

## TRANSFORMANDO MATERIAS PRIMAS SECUNDARIAS EN MATERIALES CONSTRUCTIVOS ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES

*A. Zaragoza Benzal<sup>1</sup>, D. Ferrández Vega<sup>1</sup>, R. Pastor Lamberto<sup>2</sup>, E. Atanes Sánchez<sup>1</sup>*

1. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

2. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España

### RESUMEN

La reducción del impacto medioambiental asociado a la industria de la construcción constituye en la actualidad uno de los retos más relevantes para el sector. A las emisiones derivadas de la producción y transformación de materiales de construcción se suma el elevado consumo energético de los edificios durante su vida útil, del cual aproximadamente un 63% corresponde exclusivamente al acondicionamiento térmico de los espacios interiores. Esta doble problemática ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras que integren principios de economía circular y que, simultáneamente, contribuyan a mejorar la eficiencia energética de los sistemas constructivos.

En este contexto, la presente investigación se centra en la caracterización de un nuevo compuesto destinado a aplacados interiores, desarrollado mediante la incorporación de materiales recuperados de polietileno de alta densidad (HDPE) y poliestireno expandido (EPS). El objetivo principal ha sido mejorar propiedades clave de los compuestos con base yeso, promoviendo a la vez la sustitución parcial de materias primas vírgenes por recursos secundarios. La incorporación original de los residuos de EPS mediante su disolución previa ha permitido aumentar de manera considerable los volúmenes incorporados del residuo, mejorando a su vez la integración en la matriz y mejorar la interfase de unión entre el HDPE y la matriz de yeso. En los materiales formulados se ha priorizado el reemplazo del material original por fracciones recuperadas, alcanzándose una reducción del uso de recursos naturales no renovables de hasta un 26%, lo que evidencia el potencial ambiental de la propuesta. La campaña experimental incluyó una caracterización física, mecánica y térmica con el fin de evaluar la viabilidad técnica del compuesto. Se analizaron parámetros como densidad aparente, resistencia a flexión y compresión, dureza superficial y módulo de Young, así como la conductividad térmica, dada la capacidad de los materiales recuperados para disminuir la densidad del compuesto y, por tanto, influir en su comportamiento térmico.

Los resultados obtenidos más relevantes muestran que la densidad aparente disminuye de forma significativa conforme aumenta la proporción de HDPE y EPS reciclados, lo que se asocia a un incremento de la porosidad interna. Aunque esta mayor porosidad repercute en las propiedades mecánicas, las resistencias alcanzadas superan los valores mínimos establecidos por la normativa vigente para su aplicación en elementos constructivos interiores. Paralelamente, se observa una notable reducción de la conductividad térmica, lo que confirma el potencial del compuesto para

mejorar el rendimiento energético de los edificios en los que se incorpore. En conjunto, esta investigación demuestra la viabilidad técnica y ambiental de emplear residuos plásticos como materias primas secundarias de alto valor añadido en la fabricación de nuevos materiales de construcción. Los compuestos desarrollados no solo contribuyen a la revalorización de residuos, sino que también representan una alternativa prometedora para avanzar hacia edificaciones más sostenibles y energéticamente eficientes.

**PALABRAS CLAVE:** comportamiento térmico, economía circular, revalorización de residuos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción representa uno de los sectores más intensivos en el consumo de materiales del mundo, acaparando alrededor de 30.6 mil millones de toneladas de materiales al año [1]. Esta elevada demanda de materias primas ocasiona un fuerte impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (37% del total de CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera) y contribuye a la destrucción de los ecosistemas. Asimismo, el sector es responsable de cerca del 40% del total de los residuos sólidos generados en la Unión Europea [2], por lo que buscar estrategias que apuesten por integrar la sostenibilidad en el diseño de materiales de construcción e incorporen criterios de economía circular es cada vez más necesario y se alinea con las recomendaciones de Pacto Verde Europeo de 2019.

Los materiales con base yeso se han posicionado como una solución eficiente y sostenible para la elaboración de prefabricados. Su eficiencia se basa en su buena relación calidad/precio, facilidad de ejecución y versatilidad de aplicaciones [3]. Asimismo, su sostenibilidad viene amparada por su reciclabilidad descrita por el siguiente esquema simple de reacciones:  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 3/2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \Delta \text{Calor}$  [4]. Se trata de un material con excelente comportamiento higrotérmico y que presenta un acabado liso y satinado, lo que lo convierte en la materia prima ideal para la conformación de placas de falso techo o paneles prefabricados para interior.

En las últimas décadas, como consecuencia de los elevados volúmenes de residuos plásticos generados a nivel mundial, diversos autores han apostado por la integración de estas materias primas secundarias como sustitución parcial del yeso en la elaboración de piezas prefabricadas. Solo en el año 2025, se estimó una cantidad de 225 millones de toneladas de estos residuos plásticos a nivel mundial [5], por lo que no es de extrañar la proliferación de estas investigaciones. En términos generales, la integración de plásticos en materiales de construcción se realiza en forma de granza, pudiendo destacarse los siguientes estudios recientes:

- **Polipropileno (PP)** [6]: empleado en sustitución en masa del 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0%, con un tamaño de partícula 0-1 mm, provenientes del reciclaje de capsulas de café. Los autores encontraron valores de resistencia a flexión y compresión de 2.55 MPa y 8.36 MPa, respectivamente, con una densidad de 1240 kg/m<sup>3</sup>.
- **Polietileno de alta densidad (HDPE)** [7]: empleado en sustitución en volumen del 2, 4, 6, 8 y 10%, con un tamaño de partícula 1.4 mm. Los autores encontraron en la muestra con 10% de

HDPE valores de resistencia a flexión y compresión de 3.34 MPa y 7.88 MPa, respectivamente, con una densidad de 1039.8 kg/m<sup>3</sup> y valores de conductividad térmica de 0.19 W/m·K.

- **Polietileno de baja densidad (LDPE)** [8]: procedente de la trituración de bolsas de un solo uso con tamaño menor a 1 mm, añadidas como sustitución en masa en 1, 2 y 3%. Se obtuvieron compuestos de yeso con un buen comportamiento térmico y una menor absorción de agua por capilaridad, aumentando la durabilidad con respecto al material tradicional. Se observó una buena integración del residuo en la matriz.
- **Policarbonato** [9]: empleando adiciones del 10, 20, 30 y 40% en masa sobre el peso del conglomerante, con un tamaño de partícula menor de 4 mm. Residuos eran provenientes del reciclaje de CD y DVD. Se obtuvo una resistencia a flexión y compresión de 3.32 MPa y 7.38 MPa respectivamente, con buena integración del residuo en la matriz y densidad de 840 kg/m<sup>3</sup>.
- **Poliestireno expandido (EPS)** [10]: empleando residuos de tamaño comprendido entre 1-2 mm y 2-4 mm, en 2% en masa. Asimismo, estos compuestos se reforzaron con fibras para mejorar su resistencia mecánica, superando en todos los casos los límites establecidos por la normativa actual y mejorando significativamente la resistencia térmica.
- **Poliestireno extruido (XPS)** [11]: empleados a partir de la trituración de residuos sobrantes de planchas de aislamiento térmico con tamaño de partícula menor de 4 mm, en porcentajes en masa comprendidos entre el 1-4 % en masa. Para el máximo valor de residuo adicionado, se obtuvo una resistencia a compresión de 1.71 MPa, por lo que se fijó como límite ya que no supero el valor mínimo de 2 MPa recomendado en la normativa actual.
- **Polietileno expandido** [12]: empleado como sustitución parcial en volumen del 7.5, 15.0, 22.5 y 30.0%, con un tamaño de partícula comprendido entre 1–3 mm. La incorporación de estos residuos provoca una disminución de la resistencia mecánica, en el caso más desfavorable se obtuvieron unas resistencias a flexión y compresión de 2.98 MPa y 5.11 MPa, si bien se obtuvo una fuerte mitigación del impacto ambiental en el análisis de ciclo de vida *cradle to gate*.
- **Caucho reciclado** [13]: procedente de la gestión de neumáticos fuera de uso (NFU) realizada por Signus Ecovalor, S.L., se caracterizan por su forma granular y con tamaño de partícula inferior a 4 mm. Se emplearon como sustitución parcial en volumen hasta en un porcentaje del 30%, obteniendo una resistencia mecánica a flexión y compresión de 2.25 MPa y 4.35 MPa, respectivamente, así como una disminución de la conductividad térmica del 39.1% respecto a la referencia sin NFU.
- **Residuos de cables de baja tensión** [14]: compuestos de diversos residuos plásticos entre los que destacan el PE y el PVC, se emplearon como partículas de tamaño 1-2 mm. Se adicionaron en porcentajes en volumen del 50, 60, 70% en volumen. Los resultados muestran una disminución de la resistencias mecánicas y mejora de la conductividad térmica, así como un buen comportamiento frente a la acción del agua, lo que destaca su viabilidad para ser empleados en cuartos húmedos

Este trabajo aborda el problema de la gestión de uno de los residuos plásticos más comunes en la actualidad y asociado a la rehabilitación energética de fachadas: el EPS proveniente de los sistemas de aislamiento térmico exterior (SATE). En la actualidad, la normativa en materia de eficiencia energética ha impulsado la rehabilitación de edificios en la comunidad de Madrid, y grandes volúmenes de estos residuos plásticos son desechados cada día dificultando la gestión [15]. Así, se propone de manera novedosa la integración de estos residuos en la matriz de yeso en forma de disolución, para favorecer

a si su integración durante el proceso de amasado de estos materiales de construcción. Se trata de un proceso original y patentado por los autores [16], que marca un punto de inflexión en materia de gestión de residuos. De la misma manera, se apuesta por la combinación de este residuo junto con HDPE en granza, con el objetivo de elaborar un mortero de yeso susceptible de ser aplicado en la conformación de placas prefabricadas para vivienda.

Con todo ello, el objetivo principal de este trabajo es realizar una caracterización física y mecánica del nuevo material de yeso presentado en esta comunicación. Asimismo, se presenta como objetivo realizar una discusión de los resultados obtenidos y extraer potenciales fuentes de aplicación y ventaja competitiva derivadas del empleo de estos novedosos productos desarrollados.

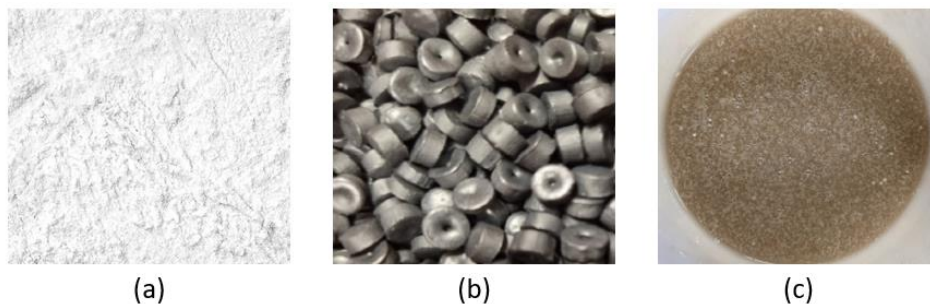
## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Materiales

Para el desarrollo de esta investigación se han empleado las siguientes materias primas, mostradas en la Figura 1:

- **Escayola:** designado como yeso tipo A de acuerdo con la norma EN 13279-1:2009, cuyas características según el fabricante Placo Saint-Gobain son: pureza superior al 92%, tamaño de partícula comprendido entre 0-0.2 mm, y pH > 6. Presenta una reacción al fuego Euroclase A1, con un factor de difusión a vapor de agua “ $\mu$ ” de 0.6.
- **Agua:** del Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid, España. Se trata de agua potable apta para el consumo humano que ha sido utilizada para la elaboración de compuestos de yeso en investigaciones previas [7, 15]. Esta agua se caracteriza por las siguientes propiedades: dureza media (25 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ); pH entre 7 y 8,5 y contenido de cloruros entre 1 y 1,5 mg/l.
- **HDPE:** proporcionados por la empresa Repsol S.A., con un tamaño de partícula de 1.4 mm y módulo de elasticidad de 1.38 MPA. presentan una densidad aparente de 930 kg/m<sup>3</sup>.
- **Disolución de EPS:** resultado de mezclar residuos de EPS y el disolvente universal en una proporción de 1:2 en peso, obteniendo un líquido viscoso con una densidad aparente final de  $650 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ .

Cabe destacar que, tanto el HDPE como el EPS empleados provienen de residuos generados en la industrial. Como se destacó, el EPS procede de los desperdicios generados en la instalación de sistemas SATE, así como, el HDPE fue suministrado por la empresa Repsol.



**Figura 1.** Materias primas empleadas: (a) escayola, (b) HDPE, y, (c) disolución de EPS.

## 2.2. Dosificaciones empleadas

En la Tabla 1, se presentan las dosificaciones empleadas para la elaboración de los novedosos compuestos de escayola diseñados en esta investigación. Cabe destacar que la relación agua/conglomerante se fijó experimentalmente en 0.7, garantizando una consistencia plástica y trabajable determinada a través del método de la mesa de sacudidas, con un diámetro de torta de  $165 \pm 10$  mm (según norma EN 13279-2:2014).

El proceso de amasado fue el descrito en la norma EN 13279-2:2014: 30 s de espolvoreo del polvo de escayola y HDPE en granza sobre el agua de amasado; 60 s de reposo; 30 s de mezclado; 30 s de reposo donde se incorpora la disolución de EPS; y, finalmente, 30 s de mezclado para homogeneizar la mezcla resultante. Las muestras se mantuvieron en condiciones de laboratorio ( $23 \pm 1^\circ\text{C}$  y humedad relativa de  $55 \pm 5\%$ ) durante 6 días, y, posteriormente, antes de realizar los ensayos se introdujeron 24 horas en estufa para su desecado a temperatura de  $40^\circ\text{C}$ . Cabe destacar que esta fase de secado favorece la evaporación del agua libre de amasado y el disolvente que puedan quedar en la mezcla endurecida tras el fraguado.

**Tabla 1.** Dosificaciones empleadas para la elaboración de los compuestos de base yeso.

Muestra	Escayola (g)	Agua (g)	EPS (g)	Disolvente (g)	HDPE (g)
Ref.	1000	700	—	—	—
10%EPS	900	630	85	170	—
20%EPS	800	560	170	340	—
3%HDPE	970	679	—	—	30
6%HDPE	940	658	—	—	60
10%EPS-3%HDPE	870	609	85	170	30
10%EPS-6%HDPE	840	588	85	170	60
20%EPS-3%HDPE	770	539	170	340	30
20%EPS-6%HDPE	740	518	170	340	60

## 2.3. Programa experimental

En el desarrollo de esta investigación se han llevado a cabo los siguientes ensayos de caracterización de los materiales de yeso elaborados:

- **Resistencia a flexión:** se llevó a cabo en probetas que medían  $40 \times 40 \times 160$  mm, apoyadas sobre dos rodillos situados a una distancia de 100 mm entre sus ejes, con un tercer rodillo aplicando una carga a velocidad constante en el centro de la muestra hasta que se produjo la rotura. Siguiendo el procedimiento descrito en la norma EN 13279-2:2014.

- **Resistencia a compresión:** medida con ayuda de una prensa hidráulica siguiendo las indicaciones de la norma EN 13279–2:2014. Se ensayaron las dos mitades de las probetas previamente testadas a flexión. La velocidad de carga fue de 20 N/s.
- **Dureza superficial:** determinada con ayuda de un durómetro Shore C, midiendo en dos caras plano-paralelas de las probetas de 40 × 40 × 160 mm. Se tomaron un total de 10 medidas por muestra, cinco en cada cara, siguiendo las indicaciones de la norma EN 13279–2:2014.
- **Conductividad térmica:** determinada con ayuda de una caja térmica equipada con termopares y sensores de flujo térmico. El ensayo se realizó siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 12664, empleando probetas de 150 × 150 × 25 mm.
- **Densidad aparente:** se realizó siguiendo las indicaciones de la norma UNE 102042:2014, utilizando el peso y el volumen de probetas prismáticas de 40 × 40 × 160 mm.
- **Porosidad abierta:** muestra la relación entre el volumen de poros accesibles y el volumen aparente del mortero, y se obtuvo según el ensayo recogido en la norma EN 13964:2016.
- **Absorción total de agua:** determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 520. Para este ensayo, las muestras deben sumergirse completamente en un recipiente con agua durante un período mínimo de dos horas. Una vez hecho esto, se pesan repetidamente para obtener la cantidad total de agua absorbida. Se emplearon probetas de 150 × 150 × 25 mm.

Asimismo, la descripción y cuantificación de los resultados obtenidos en los diversos ensayos se complementa mediante una discusión crítica de los mismos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Ensayos de caracterización mecánica

En primer lugar, en la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas de los compuestos estudiados.

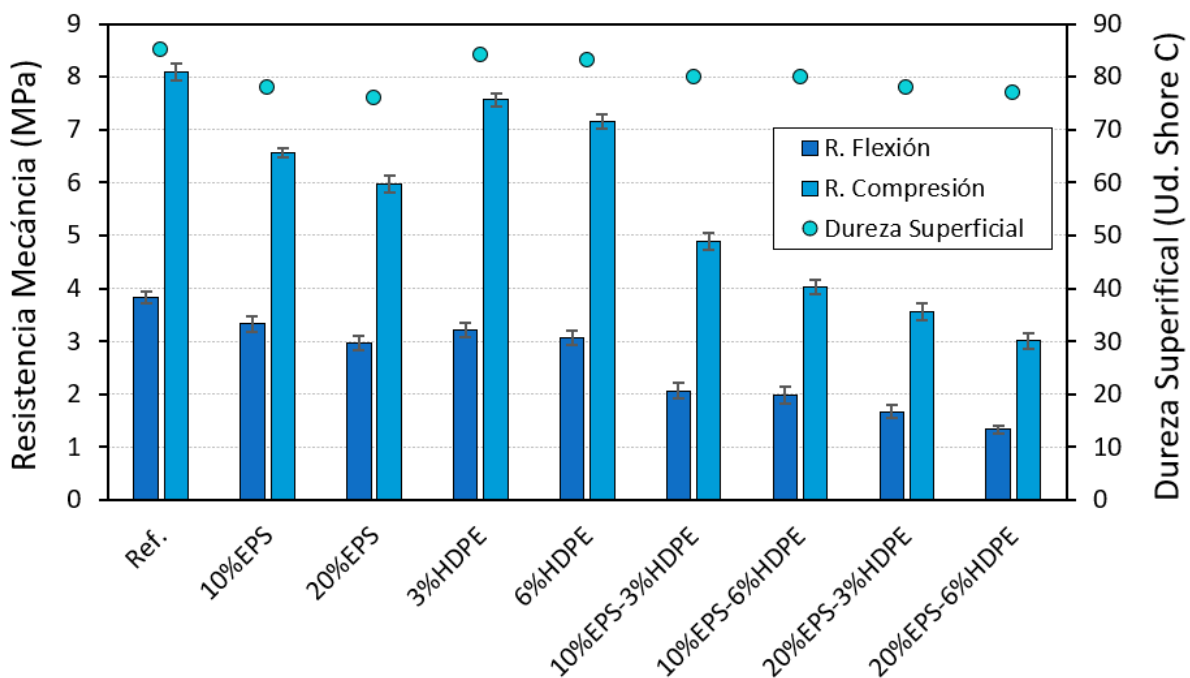


Figura 2. Resultados de las propiedades mecánicas.

Como se puede observar en la Figura 2, en ninguno de los casos analizados se superaron los valores de resistencia mecánicos ofrecidos por la muestra de referencia. Si bien en todos los compuestos se superaron los valores mínimos de resistencia a flexión y compresión, fijados por la norma EN 13279-2:2014 en un 1 MPa y 2 MPa, respectivamente. Para el compuesto con mayor contenido en materia prima reciclada 20%EPS-6%HDPE se obtuvieron valores de 1.33 MPa y 3.01 MPa, para la resistencia a flexión y compresión. La dureza superficial apenas se vio afectada por la incorporación de estos residuos en la matriz, obteniéndose en todos los casos valores comprendidos entre los 76 – 85 unidades Shore C.

Estos resultados se encuentran en relación con los obtenidos por otros investigadores como Pedreño-Rojas *et al.* [9], quienes incorporaron residuos de policarbonato en matriz de compuestos de yeso, o, por Romero-Gómez *et al.* [6], quienes incorporaron gránulos de polipropileno reciclado procedentes de capsulas de café. Asimismo, en experiencias previas realizadas con compuestos es escayola, NFU y disolución de EPS se obtuvo un comportamiento similar y se pudo observar una buena integración del residuo en la matriz [3].

### 3.2. Ensayos de caracterización física

Los resultados obtenidos para la conductividad térmica y densidad se muestran en la Figura 3.

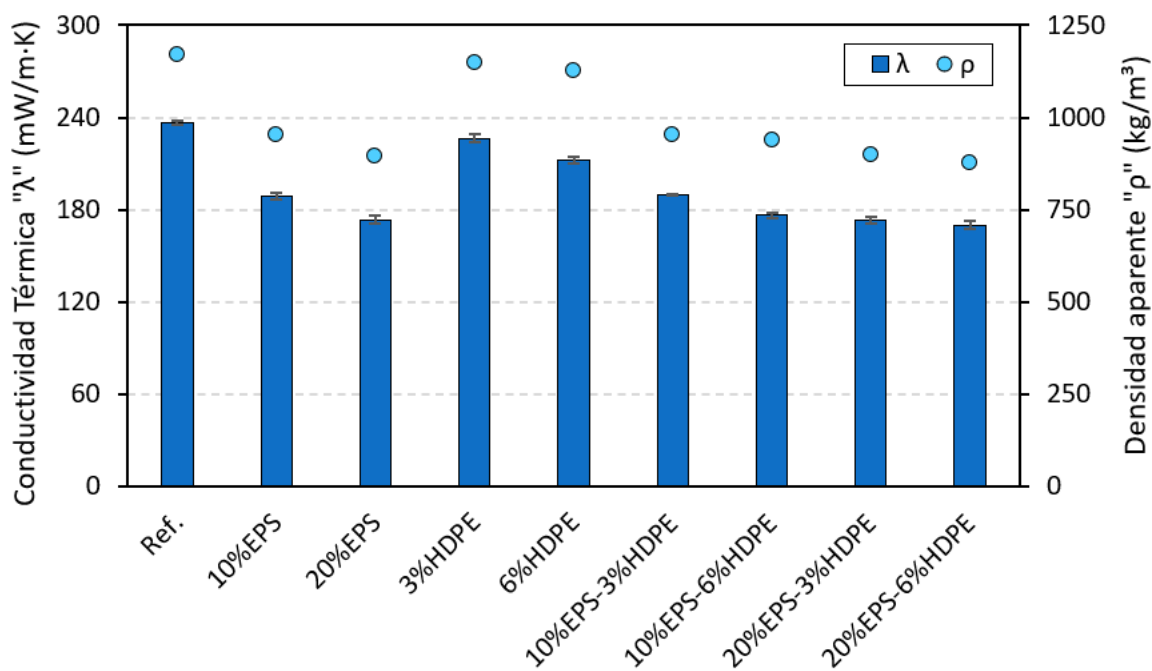


Figura 3. Resultados para la conductividad térmica y densidad aparente.

En la Figura 3 se puede observar la principal ventaja derivada del empleo conjunto del HDPE reciclado y el EPS en disolución, el aligeramiento del material de yeso y su baja conductividad térmica. Se ha podido comprobar como en todos los compuestos analizados la densidad y conductividad térmica disminuyen respecto a la referencia, siendo el compuesto 20%EPS-6%HDPE el que mejores resultados obtuvo. Concretamente, presentó valores de conductividad térmica de 169.8 mW/m·K y densidad aparente de 875.2 kg/m<sup>3</sup>, lo que supone una disminución con respecto a la referencia del 28.2% y el 25.1%, respectivamente. Esta disminución fue observada por Zaragoza-Benzal *et al.*, en su estudio con compuestos de yeso con NFU y disolución de EPS [3]. Si bien, estos valores de conductividad térmica

son muy competitivos y mejoran los obtenidos en otros estudios donde se integraban solo plásticos en granza como LDPE o HDPE [7, 8].

Asimismo, estos valores también guardan relación con la disminución de la absorción total de agua y de la porosidad abierta en estos compuestos. Donde se demuestra que la incorporación del EPS en disolución permite obtener compuestos de yeso más impermeables, lo que aumentaría su durabilidad. Estos resultados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Porosidad abierta y absorción total de agua.

HDPE (%)	—	—	—	3	6	3	6	3	6
Dis. EPS (%)	—	10	20	—	—	10	20	10	20
Abs. Tot. (%)	41.5	28.6	25.3	36.2	30.4	27.4	23.1	20.3	19.5
Por. Ab. (%)	45.2	33.5	31.3	43.5	42.7	30.2	30.1	28.6	27.4

### 3.3. Discusión crítica de los resultados

Debido a que los plásticos son mucho más ligeros que otros materiales de construcción, no destacan en las estadísticas de residuos, que normalmente se miden por masa. Sin embargo, estos residuos ocupan grandes volúmenes en vertederos y generan un fuerte impacto ambiental asociado a su lento proceso de degradación y la formación de micro plásticos. En este sentido, cualquier esfuerzo por reincorporar estas materias primas secundarias al mercado y dotarles de una nueva vida útil es de gran utilidad para industria.

Los compuestos elaborados en este trabajo pueden suponer una fuente de ventaja competitiva en diferenciación de producto, ya que permiten obtener una reducida conductividad térmica, ligereza y buen comportamiento frente a la acción del agua. Asimismo, al ser el material de yeso de uso no estructural, el volumen de residuo que puede incorporarse en la matriz es superior al permitido en otros materiales tales como el hormigón. De la misma manera, estos compuestos permiten disminuir el consumo de materias primas vírgenes, reduciendo el impacto ambiental y la huella de carbono del sector de la construcción. Además, contribuyen a abaratar costes de producción al reutilizar materiales de desecho como recurso e impulsan la innovación y la sostenibilidad en la industria, alineándose con las políticas ambientales y los objetivos de desarrollo sostenible.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han desarrollado nuevos compuestos de yeso con incorporación de residuos plásticos. Con carácter original, a la convencional incorporación de plásticos en granza, se ha sumado la adición de EPS en disolución. Con ello, se ha conseguido reducir hasta en un 26% el consumo de materias primas vírgenes por residuos plásticos, apostando por el diseño de nuevos productos con base yeso más sostenibles y circulares. Las principales características de estos compuestos:

- Resistencia mecánica por encima de los límites normativos de 1 MPa y 2 MPa a flexión y compresión, respectivamente. Si bien se produce una disminución de la resistencia en todos los compuestos con respecto al material de escayola tradicional.
- Mejora de las propiedades térmicas, reduciendo la conductividad térmica hasta valores de 169.8 mW/m·K y densidad aparente de 875.2 kg/m<sup>3</sup>, para el compuesto con mayor contenido en materias primas recicladas 20%EPS-6%HDPE. Esto hace pensar en el potencial ahorro energético que supondría el empleo de estos productos en viviendas y su viabilidad para la conformación de prefabricados.

No obstante, aún queda mucho camino por recorrer y en este trabajo se infieren futuras líneas de investigación necesarias como: caracterización fisicoquímica y necesidad de análisis microestructural, llevar a cabo un análisis de costes y evaluar su beneficio medioambiental mediante análisis de ciclo de vida de los productos desarrollados.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Acción financiada por la Comunidad de Madrid en el marco del Convenio entre la Comunidad de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid para la concesión de una subvención directa para el fomento y promoción de la investigación y la transferencia de tecnología 2023-2026, Línea de actuación A, Doctores Emergentes. Proyecto: "Transformación de residuos para desarrollar nuevos productos de construcción medioambientalmente sostenibles con propiedades mecánicas y térmicas mejoradas (Waste2BuildIns)", n.º referencia: **DOCTORES-EMERGENTES-24-DOCTORES-EMERGENTES-24-FL6X**.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Wang, M. Lanau, M. Österbring, H. Wallbaum y L. Rosado, "Barriers to reducing, reusing, and recycling plastic waste in the construction sector: A European perspective for construction companies", *Cleaner Environmental Systems*, vol. 20, 100400, <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2026.100400>, Marzo 2026.
- [2] R. Sultana, S. Zhang y C. Sun Poon, "A critical review on functionalized biochar from solid waste: Advancing sustainable construction and CO2 capture", *Waste Management*, vol. 214, 115351, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115351>, Marzo 2026.
- [3] A. Zaragoza-Benzal, D. Ferrández, P. Santos y E. Atanes-Sánchez. "Development and characterization of new lightweight waste-based plaster composites for building applications", *Journal of Building Engineering*, vol. 96, 110525, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110525>, noviembre 2024.
- [4] M.A. Pedreño-Rojas, J. de Brito, I. Flores-Colen, M.F.C. Pereira, P. Rubio-de-Hita. "Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis",

- Journal of Building Engineering*, vol. 29, 101143, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101143>, mayo 2020.
- [5] S. Zhao, L. Cai, Q. Tan, J. Li, Y. Qin, "Research on multi-dimensional decision-making method of plastic waste management", *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 119, 108360, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2026.108360>, june 2026.
- [6] M.I. Romero-Gómez, R.V. Silva, I. Flores-Colen, J. de Brito, "Influence of polypropylene residues on the physico-mechanical and water-resistance properties of gypsum plasters", *Journal of Cleaner Production*, vol. 37, 1333674, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133674>, octubre 2022.
- [7] M. Álvarez, D. Ferrández, A. Zaragoza-Benzal, B. Colorado-Pastor, "Initiative to Increase the Circularity of HDPE Waste in the Construction Industry: A Physico-Mechanical Characterization of New Sustainable Gypsum Products" *Applied Sciences* 14, no. 2: 478. <https://doi.org/10.3390/app14020478>, 2024.
- [8] D. Ferrández, A. Zaragoza-Benzal, P. Santos, L. Durães, "Characterisation of new sustainable gypsum composites with low-density polyethylene waste from single-use bags", *Journal of Building Engineering*, vol. 80, 108103, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108103>, diciembre 2023.
- [9] M.A. Pedreño-Rojas, C. Rodríguez-Liñán, I. Flores-Colen, J. de Brito. "Use of Polycarbonate Waste as Aggregate in Recycled Gypsum Plasters" *Materials* 13, no. 14: 3042. <https://doi.org/10.3390/ma13143042>, 2020.
- [10] A. San-Antonio, M. del Río, C. Viñas, P. Villoria, "Lightweight Material Made with Gypsum and EPS Waste with Enhanced Mechanical Strength", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28 (2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001382).
- [11] M. del Río, P. Villoria, I. Longobardi, J. Santa Cruz, C. Porras, "Redesigning lightweight gypsum with mixes of polystyrene waste from construction and demolition waste", *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 144-151, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.132>, mayo, 2019.
- [12] D. Ferrández, A. Zaragoza-Benzal, E. Barrak, P. Santos, C. Rodrigues. "Upcycling expanded polyethylene waste for novel composite materials: Physico-mechanical, hygrothermal and life cycle assessment", *Results in Engineering*, vol. 24, 103535, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103535>, diciembre, 2024.
- [13] D. Ferrández, M. Álvarez, A. Zaragoza-Benzal y P. Santos, "Eco-Design and Characterization of Sustainable Lightweight Gypsum Composites for Panel Manufacturing including End-of-Life Tyre Wastes" *Materials* 17, no. 3: 635, <https://doi.org/10.3390/ma17030635>, 2024.
- [14] A. Vidales, M. del Río, E. Atanes-Sánchez, C. Piña, C. Viñas, "Analysis of the feasibility of the use of CDW as a low-environmental-impact aggregate in conglomerates", *Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 83-91, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.011>, julio 2018.
- [15] A. Zaragoza-Benzal, D. Ferrández, P. Santos, E. Atanes-Sánchez, "Upcycling EPS waste and mineral wool to produce new lightweight gypsum composites with improved thermal performance", *Construction and Building Materials*, vol. 449, 138464, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138464>, octubre 2024.
- [16] D. Ferrández, A. Zaragoza-Benzal, C. Morón, "Material de construcción aislante aligerado, panel o placa prefabricado, proceso de elaboración de dicho material de construcción y de dicho panel o placa prefabricado", n.º ES 2 933 873 B2, Oficina Española de Patentes y Marcas.