




## Reciclaje químico de EPS en la elaboración de compuestos de yeso aligerado.

A. Zaragoza-Benzal<sup>1\*</sup> . D. Ferrández<sup>1</sup> . E. Atanes-Sánchez<sup>2</sup> 

\*Autor de Contacto: [alicia.zaragoza@upm.es](mailto:alicia.zaragoza@upm.es)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1039>

Recibido: 04/03/2026 | Correcciones recibidas: 28/03/2026 | Aceptado: 07/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

### RESUMEN

En este estudio se desarrollan nuevos compuestos de yeso reutilizando grandes volúmenes de residuos de poliestireno expandido (EPS) mediante reciclaje químico, sustituyendo materias primas naturales. La caracterización fisicoquímica, mecánica y medioambiental, permitió el análisis y comparación en función del disolvente empleado. Los compuestos presentan menor densidad y conductividad térmica, con buen comportamiento mecánico. El impacto ambiental de los compuestos se centra principalmente en el tipo de disolvente, siendo necesario ampliar la investigación hacia alternativas más sostenibles. Esta disolución genera cambios microestructurales, reduciendo el tamaño cristalito y produciendo la aglomeración de los cristales dependiendo del tipo de disolvente empleado. Los nuevos compuestos fomentan el uso de materiales secundarios, a la vez que mejoran la eficiencia energética en los edificios. **Palabras clave:** compuestos de escayola; revalorización de residuos; reciclaje químico; eficiencia energética.

**Citar como:** Zaragoza-Benzal, A., Ferrández, D., Atanes-Sánchez, E. (2026), “Reciclaje químico de EPS en la elaboración de compuestos de yeso aligerado”, Revista ALCONPAT, 16 (2), pp. 223 – 238, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i2.1039>

<sup>1</sup>Departamento de Tecnología de la Edificación, Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo el autor AZB contribuyó con la idea original en un 50%, experimentación en un 33%, recolección de datos en un 33%, escritura del trabajo 100%, discusión de resultados 33%. El autor DFV contribuyó con la idea original en un 50%, experimentación en un 33%, recolección de datos en un 33%, revisión del manuscrito en un 50%, discusión de resultados en un 33%. El autor EAS contribuyó con la experimentación en un 33%, recolección de datos en un 33%, revisión del manuscrito en un 50%, discusión de resultados en un 33%.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2027 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2026.

## Chemical recycling of EPS in the production of lightened gypsum composites.

### ABSTRACT

This study develops new gypsum composites by reusing large volumes of expanded polystyrene (EPS) waste through chemical recycling, thereby replacing natural raw materials. Physicochemical, mechanical and environmental characterisation enabled analysis and comparison based on the solvent used. The composites exhibit lower density and thermal conductivity, with good mechanical performance. The environmental impact of the composites is primarily linked to the type of solvent used, and further research is needed to explore more sustainable alternatives. This dissolution process induces microstructural changes, reducing crystal size and causing crystal agglomeration depending on the type of solvent used. The new composites promote the use of secondary materials whilst improving energy efficiency in buildings.

**Keywords:** plaster composites; waste revalorization; chemical recycling; energy efficiency.

## Reciclagem química de EPS na elaboração de compósitos leves de gesso.

### RESUMO

Neste estudo, são desenvolvidos novos compósitos de gesso mediante a reutilização de grandes volumes de resíduos de poliestireno expandido (EPS) por reciclagem química, substituindo matérias-primas naturais. A caracterização físico-química, mecânica e ambiental permitiu a análise e a comparação em função do solvente empregado. Os compósitos apresentaram menor densidade e menor condutividade térmica, com bom comportamento mecânico. O impacto ambiental dos compósitos está associado principalmente ao tipo de solvente utilizado, sendo necessário ampliar a pesquisa sobre alternativas mais sustentáveis. Esse processo de dissolução gera alterações microestruturais, reduzindo o tamanho dos cristalitos e promovendo a aglomeração dos cristais, conforme o tipo de solvente empregado. Os novos compósitos favorecem o uso de materiais secundários e, simultaneamente, melhoram a eficiência energética dos edifícios.

**Palavras-chave:** compósitos de gesso; revalorização de resíduos; reciclagem química; eficiência energética.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## NOMENCLATURA

Acrónimo	Nomenclatura
ACV	Análisis de ciclo de vida
ATG	Análisis termogravimétrico
DAP	Declaración ambiental de producto
DH	Dihidrato
DRX	Difracción de rayos X
EPS	Poliestireno expandido
FWHM	Anchura máxima a la mitad del pico de intensidad
GWP	Potencial de calentamiento global
MEB	Microscopía electrónica de barrido
MOE <sub>us</sub>	Módulo de Young
SATE	Sistema de Aislamiento Térmico Exterior

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria del yeso europeo cuenta con una facturación de en torno 7700 millones de euros anuales, generando millones de puestos de trabajo (Future Market Insights Global and Consulting Pvt. Ltd., n.d.). España, como principal productor a nivel europeo, juega un papel esencial en esta industria. El material de yeso es utilizado ampliamente en edificación, tanto como revestimiento y material de acabado como en la producción de placas y paneles prefabricados. A nivel medioambiental destaca principalmente por la menor energía necesaria para su producción en comparación con otros conglomerantes, además de su fácil reciclabilidad, que permite obtener el compuesto original (sulfato de yeso hemihidrato) de manera sencilla (Elert et al., 2023).

Además, es un conglomerante que admite una gran variedad de adiciones de diferente naturaleza. Tradicionalmente, desde la industria se ha optado por incorporar cargas ligeras como la perlita o la arlita, para obtener un producto aligerado de manera que se redujesen los tiempos de ejecución y facilitar su transporte, además de favorecer el aislamiento térmico del material (Del Río y Fernández Olivares, 2004).

Debido a esta sinergia que ofrece el yeso como conglomerante con otras adiciones, desde la comunidad investigadora se han realizado diversos esfuerzos en su empleo como matriz de recuperación de distintos residuos (Villoria Sáez et al., 2018). Y es que, como es sabido, el sector de la construcción es el responsable de generar el 40 % de los residuos sólidos, y del consumo de más del 36 % de la energía a nivel mundial (Yılmaz et al., 2019). Esto, sumado al incremento de la extracción y consumo de materias primas naturales, hacen del sector de la construcción una de las industrias con mayor impacto ambiental.

A este respecto, varias investigaciones han analizado la incorporación de residuos sólidos ligeros procedentes del sector de la construcción como es el poliestireno expandido (EPS). Este residuo ha venido experimentando un aumento de su presencia en vertederos debido al incremento de los trabajos de rehabilitación energética impulsados por la UE, en el que el principal sistema utilizado es el SATE (Sistema de Aislamiento Térmico Exterior) (Schleier et al., 2022). En este sistema

predomina el uso del EPS como capa principal aislante, generando gran cantidad de residuos no biodegradables y de reciclaje complejo que aumentan la presión de los vertederos ya saturados. Los estudios donde se incorporan residuos de EPS en compuestos de yeso aligerados utilizan el residuo previamente triturado, generalmente con un tamaño inferior a los 4 mm de diámetro, aunque en ocasiones se han utilizado incluso granulados de hasta 11 mm (Argalis et al., 2023; Villoria Sáez et al., 2020). Las cantidades adicionadas suelen encontrarse entre el 3 – 6 % del peso del conglomerante (Bicer y Kar, 2017; Bumanis et al., 2023). Estos bajos porcentajes de adición se deben a la baja densidad del residuo, que varía ente 28 – 70 kg/m<sup>3</sup> (CTE, 2010).

En estos estudios destaca principalmente la bajada de la conductividad térmica, debido a la reducción significativa de la densidad aparente de los compuestos obtenidos. Estudios como el de Bumanis et al. (Bumanis et al., 2023) obtuvieron una conductividad térmica inferior a 0.150 W/m·K, incorporando hasta un 4 % de EPS granulado de hasta 1.2 mm de diámetro. Estudios similares, como el de San-Antonio-González et al. (San-Antonio-González et al., 2015), consiguieron una conductividad térmica de en torno a 0.08 en compuestos con un 2 % de EPS granulado con un tamaño menor de 4 mm. En ambos casos la densidad fue inferior a 600 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, el aumento del aire ocluido que conlleva esa reducción de la densidad impacta negativamente en el comportamiento mecánico del material. En muchos casos, los compuestos elaborados ni siquiera alcanzan los mínimos normativos de 1 MPa en resistencia a flexión y 2 MPa en resistencia a compresión marcados por la normativa vigente (UNE-EN 13279-2: 2014). Los puntos preferentes de rotura que se forman entre la matriz de yeso y el residuo debido a la mala adherencia entre ambos también fundamentan este descenso de la resistencia mecánica, desaconsejándose el uso de estos materiales en edificación a pesar de sus interesantes propiedades térmicas desde el punto de vista del ahorro energético (de Oliveira et al., 2021).

En este estudio se plantea una nueva forma de incorporar los residuos de EPS, a través de su disolución previa a la fase de amasado del material, lo que genera un material menos heterogéneo y con mayor resistencia, mientras que se siguen conservando sus interesantes propiedades térmicas. Así mismo, se ha realizado una comparación empleando diferentes agentes disolventes, pudiendo así determinar si éste repercute en las características finales de los compuestos elaborados.

## 2. PROCEDIMIENTO

En esta sección se recogen los materiales utilizados, campaña experimental desarrollada y proceso de elaboración de las muestras empleadas en esta investigación.

### 2.1 Materiales

Los materiales empleados en este estudio han sido:

- Conglomerante: Yeso de construcción designado como B1 según la norma UNE-EN 13279-1. Este conglomerante, compuesto fundamentalmente por sulfato de calcio hemidratado, presenta un índice de pureza >80%, una granulometría entre 0-0.4 mm, reacción al fuego A1 y pH >6.
- Agua de amasado: agua potable, suministrada por el Canal de Isabel II (Madrid). Esta agua no presenta impurezas según la Directiva (UE) 2020/2184 (Parlamento Europeo, 2020), y ha sido utilizada anteriormente de manera satisfactoria en la elaboración de compuestos de yeso en estudios previos (Zaragoza-Benzal, Ferrández, Santos, et al., 2023).
- Disolución de residuos de EPS: Obtenido mediante la disolución de EPS descartado durante la rehabilitación energética de fachadas mediante Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE). El EPS utilizado en estos trabajos suele presentar una conductividad térmica de 0.037 W/m·K, densidad entre 15-20 kg/m<sup>3</sup>, así como una resistencia a compresión 0.06 MPa. La disolución se realizó empleando dos agentes disolventes diferentes, acetato de

etilo y disolvente universal, obteniéndose así dos tipos de disolución, dsA y dsB, respectivamente. Por un lado, el aceto de etilo ( $C_4H_8O_2$ ) presenta una pureza del 99.5% y una densidad de  $900 \text{ kg/m}^3$ . El disolvente universal está compuesto por una combinación de hidrocarburos volátiles (tolueno, metanol, acetato de metilo) y presenta una densidad de  $850 \text{ kg/m}^3$ . Las disoluciones (dsA y dsB), se realizaron a una razón EPS/disolvente de 1:2 en masa, obteniéndose una densidad de  $700 \text{ kg/m}^3$  y  $660 \text{ kg/m}^3$  para dsA y dsB respectivamente.

## 2.2 Programa experimental

El programa experimental llevado a cabo engloba la caracterización fisicoquímica, física y mecánica de los compuestos elaborados, así como una evaluación medioambiental de los compuestos obtenidos, mediante la realización de los siguientes ensayos:

- **Caracterización física:** Se determinó la densidad aparente, dureza superficial Shore C, Módulo de Young ( $MOE_{us}$ ) y conductividad térmica. Esta caracterización se obtuvo de probetas normalizadas RILEM de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . La densidad aparente, según la norma UNE 102042:2023, se obtuvo empleando el volumen midiendo las probetas con ayuda de un calibre con precisión de 0.01 mm, y la masa con una balanza electrónica de precisión de 0.01 g. La dureza superficial shore C se obtuvo siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 13279-2:2014, con la ayuda de un durómetro. Las medidas se tomaron sobre dos de las caras longitudinales de las probetas que estuvieron en contacto con el molde durante el fraguado, obteniendo un total de cinco medidas en cada cara. El módulo de Young dinámico se determinó mediante el método de los ultrasonidos según la norma UNE-EN ISO 14146:2004. Para ello se utilizó un equipo Ultrasonic tester E46 (Ibertest), pudiendo así obtener la velocidad de propagación de onda, medidos longitudinalmente a la probeta. La conductividad térmica se obtuvo con un equipo  $\lambda$ -Meter EP500e, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 12664. Para ello se emplearon probetas de  $150 \times 150 \times 30 \text{ mm}^3$ . El ensayo se realizó durante 90 min tras alcanzar un régimen estacionario a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- **Caracterización mecánica:** Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a flexión y compresión, así como la obtención de imágenes mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). La resistencia a flexión y compresión se realizaron siguiendo la norma UNE-EN 13279-2:2014 con una prensa hidráulica AUTOTEST 200-10SW (Ibertest). Para la resistencia a flexión se ensayaron tres probetas de cada dosificación de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , mientras que a compresión se ensayaron seis probetas para cada dosificación, con una superficie de aplicación de carga de  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ . Las imágenes MEB se obtuvieron mediante un microscopio Jeol JSM-820, equipado con análisis EDX de Oxford y operando a 20kV. Las muestras fueron recubiertas con oro con una metalizadora Cressington 108auto para asegurar la buena conductividad del haz de electrones.
- **Caracterización fisicoquímica:** Se realizaron análisis termogravimétricos (ATG) y difracción de rayos X (DRX) de los compuestos. Los ATG se realizaron con un equipo SDT Q600 (TA Instruments), desde temperatura ambiente hasta los  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , a una velocidad de  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{minuto}$  y empleando una atmósfera de aire con un caudal de  $100 \text{ ml/min}$ . Para el DRX, se utilizó un difractómetro Siemens Krystalloflex D5000 con monocromador de grafito con Cu-K $\alpha$ . El ensayo se realizó en un rango entre  $5^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$  cada  $0.04^\circ$  y 4 segundo por paso. Adicionalmente, se ha obtenido el tamaño cristalito obtenido a partir de

la anchura máxima a la mitad de los picos de intensidad obtenidos en los difractogramas (FWHM) según la ecuación de Debye-Scherrer (Patterson, 1939).

- Evaluación medioambiental: Se llevó a cabo aplicando el análisis de ciclo de vida (ACV) según las normativas ISO 14040 e ISO 14044, empleando como unidad funcional 1 m<sup>2</sup> de panel para la ejecución de particiones ligeras. Se trata de un análisis que abarca desde la obtención de las materias primas hasta la producción del material (A1-A3). Se han empleado las declaraciones ambientales de producto (DAP) de todas las materias primas excepto de los residuos de EPS, los cuales, al ser un residuo con computan en el inventario. Así mismo, la energía utilizada en la producción se obtuvo de la literatura (Romero-Gómez et al., 2023) para el caso concreto del *mix* de energía español. Para la fase de transporte a fábrica de las materias primas se ha considerado un camión diésel 16-32 t (EURO 6). La evaluación se ha realizado mediante el método del análisis del inventario del ciclo de vida, considerando únicamente la categoría de impacto de potencial de calentamiento global (GWP).

### 2.3 Elaboración de las muestras

La elaboración de los compuestos se llevó a cabo siguiendo los métodos y especificaciones indicados en la normativa UNE-EN 13279-2:2014. La relación agua/escayola en todos los compuestos se fijó en 0.7, obtenida por el ensayo de la mesa de sacudidas. Las disoluciones se incorporan en la última fase del amasado, obteniéndose una integración total del residuo en una masa homogénea.

Tras el fraguado de los compuestos, las probetas fueron desmoldadas y almacenadas en condiciones de laboratorio, a  $23 \pm 2$  °C de temperatura y  $50 \pm 5\%$  de humedad relativa, durante siete días. Previamente a los ensayos, las probetas fueron desecadas en estufa a  $40 \pm 2$  °C durante 24 horas. En las dosificaciones preparadas, recogidas en la Tabla 1, se puede observar cómo se ha realizado una sustitución de la amasada de yeso por las diferentes disoluciones de residuos de EPS de forma progresiva hasta un 22.7% en masa del conglomerante, con el objetivo de obtener un material con mayor proporción de materiales recuperados, en favor de la reducción en el uso de materias primas vírgenes. De este modo se apuesta por la aplicación de los principios de la economía circular en la elaboración de nuevos compuestos de construcción, contribuyendo al descenso de los residuos acumulados en vertederos a través de su revalorización.

Tabla 1. Dosificaciones empleadas en la elaboración de los compuestos estudiados.

Compuesto	Yeso (g)	Agua (g)	dsA (g)	dsB (g)
Y0.7-Ref	1000	700	–	–
Y0.7-dsA100	941	659	100	–
Y0.7-dsA200	882	618	200	–
Y0.7-dsB100	941	659	–	100
Y0.7-dsB200	882	618	–	200

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se recogen los resultados generados del programa experimental planteado, así como su discusión.

### 3.1 Caracterización física

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos para los ensayos de dureza superficial y MOE<sub>us</sub> de todos los compuestos elaborados.

Tabla 2. Resultados para el MOE<sub>us</sub> y la dureza superficial de los compuestos elaborados.

Compuesto	MOE <sub>us</sub> (MPa)	Dureza superficial (Uds. Shore C)
Y0.7-Ref	4910.39	78
Y0.7-dsA100	2897.37	73
Y0.7-dsA200	2975.07	66
Y0.7-dsB-100	3218.42	70
Y0.7-dsB-200	2561.21	67

Como se observa en la Tabla 2, el MOE<sub>us</sub> se reduce considerablemente al incorporar las distintas disoluciones en los compuestos. El compuesto Y0.7-dsB-100 fue el menos afectado con una reducción del 34.5 %, seguido del compuesto Y0.7-dsA100, Y0.7-dsA200 y Y0.7-dsB-200, este último con una reducción del 47.8 %. Este descenso en el MOE<sub>us</sub> estaría indicando un aumento de las discontinuidades internas del material que estaría provocando el polímero disuelto (López Pedrajas et al., 2022). Otras investigaciones han observado resultados similares al introducir otros residuos ligeros como el EPS en estado sólido (Porras Amores et al., 2019).

En cuanto a la dureza superficial, los resultados muestran un descenso menos acusado en las muestras, con una reducción máxima en el compuesto Y0.7-dsA200, con una dureza un 15.4 % inferior. En este caso, ambas disoluciones tuvieron efectos similares en el material de yeso. En otras investigaciones donde se introduce material reciclado en la matriz de yeso, esta disminución no es tan evidente al no producirse un material homogéneo durante la amasada (De San Antonio, 2017).

A continuación, la Figura 1 muestra los resultados para la densidad aparente y la conductividad térmica de los compuestos elaborados, así como resultados procedentes de estudios similares donde se han incorporado residuos de EPS en estado sólido en compuestos de yeso aligerados. Además, se indican los valores fijados por la normativa UNE-EN 13279-1 para yesos aligerados (800 kg/m<sup>3</sup>) y la conductividad térmica asociada a esa densidad (260 mW/m·K).

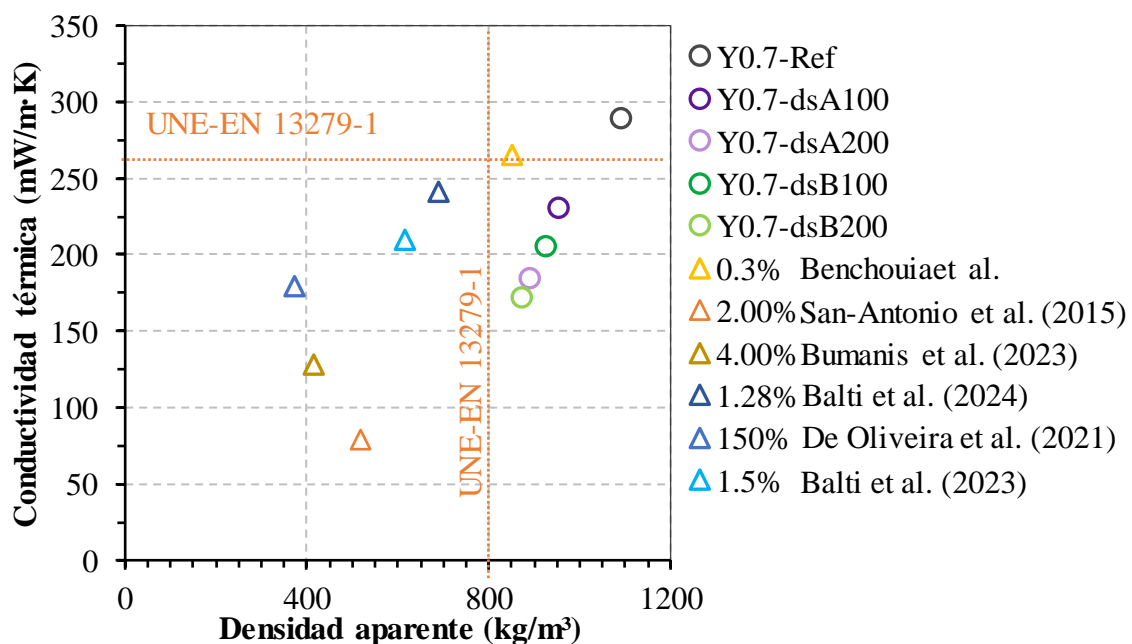


Figura 1. Resultados para la densidad aparente y la conductividad térmica de los compuestos elaborados en comparación con otros estudios similares (porcentajes de adición de EPS con respecto el peso del conglomerante).

Como se observa en la Figura 1, todos los compuestos desarrollados obtuvieron valores de densidad aparente y conductividad térmica inferiores a los de la referencia. Todos los compuestos alcanzaron valores de densidad aparente entre  $850 - 950 \text{ kg/m}^3$ , mientras que las conductividades térmicas oscilaron entre  $170 - 230 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ . Cabe destacar que los compuestos Y0.7-dsB obtuvieron valores más reducidos en estas propiedades con comparación con sus homólogos Y0.7-dsA, obteniéndose valores cada vez más reducidos conforme aumentaba la proporción de disolución en los compuestos.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones similares, se observa que los compuestos obtenidos en esta investigación se alinean con otros estudios, reduciéndose la conductividad térmica y la densidad a medida que aumenta la cantidad de material reciclado incorporado. No obstante, se observa cómo, para conductividades térmicas análogas, la densidad obtenida en los compuestos desarrollados en esta investigación es significativamente superior. Además, el porcentaje de adición de material reciclado empleado en esta investigación es más elevado, lo que aumenta el porcentaje de recuperación y revalorización de residuos. Cabe señalar que conductividades térmicas excesivamente bajas (por debajo de  $150 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ ) están relacionadas con muy bajas densidades (por debajo de  $600 \text{ kg/m}^3$ ), lo que suele repercutir negativamente en el rendimiento mecánico de los compuestos, llegando incluso a no ser viables técnicamente (del Río-Merino et al., 2022).

### 3.2 Caracterización mecánica

En la Figura 2 se muestran los resultados para la resistencia a flexión y a compresión de los compuestos de yeso elaborados, además, se han incorporado los resultados de otros estudios similares. Adicionalmente, se han señalado las resistencias mecánicas mínimas marcadas por la normativa UNE-EN 13279-2, correspondientes a  $1 \text{ MPa}$  para la resistencia a flexión y  $2 \text{ MPa}$  para la resistencia a compresión.

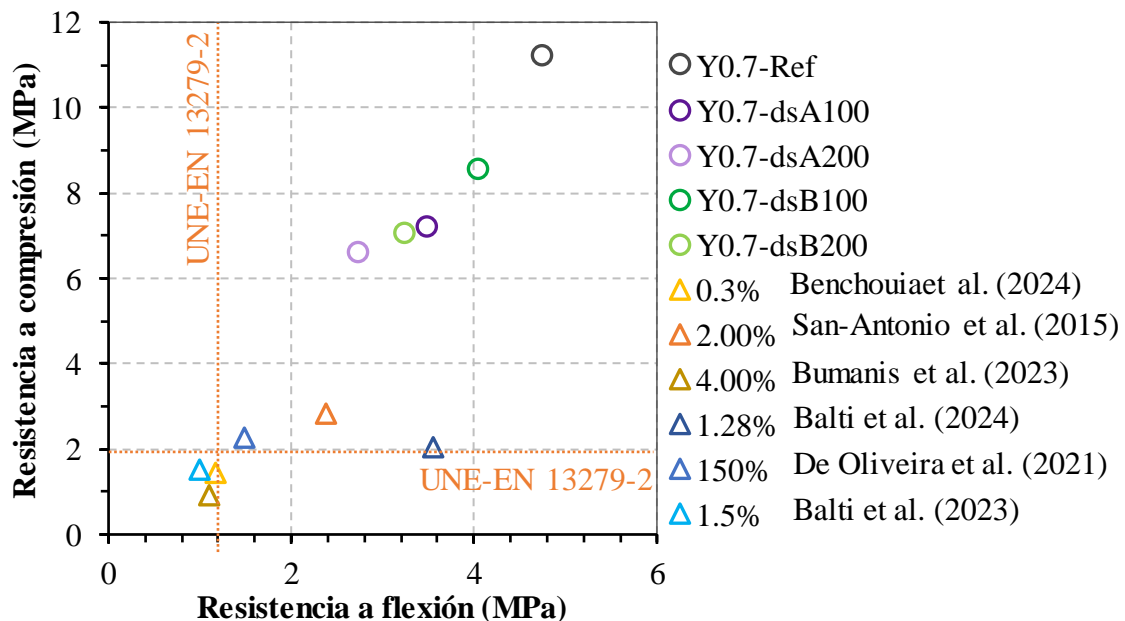


Figura 2. Resultados para la resistencia a flexión y compresión de los compuestos elaborados en comparación con otros estudios similares (porcentajes de adición de EPS con respecto al peso del conglomerante).

En la Figura 2 se observa como la incorporación de la disolución de EPS reciclado reduce las resistencias mecánicas progresivamente según se aumenta dicha disolución en los compuestos, siendo más significativo en los compuestos Y0.7-dsA. La resistencia a flexión y compresión más

baja se obtuvo en el compuesto Y0.7-dsA200, con una reducción de 42.5 % y 41.3 % con respecto a la referencia, respectivamente. Mientras que en el caso más favorable (Y0.7-dsB100), la reducción fue del 14.7 % y 23.7 % para la resistencia a flexión y compresión respectivamente. Así se hace evidente como la propiedad más afectada en los compuestos fue la resistencia a compresión en todos los casos.

Al analizar investigaciones donde la incorporación del residuo se realiza en **fase sólida**, se advierte una degradación crítica de las propiedades mecánicas. Diversos compuestos analizados apenas alcanzan el umbral mínimo de resistencia a la flexión de 1 MPa. Esta deficiencia es particularmente evidente en el ensayo de compresión, donde la escasa adherencia interfacial entre las partículas sólidas de EPS y la matriz genera puntos de rotura preferenciales que comprometen la integridad estructural del material. En consecuencia, estos compuestos suelen presentar valores inferiores al límite normativo de 2 MPa establecido por la norma (UNE-EN 13279-2:2014). Este comportamiento contrasta notablemente con los resultados obtenidos en la presente investigación, en la cual las propiedades mecánicas no solo cumplen con la normativa, sino que duplican o incluso triplican los valores reportados en estudios previos.

A continuación, en la Figura 3 se muestran unas imágenes obtenidas mediante MEB del compuesto de referencia y los compuestos con mayores cantidades de disolución (Y0.7-dsA200 y Y0.7-dsB200).

En la Figura 3 (a) se observa la matriz de la muestra de referencia, con algunos poros, pero compacta en términos generales. También se distinguen los cristales aciculares propios del sulfato de yeso dihidratado (Lanzón et al., 2022). Por otro lado, en la Figura 3 (b) y (c), la matriz aparece mucho más porosa, con grandes huecos entre cristales, lo que explicaría la reducción en las propiedades mecánicas de los compuestos. También se puede apreciar en ambos casos un cierto acortamiento y engrosamiento de los cristales de yeso, aspecto ya observado en estudios anteriores (Zaragoza-Benzal et al., 2023), confirmando así los resultados obtenidos en el tamaño medio cristalito. La principal diferencia observada entre los compuestos con diferentes disoluciones es que mientras que en el compuesto Y.7-dsA200 la matriz aparece más disgregada, en el compuesto Y0.7-dsB200 presenta una matriz más cohesionada, si bien la disolución produce ciertas aglomeraciones de cristales con forma de esfera. Ambas situaciones estarían afectando los comportamientos mecánicos observados (López Pedrajas et al., 2022).

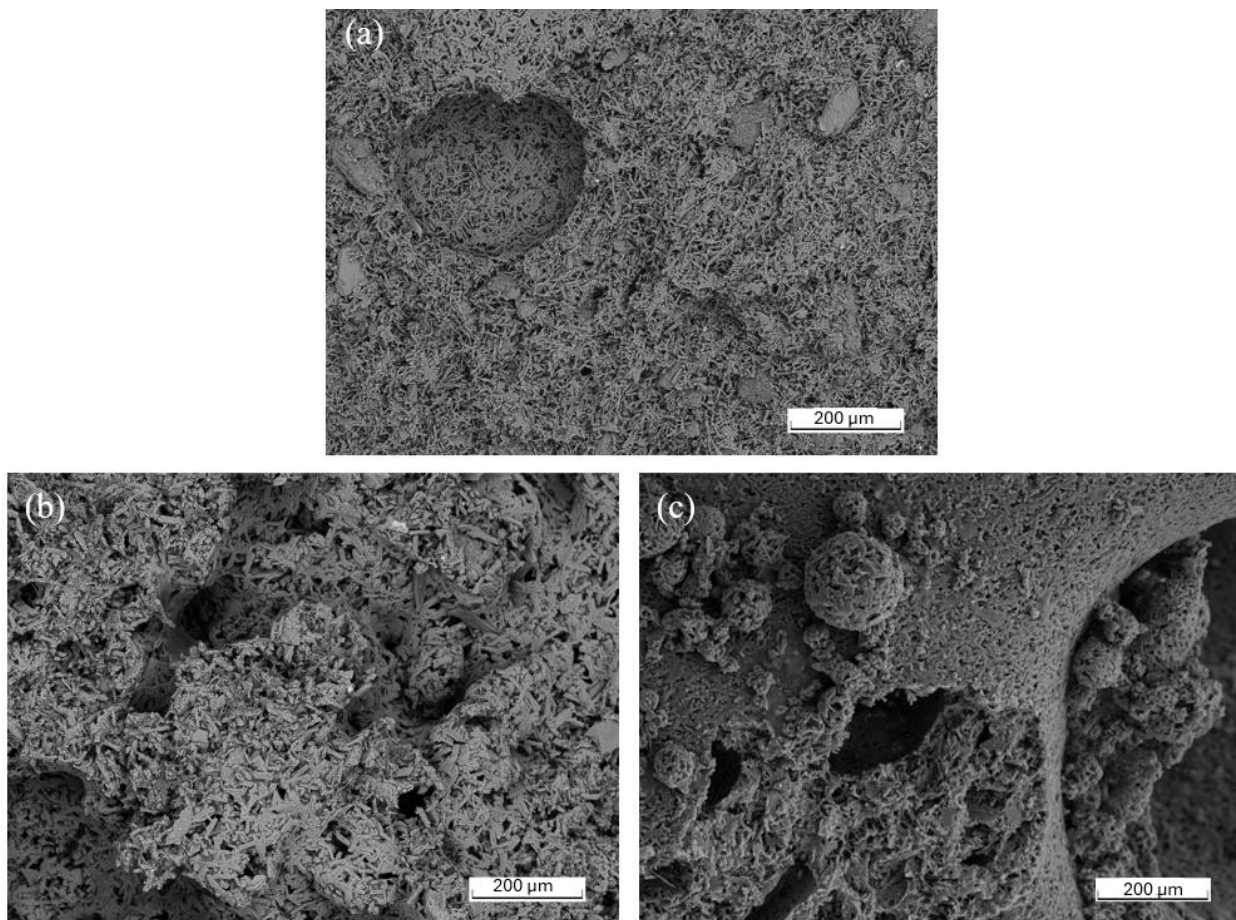
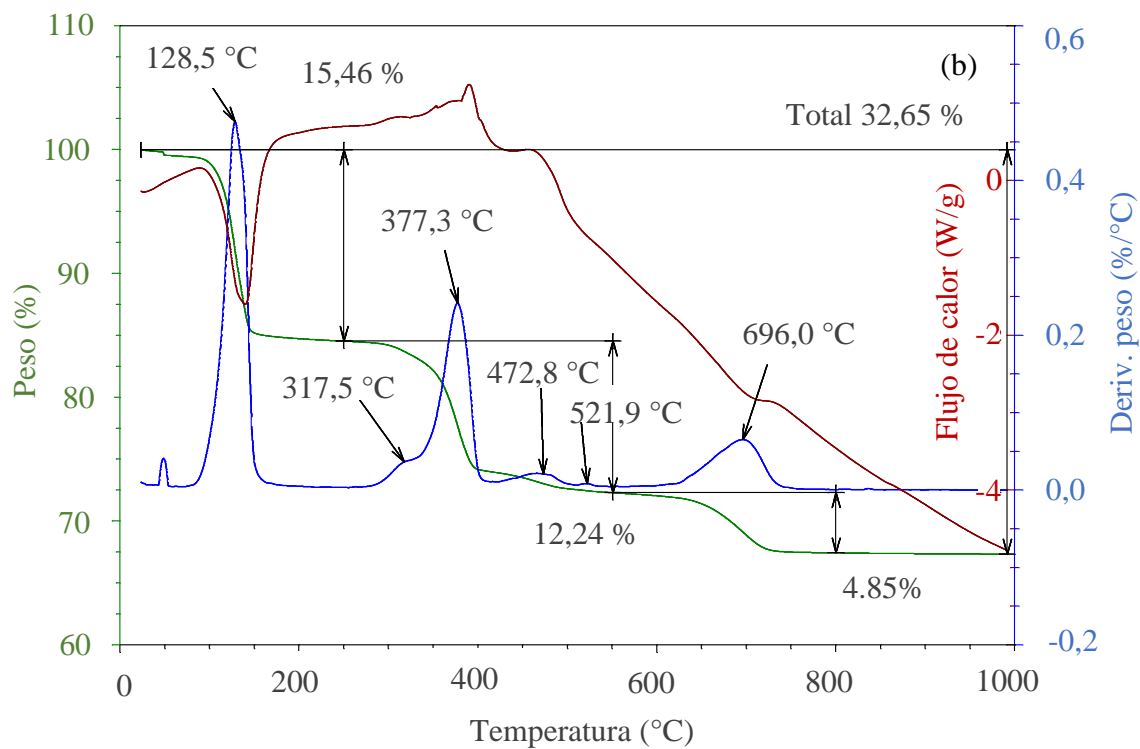
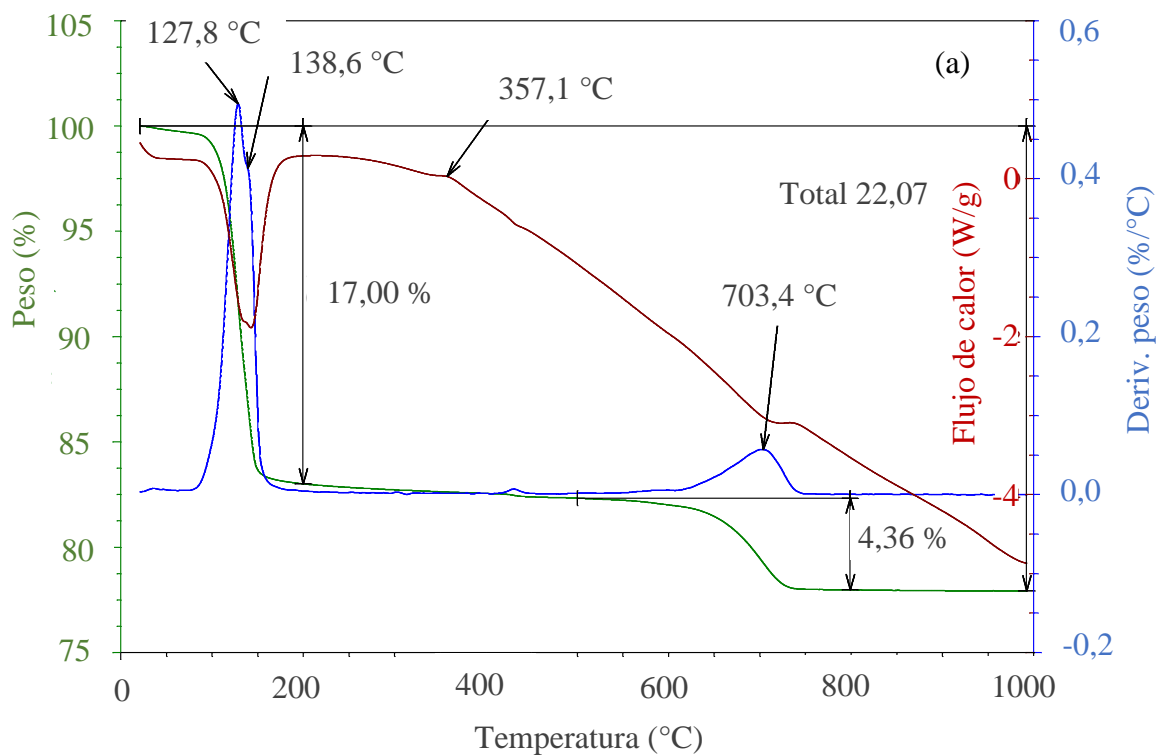


Figura 3. Imágenes MEB a 250 ampliaciones de los compuestos: (a) Y0.7-Ref, (b) Y0.7-dsA200, (c) Y0.7-dsB200.

### 3.3 Caracterización fisicoquímica

La Figura 4 muestra los análisis termogravimétricos, en donde la línea verde representa la pérdida de masa, la línea azul la derivada de la pérdida de masa y la línea marrón indica el flujo de calor. El ensayo se ha realizado sobre la muestra de referencia y las muestras con mayor contenido de EPS disuelto (Y0.7-dsA200 y Y0.7-dsB200).

Como se aprecia en la Figura 4, la muestra de referencia experimenta una pérdida total de masa del 22.07 %. En primer lugar, se produce una primera pérdida de masa (16.99 %) en un proceso endotérmico correspondiente a la transformación del sulfato de yeso dihidratado a sulfatos de yeso hemihidratado, y finalmente en anhidrita. En el intervalo entre 250 – 550 °C, un evento exotérmico sin pérdida de masa asociada indica la transformación de la anhidrita  $\alpha$  a anhidrita  $\beta$ . Por último, se produce una pequeña pérdida de masa (4.36 %) de forma endotérmica, en el rango de temperatura 550 °C – 700 °C, correspondiente al paso del carbonato de calcio en óxido de calcio. En las muestras con disolución de EPS reciclado, la pérdida de masa aumenta hasta un 32.65 % y 29.45 % para las muestras Y0.7-dsA200 y Y0.7-dsB200 respectivamente. En estas muestras, se produce un evento exotérmico, correspondiente a la combustión del polímero incorporado. En este proceso se observan dos eventos de pérdida de masa diferenciados, el primero entre 250 °C – 550 °C, y el segundo entre 550 °C – 750 °C, si bien es cierto que en el caso de la muestra Y0.7-dsA, en ambos eventos, la pérdida de masa es mayor. No obstante, la velocidad de pérdida de masa máxima es en ambos casos similar.



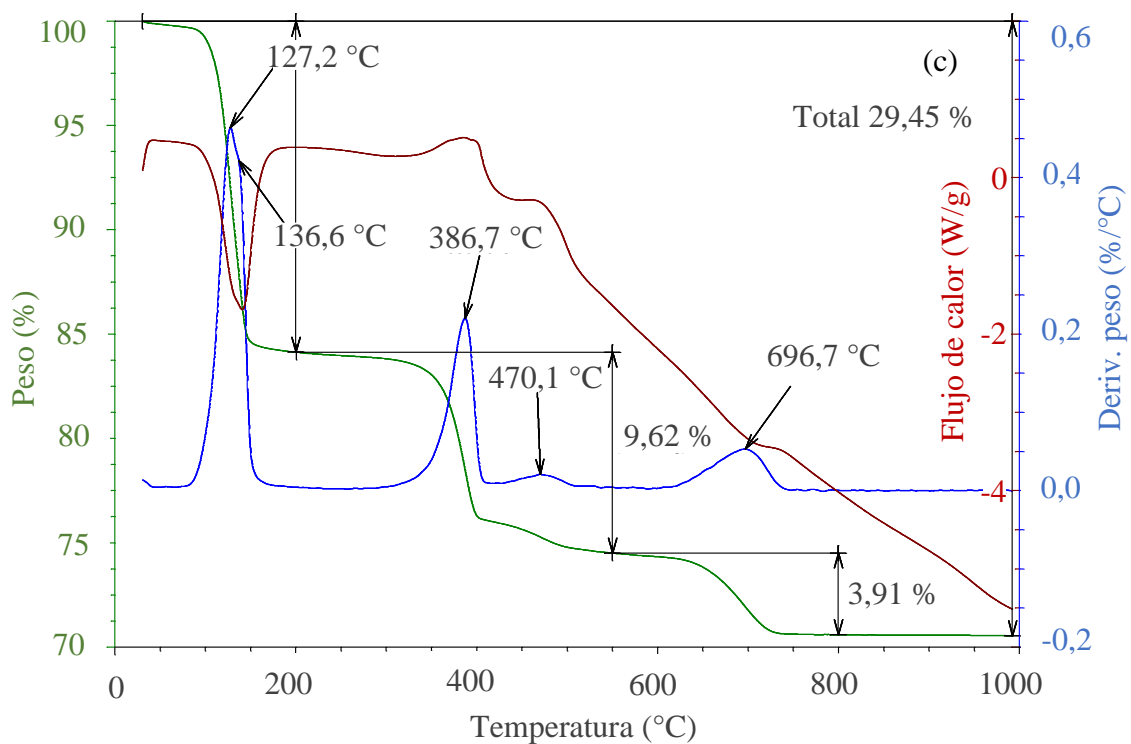


Figura 4. Resultados de los análisis termogravimétricos de: (a) Y0.7-Ref., (b) Y0.7-dsA200, (c)Y0.7-dsB200.

La Figura 5 muestra los difractogramas correspondientes a todas las muestras realizadas en esta investigación, así mismo, la Tabla 3 recoge el tamaño medio de los dominios cristalinos de las muestras.

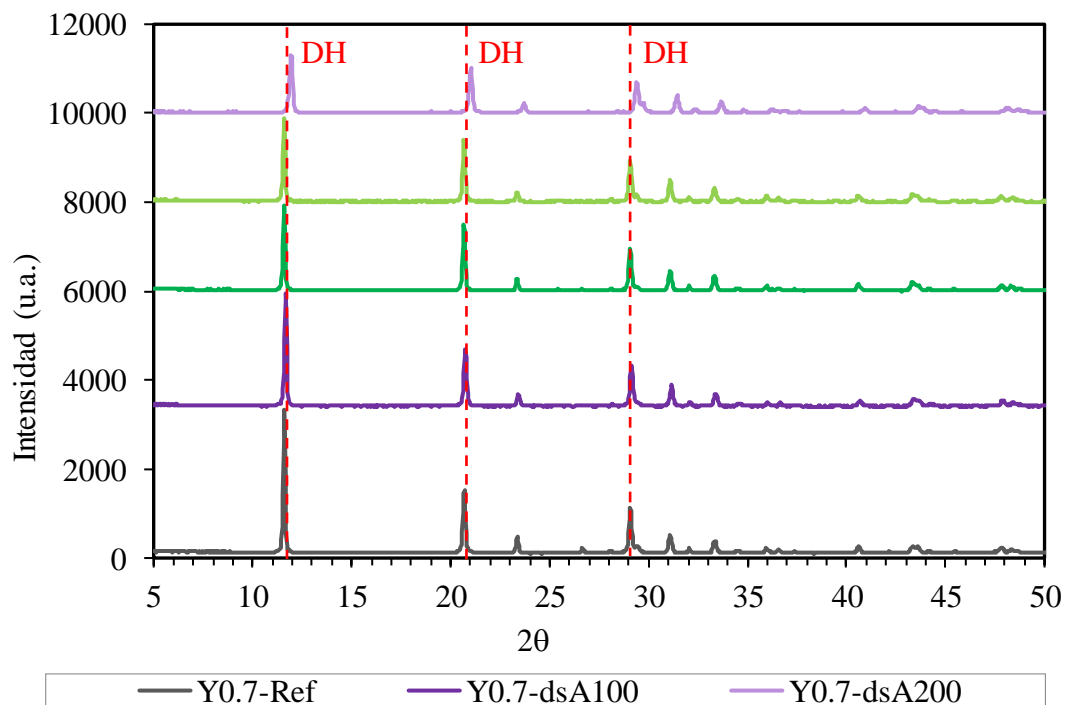


Figura 5. Difractogramas de las muestras elaboradas en esta investigación, indicando los principales ángulos de refracción de los cristales de dihidrato (DH).

Como se muestra en la Figura 5, todos los compuestos presentan los picos correspondientes al sulfato de calcio dihidrato con mayor intensidad en los ángulos de difracción  $2\theta=12^\circ$ ,  $21^\circ$  y  $29^\circ$  (Strydom & Potgieter, 1999). En las muestras con sustitución del yeso por dsA y dsB, se produce una disminución de la intensidad de los picos, siendo mayor conforme se aumenta el reemplazo en las muestras. En el compuesto Y0.7-dsA100, este efecto no es tan evidente, si bien es cierto que, al aumentar el reemplazo, en la muestra Y0.7-dsA200, la intensidad de los picos es la más afectada, siendo la menor de entre todas las muestras ensayadas.

Por su lado, la Tabla 3 complementa estos resultados al coincidir el tamaño medio cristalito con las intensidades observadas en la Figura 5.

Tabla 3. Tamaño medio (D) de los dominios cristalinos ordenados de las muestras.

Muestra	Posición del pico ( $2\theta$ , grados)	$\beta$ =FWHM (grados)	Tamaño cristalito, D (nm)
Y0.7-Ref	20.69	0.1481	56.97
Y0.7-dsA100	20.75	0.1526	55.27
Y0.7-dsA200	21.04	0.1935	43.61
Y0.7-dsB-100	20.69	0.1532	55.05
Y0.7-dsB-200	20.76	0.1713	49.23

En todas las muestras con incorporación de las diferentes disoluciones se produce una reducción del tamaño cristalito con respecto la referencia. En las muestras Y0.7-dsA100 y Y0.7-dsB100, la disminución es apenas apreciable, mientras que al aumentar la cantidad de disolución se hace más evidente. El compuesto Y0.7-dsA200 fue el compuesto más afectado negativamente a este respecto. La modificación del crecimiento cristalito al incluir polímeros en disolución ha sido observado por Pedrajas et al. (López Pedrajas et al., 2022), quienes señalaron un acortamiento de los cristales.

### 3.4 Evaluación medioambiental

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos en el ACV, referido a las emisiones de  $\text{CO}_2$  equivalente (GWP) en la elaboración de  $1 \text{ m}^2$  de placa con los compuestos de yeso diseñados.

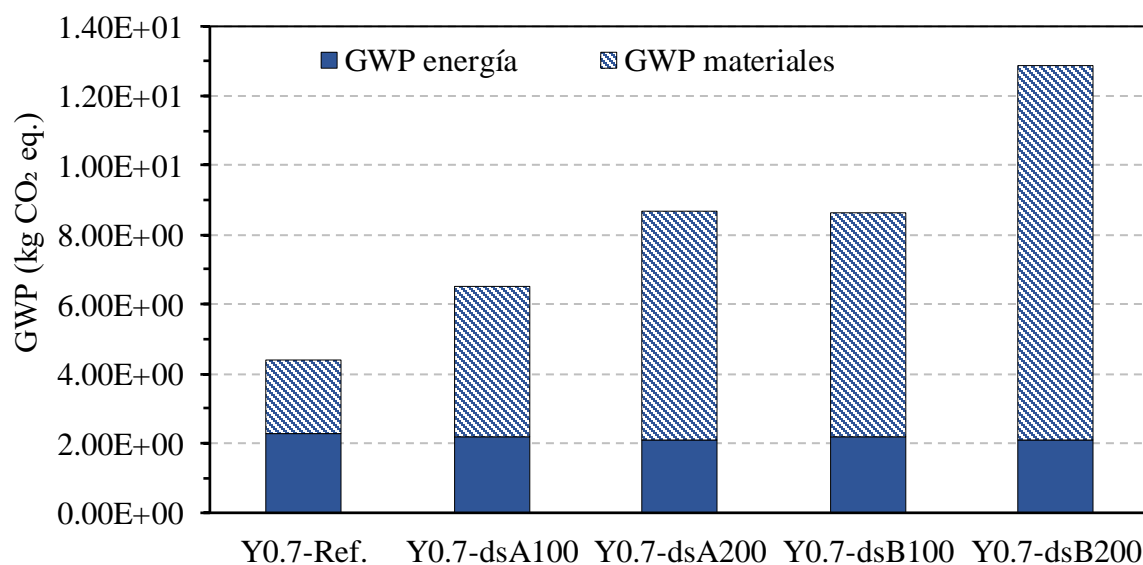


Figura 6. Resultados obtenidos para categoría de GWP, en cuanto a materiales y energía para la producción de  $1 \text{ m}^2$  de placa con cada uno de los compuestos elaborados.

Los resultados mostrados en la Figura 6 evidencian como durante la producción de las placas con los compuestos que incluye la disolución, la energía necesaria disminuye ligeramente con respecto a la referencia, debido a la reducción de la densidad del material. Por otro lado, las emisiones correspondientes a los materiales aumentan significativamente en esos mismos compuestos, debiéndose principalmente al impacto de los agentes disolventes empleados, siendo este aumento mayor en el caso de la disolución dsB. Estos resultados destacan como, si bien los compuestos obtenidos presentan propiedades técnicas interesantes, se hace necesaria la búsqueda de otro tipo de disolventes con menor impacto medioambiental que puedan reducir las emisiones obtenidas.

#### 4. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha realizado una caracterización completa de un nuevo compuesto de yeso en el que se ha llevado a cabo un reemplazo parcial de la amasada de yeso por diferentes disoluciones de EPS reciclado. De la campaña experimental realizada se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los compuestos con disolución de EPS producen un cambio microestructural en el material, aumentando la porosidad de los mismos según aumenta la cantidad de disolución incorporada. La disolución dsA produjo una mayor disgregación del compuesto, mientras que la disolución dsB tendió a formar aglomeraciones de los cristales de yeso.
- El aumento de la porosidad genera el descenso de la densidad aparente y la conductividad térmica, siendo más significativo en el caso de las disoluciones dsB. Así mismo, el MOEus y la dureza también se ven afectadas, siguiendo la misma tendencia y reduciéndose de manera progresiva según se aumenta el reemplazo de la amasada de yeso por las disoluciones.
- En todos los casos, los cristales de yeso se vieron afectados, reduciéndose su tamaño medio, siendo más significativo en el caso de los compuestos Y0.7-dsA. Además, los ATG revelan una mayor pérdida de masa en estos mismos compuestos, correspondiente a la combustión del polímero.
- Por último, los compuestos que incluyen las disoluciones aumentaron la cantidad de emisiones de efecto invernadero, principalmente debido a uso de disolventes como materia prima. En este punto se hace esencial la búsqueda de disolventes alternativos con un menor índice de impacto ambiental.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Centro de Asistencia a la Investigación de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, el apoyo en la interpretación de las imágenes SEM y su disponibilidad para la realización de estos ensayos.

#### 6. REFERENCIAS

- Argalis, P. P., Bumanis, G., Bajare, D. (2023), Gypsum Composites with Modified Waste Expanded Polystyrene. *Journal of Composites Science*, 7(5), 203. <https://doi.org/10.3390/jcs7050203>
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2:2014. Gypsum binders and gypsum plasters - Part 2: Test methods. <https://www.une.org>
- Balti, S., Boudenne, A., Dammak, L., Hamdi, N. (2023), *Mechanical and thermophysical characterization of gypsum composites reinforced by different wastes for green building*

- applications. *Construction and Building Materials*, 372, 130840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130840>
- Balti, S., Boudenne, A., Yahya, K., Hamdi, N. (2024), *Advancing reinforcement of sustainable gypsum composites: High-performance design by reusing waste materials*. *Materials Today Sustainability*, 27, 100946. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100946>
- Benchouia, H.E., Boussehel, H., Guerira, B., Sedira, L., Tedeschi, C., Becha, H.E., Cucchi, M. (2024), *An experimental evaluation of a hybrid bio-composite based on date palm petiole fibers, expanded polystyrene waste, and gypsum plaster as a sustainable insulating building material*. *Construction and Building Materials*, 422, 135735, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135735>.
- Bicer, A., Kar, F. (2017), *Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 1, 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2017.02.008>
- Bumanis, G., Argalis, P. P., Sahmenko, G., Mironovs, D., Rucevskis, S., Korjakins, A., Bajare, D. (2023), *Thermal and Sound Insulation Properties of Recycled Expanded Polystyrene Granule and Gypsum Composites*. *Recycling*, 8(1), 19. <https://doi.org/10.3390/recycling8010019>
- De Oliveira, K. A., Oliveira, C. A. B., Molina, J. C. (2021), *Lightweight recycled gypsum with residues of expanded polystyrene and cellulose fiber to improve thermal properties of gypsum*. *Materiales de Construcción*, 71(341), e242–e242. <https://doi.org/10.3989/MC.2021.07520>
- De San Antonio, A. (2017). “*Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido (XPS)*”. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Del Río, M., Fernández Olivares, F. (2004). *Escayola aligerada: propuestas alternativas a la adición de sólidos celulares*. *Materiales de Construcción*, 54(275), 65–77. <https://doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i275.248>
- del Río-Merino, M., Vidales-Barriguete, A., Piña-Ramírez, C., Vitiello, V., Santa Cruz-Astorqui, J., Castelluccio, R. (2022), *A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates*. *Journal of Building Engineering* (Vol. 45). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103338>
- Elert, K., Bel-Anzué, P., Burgos-Ruiz, M. (2023), *Influence of calcination temperature on hydration behavior, strength, and weathering resistance of traditional gypsum plaster*. *Construction and Building Materials*, 367, 130361. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.130361>
- European Parliament. (2020). Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. Official Journal of the European Union.
- Future Market Insights Global and Consulting Pvt. Ltd. (n.d.). Gypsum Market is projected to reach a revenue of US\$ 13.76 Billion by 2033 and registering a healthy CAGR of around 6.2%. Retrieved April 30, 2025, from [https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/03/21/2631090/0/en/Gypsum-Market-is-projected-to-reach-a-revenue-of-US-13-76-Billion-by-2033-and-registering-a-healthy-CAGR-of-around-6-2-Future-Market-Insights-Inc.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/03/21/2631090/0/en/Gypsum-Market-is-projected-to-reach-a-revenue-of-US-13-76-Billion-by-2033-and-registering-a-healthy-CAGR-of-around-6-2-Future-Market-Insights-Inc.html?utm_source=chatgpt.com)
- Lanzón, M., Castellón, F. J., Ayala, M. (2022), *Effect of the expanded perlite dose on the fire performance of gypsum plasters*. *Construction and Building Materials*, 346, 128494. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128494>
- López Pedrajas, D., Carmona Franco, M., Garrido Sáenz, I., Ramos Mellado, F. J., Rodríguez Romero, J. F., Borreguero Simón, A. M. (2022), *Polystyrene nanoparticles slurry as an additive for developing insulating and waterproof gypsum composites*. *Applied Thermal Engineering*, 217, 119271. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.119271>

Ministerio de Vivienda - Gobierno de España. (2010). Catálogo de elementos constructivos del CTE.

Patterson, A. L. (1939), *The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination*. Physical Review, 56(10), 978–982. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>

Porras Amores, C., Santa Cruz Astorqui, J., Del Río Merino, M., Villoria Saez, P., Viñas Arrebola, C. (2019), *Analysis of the viability of prefabricated elements for partitions manufactured with plaster and EPS from waste recycling*. Dyna, 94(1), 415–420. <https://doi.org/10.6036/8984>

Romero-Gómez, M. I., Silva, R. V., de Brito, J., Flores-Colen, I. (2023), *Prototype of alveolar gypsum blocks with plastic waste addition for partition walls: Physico-mechanical, water-resistance and life cycle assessment*. Journal of Cleaner Production, 432, 139810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139810>

San-Antonio-González, A., Merino, M. D. R., Arrebola, C. V., Villoria-Sáez, P. (2015), *Lightweight Material Made with Gypsum and EPS Waste with Enhanced Mechanical Strength*. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2), 04015101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001382)

Schleier, J., Simons, M., Greiff, K., Walther, G. (2022), *End-of-life treatment of EPS-based building insulation material – An estimation of future waste and review of treatment options*. Resources, Conservation and Recycling, 187. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106603>

Strydom, C. A., Potgieter, J. H. (1999), *Dehydration behaviour of a natural gypsum and a phosphogypsum during milling*. Thermochemica Acta, 332(1), 89–96. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00083-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00083-0)

Villoria Sáez, P., del Río Merino, M., Sorrentino, M., Amores, C. P., Cruz Astorqui, J. S., Viñas Arrebola, C. (2020), *Mechanical characterization of gypsum composites containing inert and insulation materials from construction and demolition waste and further application as a gypsum block*. Materials 2020, Vol. 13, Page 193, 13(1), 193. <https://doi.org/10.3390/MA13010193>

Villoria Sáez, P., Santa Cruz Astorqui, J., del Río Merino, M., Mercader Moyano, M. del P., Rodríguez Sánchez, A. (2018), *Estimation of construction and demolition waste in building energy efficiency retrofitting works of the vertical envelope*. Journal of Cleaner Production, 172, 2978–2985. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.11.113>

Yilmaz, E., Arslan, H., Bideci, A. (2019), *Environmental performance analysis of insulated composite facade panels using life cycle assessment (LCA)*. Construction and Building Materials, 202, 806–813. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.057>

Zaragoza-Benzal, A., Ferrández, D., Atanes-Sánchez, E., Saíz, P. (2023), *Dissolved recycled expanded polystyrene as partial replacement in plaster composites*. Journal of Building Engineering, 65, 105697. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105697>

Zaragoza-Benzal, A., Ferrández, D., Santos, P., Morón, C. (2023), *Recovery of End-of-Life Tyres and Mineral Wool Waste: A Case Study with Gypsum Composite Materials Applying Circular Economy Criteria*. Materials, 16(243). <https://doi.org/10.3390/MA16010243>