

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,
Volumen 9, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

**DESEMPEÑO FÍSICO Y MORFOLÓGICO DE
COMPUESTOS CEMENTANTES CON ASERRÍN
TRATADO COMO SUSTITUTO DEL AGREGADO
FINO**

PHYSICAL AND MORPHOLOGICAL PERFORMANCE OF
CEMENTITIOUS COMPOSITES WITH TREATED SAWDUST
AS FINE AGGREGATE SUBSTITUTE

Eulogio Daniel Garrido Cruz

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Humberto Iván Navarro Gómez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Cutberto Rodríguez Álvarez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Oliver Stiff Pérez Lugo

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19260

Desempeño físico y morfológico de compuestos cementantes con aserrín tratado como sustituto del agregado fino

Eulogio Daniel Garrido Cruz¹

ga420871@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0008-5342-8031>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México

Humberto Iván Navarro Gómez

humberto_navarro@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2338-4863>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México

Cutberto Rodríguez Álvarez

profe_7479@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9225-8695>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México

Jesús Emmanuel Cerón Carballo

jesus_ceronc@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2809-3387>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México

Oliver Stiff Pérez Lugo*

pe360563@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0009-6089-3991>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, México

RESUMEN

Este estudio evaluó el uso de aserrín de *Pinus montezumae* tratado químicamente como sustituto parcial del agregado fino en compuestos cementantes destinados a aplicaciones no estructurales. El tratamiento consistió en una alcalinización con hidróxido de sodio (NaOH), seguida de impregnación con óxido de aluminio (Al_2O_3), con el objetivo de mejorar la morfología superficial del aserrín y su compatibilidad con la matriz cementante. Se prepararon mezclas con 0 %, 10 %, 20 % y 30 % de reemplazo, empleando cemento Portland, cal hidratada y agua potable. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad aparente y análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, modelo JEOL JSM-6380), complementado con análisis digital en ImageJ v1.54d. Las mezclas con hasta 20 % de aserrín tratado mostraron un desempeño físico adecuado, con resistencia a la compresión superior a 34 kg/cm² y una reducción de densidad de hasta 11 % respecto a la mezcla control, viables para prefabricados ligeros. Morfológicamente, el tratamiento químico incrementó la apertura de poro y la funcionalización superficial, mejorando la interacción con la matriz. Esta propuesta ofrece una alternativa técnica y ambientalmente viable para aprovechar residuos lignocelulósicos en materiales constructivos sostenibles, con potencial aplicación en vivienda social y procesos de autoconstrucción.

Palabras clave: aserrín tratado, compuestos cementantes, construcción sostenible, SEM, vivienda social.

¹ Autor principal

Correspondencia: ga420871@uaeh.edu.mx

Physical and morphological performance of cementitious composites with treated sawdust as fine aggregate substitute

ABSTRACT

This study evaluated the use of chemically treated *Pinus montezumae* sawdust as a partial substitute for fine aggregate in cementitious composites intended for non-structural applications. The treatment involved alkalization with sodium hydroxide (NaOH), followed by impregnation with aluminum oxide (Al_2O_3), aiming to improve the sawdust's surface morphology and compatibility with the cement matrix. Mixtures with 0 %, 10 %, 20 %, and 30 % replacement levels were prepared, using Portland cement, hydrated lime, and potable water. Compressive strength, water absorption, apparent density, and morphological analyses were performed using scanning electron microscopy (SEM, JEOL JSM-6380), supplemented by digital processing with ImageJ v1.54d. Mixtures containing up to 20 % treated sawdust exhibited adequate physical performance, with compressive strength exceeding 34 kg/cm^2 and density reductions up to 11 % compared to the control mix, making them suitable for lightweight prefabricated components. Morphological analysis showed that chemical treatment increased pore openness and functionalized surface coverage, enhancing interaction with the matrix. This proposal presents a technically and environmentally viable alternative for utilizing lignocellulosic waste in the production of sustainable construction materials, with potential application in social housing and self-construction contexts.

Keywords: treated sawdust, cementitious composites, sustainable construction, SEM, social housing

Artículo recibido 05 julio 2025

Aceptado para publicación: 25 julio 2025



INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción representa uno de los sectores con mayor impacto ambiental a nivel global. De acuerdo con el Global Status Report for Buildings and Construction (GlobalABC, 2022), este sector es responsable de aproximadamente el 37 % de las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas con el consumo energético.

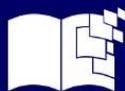
En el caso de México, el crecimiento urbano acelerado y la expansión de la infraestructura han provocado una fuerte presión sobre los recursos naturales, como arena, grava y cemento, cuya extracción y transformación generan altos costos ambientales, desde la alteración de ecosistemas ribereños hasta la emisión de gases de efecto invernadero (Flores-López et al., 2020).

Simultáneamente, la industria maderera genera grandes cantidades de residuos lignocelulósicos, entre los que destaca el aserrín, cuyo manejo inadecuado puede representar riesgos ecológicos debido a su combustión espontánea y liberación de partículas contaminantes. Frente a este panorama, la reutilización de residuos orgánicos en el sector construcción se plantea como una estrategia ambiental, social y técnica relevante para fomentar la economía circular y reducir el uso de recursos vírgenes.

A nivel internacional, se han documentado múltiples beneficios del uso de aserrín en compuestos cementantes, como la reducción de peso, propiedades aislantes y bajo costo (Olaiya et al., 2023; Gómez-Pulido et al., 2020). Sin embargo, su incorporación directa presenta limitaciones importantes: alta absorción de agua, escasa estabilidad dimensional y débil adherencia con matrices minerales (Ghafor et al., 2021; Ramírez & Díaz, 2019).

Para superar estas barreras, se han explorado tratamientos químicos que mejoren la interacción entre el aserrín y los ligantes cementantes. Los tratamientos alcalinos con NaOH han demostrado eficacia en la eliminación de hemicelulosa y lignina, aumentando la porosidad superficial (Zhang et al., 2021), mientras que la impregnación con óxidos metálicos como Al_2O_3 ha mostrado beneficios en la estabilidad térmica, adherencia y funcionalización superficial (Li et al., 2020; Zhao et al., 2024). No obstante, en América Latina persiste un vacío importante en la literatura sobre el uso de tratamientos secuenciales (alcalino + funcionalización con óxidos) en residuos lignocelulósicos aplicados a mezclas cementantes, así como su análisis combinado morfológico (SEM) y físico-mecánico.

Este estudio se propone como una contribución original a dicha área de conocimiento. El enfoque se



justifica en tres ejes complementarios: (1) ambiental, por la valorización de residuos y reducción de impactos ecológicos; (2) económico, mediante el desarrollo de materiales accesibles para vivienda social o autoconstrucción; y (3) técnico, al buscar un equilibrio entre ligereza, funcionalidad y compatibilidad con procesos cementantes convencionales.

Antecedentes

El sector de la construcción, uno de los mayores consumidores de recursos naturales a nivel mundial, ha sido objeto de múltiples esfuerzos para reducir su huella ambiental mediante la integración de materiales alternativos. En este contexto, los residuos lignocelulósicos, y en particular el aserrín, han sido explorados como sustitutos parciales en compuestos cementantes. Diversas investigaciones han demostrado que, al tratar adecuadamente estos residuos, es posible mejorar su compatibilidad con matrices inorgánicas, logrando así desarrollos constructivos más sostenibles (Roslan et al., 2020; Olaiya et al., 2023).

En México, la generación de aserrín a partir de especies como *Pinus montezumae* constituye un problema ambiental significativo, dado el volumen de residuos y la falta de estrategias eficientes para su reutilización (Flores-López et al., 2020). Sin embargo, la mayoría de los estudios locales han abordado su uso sin tratamiento químico o en aplicaciones distintas al sector cemento-cal (Ramírez & Díaz, 2019), lo que ha limitado su aplicación práctica. A pesar del interés creciente en tecnologías verdes y economía circular, la evidencia científica en América Latina sobre tratamientos químicos secuenciales (alcalinos y funcionalización con óxidos metálicos) sigue siendo escasa.

Recientemente, estudios como los de Farias et al. (2023) y Ortega et al. (2022) han empezado a documentar resultados alentadores al aplicar tratamientos a residuos vegetales, pero aún falta consolidar una base experimental sólida que incluya análisis morfológicos de alta resolución, como SEM, y protocolos de evaluación físico-mecánica conforme a normas ASTM y NMX.

Justificación

El uso de materiales reciclados en la industria de la construcción es una prioridad estratégica frente al agotamiento de recursos naturales y al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero. El aserrín, subproducto común de la industria maderera, representa una oportunidad significativa para



avanzar hacia modelos de economía circular, especialmente si se logra mejorar su comportamiento físico y químico mediante tratamientos adecuados.

En particular, el aserrín de *Pinus montezumae* destaca por su abundancia en regiones como el estado de Hidalgo (México) y por su potencial para ser transformado en un componente funcional dentro de mezclas cementantes. Sin embargo, su uso presenta desafíos técnicos como su alta higroscopicidad, pobre adherencia con ligantes minerales y baja resistencia estructural (Ghafor et al., 2021; Mansour et al., 2014). Este estudio se justifica desde tres dimensiones complementarias:

- Ambiental, al ofrecer una solución al problema de los residuos madereros y reducir el uso de agregados vírgenes como la arena.
- Técnica, al diseñar un protocolo de tratamiento químico basado en NaOH y Al₂O₃ que mejora la compatibilidad del aserrín con matrices cementantes.
- Social, al permitir el desarrollo de materiales ligeros, accesibles y adecuados para aplicaciones en vivienda social o sistemas de autoconstrucción.

Asimismo, se pretende contribuir a la literatura técnica con evidencia experimental que incluya caracterización morfológica mediante SEM y análisis de desempeño conforme a normas internacionales, generando una base replicable y útil para investigadores y técnicos del sector.).

Revisión de la literatura

En los últimos años, el tratamiento de fibras y residuos lignocelulósicos ha avanzado significativamente como línea de investigación para la fabricación de compuestos cementantes sostenibles. Estudios como los de Olaiya et al. (2023) y Li et al. (2020) han confirmado que la activación química del aserrín, especialmente mediante tratamientos alcalinos o con nanopartículas, permite superar barreras estructurales asociadas a su baja cohesión interna y alta absorción de humedad.

La activación con hidróxido de sodio (NaOH) ha demostrado ser eficaz para eliminar lignina y hemicelulosa, facilitando una mayor exposición de la celulosa cristalina y mejorando así la adherencia con la matriz (Singh et al., 2019). Además, el uso de óxidos metálicos como el Al₂O₃ no solo mejora la estabilidad térmica del material, sino que también modifica químicamente la superficie del aserrín

incrementando su resistencia y compatibilidad con la matriz cementante (Li et al., 2020; Zhao et al., 2024).

Autores como Kim et al. (2022) han integrado técnicas avanzadas de análisis morfológico (SEM + ImageJ) para caracterizar con precisión la porosidad y la modificación superficial de residuos tratados. A nivel regional, Ortega et al. (2022) y Farias et al. (2023) han empezado a aplicar estas técnicas en residuos vegetales para uso en morteros, pero sin protocolos estandarizados.

Investigaciones emergentes, como la de Chowdhury et al. (2023), exploran la combinación de caracterización física, térmica y microestructural con nuevos agentes modificadores. Asimismo, Fernández y Lima (2024) destacan la importancia de la replicabilidad de métodos en estudios de materiales compuestos bio-inspirados. Estas obras indican una creciente necesidad de vincular el análisis experimental con criterios de aplicabilidad real, bajo estándares técnicos normativos.

El presente estudio se sitúa dentro de este marco y aporta al cuerpo de conocimiento regional al aplicar un tratamiento combinado ($\text{NaOH} + \text{Al}_2\text{O}_3$) a residuos de *Pinus montezumae*, acompañando esta intervención con un análisis cuantitativo morfológico y físico-mecánico con base en normas ASTM y NMX. Esta integración metodológica y contextual representa un avance relevante frente a estudios que se han limitado a explorar efectos térmicos o estructurales de forma aislada.

Marco teórico

Problemática ambiental y técnica del aserrín

El aserrín es un residuo lignocelulósico generado en grandes volúmenes por la industria maderera, con alto potencial de aprovechamiento en la construcción. En México, tan solo en el estado de Hidalgo, se estima una producción anual de más de 25,000 toneladas de residuos de *Pinus montezumae* derivados de actividades de aserrado y transformación primaria (Flores-López et al., 2020).

Apesar de su abundancia y bajo costo, su implementación como componente de mezclas cementantes enfrenta desafíos técnicos importantes, como su alta higroscopicidad, escasa estabilidad dimensional, y limitada adherencia con matrices minerales (Ramírez & Díaz, 2019; Ghafor et al., 2021).

Diversos estudios han identificado que el uso directo de aserrín sin pretratamiento puede ocasionar baja cohesión interna, aumento en la absorción de agua, y debilitamiento estructural, lo que restringe su aplicabilidad en elementos constructivos durables (Gómez-Pulido et al., 2020). Esto ha motivado la



búsqueda de estrategias que modifiquen su comportamiento superficial y mejoren su compatibilidad con materiales inorgánicos como el cemento o la cal.

Tratamientos químicos previos (álcalis y óxidos metálicos)

Una de las estrategias más comunes para mejorar la interacción del aserrín con matrices cementantes es el tratamiento alcalino, particularmente con soluciones de hidróxido de sodio (NaOH). Esta técnica busca eliminar parcialmente lignina, hemicelulosa y otros componentes amorfos, permitiendo una mayor exposición de la celulosa cristalina (Zhang et al., 2021). Al aumentar la porosidad, se mejora el anclaje fisicoquímico del residuo en la matriz (Singh et al., 2019). Sin embargo, concentraciones superiores al 5 % de NaOH pueden degradar la estructura fibrilar, debilitando el material tratado (Mansour et al., 2014), por lo que el diseño del tratamiento debe considerar este equilibrio.

Más recientemente, se ha comenzado a explorar la impregnación con óxidos metálicos como técnica de funcionalización superficial. En particular, el óxido de aluminio (Al_2O_3) ha demostrado beneficios notables: favorece la adhesión superficial al generar enlaces con grupos hidroxilo de la celulosa, mejora la resistencia a la humedad al reducir la energía superficial del aserrín, y contribuye a una mayor estabilidad térmica del compuesto (Li et al., 2020).

El Al_2O_3 fue elegido en este estudio por su bajo costo, disponibilidad comercial y biocompatibilidad, además de mostrar mejores resultados que otros óxidos como SiO_2 o TiO_2 en aplicaciones con residuos vegetales (Zhao et al., 2024).

Experiencias regionales y brechas de investigación

A nivel internacional, se han reportado avances importantes. En el sudeste asiático, Roslan et al. (2020) desarrollaron bloques ligeros a partir de aserrín de palma, logrando una reducción del 25 % en peso y mejoras térmicas sin afectar la trabajabilidad. En India, Singh et al. (2019) lograron una mejora del 18 % en cohesión al tratar el aserrín con NaOH. En Europa, Hughes y Ferreiro (2018) analizaron fibras tratadas con álcalis y aditivos como meta caolín, obteniendo mejoras en su integración con matrices geo poliméricas.

En contraste, la literatura en América Latina sigue siendo limitada. Ortega et al. (2022) y Farias et al. (2023) documentan resultados prometedores al aplicar tratamientos químicos a residuos vegetales para uso en morteros ecológicos. Sin embargo, la mayoría de los estudios mexicanos —como los de



Ramírez y Díaz (2019)— se enfocan en fibras naturales sin pretratamiento, lo que ha arrojado resultados limitados en cuanto a durabilidad, adherencia y resistencia mecánica. Este vacío técnico impide aún el escalamiento de soluciones basadas en residuos como el aserrín de *Pinus montezumae*. Además, otros métodos como la carbonización térmica han mostrado mejoras en estabilidad dimensional, pero provocan una reducción crítica en la cohesión interna del residuo (Zulkifli et al., 2021). También se han evaluado tratamientos con ácidos minerales (HCl, H₂SO₄), pero estos generan una degradación acelerada de la matriz celulósica, disminuyendo drásticamente la resistencia del compuesto (Mansour et al., 2014).

Bases normativas y tecnológicas para el estudio

La aplicabilidad técnica del aserrín tratado en compuestos cementantes debe evaluarse con base en normas como la ASTM D1037 (para paneles lignocelulósicos), la ASTM C140 (para resistencia y absorción de unidades de mampostería) y la norma mexicana NMX-C-414 (para agregados no convencionales). Estudios recientes (Hassan et al., 2022) subrayan que el éxito en propuestas de innovación con residuos depende no solo de la caracterización morfológica, sino también de protocolos experimentales reproducibles, que incluyan análisis comparativos y estandarización de variables.

Conexión con la hipótesis del presente estudio

Estudios previos (Li et al., 2020; Zhang et al., 2021) respaldan que la combinación de tratamientos alcalinos con funcionalización por óxidos metálicos puede mejorar la adherencia, estabilidad y compatibilidad del aserrín con matrices minerales. Sin embargo, ninguno de estos estudios ha aplicado esta estrategia combinada en aserrín de *Pinus montezumae* para su uso como reemplazo parcial de agregado fino en morteros o bloques cementantes, ni ha incorporado una caracterización integral que combine análisis SEM con procesamiento digital cuantitativo. Este trabajo busca cubrir dicha brecha, proponiendo una metodología replicable con potencial técnico y ambiental.



METODOLOGÍA

Diseño experimental

Se adoptó un diseño experimental de tipo exploratorio-comparativo, con enfoque cuantitativo, orientado a evaluar el comportamiento físico-mecánico y morfológico de mezclas cementantes que incorporan aserrín tratado químicamente como reemplazo parcial del agregado fino.

Se establecieron tres proporciones de sustitución del agregado fino: 10 %, 20 % y 30 %, además de una mezcla patrón sin aserrín utilizada como grupo control. Adicionalmente, se evaluó el impacto de dos tratamientos químicos secuenciales sobre la morfología del aserrín: sin tratamiento, tratamiento con NaOH, y tratamiento con NaOH + Al₂O₃.

La variable independiente fue el tipo de tratamiento aplicado al aserrín y su proporción en la mezcla.

Las variables dependientes incluyeron: resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad aparente, tamaño de poro, grado de cobertura superficial y rugosidad morfológica.

Las muestras se organizaron en tres grupos experimentales con tres réplicas por condición (n = 3) para garantizar confiabilidad estadística preliminar. El análisis de datos se realizó de manera descriptiva; no se aplicaron pruebas de tipo inferencial en esta fase.

Materiales

- Cemento Portland CPC 30R: seleccionado por su disponibilidad y comportamiento probado en mezclas convencionales.
- Cal hidratada tipo NMX-C-021-ONNCCE: incorporada como estabilizante para mejorar cohesión y reducir retracción por secado.
- Aserrín de *Pinus montezumae*: recolectado en un aserradero del estado de Hidalgo. Se cribó a <0.5 mm y se utilizó seco.
- Agua potable: conforme a la norma NMX-AA-003-1980, en proporción ajustada a cada mezcla.
- Hidróxido de sodio (NaOH, ≥97 % pureza, grado reactivo): utilizado al 5 % m/v para el tratamiento alcalino del aserrín.
- Óxido de aluminio (Al₂O₃, nano particulado, pureza 99.5 %): disuelto al 2 % en etanol absoluto.

- Etanol (C_2H_6O , 99.5 %): medio dispersante para el proceso de modificación química superficial.

Preparación y tratamiento de las muestras

El aserrín fue recolectado en un aserradero del estado de Hidalgo y corresponde a desechos de *Pinus montezumae*. Tras su recolección, el material fue tamizado a un tamaño <0.5 mm para asegurar homogeneidad y posteriormente secado en estufa a 80 °C durante 24 h para eliminar humedad residual.

El tratamiento alcalino consistió en la inmersión del aserrín en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5 % (m/v), bajo agitación constante a 80 °C durante 2 horas. Este procedimiento buscó eliminar lignina y hemicelulosa parcialmente, con base en protocolos previos validados en la literatura (Ghafor et al., 2021; Singh et al., 2019).

Finalizado el tratamiento, las muestras fueron lavadas repetidamente con agua destilada hasta alcanzar pH neutro (medido con tira indicadora), y posteriormente secadas nuevamente a 80 °C por 24 horas.

Para la funcionalización, se sumergieron las muestras alcalinizadas en una disolución etanólica al 2 % de óxido de aluminio (Al_2O_3) en condiciones ambientales controladas (23 ± 2 °C) durante 4 horas. El etanol actuó como medio dispersante y facilitador de adherencia superficial. Finalmente, las muestras fueron calentadas a 80 °C sobre una parrilla magnética con agitación continua a 800 rpm hasta lograr la evaporación total del etanol, permitiendo la deposición del óxido sobre la superficie del aserrín, posteriormente fueron almacenadas en recipientes herméticos.

Las mezclas se elaboraron con una relación agua/cemento que ha ido ajustada para cada contenido de aserrín, procurando mantener la trabajabilidad. Se utilizaron moldes metálicos para fabricar especímenes de $20 \times 10 \times 7$ cm. Cada muestra fue compactada manualmente con una presión constante y curada durante 28 días en cámara húmeda (temperatura de 25 ± 2 °C y 95% de humedad relativa).

Caracterización morfológica

La caracterización se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) con un equipo JEOL JSM-6380, operado a 5 kV con recubrimiento previo de oro (Au) de 10 nm mediante sputtering. Se



obtuvieron imágenes de alta resolución con detectores SED (Secondary Electron Detector) para topografía y BED-C (Backscattered Electron Detector – Compositional) para contraste de fases.

Se seleccionaron 30 puntos de medición por muestra (10 por réplica) para analizar el tamaño de poro, densidad de partículas modificadas superficialmente, rugosidad y uniformidad superficial. El procesamiento digital se efectuó con ImageJ v1.54d, utilizando los complementos “Analyze Particles” y “Fractal BoxCount” para cuantificación.

Se calcularon promedios de tamaño de poro, área modificada en μm^2 , porcentaje de cobertura por partícula y desviación estándar.

Los datos morfológicos obtenidos se interpretaron en función de su aplicabilidad potencial conforme a los criterios establecidos en las siguientes normas:

- ASTM D1037: Métodos de prueba para propiedades físicas y mecánicas de paneles lignocelulósicos.
- ASTM C140/C140M-22: Ensayos para absorción, densidad y volumen en unidades de mampostería.
- ASTM E96/E96M: Determinación de transmisión de vapor de agua (para etapas posteriores).
- NMX-C-414-ONNCCE-2013: Requisitos para materiales de construcción con agregados no convencionales.

Ensayos realizados

- Resistencia a la compresión: determinada conforme a la norma ASTM C140, utilizando una prensa hidráulica a velocidad constante.
- Absorción de agua: mediante el método de inmersión total establecido en la NMX-C-037.
- Densidad aparente y porosidad: se calculó por método gravimétrico y confirmación digital con software ImageJ.
- Análisis morfológico: se aplicó microscopía electrónica de barrido (SEM) a fragmentos de los especímenes para observar la interacción entre matriz y partícula.



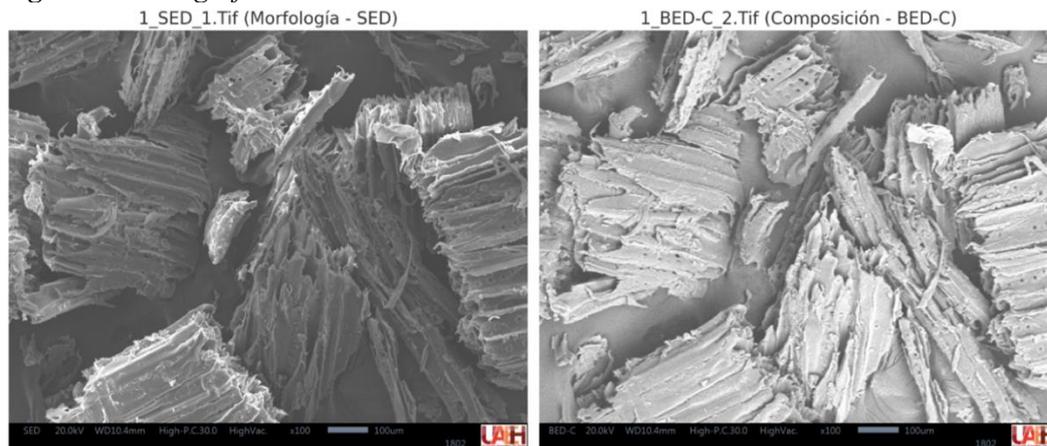
RESULTADOS

Análisis morfológico

Los análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) revelaron una transformación sustancial de la microestructura del aserrín de *Pinus montezumae* tras los tratamientos aplicados. Las muestras alcalinizadas presentaron una mayor apertura de poros y una eliminación parcial de componentes amorfos como la lignina y la hemicelulosa. La impregnación con óxido de aluminio (Al_2O_3) produjo una cobertura superficial heterogénea, observándose aglomerados dispersos sobre la matriz celulósica.

El análisis de las muestras revela que la estructura del aserrín sin tratar es densa y cerrada (Figura 1). Las fibras se encuentran aún recubiertas por lignina y hemicelulosa, lo cual limita la exposición de superficies activas y disminuye el potencial de interacción con otros compuestos.

Figura 1. *Micrografías SEM del aserrín sin tratamiento*

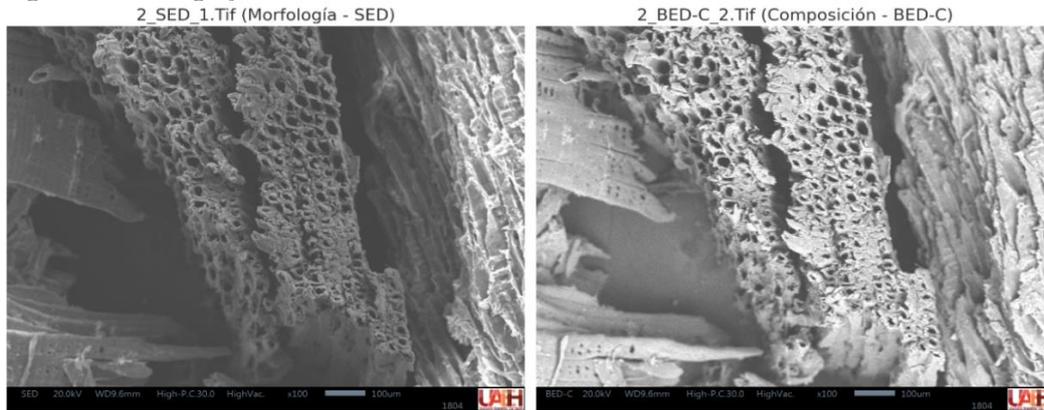


Fuente: *Elaboración propia con asistencias de los técnicos del laboratorio de la U.A.E.H. en Apan, Hidalgo.*

Nota: Imagen SEM a 100× del aserrín natural. Se observa una superficie compacta, con fibras agrupadas y baja porosidad.

El tratamiento alcalino con NaOH provocó la remoción parcial de la hemicelulosa y lignina presentes en el aserrín, lo que permitió abrir la estructura interna del aserrín (Figura 2). Esta apertura favorece una mayor capacidad del material para absorber compuestos y facilita la formación de enlaces con matrices cementantes.

Figura 2. Micrografías del aserrín tratado con NaOH

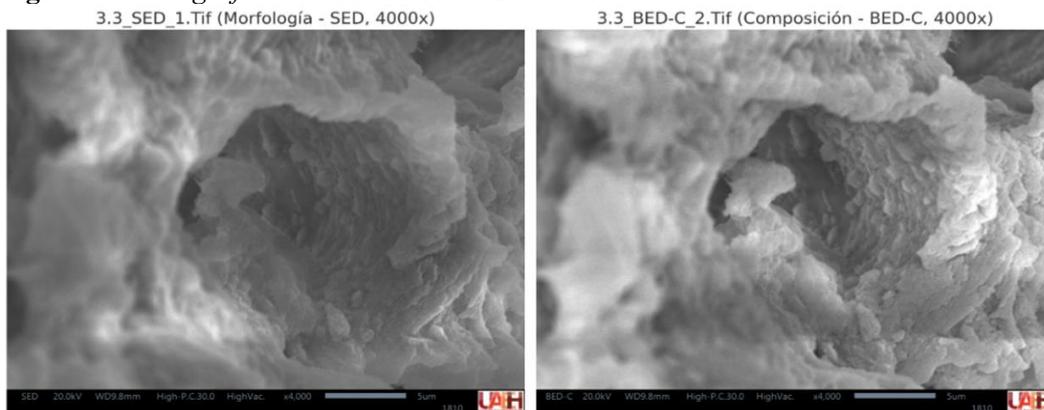


Fuente: Elaboración propia con asistencias de los técnicos del laboratorio de la U.A.E.H. en Apan, Hidalgo.

Nota: Imagen SEM a 100× del aserrín tratado con NaOH. Se observan fibras parcialmente expuestas, superficie rugosa y fragmentación de matriz lignocelulósica.

El tratamiento con óxido de aluminio produjo una deposición superficial heterogénea sobre las muestras tratadas (Figura 3), pero claramente adherida a las zonas con mayor apertura de poros. Este comportamiento sugiere que el pretratamiento alcalino con NaOH fue efectivo para crear una estructura propicia para la fijación del Al_2O_3 .

Figura 3. Micrografías del aserrín con Al_2O_3 adherido



Fuente: Elaboración propia con asistencias de los técnicos del laboratorio de la U.A.E.H. en Apan, Hidalgo.

Nota: Imagen SEM a 4000×. Se observa la presencia de partículas de óxido de aluminio (Al_2O_3) fijadas sobre zonas porosas del aserrín.

Se presentan los parámetros morfológicos observados en las muestras de aserrín bajo diferentes tratamientos químicos (Tabla 1). Se comparan valores como el tamaño promedio de poro, la cobertura

de partículas, la densidad aparente y la rugosidad superficial, con el fin de evaluar los efectos del tratamiento alcalino con NaOH y la posterior impregnación con óxido de aluminio (Al_2O_3).

Tabla 1. *Parámetros morfológicos comparativos entre tratamientos*

Parámetro	Sin tratamiento	NaOH (solo)	NaOH + Al_2O_3
Tamaño promedio de poro (μm)	9.2	15.6	17.4
Cobertura de partículas (%)	8.7	—	61.8
Densidad aparente (g/cm^3)	0.28	0.24	0.21
Rugosidad observada (cualitativa)	Baja	Media	Alta

Fuente: elaboración propia con base en resultados de SEM e ImageJ v1.54d.

Resultados cuantitativos

El tamaño de poro promedio aumentó de $9.2 \mu\text{m}$ en la muestra control a $15.6 \mu\text{m}$ en el tratamiento con NaOH y $17.4 \mu\text{m}$ en la muestra con Al_2O_3 . La cobertura superficial de partículas de Al_2O_3 fue en promedio del 61.8 % en superficie químicamente modificada, frente a solo 8.7 % en la muestra sin tratamiento.

La densidad aparente del aserrín tratado disminuyó de $0.28 \text{ g}/\text{cm}^3$ a $0.21 \text{ g}/\text{cm}^3$, lo que sugiere una estructura más abierta y ligera.

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos en cuanto a profundidad de poro, homogeneidad superficial, adhesión de aditivos, porosidad visible, y su aplicabilidad para usos no estructurales.

Tabla 2. *Comparación de propiedades físicas promedio según tratamiento aplicado*

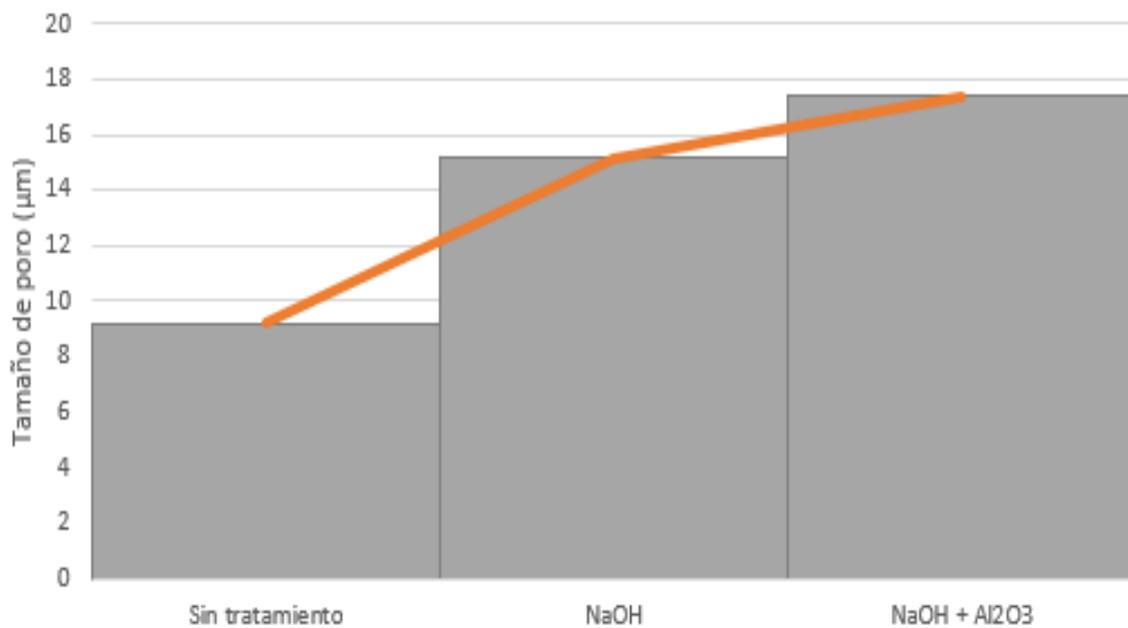
Criterio evaluado	Requisito (ASTM/NMX)	normativo	Resultado obtenido	Cumple
Profundidad de poro (visual estimada)	No definido		Moderada	-
Homogeneidad de superficie	Uniformidad parcial		Parcial	si
Adhesión de aditivos	Adhesión observable	superficial	Alta	si
Porosidad visible (comparación SEM)	Consistencia visual		Adecuada	si
Aplicabilidad para uso no estructural	Integración ligantes	física con	Viable	si

Fuente: elaboración propia a partir de observaciones SEM y criterios tomados de ASTM D1037, ASTM C140 y NMX-C-414.



El comportamiento del tamaño de poro según el tipo de tratamiento aplicado se representa en la figura 4. Se observa una tendencia creciente en la apertura de poros, desde la muestra sin tratamiento hasta la muestra tratada con NaOH y posteriormente impregnada con Al₂O₃, lo cual coincide con los datos presentados en la Tabla 1.

Figura 4. Histograma de distribución de tamaño de poro por tipo de tratamiento



Fuente: elaboración propia a partir de análisis SEM

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Ghafor et al. (2021), quienes señalaron un incremento en la compatibilidad hidráulica tras la activación alcalina. Sin embargo, se observó una distribución no uniforme del Al₂O₃, lo cual podría limitar la estabilidad térmica si no se optimiza la técnica de impregnación.

Resultados físico-mecánicos

El análisis físico-mecánico se realizó sobre mezclas con 0 %, 10 %, 20 % y 30 % de reemplazo del agregado fino por aserrín tratado. Los resultados se compararon frente a la mezcla patrón, utilizando la resistencia a compresión como variable principal, y la densidad y absorción como parámetros de soporte (Tabla 3). Los valores obtenidos fueron:

- **Resistencia a la compresión.** Disminuyó con el aumento del contenido de aserrín, manteniéndose dentro del rango aceptable hasta el 20 %, en concordancia con los límites técnicos para

elementos no estructurales definidos por ONNCCE. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Zhang et al. (2021) y Farias et al. (2023).

- **Densidad aparente.** Se redujo de 1.88 g/cm³ (control) a 1.58 g/cm³ (30 % aserrín). Esta disminución representa una ventaja en construcciones ligeras o elementos prefabricados móviles.
- **Absorción de agua.** Se incrementó de 12.1 % (control) a 14.2 % y 15.8 % para las mezclas con 10 % y 20 % de aserrín, respectivamente. La mezcla con 30 % superó el 20 %, lo cual indica una mayor vulnerabilidad a la humedad y a la degradación por ciclos de secado-humedad.
- **Análisis morfológico en mezclas.** Las imágenes SEM de los especímenes mostraron una mejor integración entre matriz y partícula en las mezclas con 10 % y 20 % de aserrín. En la mezcla con 30 %, se observaron vacíos no ligados, pérdida de cohesión y una morfología más frágil.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas según porcentaje de aserrín tratado

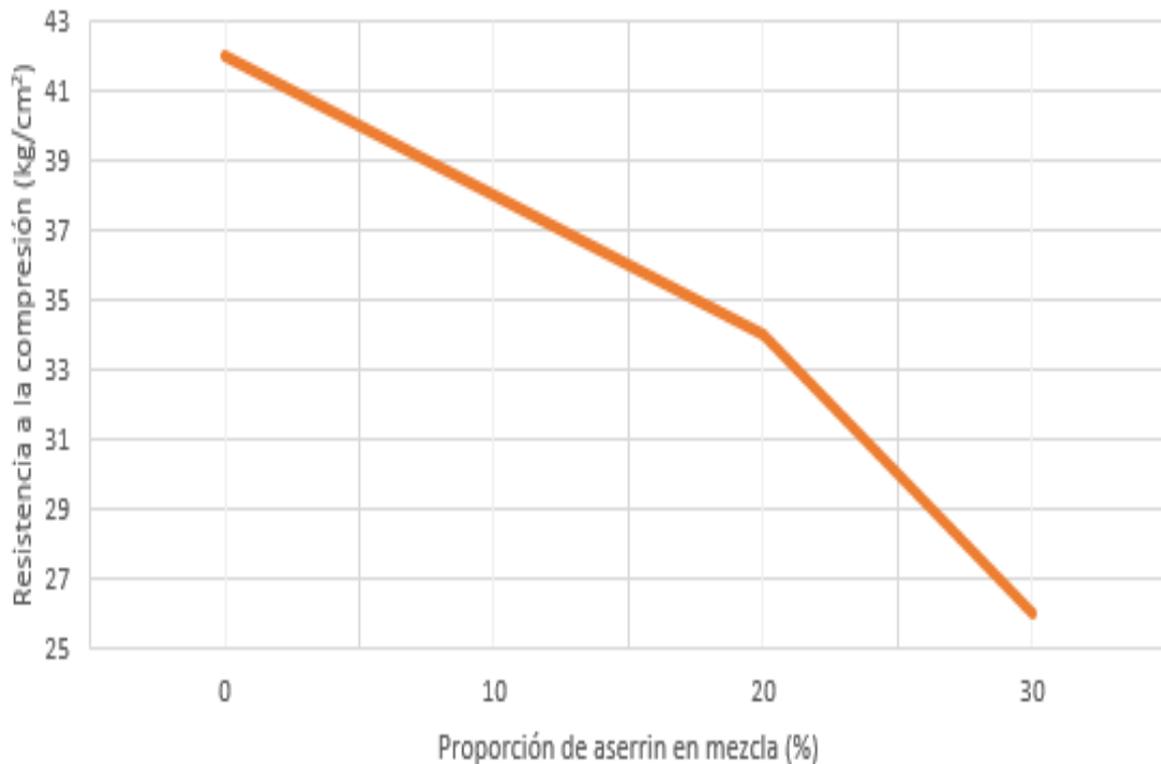
Porcentaje de aserrín tratado (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Densidad aparente (g/cm ³)	Absorción de agua (%)
0 (Control)	42	1.88	12.1
10	38	1.74	14.2
20	34	1.66	15.8
30	26	1.58	20.4

Fuente.: Elaboración propia con base en ensayos físicos y análisis gravimétrico.

La Figura 5 muestra la relación inversa entre el porcentaje de aserrín tratado incorporado en la mezcla y la resistencia a la compresión obtenida. Se observa una disminución progresiva de la resistencia conforme aumenta la proporción de aserrín, lo cual sugiere que su uso debe mantenerse dentro de un límite óptimo para garantizar la viabilidad mecánica del compuesto.



Figura 5. Relación entre porcentaje de aserrín tratado y la resistencia a la compresión promedio obtenida



Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN

El tratamiento secuencial del aserrín con hidróxido de sodio (NaOH) y óxido de aluminio (Al_2O_3) generó efectos morfológicos notables, evidenciados en el aumento del tamaño de poro, mayor rugosidad y una cobertura superficial modificada significativa. Estos cambios, observados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y cuantificados con ImageJ, indican una activación efectiva del residuo lignocelulósico, que mejora su integración en matrices cementantes.

Nuestros resultados muestran que el tamaño de poro promedio se incrementó en un 89 % respecto a la muestra sin tratamiento, alcanzando $17.4 \mu m$ tras la funcionalización con Al_2O_3 . Este hallazgo es consistente con lo reportado por Singh et al. (2019), quienes observaron incrementos similares en fibras vegetales activadas alcalinamente, y por Li et al. (2020), quienes demostraron que el uso de óxidos metálicos mejora la interacción interfacial entre fibras y matrices. A diferencia de estos estudios, sin embargo, el presente trabajo aplica un tratamiento doble y analiza cuantitativamente su efecto morfológico, lo que representa un avance metodológico significativo.

La cobertura superficial modificada observada (61.8 %) también supera los valores reportados en estudios como el de Kim et al. (2022), quienes trabajaron con fibras de celulosa modificadas con sílice, alcanzando valores de entre 40–50 %. Esto sugiere que el uso de Al_2O_3 en medio etanólico es más eficiente para la adhesión superficial en residuos con alta porosidad inducida por tratamiento alcalino.

Desde el punto de vista físico-mecánico, las mezclas con 10 % y 20 % de aserrín tratado mantuvieron una resistencia a compresión mayor a 34 kg/cm^2 , valor suficiente para aplicaciones no estructurales según la norma NMX-C-414-ONNCCE y estudios previos como el de Roslan et al. (2020), que documentaron valores similares en bloques a base de residuos de palma.

La ligera caída en resistencia observada en mezclas con 30 % de aserrín es coherente con lo señalado por Ghafor et al. (2021), quienes advierten sobre la pérdida de cohesión cuando se excede el contenido de agregados vegetales sin reforzamiento adicional.

El comportamiento de la densidad aparente mostró una tendencia decreciente, alcanzando una reducción del 11 % respecto a la mezcla control, lo cual representa una ventaja en la fabricación de componentes prefabricados ligeros. Este hallazgo concuerda con lo documentado por Olaiya et al. (2023), quienes indican que una menor densidad es una propiedad deseable para sistemas de montaje modular o viviendas de rápida construcción. No obstante, se debe considerar que dicha reducción también se acompaña de una mayor absorción de agua, como también lo señala Zulkifli et al. (2021), lo cual obliga a considerar tratamientos hidrofóbicos complementarios si se desea utilizar el material en ambientes húmedos o exteriores.

En cuanto a la adherencia entre el aserrín químicamente modificado y la matriz cementante, las micrografías SEM muestran una integración mucho más compacta y continua en las muestras con 10 % y 20 % de aserrín tratado, en comparación con las mezclas con aserrín sin tratar o en proporciones elevadas. Esta observación es clave, ya que estudios como el de Hughes y Ferreiro (2018) subrayan que la calidad de la interfase fibra-matriz es determinante en la durabilidad de materiales compuestos.

Adicionalmente, el uso de ImageJ para análisis cuantitativo morfológico, tal como lo aplicaron Chowdhury et al. (2023), aporta un valor metodológico significativo, permitiendo replicabilidad y



comparación entre estudios. En ese sentido, el presente trabajo también se alinea con los principios propuestos por Hassan et al. (2022) sobre la necesidad de diseñar estudios con métricas estandarizadas y variables controladas para fortalecer la investigación en materiales alternativos.

Finalmente, debe destacarse que este estudio no solo se limita a reproducir hallazgos existentes, sino que introduce una especie endémica poco estudiada (*Pinus montezumae*) y demuestra, con datos empíricos, su potencial técnico cuando se somete a un protocolo de activación química doble. Esta contribución es especialmente valiosa en el contexto latinoamericano, donde la investigación aplicada sobre residuos locales sigue siendo escasa (Ortega et al., 2022; Fernández & Lima, 2024).

CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación permiten establecer que el aserrín de *Pinus montezumae*, al ser sometido a un tratamiento químico secuencial con hidróxido de sodio (NaOH) e impregnación con óxido de aluminio (Al_2O_3), adquiere propiedades morfológicas y físico-mecánicas adecuadas para su integración como reemplazo parcial del agregado fino en compuestos cementantes no estructurales.

Esta mejora se traduce en un aumento del tamaño de poro, una mayor rugosidad y una cobertura superficial modificada efectiva, todos ellos factores clave para la adherencia con la matriz cementante.

Desde el punto de vista técnico, las mezclas con hasta un 20 % de aserrín tratado demostraron un equilibrio positivo entre ligereza, resistencia mecánica y absorción de agua, cumpliendo con los criterios establecidos por normas ONNCCE y ASTM para aplicaciones no estructurales.

Este desempeño es comparable, e incluso superior en algunos casos, al reportado por estudios previos con otros residuos lignocelulósicos, lo que valida tanto el protocolo de tratamiento como la especie utilizada.

Además, este estudio aporta valor metodológico al integrar análisis SEM con procesamiento digital cuantitativo (ImageJ), ofreciendo una caracterización objetiva y replicable. Este enfoque fortalece la calidad de la evidencia presentada y establece un precedente para futuras investigaciones sobre materiales compuestos sostenibles.

En términos ambientales y sociales, la reutilización del aserrín tratado representa una vía prometedora para reducir la demanda de agregados vírgenes, disminuir el impacto ambiental de la industria maderera y generar soluciones constructivas de bajo costo y alta accesibilidad, especialmente en



contextos de vivienda social, autoconstrucción o emergencia habitacional. Sin embargo, deben reconocerse ciertas limitaciones que condicionan la aplicabilidad inmediata del material: la falta de ensayos de durabilidad a largo plazo, la dispersión heterogénea del Al_2O_3 observada en algunas muestras, y la necesidad de validar el comportamiento del material bajo condiciones reales de obra.

Estas cuestiones abren nuevas líneas de investigación que deberán considerar factores como el comportamiento térmico, acústico y frente al fuego, así como estudios de ciclo de vida (LCA) para cuantificar el impacto ambiental global del material.

En síntesis, este trabajo no solo confirma la viabilidad técnica del aserrín tratado como componente de mezclas cementantes, sino que establece las bases para una propuesta sostenible, replicable y adaptable a contextos latinoamericanos. Sus resultados invitan a seguir explorando el potencial de los residuos vegetales como materiales funcionales dentro de una industria de la construcción más responsable.

Consideraciones finales y líneas de continuidad

Aunque los resultados obtenidos son alentadores, existen aspectos que requieren atención para validar la aplicabilidad del material propuesto en escenarios reales de construcción.

Limitaciones del estudio

- Condiciones de laboratorio: Todos los tratamientos y ensayos fueron realizados bajo condiciones controladas (temperatura, humedad, presión). Esto garantiza reproducibilidad, pero limita la extrapolación a entornos variables.
- Durabilidad a largo plazo: No se incluyeron pruebas de envejecimiento acelerado, exposición a ciclos de humedad-sequedad o agentes agresivos. Estos ensayos son fundamentales para evaluar la vida útil real del material.
- Comportamiento térmico y acústico: No se analizaron parámetros como conductividad térmica, aislación acústica ni resistencia al fuego, factores claves en aplicaciones habitacionales.
- Distribución del Al_2O_3 : Se observó una cierta dispersión heterogénea del modificador químico sobre el aserrín, lo que podría comprometer la uniformidad del desempeño si no se optimiza la técnica de impregnación.



Aplicaciones técnicas potenciales

Pese a estas limitaciones, el material desarrollado presenta un alto potencial para usos concretos:

- Bloques de cerramiento no portantes, paneles divisorios y módulos ligeros prefabricados.
- Viviendas sociales y autoconstrucción rural, donde el bajo costo y la facilidad de fabricación son prioritarios.
- Elementos constructivos móviles o de rápida instalación en contextos de emergencia o reconstrucción post-desastre.

Estas aplicaciones se beneficiarían de un material más ligero que el concreto tradicional, con buena trabajabilidad y costos reducidos gracias al aprovechamiento de residuos.

Recomendaciones para futuras investigaciones

- Pruebas de durabilidad: Incorporar ensayos según normas ASTM D559 (ciclos de humedad), E119 (resistencia al fuego) y E96 (transmisión de vapor de agua).
- Análisis de ciclo de vida (LCA): Evaluar el impacto ambiental total del material, incluyendo extracción, tratamiento, fabricación, uso y disposición final.
- Optimización del tratamiento: Experimentar con distintas concentraciones de NaOH y Al₂O₃, así como otros óxidos (TiO₂, ZnO) o compuestos híbridos.
- Escalado industrial: Validar la viabilidad de la propuesta en entornos semiindustriales, con mezcla por lotes, curado al aire libre y aplicación real en obra.

Proyección regional

El enfoque de este estudio —centrado en una especie endémica, una metodología replicable y un problema regional real— representa un paso significativo hacia una construcción más responsable y descentralizada. Su integración en políticas públicas, programas de vivienda y estrategias comunitarias podría consolidarse mediante alianzas entre universidades, municipios y actores productivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al personal técnico del laboratorio por las facilidades otorgadas para la realización de los ensayos, así como a quienes colaboraron en el procesamiento y análisis de los resultados experimentales.



Este trabajo fue desarrollado sin financiamiento externo, como parte de una iniciativa académica independiente.

Declaración de no existencia de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionado con la publicación de este artículo. Ninguna institución, empresa o entidad ha influido en el diseño, desarrollo, análisis o redacción del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C140/C140M-22. (2022). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*. ASTM International.

ASTM C518-17. (2017). *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*. ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/C0518-17>

ASTM D1037-12. (2012). *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*. ASTM International.

ASTM D559-03. (2003). *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*. ASTM International.

ASTM E119-22. (2022). *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*. ASTM International.

ASTM E90-09(2016). (2016). *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements*. ASTM International.

ASTM E96/E96M-16. (2016). *Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM International.

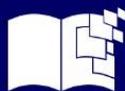
Chowdhury, S., Alam, M. S., & Roy, P. (2023). Dual-treatment strategies for lignocellulosic residues in eco-concrete applications. *Sustainable Construction Materials Journal*, 18(2), 113–126.

Farias, M., Carrillo, C., & Mendoza, P. (2023). Compatibilidad de residuos lignocelulósicos tratados en mezclas con cemento y cal. *Materiales de Construcción*, 73(349), 7–18.

Fernández, J., & Lima, R. (2024). Replicabilidad metodológica en compuestos bioinspirados. *Materiales Avanzados Latinoamericanos*, 14(2), 45–59.



- Flores-López, C. A., González-Rodríguez, H., & Jiménez-Pérez, J. (2020). Propiedades físicas de la madera de *Pinus montezumae* en el altiplano central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 128–145. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.752>
- Ghafor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2021). Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 273, 121752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121752>
- GlobalABC – Global Alliance for Buildings and Construction. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. United Nations Environment Programme. <https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- Gómez-Pulido, B., Medina, R., & Acuña, J. (2020). Uso de fibras vegetales en mezclas cementantes. *Revista Iberoamericana de Ingeniería*, 12(3), 45–52.
- Hassan, A., Yusof, N. A., & Mahmud, H. B. (2022). Experimental design and variability control in sustainable composite research. *Journal of Cleaner Construction*, 8(1), 51–62.
- Hughes, R., & Ferreiro, P. (2018). Alkali-treated natural fibres for geopolymer and cementitious matrices. *Journal of Building Materials Research*, 25(2), 88–94.
- Kim, J., Han, D., & Lee, H. (2022). SEM characterization of cellulose-silica composites for cementitious materials. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 13(1), 71–84.
- Li, C., Zhang, Y., & Wu, H. (2020). Effects of aluminum oxide nanoparticles on thermal stability and mechanical properties of wood-based composites. *Construction and Building Materials*, 244, 118290.
- Li, Y., Fu, Q., Yu, S., Yan, M., & Berglund, L. A. (2020). Strong and superhydrophobic wood with aligned cellulose nanofibers as a waterproof structural material. *Construction and Building Materials*, 258, 121752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121752>
- Mansour, M. B., Bouazizi, M. L., & Ksouri, I. (2014). Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester–Alfa fibers. *Mechanics & Industry*, 15(1), 69–73. <https://doi.org/10.1051/meca/2013082>



- NMX-C-414-ONNCCE-2013. (2013). *Industria de la construcción – Agregados ligeros – Especificaciones*. ONNCCE.
- Olaiya, B. C., Awoyera, P. O., Akinmusuru, J. O., & Adesina, A. (2023). Utilization of sawdust composites in construction—A review. *SN Applied Sciences*, 5, 140. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05361-4>
- Ortega, D., Salas, A., & Pérez, M. (2022). Evaluación de residuos vegetales tratados químicamente para uso en morteros ecológicos. *Ciencia y Construcción*, 5(1), 33–41.
- Ramírez, L., & Díaz, C. (2019). Evaluación del desempeño de fibras vegetales sin tratamiento en concretos de baja resistencia. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*, 18(2), 55–63.
- Roslan, A. M., Jamaludin, S. B., & Shafie, M. (2020). Lightweight sawdust concrete blocks for non-structural use: Thermal and workability analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020089.
- Singh, V., Agarwal, S., & Mehta, R. (2019). Enhanced adhesion of NaOH-treated sawdust in composite panels. *Materials Today: Proceedings*, 11(1), 456–462.
- Zhang, Q., Liu, B., & Chen, H. (2021). Alkali treatment of sawdust for enhanced performance in composite materials. *Construction and Building Materials*, 273, 121752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121752>
- Zhao, Y., Lin, S., & Wu, Z. (2024). Recent developments in bio-based additives for cementitious composites. *Sustainable Materials and Technologies*, 34, e00589.
- Zulkifli, R., Ab Ghani, A. F., & Mohd Nor, M. J. (2021). Effects of carbonization on the mechanical integrity of sawdust in green composite bricks. *Environmental Materials Journal*, 12(2), 79–86.

