

► **Evaluación de propiedades mecánicas y térmicas en baldosas de hormigón con agregados de residuos plásticos (EPS y PEBD)**

Evaluation of mechanical and thermal properties of concrete tiles with recycled plastic aggregates (EPS and LDPE)

Andrés Emanuel Díaz^{1,2}, Haitham Al-Hakemi², Nicolas Di Lalla¹, Alejandro Luis Hernández^{1,2}

Artículos científicos

Citar: Díaz, A. et al. (2025) Evaluación de propiedades mecánicas y térmicas en baldosas de hormigón con agregados de residuos plásticos (eps y pebd). Teks del Sud, 6, pp. 07-20

Resumen

La gestión de residuos plásticos es un desafío ambiental global. Esta investigación explora una solución sostenible mediante el desarrollo de baldosas de hormigón con agregados de plástico reciclado. Se diseñó una metodología experimental donde se evaluaron tres mezclas: una de control sin residuos (B_1), y dos mezclas con sustitución parcial de áridos tradicionales por desechos de Poliestireno Expandido (EPS) y Polietileno de Baja Densidad (PEBD) (B_2 y B_3). Se analizaron las propiedades en estado fresco (asentamiento) y endurecido (resistencia a flexión y compresión, absorción, densidad, conductividad térmica y resistencia al impacto) siguiendo normas nacionales IRAM. Los resultados indican que las mezclas con residuos plásticos (B_2 y B_3) cumplieron con los requisitos normativos, mostrando una reducción significativa en la densidad (hasta 14%) y conductividad térmica (hasta 47%) en comparación con el control. La mezcla B_2 exhibió el mejor desempeño global, con una resistencia a flexión de 7,64 daN/cm² y una absorción del 7,4%. El estudio concluye que es factible producir baldosas con mejor aislamiento térmico y propiedades mecánicas adecuadas utilizando residuos de EPS y PEBD, ofreciendo una alternativa viable para la valorización de residuos en la industria de la construcción.

Palabras clave: baldosas de hormigón, residuos plásticos, propiedades térmicas, construcción sostenible, reciclaje de eps, reciclaje de pebd, valorización de residuos.

¹ Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO)- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) e-mail: andres@exa.unsa.edu.ar

² Departamento de Física- Universidad Nacional de Salta (UNSa) e-mail: haitham.alhakemi@gmail.com; ndilalla@gmail.com; alejoher65@gmail.com

Abstract

The management of plastic waste is a global environmental challenge. This research explores a sustainable solution by developing concrete tiles incorporating recycled plastic aggregates. An experimental methodology was designed, evaluating three mixes: a control mix (B_1) without waste, and two mixes with partial replacement of traditional aggregates by Expanded Polystyrene (EPS) and Low-Density Polyethylene (LDPE) waste (B_2 and B_3). The properties in both fresh (slump) and hardened state (flexural and compressive strength, absorption, density, thermal conductivity, and impact resistance) were analyzed following international standards. The results indicate that the mixes with plastic waste (B_2 and B_3) met regulatory requirements, showing a significant reduction in density (up to 14%) and thermal conductivity (up to 47%) compared to the control. Mix B_2 exhibited the best overall performance, with a flexural strength of 7.64 daN/cm² and 7.4% absorption. The study concludes that it is feasible to produce tiles with improved thermal insulation and adequate mechanical properties using EPS and LDPE waste, offering a viable alternative for waste valorization in the construction industry.

Keywords: concrete tiles, recycled plastic, expanded polystyrene (eps), low-density polyethylene (ldpe), thermal properties, mechanical properties.

Introducción

La gestión de residuos plásticos representa uno de los mayores desafíos ambientales a escala global, debido a su persistencia en el medio ambiente y el alto volumen generado. Paralelamente, la industria de la construcción, en su constante búsqueda de materiales más sostenibles, se presenta como un potencial canal para la valorización de estos desechos, contribuyendo así a los principios de la economía circular.

El sector cerámico y de materiales para la construcción ha demostrado un creciente interés en la incorporación de residuos de diversa naturaleza. Existe un impulso significativo por evolucionar las técnicas de producción tradicionales hacia modelos de manufactura de cero residuos, integrando desechos de otras industrias para minimizar el impacto ambiental. Esta transición no solo es deseable desde una perspectiva ecológica, sino que también está siendo impulsada por incentivos regulatorios y políticas de mercado que promueven la circularidad (Javed *et al.*, 2025). En esta misma línea, investigaciones recientes han explorado el uso de residuos agrícolas (Bwambale *et al.*, 2025) y subproductos de la fabricación de baldosas de porcelana (Zanatta *et al.*, 2020) como materias primas alternativas, validando técnicamente esta práctica.

Dentro de este marco, los plásticos de tipo poliolefina, como el polietileno de baja densidad (PEBD) y el poliestireno expandido (EPS), son candidatos ideales para su reutilización en matrices cementicias. Su incorporación como agregados en morteros y hormigones no solo aborda el problema de su disposición final, sino que puede conferir propiedades beneficiosas al material compuesto, como la reducción de la densidad y la mejora del aislamiento térmico. Además, como demostraron con baldosas de pavimento (Duguma Debele *et al.*, 2024), el uso de desechos de polietileno de baja densidad (LDPE) como aglutinante puede resultar en productos con propiedades mecánicas que cumplen los estándares requeridos, mostrando una absorción de agua muy baja y una resistencia adecuada para aplicaciones en exteriores.

Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han centrado en su uso como áridos en elementos de hormigón masivo o como aglutinante principal en composites plásticos. Existe un vacío de conocimiento específico respecto a la fabricación de baldosas premoldeadas de hormigón delgadas (usualmente de 1,5-2,5 cm de espesor) que utilicen una combinación de agregados plásticos (PEBD) y partículas de EPS, orientadas a aplicaciones donde se requiera un equilibrio entre propiedades mecánicas, peso reducido y aislamiento térmico.

Este trabajo presenta una investigación experimental sobre el desarrollo y caracterización de baldosas de hormigón con agregados de desechos plásticos PEBD y EPS. El objetivo principal fue evaluar el efecto de la sustitución parcial de los áridos tradicionales por estos residuos plásticos en las propiedades frescas y endurecidas del hormigón, con especial énfasis en la resistencia a la flexión, la absorción de agua, la conductividad térmica y la resistencia al impacto. Los resultados demuestran que es posible producir baldosas que cumplan con los requisitos normativos vigentes, ofreciendo además una significativa mejora en el aislamiento térmico, contribuyendo así a una práctica de construcción más sostenible y ofreciendo una solución viable para la valorización de residuos plásticos.

Metodología

El presente estudio se llevó a cabo mediante un enfoque experimental sistemático destinado a desarrollar y caracterizar baldosas de hormigón con agregados de desechos plásticos. Para ello, se diseñaron tres dosificaciones distintas: una mezcla de control sin residuos (B_1) y dos mezclas con sustitución parcial de áridos tradicionales por residuos de EPS y PEBD (B_2 y B_3). Se evaluaron las propiedades en estado fresco (asentamiento) y endurecido (resistencia a flexión, compresión, absorción, densidad, conductividad térmica y resistencia al impacto), siguiendo normativas internacionales vigentes. A continuación, se detallan los materiales utilizados, los procedimientos de dosificación, fabricación y los métodos de ensayo empleados para la caracterización de las probetas.

Dosificaciones

Las dosificaciones se plantearon con el Método del Instituto Americano del Hormigón (ACI), que permite llegar a la dosificación final de una manera práctica, haciendo correcciones sucesivas por asentamiento y resistencia. La base para el cómputo es la expresión del m^3 de hormigón como suma del volumen sólido de cada uno de los componentes de la mezcla (ACI 211.1, 2009). El diseño de una mezcla es un proceso que consiste en tres pasos interrelacionados:

- Selección de los constituyentes.
- Determinación de sus cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, una mezcla de las características apropiadas, tanto en estado fresco como endurecido
- Ajuste de las cantidades estimadas mediante su ensayo en pastones de prueba.

La norma que rige los diseños de mezclas de hormigón es la ACI 211.1 que, a su vez, está basada en la norma ASTM C33, donde se hace referencia a las especificaciones granulométricas. Para esta etapa de prueba se utilizó en la mezcla un agregado de óxido férrico (pigmento rojo), que genera un color rojo en la mezcla (Tabla 1). Se procedió a diseñar tres grupos de dosificaciones y sus designaciones fueron:

- B_1 : Sin agregados de desechos. Relación $a/c=0,65$. 2,22 kg de pigmento rojo (cumple con norma ASTM C 979). Porcentaje de agregado fino y cemento (Portland CPC 30): 55 % fino y 45 % grueso.
- B_2 : Agregados de 9 kg de desechos de EPS (triturados de entre 1 a 3 mm) y 45 kg de desechos plásticos PEBD (pellets de 5 mm). 2,4 kg de pigmento rojo (9 % más que probeta B_1). Relación $a/c=0,56$. Porcentaje de agregado fino y cemento: 55 % fino y 45 % grueso (9,5 % menos de agregados finos y gruesos que probeta B_1).
- B_3 : 9 kg de desechos de EPS (igual que probeta B_2). 54 kg de desechos plásticos PEAD (16 % más que probeta B_2). 3,6 kg de pigmento rojo (63 % más que la probeta B_1 y 50 % más que probeta B_2). Relación $a/c=0,73$. Porcentaje de agregado fino y grueso: 55 % fino y 45 % grueso (12 % menos de agregados finos y gruesos que probeta B_1).

Componentes [kg]	B ₁	B ₂	B ₃
Agua	176	140	122
Cemento	270	250	167
Agregado fino: Módulo de Finura 3,75	569	515	500
Agregado EPS	0	9	9
Agregado Plástico	0	45	54
Aditivo Superligante: Densidad 1,09 kg/m ³	120	120	120
Pigmento	2,22	2,40	3,6
Densidad [kg/m ³]	1137	1081	975

Tabla 1:
Dosificaciones de la serie de baldosas por cada m³ de mezcla.

Elaboración de pastones

El procedimiento para la elaboración de las mezclas fue el siguiente:

- 1º) Incorporar agua a los agregados reciclados, mezclar y dejar secar unos 15 minutos. En la Figura 1 se muestran los agregados para formar la pasta para las baldosas.



Figura 1.
Agregados utilizados para la elaboración de la Serie de Baldosas.

- 2º) Introducir el o los agregados reciclados (según corresponda la dosificación) a la hormigonera.
- 3º) Mezclar un 20 % del agua con el pigmento.
- 4º) Agregar aditivo y cemento con un 20 % de agua de amasado.
- 5º) Luego de unos minutos de mezclado introducir el agregado fino con un 10 % de agua de amasado. Ver Figura 2(a).

Figura 2.
(a) Inclusión de los agregados para la realización de la baldosa, (b) Etapa final de la pasta



- 6º) Luego de tres minutos de mezclado agregar el agua restante (50%). Ver Figura 2(b).
7º) Medir la temperatura de la mezcla y procedemos a llenar los moldes cuadrados para la conductividad térmica y los moldes cilíndricos de acero para los pastones (Figura 3).

Figura 3.
Llenado de los moldes para sus posteriores ensayos de conductividad térmica.



Ensayos sobre estado fresco

Para verificar la influencia de los agregados reciclados en la trabajabilidad de las mezclas se realizaron ensayos en estado fresco para determinar el asentamiento con el cono de Abrams (Norma IRAM 1536). Se llenó el cono con la mezcla y se repitió dos veces el ensayo por cada pastón sacando un valor promedio de asentamiento.

Ensayos sobre estado endurecido

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo a los 7 días y 28 días de curado de las probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm, según norma IRAM 1546. Los ensayos de flexión y choque se realizaron a los 7 y 28 días de realizadas las probetas siguiendo la Norma IRAM 1522. Las probetas tienen la forma prismática de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Para analizar el comportamiento térmico, se determinó el coeficiente de conductividad térmica mediante un equipo de placa caliente, de acuerdo con Norma IRAM 11559 (Díaz y Hernández, 2025). Para las mediciones realizadas se necesitaron dos probetas mellizas de cada mezcla, dado que este modelo de equipo necesita dos muestras de similares características para medir la conductividad térmica. Las dimensiones de las probetas eran de 30 cm de alto x 30 cm ancho x 4 cm de espesor.

Resultados

Los resultados del ensayo de asentamiento se presentan en la Tabla 2. Por lo apreciado, se aumentó la relación de agua/cemento (a/c) para que la mezcla fuera más fluida. El de mayor asentamiento es la mezcla B₃, que tiene más contenido en peso de agregados plásticos. Mientras que la de menor asentamiento es la probeta B₂ que contiene menos agregado plástico y más de agregados finos y gruesos.

Probeta	Reciclado	Relación a/c	Asentamiento [cm]
B ₂	EPS y PEBD	0,56	3,5
B ₃		0,73	4,5
B ₁	—	0,65	4,0

Tabla 2.
Resultados
de los
asentamientos
y relación a/c
utilizada.

En la Figura 4(a) se puede observar cómo se realizó el ensayo de resistencia a la flexión de las probetas. La imagen muestra la probeta B₂ con un valor de 7,64 daN/cm² y la probeta B₃ 5,7 daN/cm². Estos resultados superan los 5 daN/cm² establecidos por la norma IRAM 1522. Finalmente, la probeta de control B₁ obtuvo el valor más alto de 9,68 daN/cm². En la Figura 4(b) se observan las probetas B₂ y B₃ luego del ensayo de resistencia a la flexión. Se puede observar en la parte superior de la imagen cómo se distribuyó el agregado de EPS y PEBD.

El gráfico de la Figura 5 se muestra los resultados de la resistencia a la flexión ordenados de mayor a menor resistencia a la flexión, siendo B₁ la probeta de control. B₂ tiene 9,5 % menos de agregado fino y grueso que la probeta de control, mientras que B₃

Figura 4.
(a) Ensayo de la resistencia a la flexión. (b) Probetas B₃ (superior de la imagen) y B₂ (inferior de la imagen) luego del ensayo de resistencia a la flexión

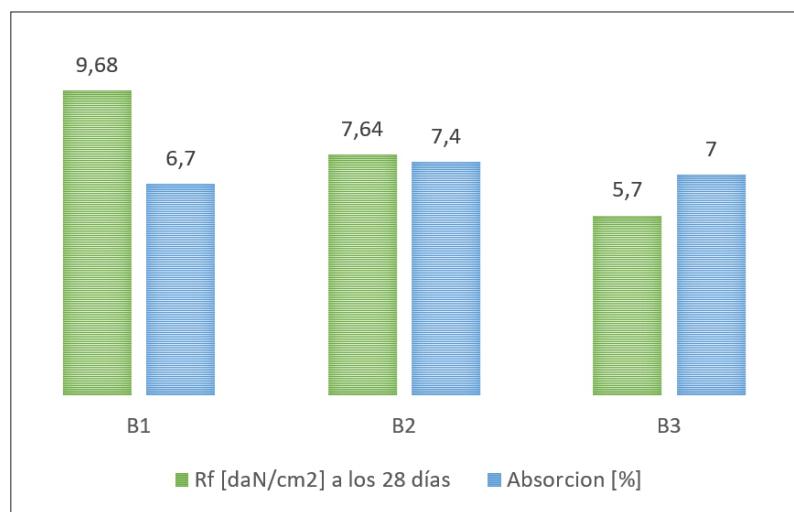


Figura 5.
Resultados de la resistencia a la flexión R_f y el porcentaje de absorción.

un 12 % menos. La Figura 5 también detalla los porcentajes de absorción de las probetas. De acuerdo con los resultados de absorción de las tres probetas B₁, B₂ y B₃ todas fueron menores al 10 %, cumpliendo con la norma IRAM 1522.

Los ensayos de densidad y conductividad térmica fueron satisfactorios, como muestra Figura 6, se redujo la densidad y por consecuencia la conductividad térmica con respecto a la probeta de control B₁. La probeta B₂ obtuvo un 40 % menos de conductividad térmica y un 9 % menos de densidad, mientras que la probeta B₃ presentó un 47 % menos de conductividad térmica y un 14% menos de densidad.

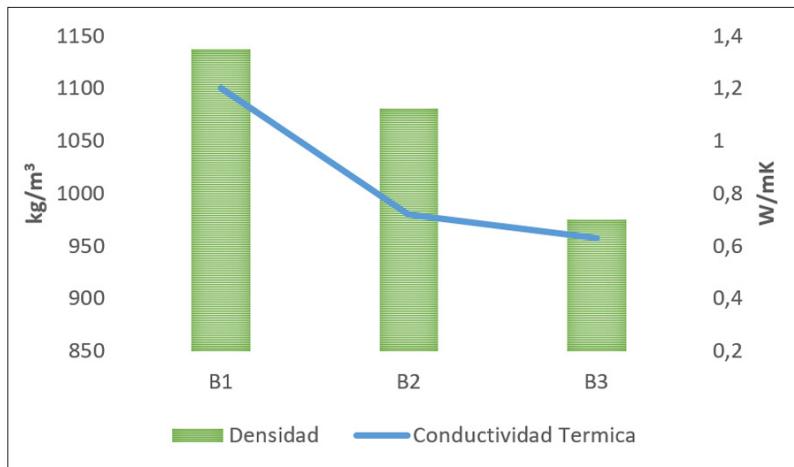


Figura 6.
Resultados
de la
densidad y la
conductividad
térmica.

Para el ensayo de choque se utilizó una caja de 60 cm x 60 cm y 20 cm de alto, con 10 cm de alto lleno de arena mediana, Figura 7(a). Se arrojó una esfera (Figura 7(b)) de 650 gramos de hierro desde diferentes alturas hasta obtener la ruptura de las baldosas. Las dimensiones de las baldosas ensayadas son de 30 cm x 30 cm x 2 cm de espesor.

La esfera de hierro fue arrojada desde nueve diferentes alturas comenzando desde los 30 cm hasta los 250 cm, altura a la cual las baldosas B_1 y B_2 se rompieron, Figura 8(a). Mediante el análisis de las Figura 8(a) y Figura 8(b) podemos apreciar la diferencia en las grietas de las baldosas, ya que la baldosa B_2 no presentó una grieta continua ante el impacto final de choque, mientras que en la baldosa B_1 la grieta fue continua y llegó a abarcar todo el largo de la baldosa, Figura 8(b). Esto se debe a los agregados de desechos plásticos y de EPS que fueron amortiguando al choque de la esfera de hierro.



Figura 7.
a) Caja de arena. b)
Esfera de hierro para
ensayo de choque.

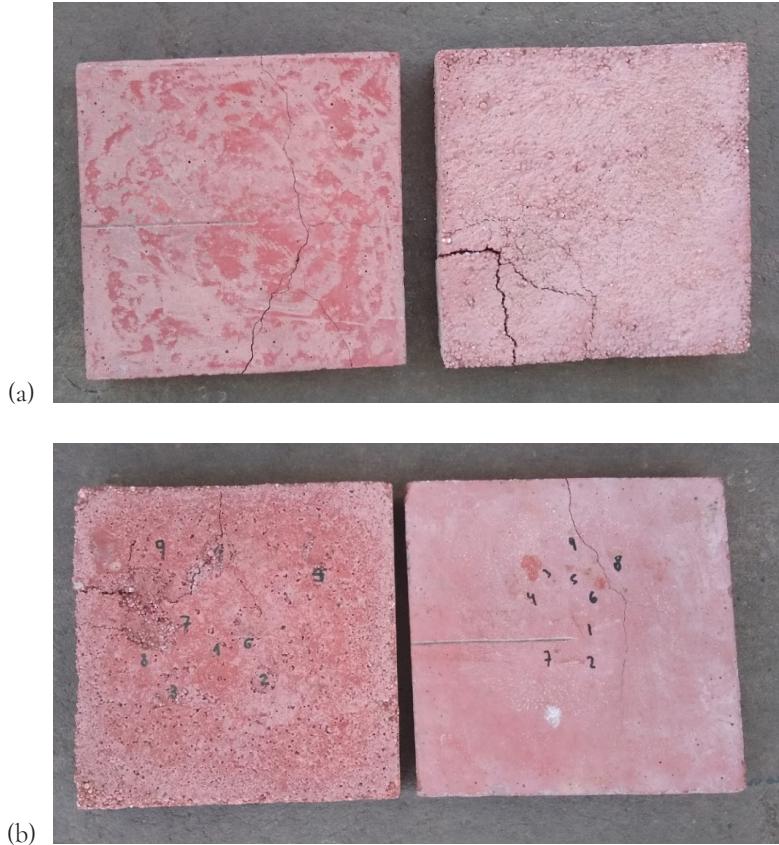


Figura 8.
(a) Marcas de las caídas de la esfera donde a la izquierda esta la probeta B₂ y a la derecha la probeta B₁, (b) Diferencia de las grietas en las probetas al momento de la ruptura.

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la incorporación de residuos plásticos (EPS y PEVD) como agregados en la fabricación de baldosas de hormigón es técnicamente viable y ambientalmente prometedora. La reducción significativa en la densidad (hasta un 14%) y la conductividad térmica (hasta un 47%) en las mezclas B₂ y B₃ coincide con lo reportado en la literatura para composites cementicios con agregados plásticos (Duguma Debele *et al.*, 2024). Esta mejora en las propiedades térmicas es particularmente relevante para aplicaciones en exteriores, donde el aislamiento térmico puede contribuir a la eficiencia energética de edificaciones, un aspecto clave en la construcción sostenible (Javed *et al.*, 2025). La disminución en la resistencia a flexión observada en las mezclas con plástico (B₂ y B₃) en comparación con el control (B₁) era esperable, dado la pobre adhesión entre la matriz cementicia y los agregados plásticos hidrofóbicos, un fenómeno ampliamente documentado (Bwambale *et al.*, 2025). Sin embargo, es crucial destacar que ambos valores (5,7 y 7,64 daN/cm²) superaron el mínimo

requerido por la norma IRAM 1522 (5 daN/cm^2), lo que confirma que la pérdida de resistencia no compromete la funcionalidad del producto para su uso previsto. Este hallazgo es consistente con el de (Duguma Debele *et al.*, 2024), quien también reportó resistencias mecánicas adecuadas en baldosas con PEBD.

El comportamiento superior de la mezcla B₂ sobre la B₃ sugiere que existe un porcentaje óptimo de sustitución más allá del cual las propiedades mecánicas pueden degradarse más significativamente sin ganancias proporcionales en las propiedades térmicas, este resultado se condice con la menor relación a/c. Esto subraya la importancia de optimizar la dosificación para lograr un equilibrio entre desempeño mecánico y térmico, un desafío común en el desarrollo de materiales con residuos (Zanatta *et al.*, 2020).

La mayor ductilidad y el patrón de grietas no continuo observado en el ensayo de impacto para las baldosas B₂ y B₃ es un resultado novedoso y altamente favorable. Este comportamiento, atribuible a la capacidad de los plásticos para absorber y distribuir la energía del impacto, no es típicamente reportado en baldosas cerámicas o de hormigón tradicionales. Esta ventaja podría abrir nuevas aplicaciones en áreas donde se requiera cierto grado de resiliencia al impacto.

Si bien este estudio demostró éxito a escala de laboratorio, una limitación reconocida es la necesidad de evaluar el desempeño a largo plazo de estas baldosas, incluyendo su resistencia a la intemperie, ciclos de hielo-deshielo y la posible degradación UV de los plásticos expuestos. Futuras investigaciones deberían escalar la producción a nivel industrial para validar la viabilidad económica y técnica del proceso. Asimismo, se recomienda explorar tratamientos superficiales en los agregados plásticos para mejorar aún más la adhesión a la matriz cementicia y, potencialmente, incrementar la resistencia mecánica sin sacrificar las beneficiosas propiedades térmicas y de densidad.

Los resultados de este trabajo se alinean y fortalecen al cuerpo de literatura que aboga por la economía circular en la industria de la construcción. Se confirma que los residuos plásticos, lejos de ser un desecho problemático, pueden transformarse en un recurso valioso para desarrollar materiales de construcción innovadores y con propiedades mejoradas, contribuyendo directamente a la sostenibilidad del sector.

Conclusiones

Este estudio demostró la viabilidad técnica de utilizar residuos plásticos (EPS y PEBD) como agregados en la fabricación de baldosas de hormigón. La sustitución parcial de áridos tradicionales por estos desechos resultó en composites con propiedades mecánicas que cumplen con los estándares normativos (IRAM 1522), a la vez que confirieron características beneficiosas clave.

Las dosificaciones con plásticos (B_2 y B_3) presentaron una significativa reducción en la densidad (hasta un 14% menos) y una mejora notable en el aislamiento térmico, con una disminución de la conductividad térmica de hasta un 47% en comparación con la mezcla de control (B_1). Si bien se observó una disminución en la resistencia a flexión respecto al control, los valores obtenidos (5,7 y 7,64 daN/cm² para B_3 y B_2 , respectivamente) superaron el mínimo exigido por la norma. La mezcla B_2 mostró el mejor equilibrio global de propiedades. Además, el ensayo de impacto reveló un comportamiento más dúctil en las baldosas con plásticos, las cuales desarrollaron grietas menos continuas que la baldosa tradicional ante la misma energía de impacto.

Esta investigación valida el uso de residuos de EPS y PECD para producir baldosas ligeras, con mayor aislamiento térmico y adecuadas para aplicaciones en exteriores, representando una solución prometedora y sostenible para la valorización de residuos plásticos en la industria de la construcción.

Referencias

- ACI 211.1, 2009. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute.
- Yunusu B., Yiga V.A., Lubwama M. (2025). Utilization of agricultural residues in ceramic tiles: A review. Open Ceramics, 100783. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100783>.
- Duguma Debele A., Demeke S., Bekele T., Malimo M. (2024). Recycling and reusing potential of disposable low-density polyethylene plastic waste for exible paver tile construction for outdoor application. Heliyon, 10(3), e29381. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29381>.
- Díaz A. E. & Hernandez A.L. (2025). Experimental study to measure conductive heat transfer properties in new materials with environmental waste aggregates. Am. J. Phys. Appl. 13 (2), 17–27. <https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20251302.11>.
- IRAM 11559, 1995. Acondicionamiento térmico: Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 11601, 2004. Aislamiento térmico de edificios: Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM 1522, (2020). Baldosas de cemento. Métodos de ensayo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 1536, 2023. Hormigón fresco de cemento: Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. Instituto Argentino de Normalización.

IRAM 1546, 2017. Hormigón de cemento: Método de ensayo de compresión. Instituto Argentino de Normalización.

Javed S., Conte S., Molinari C., Rosa R., Ferrari A.M., Dondi M., Chiara Zanelli C. (2025). Strategies and pathways to improve circularity in ceramic tile production. Journal of Cleaner Production, 145788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145788>.
Zanatta T., Rozineide A. Boca Santa A., Padoin N., Soares C., Gracher Riella H. (2020). Eco-friendly ceramic tiles: development based on technical and market demands. Journal of Materials Research and Technology, 12, 2153-2165. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.081>.

