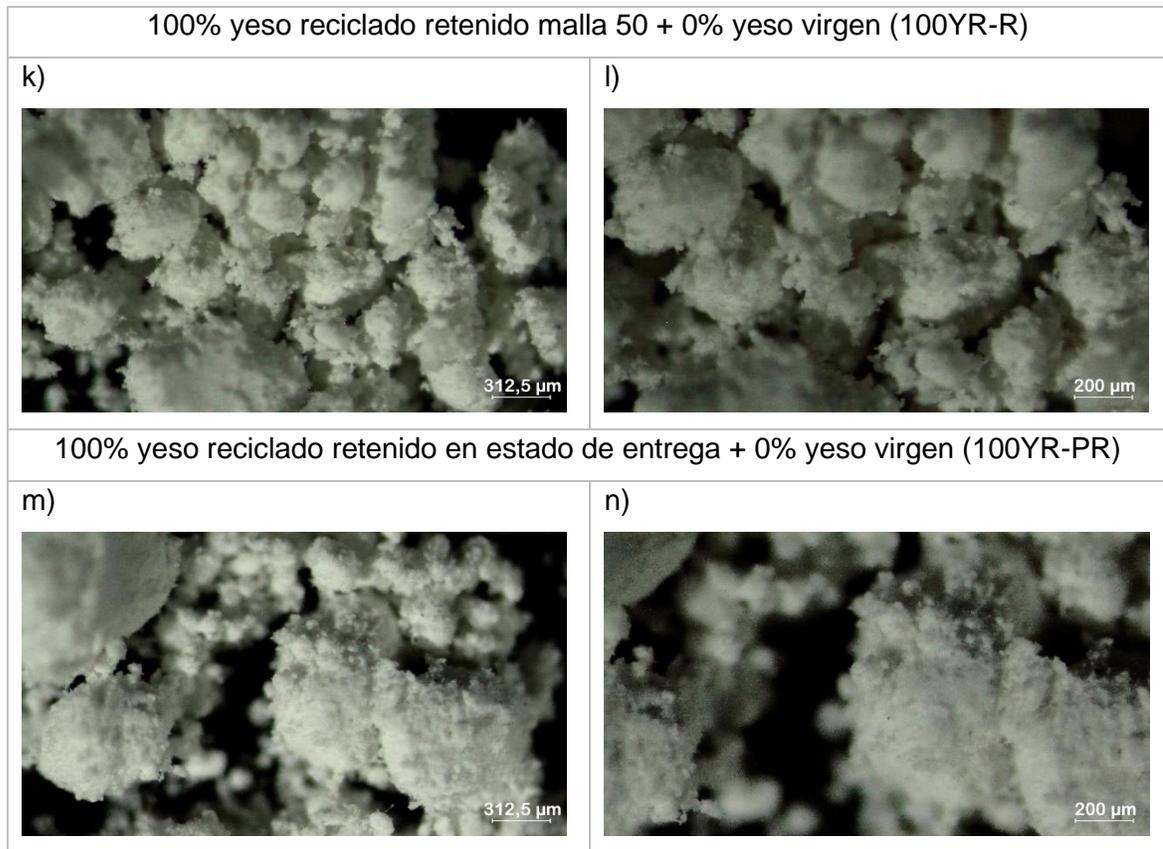
En la Figura 3-3a) y b) se presenta el análisis morfológico del yeso virgen (0YR); c) y d) 50% de yeso virgen + 50% de yeso reciclado pasante malla 50, e) y f) 50% de yeso virgen + 50% yeso reciclado retenido malla 50, g) y h) 50% de yeso virgen + 50% yeso reciclado en estado de entrega, i) y j) yeso reciclado pasante malla 50, k) y l) yeso reciclado retenido malla 50, y m) y n) yeso reciclado en estado de entrega. Se puede observar que el yeso virgen, como se observó en la distribución granulométrica, es un material muy fino donde no se presenta una aglomeración evidente de partículas. Las condiciones 50-50 muestran baja aglomeración de partículas, caso contrario a las condiciones 100-0 en las cuales presentan mayor aglomeración de estas.

Figura 3-3: Análisis morfológico para: a) y b) 0YR, c) y d) 50YR-P, e) y f) 50YR-R, g) y h) 50YR-PR, i) y j) 100YR-P, k) y l) 100YR-R, m) y n) 100YR-PR.

Fuente: Elaboración propia.



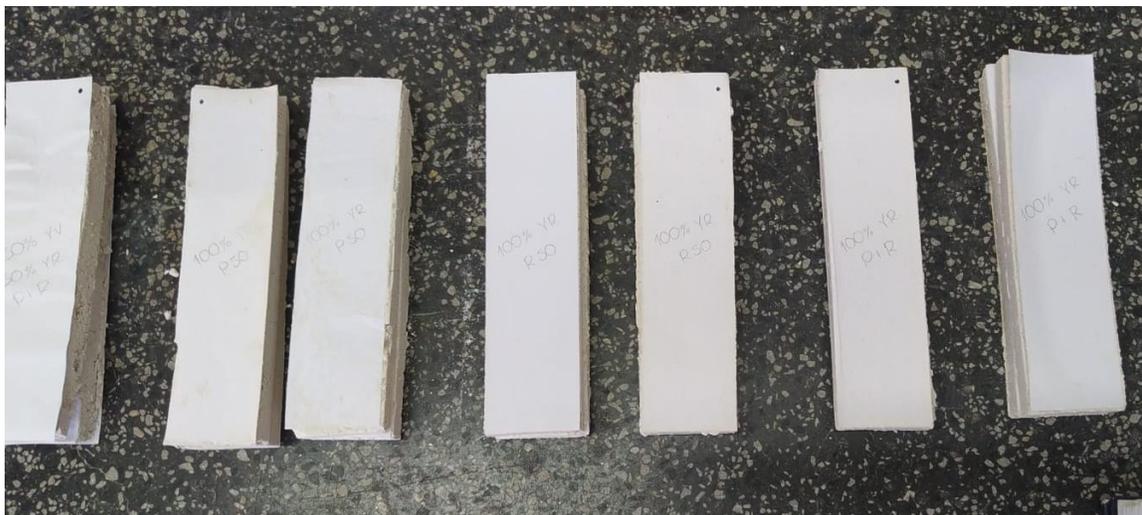




3.2.1 Elaboración de placas

En la Figura 3-4 se presentan algunas de las placas de yeso fabricadas mediante un proceso artesanal y de acuerdo con las condiciones planteadas. En general los núcleos de yeso presentaron una buena adherencia con la cartulina y una superficie homogénea. Es importante resaltar que el tiempo de apisonamiento con el vidrio no debe superar los 3 días, ya que luego de este tiempo por efecto de la humedad comienza la formación de hongos en la superficie del papel, afectando la apariencia.

Figura 3-4: Placas de yeso fabricadas. Fuente: Fotografía propia.



3.2.2 Determinación de propiedades físicas y mecánicas

3.2.2.1 Tamaño, espesor y densidad

En la Tabla 3-5 se presentan las propiedades físicas de las placas. Se incluye la condición P-C correspondiente a la muestra comercial KNAUF Standard. En general se puede observar que las placas tuvieron un comportamiento homogéneo en sus dimensiones, con áreas mínimas y máximas de $6375,6 \pm 0,3$ y $6495,4 \pm 0,4$ mm² respectivamente y espesores mínimos y máximos de $12,6 \pm 0,2$ y $12,8 \pm 0,5$ mm, respectivamente. En relación a la densidad, la muestra P-C presentó la menor densidad con $0,48 \pm 0,01$ g/cm³, consecuente con lo reportado por Erbs et al., (2018) de la inclusión de aditivos y agentes espumantes para disminuir el peso de la placa. Caso contrario ocurre con la placa 0YR que presentó la mayor densidad ($1,20 \pm 0,01$ g/cm³), relacionado con la finura del material y el empaquetamiento de las partículas. En este orden de ideas, las placas elaboradas con 100% material reciclado presentaron la menor densidad. En cuanto a las condiciones específicas 50-50 y 100-0 que son las que contienen yeso reciclado, es una constante que las placas elaboradas con pasante de malla 50 son las menos densas, seguidas por las elaboradas con el yeso reciclado en estado de entrega posterior al proceso de molienda y las de mayor densidad son las elaboradas con el retenido de malla 50.

Tabla 3-5: Propiedades físicas de las condiciones evaluadas.

Condición	Área (mm ²)	Espesor (mm)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
P-C	6455,0±0,1	12,7±0,3	39,2±0,5	0,48±0,01
0YR	6452,4±0,1	12,8±0,2	98,8±0,5	1,20±0,01
50YR-P	6384,3±0,4	12,7±0,2	73,3±0,5	0,90±0,01
50YR-R	6472,2±0,3	12,7±0,3	81,2±0,5	0,98±0,00
50YR-PR	6424,0±0,2	12,6±0,2	84,1±0,5	1,04±0,01
100YR-P	6375,6±0,3	12,8±0,5	80,2±0,5	0,98±0,03
100YR-R	6495,4±0,4	12,7±0,4	69,2±0,5	0,84±0,01
100YR-PR	6427,7±0,2	12,7±0,3	78,4±0,5	0,96±0,02

Fuente: Elaboración propia.

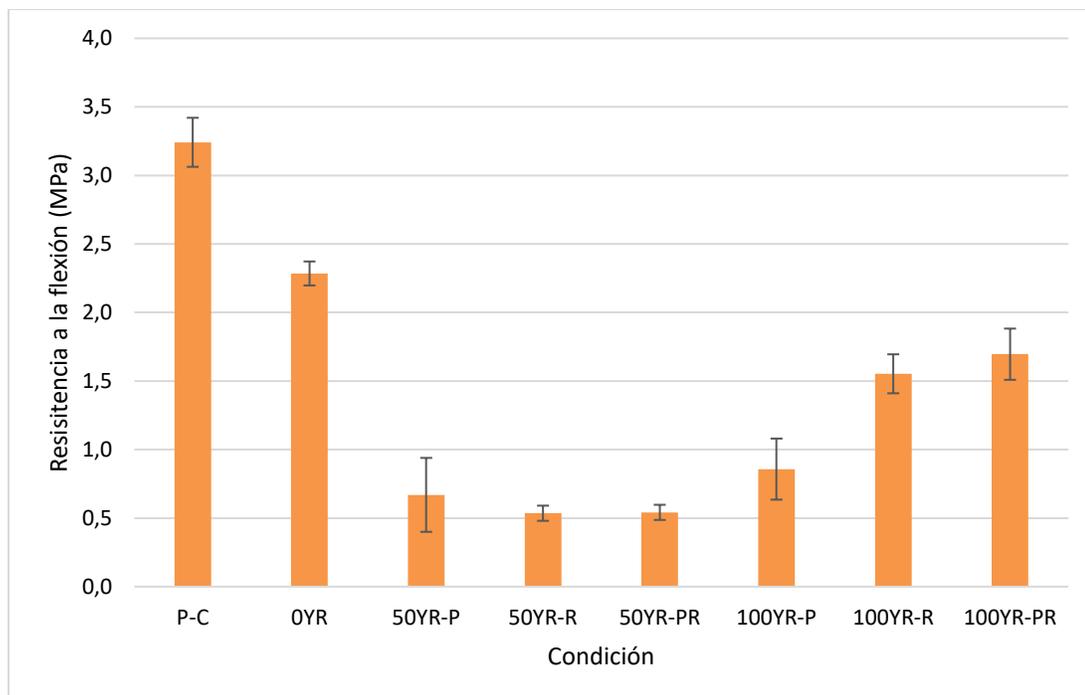
3.2.2.2 Resistencia a la flexión

En la Figura 3-5 se presenta la resistencia a la flexión en MPa para las condiciones evaluadas. De manera general, en la figura se observa que las condiciones con 50% de material reciclado presentaron resistencia a la flexión inferior a las condiciones con solo material reciclado. Esto se explica desde el requerimiento de agua en las mezclas. Como se presentó en la Figura 3-3, las condiciones con 50% de material reciclado evidencian una mayor área superficial expuesta de las partículas en comparación con las condiciones con solo yeso reciclado, incrementando el requerimiento de agua y por lo tanto generando un detrimento en la propiedad evaluada, además como se informa en la literatura, la adición de agua aumenta el número y tamaño de los poros de la pasta, y cuando esta se evapora, crea porosidad en el yeso, que aumenta su deformabilidad y disminuye su resistencia (Erbs et al., 2018). Por su parte, la condición con yeso virgen no se compara directamente en función del requerimiento de agua, ya que no ha pasado por procesos de calcinación, hidratación, conformado y posterior molienda para reciclaje. De manera específica, se puede observar que la mejor condición de las placas con material reciclado corresponde a 100YR-PR, con 1,7±0,2 MPa, condición que además conduce a la eliminación del proceso de tamizado por corresponder a yeso reciclado en estado de entrega posterior al proceso de molienda, que también se ve reflejado en un ahorro energético. Al comparar esta condición con 0YR (2,3±0,1 MPa) se alcanzó el 74,2% de la resistencia, lo cual corresponde a un resultado importante, teniendo en cuenta que 100YR-

PR no incluye material virgen. Por otra parte, al comparar la condición con P-C ($3,2 \pm 0,2$ MPa) se alcanzó el 52,3% de la resistencia. En este caso, el resultado también es muy importante, ya que la placa comercial P-C incluye además del yeso fibras de vidrio, vermiculita, arcilla, almidón, potasa cáustica y agentes espumantes, que mejoran considerablemente la propiedad mencionada (Erbs et al., 2018). Sin embargo, este valor se encuentra muy alejado del resultado de P-C, lo cual evidencia la necesidad de llevar a cabo este tipo de ensayos en las muestras comerciales, con el fin de unificar criterios de comparación y evaluación.

Al evaluar la influencia del tamaño de partícula para las condiciones en las que ésta tuvo incidencia, se encuentra que en las condiciones 50-50 y 100-0 se dio un comportamiento muy diferente, en la condición 50-50, la placa que alcanzó la resistencia más alta fue la placa elaborada con pasante de malla 50 y la que alcanzó la resistencia más baja fue la placa elaborada con yeso reciclado en estado de entrega, mientras que en la condición 100-0, esta última fue la que alcanzó la resistencia más alta y la que se elaboró con pasante de malla 50, obtuvo la más baja, en ambos casos, la placa elaborada con retenido de malla 50, se conservó en el centro de los valores superiores e inferiores de resistencia.

Figura 3-5: Resistencia a la flexión (MPa) para las condiciones evaluadas. Fuente: Elaboración propia



3.3 Evaluación del impacto ambiental

En la Tabla 3-6 se muestran las fases asociadas a los módulos de la norma UNE-EN 15804:2012 (Asociación Española de Normalización, 2012) para la fabricación del prototipo de placa liviana. Para el módulo A1 correspondiente al proceso de aprovechamiento de RCD, las actividades que presentan un impacto ambiental susceptible de cálculo corresponden al consumo eléctrico de la trituración y molienda, con consumos de 0,05 y 0,47 kWh/kg respectivamente. Para el módulo A3 correspondiente a la elaboración de las placas, la actividad susceptible de cálculo corresponde al consumo eléctrico de la batidora casera durante el proceso de mezclado, con un consumo de 0,0814 kWh/kg para 0YR y 0,0813 kWh/kg para 100YR-PR. En este módulo se incluyen además los factores de emisión del yeso virgen, el agua y el papel. El módulo A2 correspondiente a transportes entre etapas no fue tenido en cuenta.

Tabla 3-6: Fases para la fabricación del prototipo de placa liviana

Módulo	Proceso	Actividad	Emisiones asociadas
A1	Proceso de aprovechamiento de RCD	Corte manual de placas para posterior trituración	-
		Trituración	Indirectas – consumo eléctrico
		Separación manual de celulosa y núcleo de yeso	-
		Molienda	Indirectas – consumo eléctrico
		Tamizado	-
A2	-	-	-
A3	Elaboración de las placas	Instalación de papel	Factor de emisión del material
		Mezcla de agua + yeso	Factor de emisión de los materiales
		Mezcla de materiales	Indirectas – consumo eléctrico
		Secado	-

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3-7 se presentan las emisiones para las mejores condiciones evaluadas y la placa de referencia KNAUF Standard. Se puede observar que en comparación con P-C (DAPcons & KNAUF, 2020) y 0YR, la condición 100YR-PR presentó una significativa reducción en las emisiones por metro cuadrado, con 42,2 y 73,0% respectivamente. Si bien los resultados de resistencia a la flexión mostraron que 100YR-PR alcanzó el 52,1%

de P-C, los resultados de emisiones demuestran el potencial en términos de sostenibilidad que pueden tener este tipo de procesos.

Tabla 3-7: Emisiones por metro cuadrado para las mejores condiciones encontradas y la placa comercial

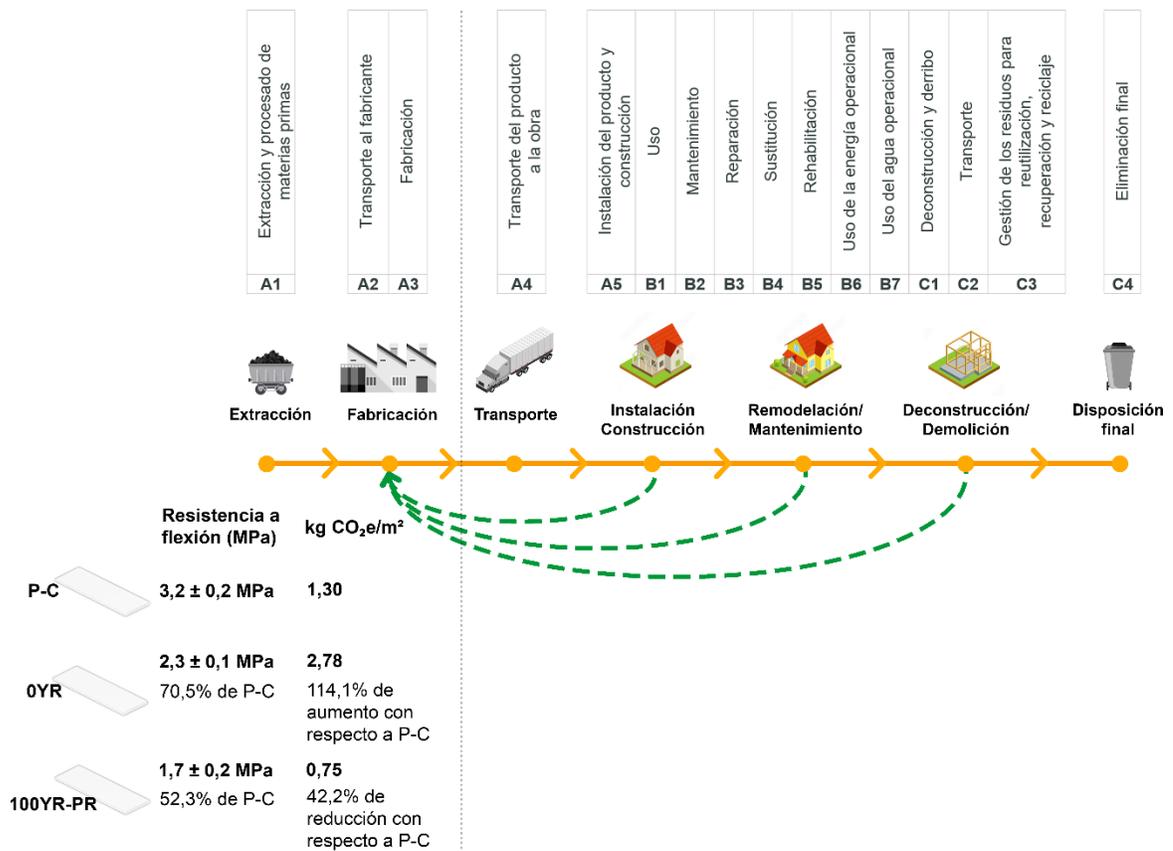
Emisión para 1 m² de 0YR						
Material-Proceso	Factor de emisión			Cantidad o consumo por m²		kg CO₂e/m²
	Valor	Unidad	Fuente	Valor	Unidad	
Yeso virgen	0,1970	kg CO ₂ e/kg	Pardo Álvarez et al., (2021)	14,0195	kg	2,7618
Agua	0,0013		Pardo Álvarez et al., (2021)	8,7148		0,0113
Papel	0,0012		Ta Thi & Thi Anh, (2020).	0,1800		0,0002
Mezclado	0,1260	kg CO ₂ e/kWh	UPME, (2022).	0,0814	kWh	0,0103
TOTAL						2,7837
Emisión para 1 m² de 100YR-PR						
Material-Proceso	Factor de emisión			Cantidad o consumo por m²		kg CO₂e/m²
	Valor	Unidad	Fuente	Valor	Unidad	
Yeso reciclado (trititación y molienda)	0,0655	kg CO ₂ e/kg	Propio. A partir de 0,52 kWh/kg y UPME, (2022).	11,1771	kg	0,7323
Agua	0,0013		Pardo Álvarez et al., (2021)	6,9479		0,0090
Papel	0,0012		Ta Thi & Thi Anh, (2020).	0,1800		0,0002
Mezclado	0,1260	kg CO ₂ e/kWh	UPME, (2022).	0,0813	kWh	0,0102
TOTAL						0,7518
Emisión para 1 m² de P-C (DAPcons & KNAUF, 2020)						kg CO₂e/m²
TOTAL						1,30

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-6 se relaciona un resumen gráfico en el que se presenta el cambio de modelo lineal a circular (líneas verdes), en función del criterio técnico de resistencia a la

flexión (MPa) y del indicador de sostenibilidad (kg CO₂e/m²). Si bien el resumen gráfico demuestra la necesidad de transportar los residuos generados en las etapas de instalación / construcción, remodelación / mantenimiento y deconstrucción / demolición, el transporte no se incluyó debido a la alta incertidumbre asociada al posible lugar de una planta de aprovechamiento.

Figura 3-6: Resumen gráfico en función de resistencia y del indicador de sostenibilidad
Fuente: Elaboración propia



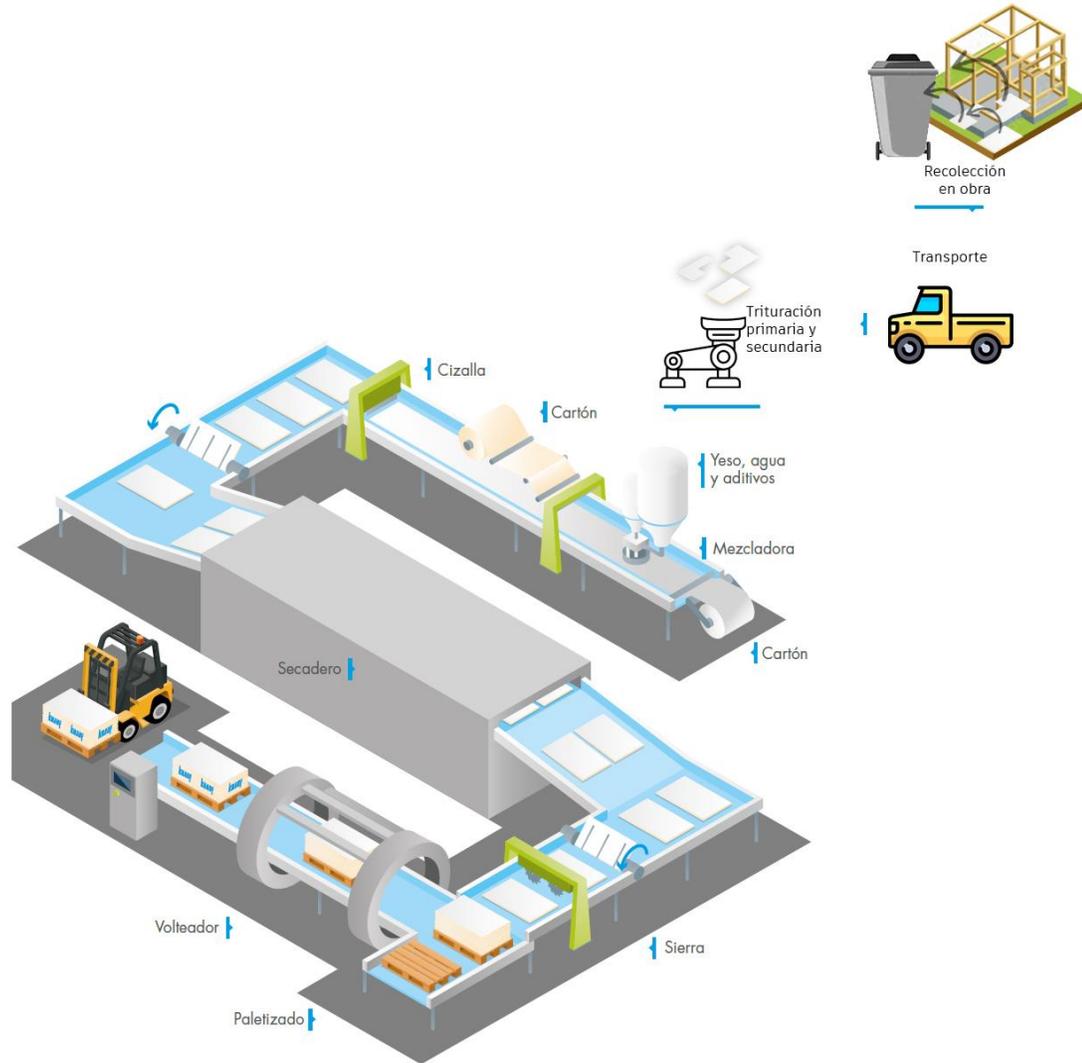
3.4 Análisis del impacto económico y social

A nivel local, se encuentran algunas empresas del sector constructor con un enfoque de reciclaje e incorporación de Residuos de Construcción y Demolición, como es el caso de Ternium (empresa con presencia en varios países de América, incluyendo Colombia), quienes le apuestan a una economía circular, partiendo de la eficiencia de los materiales y del reciclaje del acero, el cual es un material con alto potencial de reciclaje sin pérdida de calidad o propiedades, dicha empresa recicla la chatarra de acero generada en las

instalaciones de sus plantas y también compra chatarra de acero a empresas de procesamiento o recolección de las mismas, en el año 2022, Ternium recicló 2,8 millones de toneladas de acero para producir acero nuevo reduciendo el impacto ambiental. Una de las plantas con menor intensidad de emisiones de Ternium, es la planta de Manizales, la cual basa 100% en chatarra la producción de acero largo (TERNIUM, 2022; Ternium. n.d.). GeoNatural es otra de las empresas con un enfoque de economía circular, partiendo del reciclaje de agregados y transformando RCD en nuevos materiales de construcción, buscan trabajar por la sostenibilidad desde un enfoque local, recogen, transportan, y aprovechan RCD con la idea de desvincular el crecimiento económico de la degradación medio ambiental (GeoNatural. n.d.). Por su parte, Indural, una empresa con años de historia en el ámbito local, produce prefabricados en concreto con contenidos de material reciclado, cuentan con planta de aprovechamiento de RCD donde se reciben, separan y procesan residuos provenientes del sector construcción, aportando a la construcción sostenible y la producción más limpia (Varon-Jiménez et al. 2011; Indural. n.d.).

En función del hecho de que a nivel local ya existen empresas de aprovechamiento de RCD, se parte del supuesto de la implementación de una industria de aprovechamiento y desarrollo de placas livianas a partir de residuos de construcción y demolición de yeso. A nivel industrial, las placas se obtienen mediante un proceso de fabricación en laminación continua. Para placas a partir de yeso virgen, una vez extraído el yeso de la cantera se introduce en una cinta transportadora que lo lleva hasta un molino donde se convierte en polvo y se calcina para eliminar el exceso de humedad. En función de la investigación, los residuos serán recolectados en diferentes obras, transportados hasta la planta y sometidos a trituración y molienda (ver Figura 3-7). Posteriormente, el yeso es mezclado con otros componentes y agua para producir la lechada, la cual se deposita entre dos cintas continuas de papel en la plancha de moldeado. Aquí se produce una placa continua que se lleva a través de una cinta transportadora. En esta cinta, el yeso va endureciendo y se procede a su cortado según la longitud deseada. A continuación, la placa se introduce en un secador de gas de aire caliente para terminar de endurecer las placas. El secador transporta las placas y las va enfriando paulatinamente. Al salir las placas del secador se apilan, de dos en dos, con las caras vistas juntas para protegerlas. Después se paletizan para su posterior almacenaje y transporte hasta la zona donde serán instaladas (DAPcons & KNAUF, 2020).

Figura 3-7: Proceso de fabricación de las placas a partir de residuos de yeso a nivel industrial. Modificado a partir de (DAPcons & KNAUF, 2020).



Para la creación de una planta de este tipo, se deben tener algunas consideraciones que implican sus respectivos costos (U.S. Small Business Administration, 2023):

- Infraestructura y equipos: Se debe tener en cuenta el costo de la adquisición del terreno, los costos de construcción de la planta y la adquisición de equipos especializados como trituradoras, mezcladoras, cizallas, secadoras, sierras, volteadores, etc.

- **Materias primas:** Generalmente los proyectos constructivos deben pagar por el transporte y disposición de sus residuos. Por lo tanto, se deben establecer acuerdos o negociaciones para que el residuo sea transportado a la planta de aprovechamiento en lugar de la disposición final y que los costos sean atractivos para ambas partes.
- **Mano de obra:** En la empresa los salarios, beneficios y cargas sociales se deben tener en cuenta para operadores de maquinaria, técnicos, personal de control de calidad y personal administrativo. Además, de manera directa o indirecta se incluye el personal de transporte de residuos.
- **Costos operativos:** Los costos operativos incluyen consumo de energía, consumo de agua, mantenimiento y reparación de equipos, gestión de residuos, logística y transporte, y costos administrativos y de marketing.
- **Regulaciones y permisos:** Asociados a los requisitos legales y ambientales para permisos y cumplimiento normativo.

En función de los costos mencionados, algunos puntos clave desde el impacto económico y su relación con los ODS son (De Souza Campos, et al., 2023; Souza-Piao, et al., 2023; Blackbeard, G., 2023):

- **Creación de empleo directo e indirecto:** Corresponde a la generación de empleo directo en diferentes etapas del proceso, como la recolección, clasificación, procesamiento y fabricación de las placas. Además, también se afecta la generación de empleos indirectos en áreas relacionadas como la logística, el transporte y la comercialización de las placas divisorias. Se relaciona con el ODS 8, centrado en promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos.
- **Estimulación económica local:** La creación de la empresa y su emplazamiento a nivel local representa tanto inversión en infraestructura y equipos como comercialización con empresas y servicios cercanos. Se relaciona con el ODS 9, el cual busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.
- **Innovación y desarrollo tecnológico:** El continuo desarrollo e investigación alrededor de las placas generadas a partir de residuos impulsa la innovación en la construcción.

Cada nuevo desarrollo mejora la eficiencia, reduce costos y genera empleo y competitividad en el mercado. Además, se alinea con la demanda actual para una construcción sostenible. En adición, su cálculo de indicador ambiental puede llevar que las placas contribuyan al cumplimiento de certificaciones en construcción sostenible como EDGE, LEED o CASA Colombia y sus beneficios tributarios asociados. Se relaciona con el ODS 9, asociado con la promoción de la innovación y el desarrollo tecnológico para lograr un crecimiento económico sostenible.

- Reducción de costos de disposición de residuos: El reciclaje de residuos de yeso y su uso como materia prima podría reducir significativamente los costos de transporte y disposición final de los residuos y abrir la puerta a negociaciones entre la empresa y los generadores. De esta manera se potencia el consumo responsable y la economía circular. Se relaciona con el ODS 12, el cual tiene como objetivo garantizar patrones de producción y consumo sostenibles.
- Desarrollo de mercados y exportación: El cumplimiento técnico y ambiental de las placas conlleva a desarrollar nuevos mercados a nivel nacional e internacional, debido a la generación de oportunidades comerciales y el fortalecimiento de la economía nacional. Además, al promover la exportación, se generan divisas y se fomenta la producción y el consumo responsables al ofrecer alternativas sostenibles en el mercado de la construcción. Se relaciona con los ODS 12 y 17, promoviendo prácticas sostenibles en las cadenas de suministro y la gestión adecuada de los desechos y el fortalecimiento de la alianza global para el desarrollo sostenible.

De acuerdo con lo expuesto por De Souza Campos, et al., (2023) las prácticas de economía circular, presentan importantes contribuciones a la dimensión social, sin embargo, parte importante de estas contribuciones se producen gracias a la generación y a la calidad de empleos que resultan, dichas prácticas se relacionan con los ODS impactando la inclusión social de las personas que no contaban con oportunidades de progreso dentro de un entorno social. Souza-Piao, et al., (2023) evaluaron dos estudios de casos incluidos en prácticas de economía circular, en ambos casos hubo indicios de mejora económica y social de los trabajadores y abordaron los ODS1, 8, 10 y 12. En este sentido, algunos puntos clave desde el impacto social y su relación con los ODS son (De Souza Campos, et al., 2023; Souza-Piao, et al., 2023; Blackbeard, G., 2023; Adesina. 2020 Schröder & Anantharaman, 2023):.

- Generación de empleo local: Como se mencionó para la dimensión económica, la creación de una planta de este tipo puede contribuir a la generación de empleo en la comunidad local. Al reducir el desempleo, fomenta el desarrollo de habilidades y capacitación, y promueve la cohesión social en la comunidad. Se relaciona con el ODS 8, el cual se centra en promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, así como el empleo pleno y productivo para todos.
- Inclusión social y equidad: La creación de empleo puede proporcionar oportunidades a personas que pueden enfrentar barreras de acceso al mercado laboral, se les brinda una vía para mejorar su situación y participar de manera activa en la economía local, reduciendo las brechas sociales y económicas. Se relaciona con el ODS 10, el cual tiene como objetivo reducir la desigualdad dentro y entre los países.
- Capacitación y desarrollo de habilidades: Mejorando las perspectivas laborales de los trabajadores involucrados y contribuyendo a fortalecer el capital humano y la capacidad productiva de la comunidad en general. Se relaciona con el ODS 4, el cual se centra en garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje para todos.
- Mejora de la calidad de vida. Al proporcionar empleo digno y estable con la empresa, se pueden satisfacer necesidades básicas de los trabajadores como la alimentación, el acceso a la vivienda, la educación y la atención médica, lo cual contribuye al desarrollo humano y al empoderamiento de la comunidad. Se relaciona con el ODS 1, el cual busca poner fin a la pobreza en todas sus formas.
- Sensibilización y conciencia ambiental. Al promover el aprovechamiento de residuos, se destaca la importancia de la gestión sostenible de los recursos y se educa sobre la importancia de reducir, reutilizar y reciclar. Esto puede generar un cambio de actitud hacia prácticas más sostenibles en el sector de la construcción y en la comunidad en general. Se relaciona con el ODS 12, el cual se centra en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

De acuerdo con Blackbeard, G., (2023) los modelos circulares constantemente se centran en la sostenibilidad ambiental dejando de lado consideraciones sociales y han presentado barreras para poder ser implementados, estas barreras han sido financieras, por la dificultad de encontrar sus beneficios; estructurales, ya que poner en marcha procesos

circulares requiere recursos adicionales y un cambio en la estructura de los negocios actuales; operativos, por el personal necesario para su implementación; de actitud, porque la circularidad va en contra del proceso que se desarrolla generalmente y no siempre es bien entendida; finalmente, la falta de incentivos para el cambio, también obstaculizan el proceso. Además, afirma que la falta de inclusión social se encuentra en gran parte de la bibliografía, presentando problemáticas como la falta de apoyo de los clientes, un sistema colaborativo lento por requerir afinidad de las empresas, también mencionan posibles pérdidas de puestos de trabajo por los requisitos de formación y educación de los empleados.

En la misma línea, Adesina (2020) y Ding et al., (2023) identifican desafíos y problemáticas para la economía circular, entre los cuales mencionan: desconfianza, algunas de las partes interesadas se muestran reacias a adaptarse a un modelo diferente de economía, Viabilidad económica, falta de mercado, falta de tecnología, falta de canales para la adquisición de residuos y su tratamiento, falta de integración con otras industrias y falta de regulación. No obstante, afirman que el reciclaje de RCD se considera una opción práctica en el marco de la economía circular.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Los resultados mostraron que el proceso de trituración tiene una alta tasa de recuperación del material aprovechable (80,5%), relacionado a una pérdida de material respecto a una placa comercial del 12,5%. Esto demuestra que el proceso es eficiente y tiene potencial de escalamiento a nivel industrial. Además, el proceso de molienda demuestra que el yeso reciclado, por su finura, tiene potencial de aprovechamiento.
- De acuerdo con los resultados de resistencia a la flexión, la condición 100YR-PR (100% yeso reciclado en estado de entrega) obtuvo el mejor rendimiento, alcanzando el 74,2% de 0YR (100% yeso virgen) y el 52,3% de P-C (placa comercial). Estos valores de resistencia muestran que el reciclaje de este tipo de residuos tiene un alto potencial en términos mecánicos, ya que en las condiciones preparadas no se incluyeron otros materiales como fibras o aditivos que suelen incrementar dicha propiedad.
- Con relación al impacto ambiental, la condición 100YR-PR redujo considerablemente las emisiones, con 73,0% respecto a 0YR y 42,2% respecto a P-C (placa comercial). De manera análoga a la resistencia, estos valores muestran que el reciclaje de este tipo de residuos tiene un alto potencial en términos de sostenibilidad. No obstante, es importante resaltar que este indicador puede presentar variaciones significativas en relación al escalamiento industrial de este tipo de procesos, en especial en relación con el impacto del transporte y la ubicación de una planta de aprovechamiento de estas características o la inclusión de procesos mecánicos como corte o tamizado.
- Los residuos de construcción y demolición de yeso presentaron un alto potencial de reciclaje como lo evidenció la literatura y también la presente investigación. Sin embargo, es necesario evaluar más condiciones de molienda y la inclusión de otros materiales como aditivos o fibras que permitan llegar a las resistencias a la flexión de placas comerciales.

- La fabricación de placas de yeso a escala industrial, desde la dimensión económica, podría tener un impacto positivo en la economía local, la innovación, la reducción de costos y el desarrollo de mercados. Además, desde la dimensión social, podría generar empleo local, promover la inclusión social y la equidad, fomentar la capacitación y el desarrollo de habilidades, mejorar la calidad de vida de las personas y promover la sensibilización y conciencia ambiental. Estos aspectos contribuyen a la construcción de un sector más sostenible, a la protección del medio ambiente y al bienestar de la comunidad local.
- La economía circular se basa en la idea de maximizar el valor de los recursos existentes al mantenerlos en uso durante el mayor tiempo posible a través del reciclaje, la reutilización y la reducción de residuos. En el caso de los residuos de placas de yeso, la investigación demostró que su aprovechamiento para generar nuevas placas de yeso ofrece beneficios ambientales al reducir la extracción de yeso natural, disminuir la contaminación y optimizar el uso de recursos.

4.2 Recomendaciones

- Si bien la placa 100YR-PR (100% yeso reciclado en estado de entrega) no cumplió con la resistencia a flexión necesaria para el uso bajo la normativa actual, podría acondicionarse para ser usada en cielos modulares. En estos, los perfiles, fijaciones y anclajes son los encargados de sostener las placas y suelen tener una dimensión de 61x61 cm, por lo que también es una dimensión manejable en una escala no industrializada.
- De igual manera que las placas de yeso comerciales no están diseñadas para ser instaladas en zonas con altos índices de humedad ni para exteriores, las placas desarrolladas a partir de yeso reciclado también deben ser utilizadas únicamente para interiores.
- Investigaciones posteriores podrían estar enfocadas al análisis de la influencia de diferentes temperaturas de calcinación para la mejora de la resistencia a la flexión. En este caso se hace necesaria la medición del indicador de calentamiento global para verificar que en realidad se esté llevando a cabo una reducción en el impacto ambiental. De igual manera, podría evaluarse la inclusión de agentes espumantes para disminuir

la densidad o la inclusión de lana mineral de roca, una alternativa local que podría brindar propiedades de aislamiento acústico en adición al incremento de la propiedad de resistencia a la flexión.

- Trabajos futuros que relacionen diferentes proporciones de yeso virgen y yeso reciclado podrían considerar la inclusión de aditivos que lleven a conseguir una única relación agua/yeso para todas las mezclas, teniendo en cuenta que las mezclas 50-50 presentaron la menor resistencia dada la cantidad de agua y el efecto que esta generó también en la celulosa de recubrimiento.

Bibliografía

- Adesina, A. (2020). Circular economy in the concrete industry. *Handbook of Solid Waste Management: Sustainability through Circular Economy*, 1-15.
- Al-Ansary, M. S., & El-Hagggar, S. M. (2005). Construction waste management: Using the 7Rs golden rule for industrial ecology. *Proceedings of the International Conference on Achieving Sustainability in Construction*, 371–378.
<https://doi.org/10.1680/asic.34044.0043>
- Asociación Española de Normalización. (2012). *UNE-EN 15804:2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto*.
- ASTM C473-19. (2019). *Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum Panel Products*.
- Atkins, A. S., Zhang, L., Yu, H., & Naylor, B. P. (2008). Application of knowledge hub and RFID technology in auditing and tracking of plasterboard for environment recycling and waste disposal. *ICEIS 2008 - 10th International Conference on Enterprise Information Systems, Proceedings, SAIC*, 190–195.
<https://doi.org/10.5220/0001723601900195>
- Blackbeard, G. (2023). How Effective Are Circular Models at Delivering a Sustainable Trifactor: A Focus on Social Inclusion?. *The Social Dimensions of the Circular Economy* (pp. 201-221). Springer International Publishing.
- CCCS, CAMACOL, & IFC. (2020). Introducción a la construcción sostenible. In *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Claisse, P. A., & Ganjian, E. (2006). Briefing: Gypsum: Prospects for recycling. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, 159(1), 3–4.
<https://doi.org/10.1680/coma.2006.159.1.3>

- CORONA. (2015). *ESCAYOLA MODELO*.
<https://usermanual.wiki/Pdf/EscayolaModeloBlancoFichaTecnica1821010011.807237833/view>
- DAPcons, & KNAUF. (2020). *Declaración Ambiental de Producto Placa de Yeso Laminado Knauf Standard tipo A de 12,5 mm*.
- De Souza Campos, L. M. ;, Augusto Karl, Alexandre; Augusto, & Diego A. Karl. (2023). 3. The Relation Between Social Inclusion and Circular Economy Performance: An Analysis of Circular Economy Social Practices and Their Contributions to the Sustainable Development Goals. In D. A. Vázquez-Brust & J. Sarkis (Eds.), *The Social Dimensions of the Circular Economy* (Vol. 10, pp. 53–84). Springer Nature Switzerland AG.
- Departamento Nacional de Planeación. (2016). *CONPES 3874 Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos*.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *CONPES 3934 Política de crecimiento verde*.
- Ding, Z., Wang, X., & Zou, P. X. (2023). Barriers and countermeasures of construction and demolition waste recycling enterprises under circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138235.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy*. *Journal of Industrial Ecology* (Vol. 1).
- Erbs, A., Nagalli, A., Carvalho, K. Q. de, Mazer, W., Moraes Erbs, M. de, Paz, D. H. F., & Lafayette, K. P. V. (2021). Development of plasterboard sheets exclusively from waste. *Journal of Building Engineering*, 44(November 2020).
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102524>
- Erbs, A., Nagalli, A., Querne de Carvalho, K., Mymrin, V., Passig, F. H., & Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314–1322.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.189>

- Ganjian, E., Sadeghi-Pouya, H., & Claisse, P. (2011). Plasterboard and gypsum waste as a novel cementitious binder. *Gypsum: Properties, Production and Applications*, 249–358.
- Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M., Silva, J. S., Andrade, H. M. C., Dweck, J., Gonçalves, J. P., & Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, 164, 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>
- GeoNatural. (n.d.). Retrieved March 11, 2024, from https://www.facebook.com/GeoNatural.S.A.S/?locale=es_LA
- Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- Gobierno de la República de Colombia. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. Bogotá D.C., Colombia. Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.
- Hamm, H., Hüller, R., & Demmich, J. (2007). *Recycling of plasterboard [Article @ Recycling von Gipsplatten]*.
- ICONTEC. (2017). *NTC 6159:2017 Placas de yeso. Requisitos*.
- Indural. (n.d.). Retrieved March 11, 2024, from <https://indural.com/>
- ISO 14040:2006(es). (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*.
- ISO 14044:2006(es). (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*.
- Jaramillo Castro, R. D., & Restrepo Baena, O. J. (2020). *RECICLAJE DEL YESO NATURAL A PARTIR DE LA PRODUCCIÓN DE PLACAS DE YESO LAMINADO*. 13–89. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>

- Jiménez-Rivero, A., & García-Navarro, J. (2017). Best practices for the management of end-of-life gypsum in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1335–1344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.068>
- KNAUF. (2023). *Placa Knauf ST*.
<https://www.knauf.com.co/index.php?r=product/view&id=3>
- Menegaki, M., & Damigos, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 0472 de 2017*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021a). *RESOLUCION 1257 de 2021*.
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Papailiopoulou, N., Grigoropoulou, H., & Founti, M. (2017). Energy Analysis of the Effects of High-Level Reincorporation of Post-consumer Recycled Gypsum in Plasterboard Manufacturing. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1829–1839.
<https://doi.org/10.1007/s12649-016-9750-7>
- Pardo Álvarez, N. S., López Castaño, D. J., & Rico Pérez, M. A. (2021). Inclusión de concretos sostenibles en el cumplimiento de la Resolución 0472 de 2017 y la disminución de emisiones del sector constructor colombiano: Análisis de materiales. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 14(1), 76–85.
<https://doi.org/10.22335/rlct.v14i1.1510>
- Pedreño-Rojas, M. A., De Brito, J., Flores-Colen, I., Pereira, M. F. C., & Rubio-de-Hita, P. (2020a). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 29(August 2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101143>
- Pedreño-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J., & Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical,

- thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444–457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>
- Pedreño-Rojas, M.A., Fort, J., Cerny, R., Rubio-de-Hita, P. (2020b). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253, 120056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>.
- Revilla-Cuesta, V., Faleschini, F., Pellegrino, C., Skaf, M., & Ortega-López, V. (2022). Simultaneous addition of slag binder, recycled concrete aggregate and sustainable powders to self-compacting concrete: a synergistic mechanical-property approach. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1886–1908. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.080>
- Schröder, P., & Anantharaman, M. (2023). Complexities and Challenges of the Circular Economy Transition. In *Innovating for The Circular Economy* (pp. 21-36). CRC Press.
- Sierra Perdomo, N. (2020). *Residuos de construcción y demolición (RCD), construcción en la ciudad de Bogotá y la metodología PMBOK*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Soto-Paz, J., Arroyo, O., Torres-Guevara, L. E., Parra-Orobio, B. A., Casallas-Ojeda, M. (2023). The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *Journal of Building Engineering*, 78, 107724. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107724>.
- Souza-Piao, R., de Vincenzi, T. B., & de Carvalho, M. M. (2023). Strategies for social inclusion in Circular Economy. *The Social Dimensions of the Circular Economy* (pp. 265-282). Springer International Publishing.
- Suárez Silgado, S., & Roca, X. (2014). Viabilidad ambiental del reciclaje del yeso. In *CONAMA, Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Ta Thi, Y., & Thi Anh, T. N. (2020). Determination of life cycle GHG emission factor for paper products of Vietnam. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 586–594. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0061>
- TERNIUM. (2022) Reporte de Sustentabilidad 2022
- Ternium. (n.d.). Retrieved March 11, 2024, from <https://co.ternium.com/es>

The Black & Decker Corporation. (2017). *Batidora De Pedestal Model: MX1200*.

Thoeny, Z. A., Abdul, Z., & Thoeny, R. (2020). *The Effect of Particle Size Distribution on some Properties of Gypsum*. www.scientific.net.

UPME. (2022). *Resolución 000320 de 2022 Por la cual se actualiza el factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional del año 2021 para inventarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y proyectos de mitigación de GEI*. https://www1.upme.gov.co/Normatividad/320_2022.pdf

U.S. Small Business Administration. (2023). *10 steps to start your business*. <https://www.sba.gov/business-guide/10-steps-start-your-business>

Varon-Jiménez, L. M., Sierra-Tobón, D. C., & Bedoya, L. Y. (2011). INDURAL: un aporte significativo a la producción más limpia y la construcción sostenible. *Producción + Limpia*, 6(1), 128-135. Retrieved March 12, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552011000100011&lng=en&tlng=es.