



Fabricación y evaluación de bloques prensados a partir de papel reciclado para aislamiento termoacústico

Manufacture and evaluation of pressed blocks made from recycled paper for thermoacoustic insulation

Amin Nazer¹, Rodrigo Olivares¹, Lucas Cortés¹, Sebastián Rivera¹

¹ Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Construcción, Chile

amin.nazerv@userena.cl, rolivares@userena.cl, lucas.cortesp@userena.cl, sebastian.riverar@userena.cl

Este estudio desarrolla un proceso para fabricar bloques prensados sin aglutinantes a partir de papel reciclado de oficinas, evaluando preliminarmente sus propiedades termoacústicas, mecánicas y de resistencia al fuego. Utilizando papel se obtuvo pulpa mediante hidratación, trituración y prensado hidráulico, seguida de secado controlado.

Los bloques mostraron una densidad promedio de 300 kg/m³, transmitancia térmica estimada de 0,37 W/m²·K (superior a normativas chilenas para zonas térmicas, $U \leq 0,80$ W/m²·K), atenuación acústica de 33 dB, resistencia a flexotracción de 0,63 MPa y comportamiento al fuego con carbonización superficial sin propagación, colapsando tras 28 minutos de exposición directa. Estos resultados posicionan los bloques como alternativa ecológica y de bajo costo para aislamiento no estructural, promoviendo la economía circular asociada a residuos celulósicos.

Palabras clave: Papel de oficina reciclado, bloques prensados, Materiales de construcción no estructurales, aislamiento termoacústico, sostenibilidad, economía circular en construcción.

This study develops an artisanal process for manufacturing pressed blocks without binders from office recycled paper, preliminarily evaluating their thermoacoustic, mechanical, and fire resistance properties. Using paper, pulp was obtained through hydration, shredding, and hydraulic pressing, followed by controlled drying.

The blocks exhibited an average density of 300 kg/m³, an estimated thermal transmittance of 0.37 W/m²·K (superior to Chilean regulations for thermal zones, $U \leq 0.80$ W/m²·K), acoustic attenuation of 33 dB, flexural strength of 0.63 MPa, and fire behavior with superficial carbonization without propagation, collapsing after 28 minutes of direct exposure. These results position the blocks as an ecological and low-cost alternative for non-structural insulation, promoting the circular economy associated with cellulosic waste.

Keywords: Recycled office paper, Non-structural building materials, thermoacoustic insulation, sustainability, circular economy in construction

Introducción

El uso de papel de descarte y su reutilización en la producción de materiales de construcción ha ganado relevancia en los últimos años abordando desafíos en la gestión de residuos y promoviendo la sostenibilidad [1]. Se ha observado que la utilización de papel impreso desechado en las oficinas puede mejorar algunas propiedades de los materiales de construcción, lo que conlleva a interesantes beneficios ambientales y económicos [2]. Los estudios actuales se han centrado principalmente en mezclas de cemento [3] y papel descartado [4], así como también, se ha adicionado

papel tanto en la fabricación de ladrillos de arcilla cocidos [5] como en la fabricación de baldosas cerámicas [6].

Shermale & Warma (2015) [7] utilizan *papercrete*, un material compuesto que reemplaza parcialmente el cemento Pórtland con papel usado, lo que resulta en una reducción del uso de cemento, y por consiguiente, una reducción de las emisiones de CO₂. Solahuddin & Yahaya (2021a) [8], investigaron el efecto del papel usado en las propiedades mecánicas del hormigón, concluyendo que puede aumentar su resistencia al reemplazar el cemento por papel entre un 5% y el 10%. Mamta (2017) [9], igualmente estudiaron



el comportamiento del hormigón con la adición de papel, determinando que la resistencia del hormigón disminuyó con el aumento del contenido de papel, observando una correlación positiva entre la densidad y la resistencia del hormigón con la cantidad de papel usado. Solahuddin & Yahaya (2022) [10], realizaron una revisión bibliográfica que destacó la mejora de la resistencia a la compresión y a la flexión en el hormigón con papel usado, resaltando su carácter ecológico y rentable. Solahuddin & Yahaya (2021b) [11], investigaron el impacto del papel triturado en las propiedades del hormigón, observando mejoras en la resistencia y la absorción de agua. Okeyinka & Idowu (2014) [12], evaluaron la idoneidad del papel reciclado como material de ingeniería en la producción de planchas de techo. Encontraron que la mezcla de cemento y papel en proporción 1:1 mostró las mejores propiedades para la fabricación mecanizada. de Oliveira *et al.* (2023) [13], estudiaron la incorporación de residuos de la industria papelera en baldosas cerámicas, encontrando que es viable incorporar hasta un 10% de papel reciclado para obtener beneficios económicos y ambientales. Sangeetha, Divahar & Aranvid Raj (2022) [14], evaluaron ladrillos de hormigón fabricados con papel usado, encontrando que la incorporación de papel redujo la resistencia y el peso del ladrillo.

El *papercrete* también ha sido objeto de estudio en relación con sus propiedades termoacústicas. Shibib (2015) [5] evaluaron el impacto de la adición de papel usado en ladrillos cocidos, demostrando que los materiales resultantes mostraban un buen desempeño térmico y mecánico. Hospodarova *et al.* (2018) [15], investigaron la incorporación de fibras celulósicas de papel reciclado en materiales de construcción a base de cemento, encontrando que mejoran la resistencia y la conductividad térmica, mientras que el uso de superplastificante aumenta la trabajabilidad. Liuzzi *et al.* (2023) [16], desarrollaron mezclas de pulpa de papel con diferentes biomásas, evaluando sus propiedades termoacústicas y obteniendo resultados aceptables. Cardinale *et al.* (2021) [17], exploraron el reciclaje de *papercrete* para producir concreto ecológico, obteniendo mejoras en la absorción de sonido y reducción de costos, aunque a costa de una disminución en las propiedades de resistencia al aumentar el contenido de papel. Mandili *et al.* (2019) [18], exploraron un compuesto de papel residual y cal, logrando una conductividad

térmica de 0,12 W/m·K, sugiriendo un adecuado uso para aislamiento en edificios ecológicos.

En el contexto de la gestión de residuos de papel, Hong *et al.* (2021) [19] reportaron que el papel de oficina constituye aproximadamente el 60% de los residuos de papel a nivel global, con impactos ambientales significativos debido a la acumulación en vertederos y la deforestación. En Chile, los programas de reciclaje de papel a nivel institucional son limitados. La Ley 20.920 [20], también denominada Ley REP, que establece el marco para la gestión de residuos y la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje, no incluye al papel dentro de la categoría de productos prioritarios. Este vacío es particularmente pertinente dada la estimación de consumo anual de 10.000 hojas por empleado de oficina (Sha *et al.*, 2019) [21], reforzando la necesidad de estrategias innovadoras de reutilización.

Como se ha visto, los estudios demuestran el potencial del papel reciclado como material alternativo en la construcción, con beneficios que van desde la mejora de propiedades mecánicas y térmicas hasta la reducción de costos y el impacto ambiental positivo. Sin embargo, estudios sobre la fabricación de bloques prensados de papel reciclado sin adición de cemento son escasos. Robert, Etuk & Agbasi (2025) [22], investigaron el uso de placas para cielos rasos compuestos de papel reciclado sin aglutinante. Sus resultados mostraron que estos tableros, hechos de pasta de periódico y papel de escribir desechados, poseen propiedades físicas y térmicas superiores a los materiales convencionales.

El uso generalizado del papel hace que conocer su composición sea fundamental, no solo para entender sus propiedades físicas y químicas, sino también para optimizar la gestión integral de residuos y procesos de reciclaje, que se han convertido en prioridades esenciales ante la creciente preocupación ambiental global. En particular, el papel utilizado en impresoras de oficina, comúnmente conocido como papel bond o multifuncional, está compuesto principalmente por fibras de celulosa derivadas de pulpa de madera (virgen o reciclada), que representan entre el 70% y el 90% de su estructura total. La celulosa es un polímero natural que proporciona la base fibrosa y resistente del papel, aunque puede incluir trazas de lignina residual si no se procesa completamente.



Además de la celulosa, el papel de oficina incluye otros componentes químicos y aditivos para mejorar su calidad, imprimibilidad y durabilidad:

- Cargas o fillers (10-20%): Compuestos inorgánicos como carbonato de calcio (CaCO_3), arcilla (caolín) o dióxido de titanio (TiO_2), que aumentan la opacidad, el brillo y la suavidad, permitiendo una mejor absorción de tinta en impresoras láser o de inyección [23].
- Agentes de encolado (1-5%): Sustancias como almidón, resinas sintéticas (por ejemplo, resinas alquídicas) o sulfato de aluminio, que evitan que la tinta se esparza excesivamente y mejoran la resistencia al agua [24].
- Blanqueadores y aditivos ópticos (menos del 1%): Compuestos como blanqueadores libres de cloro elemental (ECF, por sus siglas en inglés) para eliminar lignina y lograr un blanco brillante, junto con agentes fluorescentes para mayor luminosidad [24].
- Agua y otros minoritarios (5-10%): Humedad residual y trazas de lignina (un compuesto orgánico que se elimina en gran medida durante el proceso químico de pulpeado para evitar amarilleo) [23].

Esta composición varía ligeramente según el gramaje (generalmente 75-90 g/m² para uso estándar en oficinas [25] y si es reciclado o virgen, pero en general, se produce mediante procesos químicos que eliminan impurezas para garantizar compatibilidad con impresoras.

El papel desechado en las oficinas posee propiedades aglutinantes debido a la fibra de celulosa que lo compone y a los adhesivos utilizados en su fabricación. Estas propiedades permiten que el papel reciclado se pueda volver a procesar y formar nuevas hojas. Además, posee baja conductividad térmica y una estructura que puede absorber y diseminar ondas sonoras [17], lo que lo considera un candidato ideal para aplicaciones de aislamiento termoacústico. Sangrutsamee *et al.* (2012) [26], incorporó pulpa de papel en mezclas de mortero. El estudio demostró que la incorporación de estos residuos de papel presentó una disminución en la conductividad térmica de las muestras.

A diferencia de los enfoques predominantes en la literatura, centrados en el uso de papel reciclado como adición parcial en matrices cementicias (papercrete) o en paneles

compuestos con aglutinantes minerales, el presente estudio explora la fabricación de bloques prensados elaborados exclusivamente a partir de pulpa de papel reciclado de oficinas, sin la incorporación de cemento, cal u otros ligantes externos.

Esta aproximación busca evaluar el potencial intrínseco de la fibra celulósica como material autoaglutinante mediante procesos físicos de hidratación, tritución y prensado, proponiendo una alternativa de bajo impacto ambiental para aplicaciones de aislamiento termoacústico no estructural.

El objetivo general de este estudio fue desarrollar y evaluar un proceso artesanal para la fabricación de bloques prensados sin aglutinante a partir de papel reciclado de oficinas. Se analizaron de manera preliminar sus propiedades térmicas, acústicas, mecánicas y su comportamiento frente a llama directa, con el fin de identificar su viabilidad potencial como material de aislamiento en aplicaciones interiores no estructurales, sin pretender establecer comparaciones normativas definitivas.

Parte Experimental

Selección y limpieza del papel

Se seleccionó papel impreso de diversos tamaños, desechado en oficinas de académicos de la Universidad de La Serena. El proceso de limpieza implicó la remoción manual de grapas, cintas adhesivas y cualquier material extraño al papel (Fig. 1a). Además, se descartaron documentos deteriorados por hongos o químicos derramados para garantizar la uniformidad de la mezcla y preservar las propiedades físicas de los bloques fabricados.

Obtención de la pulpa de papel

Posteriormente, las hojas de papel fueron a un contenedor de 50 litros aproximadamente con agua potable para su saturación durante 24 horas a temperatura ambiente. Luego, en el contenedor se procedió a la tritución del papel saturado a través del uso de un mezclador eléctrico (220 V y 2100 W), usualmente utilizado para la mezcla de morteros y hormigones, hasta obtener una densa pulpa fina homogénea y sin grumos. Para evitar salpicaduras fuera del contenedor durante el tritutado, éste se cubrió con plástico como se muestra en la fig. 1c.

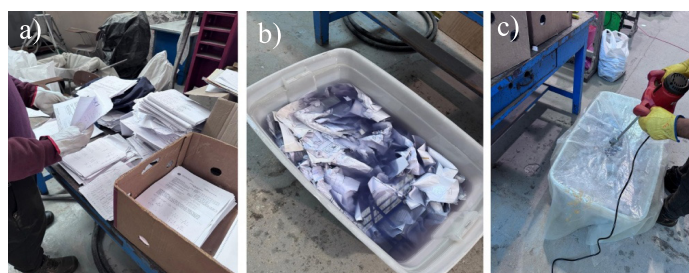


Figura 1. Obtención de la pulpa de papel. a) Selección del papel, b) hidratación, y c) triturado en húmedo.

Filtrado de la pulpa de papel

Para obtener una pulpa drenada, se fabricó un filtro prismático de madera (15x15x30 cm) con agujeros de 8 mm de diámetro distribuidos cada 2 cm en el fondo y las paredes (Fig. 2). Este dispositivo permitió el drenaje inicial, aunque requirió presión adicional; por ello, se colocó una plancha superior de madera con dimensiones 5 mm menores por arista que el molde, cargada durante 15 minutos con un bloque de acero con un peso total de 12 kg. Esta operación permitió el drenaje parcial del agua, evitó la pérdida de material sólido y modificó la textura de la pulpa antes del proceso de compactación en la prensa. Este procedimiento garantizó un contenido de humedad homogéneo para cada bloque.



Figura 2. Molde drenante de la pulpa de papel.

Moldeo de la pulpa

Para el moldeo de los bloques compactados se utilizó una prensa tipo Cimba-Ram adaptada en el laboratorio, se le agregó un sistema hidráulico que incluyó una bomba manual, un cilindro de simple efecto y un manómetro (Enerpac). Todo el sistema fue montado sobre una estructura metálica adaptada para garantizar una presión homogénea en los bloques (Fig. 3).



Figura 3. Sistema de prensado para la obtención de bloques prensados de papel reciclado. Está compuesto de prensa Cimva-Ram modificada con adaptación de bomba hidráulica manual.

La pulpa de papel drenada previamente se distribuyó dentro del molde en capas de 3 cm, distribuida manualmente para eliminar burbujas de aire hasta alcanzar el ras del molde de la prensa. Se colocó la tapa metálica al molde y se reforzó con dos prensas manuales tipo C en los extremos para evitar desviaciones y deformación del bloque de papel tras el prensado. Al accionar la palanca manualmente, se generó una presión ascendente en el cilindro que comprimió la pulpa y eliminó el exceso de agua (Fig. 4).

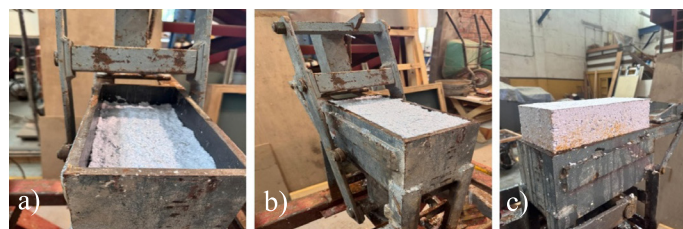


Figura 4. Moldeo y prensado de la pulpa de papel. a) llenado del molde, b) prensado, y c) expulsión del bloque prensado.

El proceso incluyó 15 bombeos iniciales, con presiones de 350 PSI aproximadamente. Posteriormente, se insertó una pieza de madera de 5 cm de altura entre el cilindro y la prensa, y se realizaron 25 bombeos adicionales en la segunda fase con el propósito de mejorar la compactación de la pulpa de papel. Una vez completado el proceso, se libera la presión, se retiran las prensas manuales y la tapa del molde. Con ayuda de la palanca de la prensa se expulsa cuidadosamente el bloque recién fabricado. El bloque de papel en estado húmedo, presentó un diseño prismático con dimensiones de 10 × 15 × 30 cm. Este procedimiento se repitió hasta obtener 30 unidades de bloques.



Secado del bloque de papel

Se procedió al secado solar de los bloques a la intemperie, sin embargo, dadas las condiciones ambientales con humedad relativa superiores a 80% en la estación de otoño, los bloques prensados no perdieron la humedad necesaria, por lo que se optó por un secado en horno eléctrico a 60°C hasta obtener una masa constante (Fig. 5). La humedad de los bloques deshidratados se verificó con un higrómetro digital para materiales (Benetech, Mod. GM620).



Figura 5. Secuencia de deshidratado de los bloques prensados de papel reciclado. a) Registro de la masa de bloque prensado, b) secado en horno a 60°C y c) verificación de la humedad final con higrómetro de materiales.

Cada bloque seco se midió en triplicado en cada una de sus caras utilizando un calibrador digital de precisión (resolución de 0,01 mm), debido a la falta de uniformidad dimensional observada. Se registraron las dimensiones de longitud, ancho y altura para calcular promedios y desviaciones estándar, lo que permitió evaluar variaciones post-secado y asegurar la consistencia en las propiedades físicas de los bloques.

Transmitancia térmica

Se aplicó un método indirecto y exploratorio de estimación del comportamiento térmico, basado en la densidad seca del material. Este enfoque no corresponde a un ensayo normalizado, sino que se fundamenta en correlaciones empíricas reportadas en la literatura entre densidad aparente y conductividad térmica en materiales porosos de baja densidad.

Una vez alcanzado el estado de peso constante seco, se procedió a la caracterización física de los bloques. Las dimensiones (largo, ancho y alto) se midieron en tres puntos por cada cara, con el propósito de reducir errores asociados a irregularidades superficiales. A partir de dichas mediciones se determinó el volumen promedio de cada bloque. La masa se registró mediante una balanza

electrónica de precisión, asegurando la estabilidad de los valores tras exposiciones prolongadas al ambiente.

Con estos datos se calculó la densidad aparente seca (ρ) aplicando la relación $\rho=m/V$. El valor promedio obtenido permitió seleccionar un material de referencia con propiedades físicas similares, necesario para estimar la conductividad térmica (λ). De acuerdo con la literatura técnica, se consideró la madera balsa como material análogo, debido a su estructura celular y rango de densidad comparable. La conductividad térmica de referencia adoptada para los cálculos fue de 0,05 W/m·K, correspondiente al valor medio reportado para dicho material.

Con el espesor promedio de los bloques determinado experimentalmente, se estimó la resistencia térmica (R) mediante la expresión $R=e/\lambda$, y posteriormente la transmitancia térmica (U) como su inverso ($U=1/R$). Este procedimiento permitió obtener una estimación referencial del comportamiento térmico de los bloques, útil para su comparación con materiales de similares características empleados en construcción.

La transmitancia térmica (U) obtenida para los bloques prensados de papel reciclado prensado se comparó con los requisitos establecidos en la actualización del artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) [27], publicada en el Diario Oficial de 2024 y con entrada en vigencia el 28 de noviembre de 2025. Esta comparación evaluó el cumplimiento de los valores límite para elementos constructivos como techumbres, muros perimetrales, pisos ventilados y puertas opacas, en términos de transmitancia térmica (U) o resistencia térmica total (R_t). Los valores aplicables se determinaron según la zona térmica de la edificación, definida en la norma chilena NCh1079 [28].

La comparación con los valores límite establecidos en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) se realiza únicamente con fines referenciales, con el objetivo de contextualizar el orden de magnitud de los valores estimados. Estos resultados no deben interpretarse como una verificación de cumplimiento normativo, ya que no provienen de ensayos térmicos instrumentales normalizados.

Evaluación del comportamiento acústico

Con el propósito de obtener una estimación preliminar del comportamiento acústico de los bloques fabricados, se diseñó un ensayo experimental simplificado bajo condiciones controladas de laboratorio. El procedimiento implementado no corresponde a un método normalizado, sino que busca identificar tendencias comparativas de atenuación sonora asociadas al uso del material.

El ensayo se efectuó en un recinto de prueba construido con siete bloques prensados de papel reciclado reciclado (Fig. 6). Dos bloques se dispusieron como base, otros dos se ubicaron verticalmente en los extremos laterales y dos más conformaron la cubierta superior. Los frentes anterior y posterior se cerraron utilizando un bloque preliminar dividido por la mitad, asegurando el sellado completo del conjunto con un adhesivo de contacto.



Figura 6. Medición de las propiedades acústicas del bloque de papel.

En el interior del recinto se instaló un parlante (Bose SoundLink Flex) como fuente emisora de sonido, mientras que las mediciones se realizaron con un sonómetro digital (Digital Sound Level Meter) con rango operativo entre 30 y 130 dB. El sistema se configuró para generar una señal acústica de alta frecuencia, manteniendo constante la potencia de salida durante todas las pruebas.

Se realizaron dos mediciones principales para determinar la atenuación sonora producida por los bloques:

- Medición a 10 cm: el parlante se ubicó en el centro del recinto, a 1,68 cm de la cara interna del bloque, y el sonómetro se posicionó al exterior, a una distancia total de 10 cm entre la fuente y el sensor.

- Medición a 20 cm: se mantuvo la posición del parlante y se alejó el sonómetro 10 cm adicionales, obteniendo una distancia total de 20 cm.

Ambas configuraciones se replicaron en un entorno abierto, sin la presencia de otros sonidos en el recinto, con el fin de registrar los niveles de presión sonora a las mismas distancias y establecer la diferencia de decibeles atribuible exclusivamente al efecto de aislamiento del material. Esta comparación permitió cuantificar la atenuación acústica de los bloques en condiciones controladas.

Si bien los resultados obtenidos muestran una reducción apreciable de los niveles de presión sonora, estos deben interpretarse exclusivamente como indicadores exploratorios del potencial acústico del material. No se establece equivalencia directa con índices de aislamiento acústico normalizados, los cuales requieren ensayos en cámaras reverberantes y condiciones controladas según normativa vigente.

Ensayos de flexotracción

Los ensayos de flexotracción se realizaron para evaluar el comportamiento mecánico de los bloques prensados de papel reciclado bajo cargas combinadas de tracción y compresión. Se utilizó la máquina universal de ensayos para hormigón.

Dado que las dimensiones y características del material no se ajustan a probetas normalizadas para hormigón, se utilizó la norma NCh1038:2009 únicamente como referencia metodológica, adaptando el esquema de carga y el cálculo de tensiones. Esta adaptación introduce incertidumbres adicionales, las cuales se reconocen como una limitación del presente estudio.

Los bloques se apoyaron en dos puntos inferiores, con la carga aplicada en el punto central superior. La carga se incrementó de forma gradual y continua hasta producirse la ruptura visible, registrando la carga máxima en kilonewtons (kN) en el momento de la falla (Ver fig. 7).

La resistencia a flexotracción (σ_f) se calculó utilizando la fórmula adaptada de la norma para probetas prismáticas: $\sigma_f = (3 \times P \times L) / (2 \times b \times h^2)$, donde P es la carga máxima de ruptura (kN), L es la distancia entre apoyos (mm), b es el ancho de la sección transversal (mm) y h es la altura de la



Figura 7. Ensayo de flexotracción de piezas de bloques prensado de papel reciclado prensado.

sección transversal (mm). Las dimensiones de cada bloque se midieron antes del ensayo para incorporar variaciones reales en los cálculos.

Se evaluaron seis bloques prensados de papel reciclado prensado y en estado seco. Todos los ensayos se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio estándar, registrando los datos mediante la interfaz digital de la máquina. Los resultados se promediaron para evaluar consistencia.

Comportamiento al fuego

Se realizó un ensayo cualitativo para evaluar el comportamiento al fuego de los bloques prensados de papel reciclado prensado. El ensayo no siguió una norma específica debido a la naturaleza preliminar, pero se inspiró en métodos cualitativos para materiales celulósicos, priorizando la seguridad y la observación visual. Se seleccionó uno de los bloques completamente secos y se aplicó una llama directa mediante un mechero a gas Bunsen a 10 cm de la zona central de la superficie. La exposición se mantuvo por un período predefinido de 30 minutos máximo, observando la respuesta del material durante y después de la aplicación de la llama. Una cámara termográfica (Bosch-GTC 400 C, -10°C a +400°C ± 3°C, software GTC Transfer) registró imágenes térmicas durante el ensayo (Fig. 8).

Los resultados experimentales se analizaron mediante estadística descriptiva básica, reportando valores promedio y desviación estándar. Dado el tamaño reducido de muestra, los análisis estadísticos se limitan a una interpretación exploratoria, sin inferencia estadística de carácter confirmatorio.

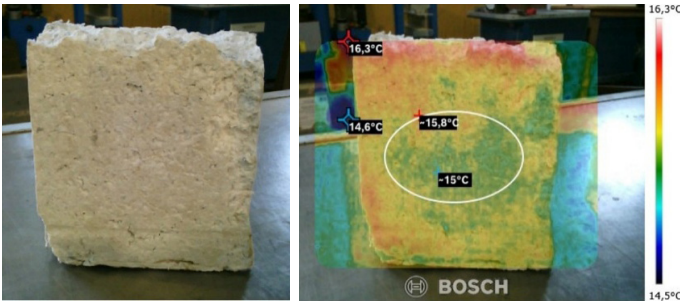


Figura 8. Imagen térmica de un bloque de papel prensado a temperatura ambiente.

Resultados

Los valores de pérdida de humedad, estabilidad dimensional y densidad aparente se reportan como promedio ± desviación estándar, permitiendo evaluar la variabilidad asociada al proceso de prensado y secado.

Pérdida de humedad por secado en horno.

Se evaluaron seis bloques prensados de papel reciclado prensado constatando que la pérdida de humedad en promedio fue $73,4\% \pm 3,2\%$.

Estabilidad dimensional

Las variaciones de las dimensiones y volumen final respecto de las iniciales de una muestra de seis bloques son mostradas en la Tabla 1. Por otra parte, la densidad promedio de los bloques prensados y secos fue de 300 kg/m^3 .

Tabla 1. Variación dimensional de los bloques prensados de papel reciclado prensado en estado seco.

Dimensión	Promedio	Variación (%)
Espesor	$9,0 \pm 0,6 \text{ (cm)}$	$-8,0 \pm 3,9$
Largo	$28,2 \pm 0,4 \text{ (cm)}$	$-4,3 \pm 1,0$
Ancho	$13,4 \pm 0,2 \text{ (cm)}$	$-4,7 \pm 1,6$
Volumen	$3.387,3 \pm 148,7 \text{ (cm}^3\text{)}$	$-16,1 \pm 2,1$

Transmitancia térmica

La transmitancia térmica estimada se presenta como un valor promedio derivado de las dimensiones y densidad seca de los bloques, reconociendo que la variabilidad dimensional influye directamente en la estimación del desempeño térmico.

La densidad de los bloques fabricados resultó comparable a la de la madera balsa ($100\text{--}300\text{ kg/m}^3$), un material de referencia en aplicaciones de aislamiento térmico. De acuerdo con la literatura técnica, la conductividad térmica promedio de la madera balsa se estima en $0,05\text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo que sirvió de base para la aproximación indirecta de las propiedades térmicas de los bloques. Conocido el ancho del bloque dado en la Tabla 1 y la conductividad térmica de la madera balsa, se puede obtener comparativamente los valores correspondientes a la resistencia térmica (R) y la transmitancia térmica (U) del bloque de papel prensado, siendo $2,68\text{ m}^2\text{ K/W}$ y $0,37\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, respectivamente.

Para el caso de Chile, según la norma chilena NCh1079:2008 [28], la actualización del artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC, publicada en 2024 y vigente desde el 28 de noviembre de 2025) [27], establece un valor máximo de transmitancia térmica (U) para complejo de techumbre, muros perimetrales, complejo de piso ventilado y complejo de puertas opacas para zonas térmicas desde A a la I.

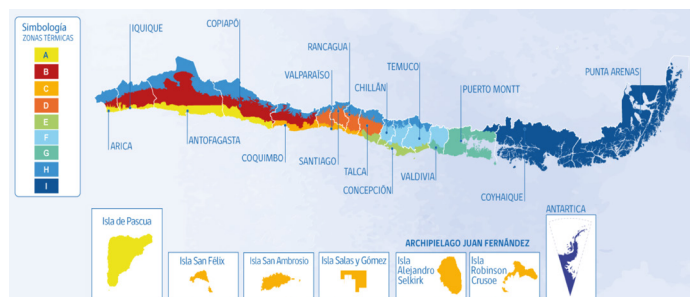


Figura 9. Zonificación térmica en Chile [31].

Tabla 2. Requisitos de transmitancia según la envolvente y cumplimiento de los bloques prensados de papel reciclado para cada zona térmica [27].

Envolvente	U máximo ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) OGUC	U bloque prensado ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	Bloque califica para zona térmica
Complejo de techumbre	0,47	0,37	A-B-C-D
Complejo de muros perimetrales	0,80	0,37	A-B-C-D-E-F-G
Complejo de piso ventilado	0,70	0,37	A-B-C-D-E-F-G
Complejo de puertas opacas	1,70	0,37	A-B-C-D-E-F-G-H-I

En comparación, los bloques desarrollados en este estudio presentaron una transmitancia térmica superior a los requisitos normativos para casi la totalidad de las zonas térmicas nacionales, pudiendo cumplir satisfactoriamente su uso como material aislante (ver Tabla 2).

Comportamiento acústico

La atenuación acústica debida al módulo de bloques prensados de papel reciclado se calculó como la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos con el parlante fuera y dentro del recinto, resultando en reducciones de 32,0 dB (equivalente a una disminución relativa del 30,4%) y 33,1 dB (equivalente a una disminución relativa del 34,0%) para las distancias de 10 cm y 20 cm desde la fuente emisora, respectivamente. La disminución relativa se obtuvo mediante la fórmula $[(L_{\text{fuera}} - L_{\text{dentro}}) / L_{\text{fuera}}] \times 100$, donde L representa el nivel de presión sonora promedio en dB. Las lecturas se realizaron directamente con un sonómetro calibrado a las distancias mencionadas. A continuación, se presenta la tabla con los datos crudos y promedios obtenidos.

Las mediciones acústicas se reportan como valores promedio $\pm$ desviación estándar, lo que permite observar la dispersión de los niveles de presión sonora registrados en cada configuración experimental.

Tabla 3. Resultados de las lecturas con el sonómetro.

Configuración del ensayo	Medición 1 (dB)	Medición 2 (dB)	Medición 3 (dB)	Promedio (dB)
Parlante dentro del módulo y sonómetro a 10 cm	72,0	75,0	73,2	$73,4 \pm 1,5$
Parlante fuera del módulo y sonómetro a 10 cm	106,3	104,5	105,4	$105,4 \pm 0,9$
Parlante dentro del módulo y sonómetro a 20 cm	66,1	63,3	63,3	$64,23 \pm 1,6$
Parlante fuera del módulo y sonómetro a 20 cm	100,3	97,7	94,1	$97,37 \pm 3,1$

Estos resultados sugieren un potencial comportamiento aislante acústico del material para aplicaciones interiores



no estructurales, sin constituir una caracterización acústica definitiva ni comparable directamente con soluciones comerciales certificadas.

Análisis de correlaciones exploratorias

Con el fin de identificar relaciones preliminares entre las propiedades medidas, se realizó un análisis exploratorio de correlación entre la densidad aparente seca, la resistencia a flexotracción y la transmitancia térmica estimada de los bloques. Se observó una tendencia positiva entre densidad y resistencia a flexotracción, coherente con lo reportado en materiales porosos de base celulósica, mientras que una mayor densidad se asoció a una transmitancia térmica ligeramente superior, lo que sugiere un compromiso entre desempeño mecánico y capacidad aislante.

Estas relaciones deben interpretarse únicamente como tendencias preliminares, dada la cantidad limitada de especímenes y el carácter indirecto de la estimación térmica.

Tabla 4. Correlaciones exploratorias entre densidad, resistencia mecánica y desempeño térmico estimado.

Propiedad 1	Propiedad 2	Tendencia observada	Interpretación exploratoria
Densidad aparente seca	Resistencia a flexotracción	Positiva	Bloques con mayor densidad tienden a presentar mayor resistencia mecánica, coherente con una mayor compactación de la matriz celulósica.
Densidad aparente seca	Transmitancia térmica estimada (U)	Positiva leve	El aumento de densidad se asocia a una ligera disminución de la capacidad aislante, reflejando el compromiso entre compactación y desempeño térmico.
Resistencia a flexotracción	Transmitancia térmica estimada (U)	Indirecta	Bloques con mayor resistencia mecánica tienden a mostrar valores ligeramente superiores de transmitancia térmica, sugiriendo un balance entre rigidez y aislamiento.

Ensayo a la flexotracción

Los ensayos de flexotracción se realizaron con el objetivo de obtener una aproximación preliminar al comportamiento mecánico de los bloques prensados de papel reciclado, considerando su potencial uso en aplicaciones no estructurales. Debido a la naturaleza exploratoria del estudio y al número limitado de especímenes ensayados, los resultados obtenidos deben interpretarse como valores indicativos y no como propiedades mecánicas definitivas del material.

La resistencia promedio a flexotracción obtenida ($0,63 \pm 0,05$ MPa) sugiere que los bloques presentan una capacidad mecánica limitada, coherente con su baja densidad y composición celulósica. Estos valores confirman su uso exclusivo en aplicaciones no estructurales, sin pretender equipararlos a elementos constructivos con función resistente.

Comportamiento al fuego

Se realizó un ensayo cualitativo y exploratorio para observar el comportamiento del material frente a una fuente de llama directa, sin ajustarse a protocolos normalizados de reacción o resistencia al fuego. El objetivo del ensayo fue describir el proceso de degradación térmica del bloque y su respuesta visual y térmica, más que clasificar su desempeño según normativa vigente. Se seleccionó un bloque con un espesor de 9,5 cm. Este bloque se expuso a una llama directa constante mediante un mechero ajustado a potencia media, posicionado aproximadamente a 10 cm de la superficie.

Durante la prueba, se monitoreó la temperatura en la cara opuesta a la exposición de la llama utilizando una cámara termográfica, con el objetivo de evaluar la capacidad de aislamiento térmico del bloque ante una fuente de calor constante, verificando que no es un material inflamable. En los primeros 10 minutos de exposición, se observó un desprendimiento superficial en la cara impactada por la llama, sin fisuras visibles ni variaciones térmicas detectables en la cara opuesta, según los registros de la cámara termográfica. En este tiempo, el área afectada de la superficie se contraía, causando una reducción de aproximadamente $\frac{1}{4}$ del grosor del bloque.

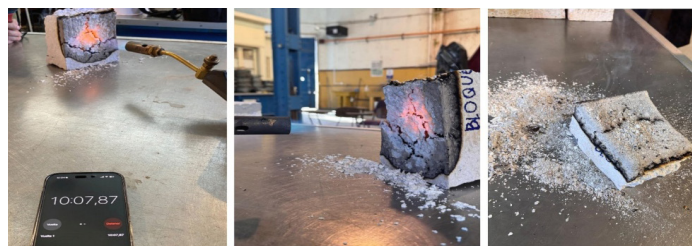


Figura 10. Bloque de papel prensado sometido a ensayo de llama directa y estado final.

A los 17 minutos, se comenzó a notar un incremento en la temperatura de la cara no expuesta, con un cambio de aproximadamente 1°C por minuto, lo que indicaba una transmisión de calor a través del material. Finalmente, tras 28 minutos de exposición ininterrumpida, el bloque colapsó, registrando un aumento en la temperatura de hasta $41,6^{\circ}\text{C}$ en la cara no expuesta a la llama ($>400^{\circ}\text{C}$ excediendo el límite de medición del equipo en la cara expuesta) y una disminución de más del 50% del espesor total del bloque (Fig. 11). Este procedimiento se llevó a cabo en condiciones de laboratorio controladas, con registro fotográfico y termográfico de las etapas.

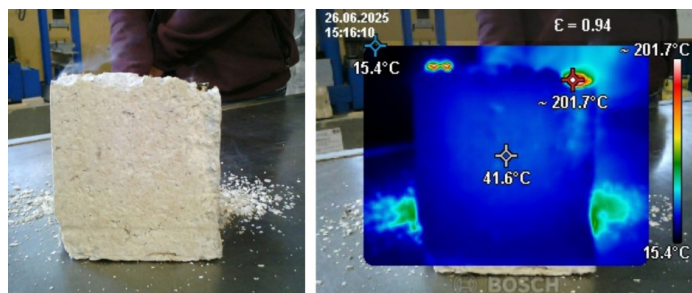


Figura 11. Imagen termográfica de la cara posterior a la llama directa del bloque al finalizar el ensayo.

Durante el ensayo se observó un proceso de carbonización superficial progresiva en la cara expuesta a la llama, acompañado de pérdida gradual de espesor y aumento retardado de temperatura en la cara opuesta. No se evidenció propagación súbita de la llama ni ignición violenta del material, registrándose un colapso estructural tras aproximadamente 28 minutos de exposición continua.

Dado el carácter no normalizado del ensayo y el uso de un único espécimen, los resultados deben interpretarse exclusivamente como una descripción cualitativa del comportamiento observado, sin permitir su clasificación en términos de resistencia o reacción al fuego conforme

a normativa técnica. Ensayos futuros deberán incorporar metodologías estandarizadas y un mayor número de muestras para una evaluación más robusta.

Discusión

Comparación con materiales aislantes comerciales y bio-basados

Desde una perspectiva comparativa, los bloques prensados de papel reciclado presentan una densidad aparente del orden de 300 kg/m^3 , significativamente superior a la de aislantes livianos convencionales como las lanas minerales ($10\text{--}80\text{ kg/m}^3$) o el poliestireno expandido ($10\text{--}30\text{ kg/m}^3$).

No obstante, estos valores resultan comparables a los reportados para materiales bio-basados densificados, tales como paneles rígidos de fibras vegetales o compuestos celulósicos prensados, cuyas densidades típicas se sitúan entre 200 y 400 kg/m^3 , dependiendo del proceso de fabricación y grado de compactación. Esta similitud posiciona al material desarrollado dentro del grupo de aislantes bio-basados de media densidad, orientados a aplicaciones interiores no estructurales.

En términos de desempeño térmico, la transmitancia térmica estimada se sitúa en un rango competitivo para aplicaciones interiores, aunque inferior al de aislantes comerciales optimizados. Sin embargo, el material destaca por su bajo impacto ambiental, ausencia de aglutinantes minerales o sintéticos y potencial de fabricación local con residuos de oficina, lo que refuerza su interés desde una perspectiva de economía circular.

Comparación acústica

En comparación con soluciones acústicas comerciales utilizadas en acondicionamiento interior, los bloques prensados de papel reciclado muestran una capacidad apreciable de atenuación sonora, atribuible a su estructura porosa y fibrosa. Si bien no alcanzan niveles certificados de aislamiento acústico, su desempeño resulta consistente con otros materiales bio-basados empleados como soluciones pasivas de control de ruido en espacios interiores.

Limitaciones del material

A pesar de los resultados favorables observados, el material presenta limitaciones relevantes que condicionan su aplicación.



La sensibilidad a la humedad constituye una de las principales restricciones, dado el carácter higroscópico de la fibra celulósica, lo que puede afectar la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas en ambientes no controlados.

Asimismo, la durabilidad a largo plazo del material no fue evaluada en este estudio, por lo que no es posible establecer su comportamiento frente a ciclos de humedad-secado, envejecimiento natural o exposición prolongada a agentes ambientales. La naturaleza orgánica del material implica además un riesgo potencial de ataque biológico, como hongos o microorganismos, especialmente en condiciones de alta humedad, lo que refuerza la necesidad de tratamientos superficiales o aditivos protectores en desarrollos futuros.

Conclusiones

El desarrollo de un proceso artesanal para la fabricación de bloques termoacústicos a partir de papel reciclado de oficinas demuestra la viabilidad de transformar residuos celulósicos en materiales de construcción no estructurales, sin la adición de aglutinantes externos.

Los bloques obtenidos presentan propiedades térmicas favorables, con una transmitancia térmica estimada de $0,37 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, que cumple con los requisitos normativos de la OGUC (artículo 4.1.10, 2024) para diferentes zonas térmicas en Chile, posicionándolos como una alternativa efectiva para aislamiento en revestimientos interiores. De igual manera, la atenuación acústica medida de 33 dB confirma su capacidad para reducir ruido ambiental, alineada con la norma NCh2785:2010 [29], lo que resalta su potencial en aplicaciones de control sonoro en entornos educativos o administrativos.

En términos mecánicos, los ensayos de flexotracción muestran una resistencia promedio de $0,631 \text{ MPa}$, suficiente para usos no portantes pero insuficiente para elementos estructurales, evaluando la necesidad de optimizaciones en la compactación para mejorar la durabilidad.

El comportamiento frente a la llama directa evidenció una degradación progresiva mediante carbonización superficial, sin observaciones de ignición súbita, lo que sugiere un desempeño térmico interesante desde un punto de vista exploratorio, aunque no permite establecer

clasificaciones normativas de resistencia al fuego.

El análisis estadístico descriptivo y correlacional realizado permitió identificar tendencias coherentes entre densidad, resistencia mecánica y desempeño térmico estimado, reforzando la consistencia interna de los resultados y proporcionando una base para futuras investigaciones con mayor número de muestras y ensayos normalizados.

Estos resultados contribuyen a la economía circular al reutilizar papel desechado en la fabricación de bloques, reduciendo el impacto ambiental asociado a vertederos y deforestación.

No obstante, se reconoce que el presente estudio corresponde a una etapa preliminar de investigación, por lo que los valores reportados deben interpretarse como indicativos y no como parámetros de desempeño normalizado. Estudios futuros deberán profundizar en ensayos estandarizados, durabilidad y control de humedad para una validación técnica más robusta.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de ANID InES I+DINID230003 a través del proyecto CEIINNOV2453853 de la Universidad de La Serena, Chile.

Referencias

- [1] S. Sidabutar, *MORFAI J.* **3**, 133 (2023). <https://doi.org/10.54443/morfai.v3i1.838>
- [2] M. H. Iqbal and F. Ahmed, *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* **9**, 10 (2015). <https://doi.org/10.9790/2402-09811017>
- [3] A. B. Al Zubaidi, S. R. Ahmedizat, and A. A. Al-Tabbakh, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **870**, 012138 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012138>
- [4] Mamta, Anshu, and A. Singhal, *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)* **5**, (3) (2016). <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS03015>
- [5] K. S. Shibib, *Heat Mass Transf.* **51**, 685 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1438-6>
- [6] R. Afonso *et al.*, *Green Mater: Sustain. Water Remediation Treat.* (Springer, 2018) pp. 1–10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5_30



- [7] Y. D. Shermale and M. B. Varma, *Recent Trends Civ. Eng. Technol.* **2**, 54 (2015).
- [8] B. A. Solahuddin and F. M. Yahaya, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **1092**, 012067 (2021a). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1092/1/012067>
- [9] Mamta, Anshu, and A. Singhal, *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)* **5**, (3) (2017). (ICADEMS – 2017).
- [10] B. A. Solahuddin and F. M. Yahaya, *Civ. Eng. J.* **7**, 94 (2022). <https://doi.org/10.28991/CEJ-SP2021-07-07>
- [11] A. Solahuddin and F. M. Yahaya, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **682**, 012006 (2021b). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012006>
- [12] O. M. Okeyinka and O. J. Idowu, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **4**, 724 (2014). <https://doi.org/10.48084/etasr.485>
- [13] D. M. de Oliveira *et al.*, *Polymers* **15**, 426 (2023). <https://doi.org/10.3390/polym15020426>
- [14] S. P. Sangeetha, R. Divahar, and P. S. Aravind Raj, *Trends Ind. Eng. Appl. Manuf. Process* (Springer, 2022) pp. 1–10. <https://doi.org/10.9734/bpi/tier/v1/2363b>
- [15] V. Hospodarova, N. Stevulova, J. Briancin, and K. Kostelanska, *Buildings* **8**, 43 (2018). <https://doi.org/10.3390/buildings8030043>
- [16] S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, and P. Stefanizzi, *Appl. Sci.* **13**, 4710 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13084710>
- [17] T. Cardinale, M. D'Amato, R. Sulla, and N. Cardinale, *Appl. Sci.* **11**, 1011 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11031011>
- [18] B. Mandili, M. Taqi, A. El Bouari, and M. Errouaiti, *Constr. Build. Mater.* **229**, 117097 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117097>
- [19] H. Hong, W. Huang, H. Zhao, X. Hong, and D. Hong, *Polymers* **13**, 3119 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13183119>
- [20] Biblioteca del Congreso Nacional, *Ley Chile* (2016). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>
- [21] I. A. Shah, S. Amjed, and N. A. Alkathiri, *J. Bus. Econ. Manag.* **20**, 43 (2019). <https://doi.org/10.3846/jbem.2019.6809>
- [22] U. W. Robert, S. E. Etuk, and O. E. Agbasi, *Momento* **71**, 65 (2025). <https://doi.org/10.15446/mo.n71.119616>
- [23] Grupo PCC, *PCC Group Product Portal* (2025). Recuperado 3 de octubre de 2025 de <https://www.products.pcc.eu/es/k/industria-de-pulpa-y-papel/>
- [24] AMED, *¿De qué está hecho el papel? La ciencia detrás de la producción de papel* (2025). <https://amed-us.com/es/news/de-que-esta-hecho-el-papel-la-ciencia-detras-de-la-produccion-de-papel/>
- [25] K. Dölle, *J. Eng. Res. Rep.* **23**, 39 (2022). <https://doi.org/10.9734/jerr/2022/v23i317599>
- [26] V. Sangrutsamee, P. Srichandr, and N. Poolthong, *J. Asian Archit. Build. Eng.* **11**, 147 (2012). <https://doi.org/10.3130/jaabe.11.147>
- [27] Biblioteca del Congreso Nacional, *Ley Chile* (1992). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8201>
- [28] Instituto Nacional de Normalización (INN), *NCh1079:2019 ES. Arquitectura y construcción – Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones* (2019). <https://ecommerce.inn.cl/nch10792019-es74937>
- [29] Instituto Nacional de Normalización (INN), *NCh2785:2003 ISO 140-4:1998. Acústica – Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción – Mediciones en terreno de la aislación acústica aérea entre recintos* (2003).
- [30] Instituto Nacional de Normalización (INN), *NCh1038:2009 Hormigón – Ensayo de tracción por flexión* (2009).
- [31] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, *Nueva Reglamentación Térmica* (2025). Recuperado 16 de octubre de 2025 de <https://www.minvu.gob.cl/nueva-reglamentacion-termica/>