

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i13edespmayo.0191>

AISLANTE TÉRMICO Y ACÚSTICO EN REVESTIMIENTOS DE MÓDULOS PREFABRICADOS CON EL USO DE UN MORTERO GEOPOLIMÉRICO

THERMAL AND ACOUSTIC INSULATION IN PREFABRICATED MODULE COATINGS WITH THE USE OF A GEOPOLIMER MORTAR

Solís-Yépez Odalis Isabel ¹; Salazar-Miranda Dennis Alejandro ²;
Andrade-Valle Alexis Iván ³; Castillo Tito Oswaldo ⁴

¹ Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Correo: odalis.solis@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7714-8714>

² Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Correo: dennis.salazar@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6243-1039>

³ Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Correo: alexis.andrade@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1543-4381>

⁴ Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Correo: tcastillo@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3472-3456>

Resumen

La ingeniería civil emplea cada vez más la prefabricación por sus ventajas sobre la construcción tradicional: rapidez, menores costos y confort estético, térmico y acústico. El uso de materiales aislantes como la piedra pómez, presente también en la formación de geopolímeros, puede lograr un buen aislamiento térmico y acústico, siendo una alternativa al mortero tradicional. Esta investigación analiza el comportamiento térmico y acústico del revestimiento de geopolímero a base de piedra pómez en paneles modulares prefabricados de poliestireno en comparación con el mortero tradicional. Se han construido dos cajas que simulan una habitación a pequeña escala, recubiertas con geopolímero de piedra pómez y mortero tradicional. En su interior se han colocado sensores conectados a un Arduino básico que permiten recopilar lecturas de temperatura para identificar la conducta térmica de cada caja. Para el aislamiento acústico se utilizó un sonómetro que proporciona valores del nivel de presión sonora (Ln) para determinar el índice de reducción de sonido (SRI). Tras el análisis acústico y térmico se concluye que los geopolímeros tienen un mejor comportamiento que el mortero tradicional.

Palabras clave: Geopolimero, aislante térmico, aislante acústico, módulos prefabricados, piedra pómez.

Abstract

Civil engineering increasingly uses prefabrication due to its advantages over traditional construction: speed, lower costs and aesthetic, thermal and acoustic comfort. The use of insulating materials such as pumice, also present in the formation of geopolymers, can achieve good thermal and acoustic insulation, being an alternative to traditional mortar. This research analyzes the thermal and acoustic behavior of pumice-based geopolymer coating on prefabricated modular polystyrene panels compared to traditional mortar. Two boxes have been built that simulate a small-scale room, covered with pumice stone geopolymer and traditional mortar. Sensors connected to a basic Arduino have been placed inside that allow temperature readings to be collected to identify the thermal behavior of each box. For acoustic insulation, a sound level meter was used that provides values of the sound pressure level (Ln) to determine

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 08 de febrero de 2024.

Fecha de aceptación: 22 de abril de 2024.

Fecha de publicación: 06 de mayo de 2024.



the sound reduction index (SRI). After the acoustic and thermal analysis, it is concluded that geopolymers have better performance than traditional mortar.

Keywords: Geopolymer, thermal insulation, acoustic insulation, prefabricated modules, pumice stone.

1. Introducción

La ingeniería civil ha experimentado un cambio radical en los últimos años con la introducción de la prefabricación. Este método innovador consiste en la producción de elementos en instalaciones especializadas, para luego ser transportados y ensamblados en el sitio de la obra. (Montenegro et al., 2020). La construcción con módulos prefabricados representa una innovación en el sector, ya que permite una edificación rápida y eficiente sin necesidad de estructuras temporales. Esto se traduce en una reducción de costes operativos, un aumento significativo de la productividad y un mayor grado de durabilidad y sostenibilidad en las obras (Herrera et al., 2020). Se fabrican en un ambiente controlado, lo que las hace más eficientes, confiables y seguras. Además, son resistentes y duraderas. El material prefabricado brinda confort estético, térmico y acústico, el mismo que aísla la temperatura y el sonido, lo

que permite mantener una temperatura estable y un ambiente confortable sin un consumo energético excesivo. (Navacerrada et al., 2021). Los paneles modulares no solo sirven para construir paredes portantes livianas y sismo-resistentes, sino que también ofrecen un sistema termoacústico que mantiene una temperatura agradable y constante dentro del espacio, ahorrando energía. Además, su aislamiento acústico permite una efectiva separación entre ambientes. (Rodríguez D. & Moya J., 2022). La piedra pómez, material natural de origen ígneo, aporta beneficios al ser utilizada en morteros. Sus propiedades de aislante térmico y baja densidad la convierten en una opción ecológica para la construcción, mejorando el confort térmico y reduciendo el impacto ambiental. (Torres C. A. L., 2020); El polvo de piedra pómez, rico en aluminosilicatos, es un componente esencial para la formación de geopolímeros. Estos materiales inorgánicos, obtenidos

por la activación alcalina de la piedra pómez, se presentan como una alternativa innovadora al hormigón tradicional. (Mieles M. & Castillo J., 2022). Los geopolímeros son materiales inorgánicos con una estructura similar a la de los polímeros, pero formados por elementos inorgánicos como el aluminio y el silicio. Se obtienen a partir de la reacción química entre un material precursor rico en aluminosilicatos (como cenizas volantes o polvo de piedra pómez) y un activador alcalino. Esta reacción produce una estructura semicristalina con una larga cadena de unidades tetraédricas de aluminio y sílice, lo que les confiere propiedades únicas como alta resistencia mecánica, resistencia química y baja emisión de CO₂ en su producción. (Gutiérrez A., 2018). Los geopolímeros se presentan como una alternativa ventajosa al cemento Portland en diversas aplicaciones, sus propiedades y características finales, como la alta resistencia a la compresión, la baja retracción, el curado rápido o lento, la resistencia a los ácidos, la firmeza al fuego y la baja conductividad térmica, pueden modificarse a través

de la selección de materias primas y las condiciones de preparación de los materiales activados alcalinamente. (da Silva et al., 2023). Un material con propiedades aislantes térmicas y acústicas ofrece un doble beneficio. Por un lado, su baja conductividad de temperatura permite mantener una temperatura estable en el interior, aislando del clima exterior desfavorable. Por otro lado, su capacidad para absorber o reflejar las ondas sonoras reduce la transmisión de ruido, tanto hacia el interior como hacia el exterior del espacio que se desea proteger. (Castells X. E., 2012). Si bien la capacidad de aislamiento térmico de un material puede verse afectada por factores externos como la altitud y el clima, la tecnología moderna nos permite controlar y monitorizar este proceso de forma precisa. Un ejemplo de ello es un sistema de bajo costo que utiliza una placa Arduino como unidad central y sensores de temperatura y humedad para recopilar, analizar y visualizar datos en tiempo real. Este sistema de bajo costo ofrece una solución viable para controlar y optimizar el aislamiento térmico en edificios, lo que se traduce en un mayor confort

interior y un menor consumo de energía. En definitiva, la tecnología inteligente se perfila como una herramienta fundamental para la construcción del futuro, permitiendo un manejo más eficiente y sostenible de los recursos. (Velázquez O. 2023). La reducción acústica en un espacio habitable es crucial para controlar el ruido tanto exterior como interior. El sonido se transmite entre dos recintos: el emisor, donde se genera el sonido, y el receptor, donde se capta. La diferencia de nivel sonoro entre ambos se define como aislamiento acústico. Este depende de la fuente emisora, el aislamiento del paramento separador, los flancos y las condiciones acústicas del receptor. Es vital considerar estos parámetros para lograr un ambiente acústico confortable. (Parra P. & Ruiz M., 2018). La evaluación precisa del ruido exige un instrumento especializado: el sonómetro. Este dispositivo, con filtros que simulan el oído humano, captura el sonido y mide su intensidad en decibelios (dB), determinando el nivel de presión acústica. Además, analiza las frecuencias del sonido, permitiendo una evaluación completa del espectro sonoro y una

identificación precisa de las fuentes de ruido en un entorno específico. (Najarro P. & Ramírez G., 2022).

Se analizará el comportamiento térmico y acústico de un revestimiento de geopolímero a base de piedra pómez en paneles modulares o prefabricados, comparándolo con el mortero tradicional. La investigación busca determinar si este nuevo material ofrece mejores propiedades aislantes y acústicas que el mortero convencional.

2. Metodología

2.1 Población y muestra parafraseado

La investigación, de carácter experimental, se realizó con una población finita de dos cajas. Estas cajas se construyeron con módulos prefabricados de poliestireno de 30x30x30 cm y un espesor promedio de 6 cm.

La cantidad de muestras para análisis térmico y acústico varía según el contexto. Para el análisis térmico, el clima de la zona determina la cantidad de muestras necesarias para determinar las propiedades térmicas de las

habitaciones. En cambio, el análisis acústico depende del tamaño de la población, tomando lecturas con equipo de medición en cada caja y una adicional por normativa.

2.2 Mortero Tradicional

La dosificación para un mortero tradicional se establece en una relación de 1:3 entre cemento y arena fina. La cantidad de agua a añadir depende de la consistencia deseada del mortero, siendo 0.8 una relación típica. En cuanto a la densidad, el cemento presenta un valor de $1.44 \text{ g}/(\text{cm}^3)$ y la arena de $1.6 \text{ g}/(\text{cm}^3)$.

2.3 Mortero Geopolimérico

La investigación (Mieles M. & Castillo J., 2022) presenta una dosificación específica de geopolímero, previamente caracterizada en sus propiedades mecánicas y físicas, que fue adaptada para la fabricación del material geopolimérico utilizado como recubrimiento. Esta dosificación se describe en detalle en el texto, proporcionando información sobre las proporciones de los diferentes componentes que conforman el geopolímero. La adaptación de la dosificación se realizó con el objetivo de obtener un material con las características deseadas para su aplicación como recubrimiento, considerando aspectos como la durabilidad y la trabajabilidad.

Tabla 1. Dosificación de geopolímero

Concentración de NaOH	Na_2SiO_3 / NaOH	Solución Alcalina/ Aglutinante	Solución Alcalina Na_2SiO_3 + NaOH	Aglutinante (PP) [kg]	Na_2SiO_3 [kg]	Agua / Aglutinante	Peso del agua [kg]
12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	0.978	0.40	1.565

Adaptado de: (Mieles M. & Castillo J., 2022)

Para obtener polvo de piedra pómez (PP), La piedra pómez se tritura en la máquina de los ángeles para

minimizar el tamaño de las partículas. Luego, el material se coloca en un horno industrial a 100

$^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Finalmente, se tamiza el material seco con una tamizadora mecánica para obtener polvo de PP, que son las partículas que pasan a través del tamiz No. 200.

Se disuelven 480 g de cristales de Hidróxido de sodio en agua destilada para preparar la solución de Hidróxido de sodio. La concentración molar de la solución es de 12 M, siguiendo las indicaciones de (Mieles M. & Castillo J., 2022). Se bate la solución con una pipeta de cristal y se coloca en una charola con agua, ya que la reacción genera calor. Es importante mencionar que la preparación de la solución debe efectuarse 24 horas antes de ser utilizada para la confección del geopolímero y que la solución debe enfriarse a temperatura ambiente antes de su uso.

La generación de un geopolímero comienza con la mezcla del material de silicio y la solución alcalina activadora. Para el material de silicio, se mezclan la PP y el humo de sílice durante 3 minutos hasta obtener una masa homogénea. La solución alcalina se forma mezclando silicato de sodio y la solución de hidróxido de sodio en una proporción de 2.5

durante 2 minutos, y luego se añade la cantidad de agua necesaria para obtener una relación agua/aglutinante de 0.40, mezclando por 2 minutos más. Finalmente, ambas partes se mezclan durante 5 minutos hasta obtener una pasta homogénea.

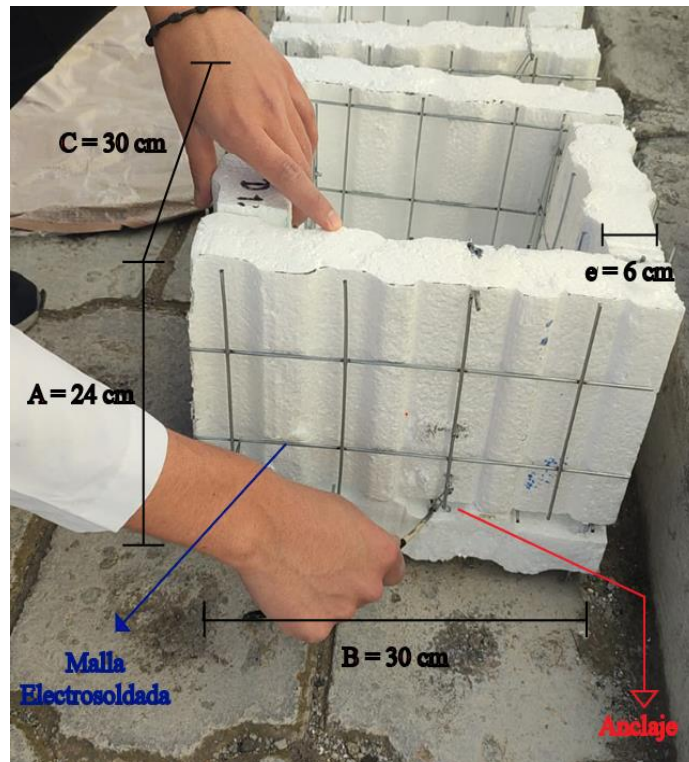
2.4 Construcción de Cajas

Los módulos prefabricados se conforman por paneles de poliestireno expandido ignífugo. La superficie de los paneles presenta una geometría acanalada y rugosa, especialmente diseñada para una mejor adherencia del material. Son paneles simples estructurales de 6 cm de espesor, generalmente utilizados para la construcción de paredes. Cuentan con una malla electrosoldada de refuerzo angular que cumple con la normativa de calidad.

Para la construcción de las cajas, se utilizan dos paneles de 30x30 cm para la tapa y la base, dos paneles de 30x18 cm para las paredes largas y dos paneles de 18x18 cm para las paredes cortas. Los paneles se colocan de manera que la malla electrosoldada de uno encaje con la de otro, permitiendo amarrarlos con un alambre de acero. La caja testigo

de hormigón tradicional, al no tener malla electrosoldada, se ancla mediante la incrustación de retazos de alambre de amarre en la base para fijar las paredes. Adicionalmente, se colocan

alambres a modo de puentes en la superficie de las paredes para garantizar un buen anclaje y se sellan con RTV Silicon las partes que presenten agujeros.



Se aceitan las paredes del encofrado de madera. Se inserta una caja para el recubrimiento con el material geopolimérico, mientras que la otra caja se recubre con mortero tradicional en una dosificación 1:3 (cemento: arena fina). Finalmente, se desencofran cuidadosamente las cajas de geopolímero y se

humedecen parcialmente para ejecutar su proceso de fraguado. Es importante destacar que, después del desencofrado, se revisten las cajas de geopolímero con una capa del mismo material para cubrir las fisuras ocasionadas por la exposición a las inclemencias ambientales.



2.5 Aislamiento Térmico

Para obtener valores de temperatura, se fabrica un sistema electrónico con: una placa de Arduino básica, una protoboard, cinco sensores de temperatura modulares con 3 pines de salida, cables buses de conexión macho-macho y macho-hembra, el software para programar el Arduino y recopilar datos, y RTV Silicon.

El ensayo inicia conectando los sensores a la protoboard y a la placa de Arduino por medio de los buses. Se fijan los sensores en el interior de la caja y se sella herméticamente la tapa a las paredes de esta con RTV Silicon para obtener lecturas precisas. En el software de Arduino, se cargan las líneas de código al microcontrolador y se ejecuta el programa para que los sensores

empiecen a tomar las lecturas de temperatura en grados Celsius. Paralelamente se inicia la toma de lecturas automatizadas con el software de recolección de datos.

Se colocan los sensores dentro de las cajas y se sellan las tapas de inmediato con RTV Silicon para garantizar un ambiente interno hermético. Un sensor suspendido en el aire también se coloca para recopilar lecturas ambientales. Mientras se espera que la temperatura dentro de las cajas se estabilice, se verifica el correcto funcionamiento del sistema electrónico. Se establece la hora de inicio de las lecturas y se ejecutan los programas correspondientes con un par de minutos de anticipación. Los cinco sensores recopilan datos simultáneamente cada 5 segundos

durante 15 minutos, lo que equivale a un total de 181 lecturas por caja.

Una vez se hayan recolectado todos los datos, se aplica la siguiente ecuación para determinar el aislamiento térmico en cada caja:

$$AT = TAP - TRP$$

Donde:

AT = Aislamiento Térmico [°C].

TAP = Temperatura Ambiental Promedio [°C].

TRP = Temperatura de la Caja analizada Promedio [°C].

2.6 Aislamiento Acústico

Los valores necesarios para determinar el nivel de presión sonora se obtienen adaptando la norma UNE-EN ISO 10140, (2022) (parte 2) a los requerimientos de las cajas. Para ello, se utilizan los siguientes implementos: un sonómetro previamente calibrado, una fuente de sonido, el software denominado "NoiseTools" y RTV Silicon.

El ensayo comienza midiendo el nivel de ruido de fondo en el entorno de prueba con un sonómetro. Luego, se coloca un soporte a 2 metros de distancia del sonómetro para ubicar

la caja que se analizará. Se inserta la fuente de sonido en el interior de la habitación y se sella herméticamente la tapa a las paredes de la caja con Silicon. Se reproduce ruido rosa en la bocina y se toman las lecturas con el sonómetro en la configuración de "vista ambiental" durante 5 minutos. Finalmente, se conecta el sonómetro a una computadora por medio de un cable de comunicación para extraer las lecturas utilizando el software NoiseTools.

Una vez recolectados todos los datos, se aplica la siguiente ecuación para determinar el aislamiento acústico en cada caja:

$$SRI = L1 - L2 + 10 \log \left(\frac{A1}{A2} \right)$$

Donde:

SRI = Índice de reducción sonora [dB].

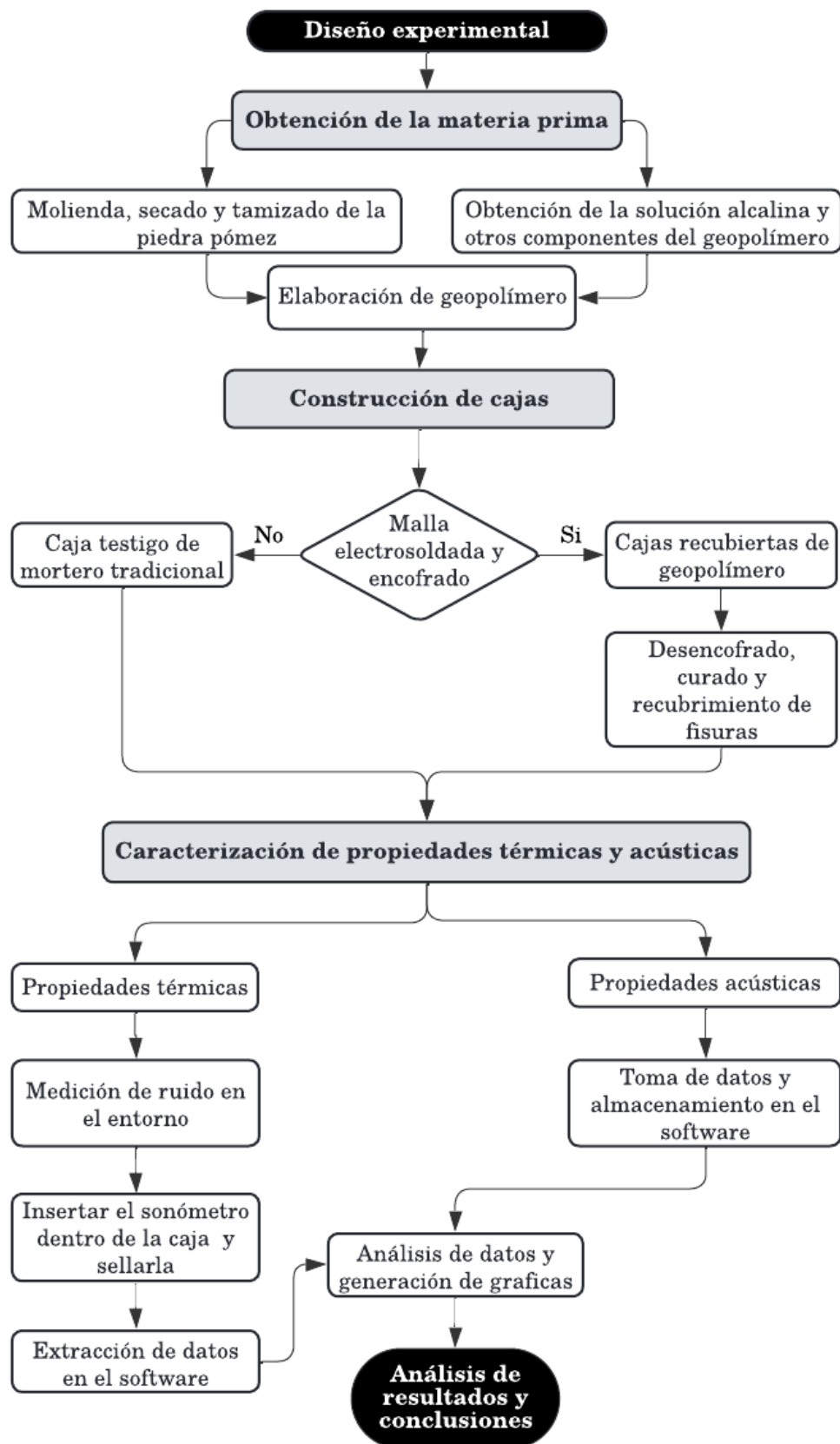
L1 = Nivel de presión sonora en el lado emisor [dB].

L2 = Nivel de presión sonora en el lado receptor [dB].

A1 = Área del lado emisor de la barrera acústica [m²].

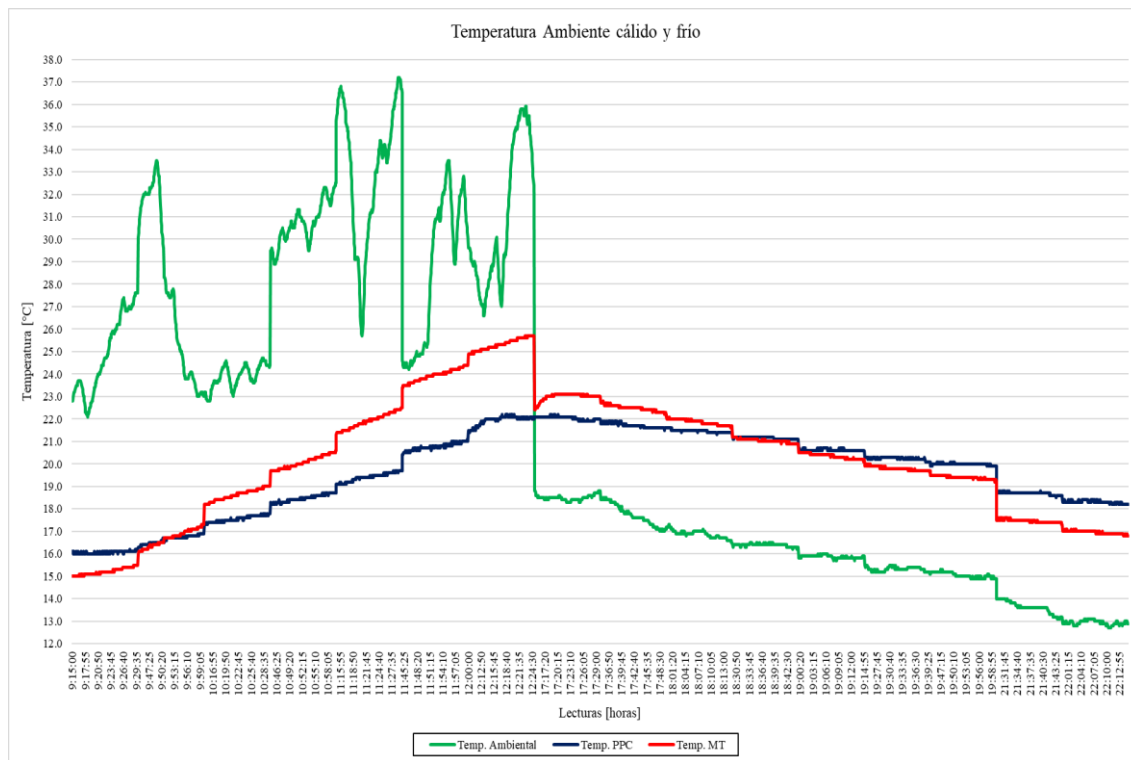
A2 = Área del lado receptor de la barrera acústica [m²]

2.7 Esquema del proceso



3. Resultados y discusión

Aislamiento Térmico

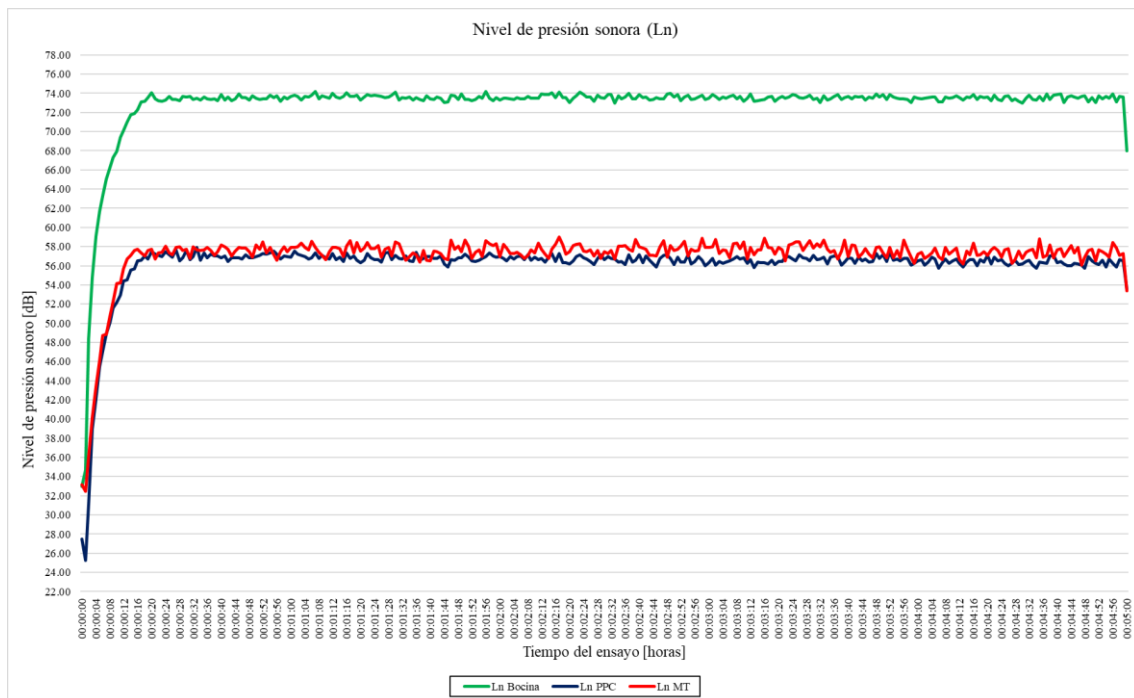


En el gráfico se observa una notable oscilación en la temperatura ambiental durante la recolección de datos, con un valor máximo de 37.20°C y un valor mínimo de 12.70°C. Este rango refleja una considerable variabilidad en la temperatura ambiental, con picos tanto altos como bajos, debido a la nubosidad presente en horas de la mañana cuando la temperatura fue mayor, y en la tarde se presentaron precipitaciones.

Se observa un desempeño favorable del mortero geopolimérico, el cual se

traduce en una temperatura interna estable dentro de la caja, independientemente de las condiciones climáticas externas. Es preciso destacar que el comportamiento del mortero tradicional también es positivo, aunque presenta un ligero descenso en comparación con el geopolimérico.

Aislamiento Acústico



El gráfico muestra cómo las cajas actúan como barreras acústicas, reduciendo el nivel de presión sonora (Ln) en ambos casos. La caja MT, construida con mortero tradicional, reduce el nivel sonoro en 15.17 dB en comparación con el nivel máximo medido en la bocina (74.16 dB). La caja geopolimérica presenta un comportamiento similar, incluso con una ligera ventaja en la reducción del sonido ya que su valor máximo registrado es de 57.92dB, es decir, reduce el nivel sonoro en 16.24 dB.

4. Conclusiones

El geopolímero de piedra pómez evidenció un comportamiento térmico superior al mortero tradicional en ambas condiciones climáticas. En ambientes cálidos, el aislamiento promedio del geopolímero fue de 9.81 °C, mientras que el mortero tradicional registró 8.26 °C. En ambientes fríos, la diferencia se redujo, pero el geopolímero aún mantuvo una ventaja con 4.70 °C frente a 4.62 °C del mortero. En términos generales, el porcentaje de aislamiento del geopolímero fue de 32.76%, mientras que el mortero tradicional alcanzó un 29.07%.

El geopolímero de piedra pómez también superó al mortero tradicional en términos de aislamiento acústico. La caja geopolimérica alcanzó un índice de reducción sonora de 11.41 dB, mientras que el concreto se situó en 10.41 dB. En términos porcentuales, la caja de geopolímero logró un 15.54% de aislamiento acústico, superior al 14.18% de la caja de mortero tradicional.

El geopolímero de piedra pómez se ha determinado como el material con mejor comportamiento debido a su rendimiento en aislamiento térmico y acústico en comparación con el mortero tradicional. La caja de geopolímero obtuvo un 24.15% de aislamiento general, gracias a su mejor aislamiento térmico (32.76% vs 29.07%) y acústico (15.54% vs 14.18%). Estos resultados demuestran que el material geopolimérico presenta un mejor comportamiento general en términos de aislamiento que el mortero tradicional.

Bibliografía

Castells, X. E. (2012). Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y

fangos de depuradora. Ediciones Díaz de Santos.

Da Silva, M. C., Racanelli, L. de A., Souza, J. A. da S., Quaresma, J. N. N., & Corrêa, M. S. (2023). Estudo do desempenho mecânico de geopolímero produzido com auto teor de ferro. *Revista Materia*, 28(1). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0309>

Gutiérrez Torres, A. G. (2018). Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland (Doctoral dissertation).

Herrera Ramírez, A. G. (2020). Propuesta para el diseño y construcción de una vivienda sostenible con integración paisajística en relación con los ecosistemas de montaña ubicada en la Vereda Córcega, Municipio de Vergara Cundinamarca.

Mieles Mariño, M. L., & Castillo Cevallos, J. J. (2022). Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo).

- Montenegro Carrillo, R. A., López Chaupijulca, G. L., García Arriola, M. A., Vílchez Moreno, S. E., & Muñoz Blanco, J. C. (2020). Consideraciones de diseño para el uso de elementos prefabricados de concreto armado para estructuras de edificios.
- Najarro Sinforoso, P., & Ramirez Dios, G. M. (2022). La actividad humana y la contaminación acústica en la Av. Nicolás Ayllón–distrito de Ate–Lima–2022
- Navacerrada, M. Á., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. (2021). Comportamiento acústico y térmico de materiales basados en fibras naturales para la eficiencia energética en edificación. *Informes de La Construcción*, 73. <https://doi.org/10.3989/ic.74558>
- Parra, P. C., & Ruiz, M. C. (2018). El ruido. Los Libros de La Catarata.
- Rodríguez Moya, D. A., & Rueda Escobar, J. L. (2022). Ensamble de una vivienda autosustentable.
- Torres, C. A. L. (2020). Diseño de paneles de concreto ligero a base de EPS reciclado y su proceso constructivo.
- UNE-EN ISO 10140-2. (2022). Medición en laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: Medición del aislamiento acústico al ruido aéreo (ISO 10140-2:2021). Asociación Española de Normalización UNE.