




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

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

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

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

Recebido: 04/03/2026 | Correções recebidas: 28/03/2026 | Aceito: 07/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

### 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.

**Citar como:** Zaragoza-Benzal, A., Ferrández, D., Atanes-Sánchez, E. (2026), “Reciclagem química de EPS na elaboração de compósitos leves de gesso”, 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.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, a autora AZB contribuiu com a ideia original em 50%, experimentação em 33%, coleta de dados em 33%, redação do trabalho em 100% e discussão dos resultados em 33%. O autor DFV contribuiu com a ideia original em 50%, experimentação em 33%, coleta de dados em 33%, revisão do manuscrito em 50% e discussão dos resultados em 33%. A autora EAS contribuiu com a experimentação em 33%, coleta de dados em 33%, revisão do manuscrito em 50% e discussão dos resultados em 33%.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 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.

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

### 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.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-01 1717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## NOMENCLATURA

Acrônimo	Nomenclatura
ACV	Análise de ciclo de vida
ATG	Análise termogravimétrica
DAP (EPD)	Declaração ambiental de produto
DH	Dihidrato
DRX	Difração de raios X
EPS	Poliestireno expandido
FWHM	Largura máxima à meia altura do pico de intensidade
GWP	Potencial de aquecimento global
MEB	Microscopia eletrônica de varredura
MOE <sub>us</sub>	Módulo de Young
SATE	Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria europeia do gesso apresenta faturamento de cerca de 7,7 bilhões de euros por ano, gerando milhões de postos de trabalho (Future Market Insights Global and Consulting Pvt. Ltd., n.d.). A Espanha, como principal produtora na Europa, desempenha papel essencial nessa indústria. O gesso é amplamente utilizado na edificação, tanto como revestimento e material de acabamento quanto na produção de placas e painéis pré-fabricados. Do ponto de vista ambiental, destaca-se principalmente pela menor energia necessária para sua produção em comparação com outros aglomerantes, além de sua fácil reciclabilidade, que permite obter o composto original (sulfato de cálcio hemidratado) de maneira simples (Elert et al., 2023).

Além disso, é um aglomerante que admite uma grande variedade de adições de diferentes naturezas. Tradicionalmente, a indústria tem optado pela incorporação de cargas leves, como perlita ou argila expandida, para obter um produto leve, de modo a reduzir os tempos de execução e facilitar seu transporte, além de favorecer o isolamento térmico do material (Del Río e Fernández Olivares, 2004).

Devido a essa sinergia oferecida pelo gesso como aglomerante com outras adições, a comunidade científica tem realizado diversos esforços para utilizá-lo como matriz de recuperação de diferentes resíduos (Villoria Sáez et al., 2018). Como se sabe, o setor da construção é responsável por gerar 40% dos resíduos sólidos e por consumir mais de 36% da energia em nível mundial (Yılmaz et al., 2019). Isso, somado ao aumento da extração e do consumo de matérias-primas naturais, faz do setor da construção uma das indústrias com maior impacto ambiental.

A esse respeito, várias pesquisas analisaram a incorporação de resíduos sólidos leves provenientes do setor da construção, como o poliestireno expandido (EPS). Esse resíduo vem apresentando aumento de sua presença em aterros devido ao crescimento dos trabalhos de reabilitação energética impulsionados pela UE, nos quais o principal sistema utilizado é o SATE (Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior) (Schleier et al., 2022). Nesse sistema, predomina o uso do EPS como

camada principal de isolamento, gerando grande quantidade de resíduos não biodegradáveis e de reciclagem complexa, que aumentam a pressão sobre aterros já saturados.

Os estudos em que resíduos de EPS são incorporados a compósitos leves de gesso utilizam o resíduo previamente triturado, geralmente com tamanho inferior a 4 mm de diâmetro, embora, em alguns casos, tenham sido utilizados granulados de até 11 mm (Argalis et al., 2023; Villoria Sáez et al., 2020). As quantidades adicionadas normalmente ficam entre 3% e 6% da massa do aglomerante (Bicer e Kar, 2017; Bumanis et al., 2023). Esses baixos percentuais de adição devem-se à baixa densidade do resíduo, que varia entre 28 e 70 kg/m<sup>3</sup> (CTE, 2010).

Nesses estudos, destaca-se principalmente a redução da condutividade térmica, decorrente da diminuição significativa da densidade aparente dos compósitos obtidos. Estudos como o de Bumanis et al. (2023) obtiveram condutividade térmica inferior a 0,150 W/m·K, incorporando até 4% de EPS granulado de até 1,2 mm de diâmetro. Estudos semelhantes, como o de San-Antonio-González et al. (2015), alcançaram condutividade térmica em torno de 0,08 W/m·K em compósitos com 2% de EPS granulado com tamanho inferior a 4 mm. Em ambos os casos, a densidade foi inferior a 600 kg/m<sup>3</sup>.

No entanto, o aumento do ar ocluído associado a essa redução da densidade impacta negativamente o comportamento mecânico do material. Em muitos casos, os compósitos elaborados sequer atingem os mínimos normativos de 1 MPa de resistência à flexão e 2 MPa de resistência à compressão estabelecidos pela norma vigente (UNE-EN 13279-2:2014). Os pontos preferenciais de ruptura formados entre a matriz de gesso e o resíduo, devido à má aderência entre ambos, também justificam essa redução da resistência mecânica, desaconselhando-se o uso desses materiais em edificações, apesar de suas propriedades térmicas interessantes do ponto de vista da economia de energia (de Oliveira et al., 2021).

Neste estudo, propõe-se uma nova forma de incorporar resíduos de EPS, por meio de sua dissolução antes da fase de amassamento do material, o que gera um material menos heterogêneo e com maior resistência, mantendo suas propriedades térmicas interessantes. Também foi realizada uma comparação com diferentes solventes, permitindo determinar se estes influenciam as características finais dos compósitos elaborados.

## 2. PROCEDIMENTO

Nesta seção, são apresentados os materiais utilizados, a campanha experimental desenvolvida e o processo de elaboração das amostras empregadas nesta pesquisa.

### 2.1 Materiais

Os materiais empregados neste estudo foram:

- Aglomerante: gesso de construção designado como B1 segundo a norma UNE-EN 13279-1. Esse aglomerante, composto fundamentalmente por sulfato de cálcio hemidratado, apresenta índice de pureza >80%, granulometria entre 0 e 0,4 mm, reação ao fogo A1 e pH >6.
- Água de amassamento: água potável, fornecida pelo Canal de Isabel II (Madrid). Essa água não apresenta impurezas segundo a Diretiva (UE) 2020/2184 (Parlamento Europeu, 2020), e já foi utilizada anteriormente de forma satisfatória na elaboração de compósitos de gesso em estudos prévios (Zaragoza-Benzal, Ferrández, Santos, et al., 2023).
- Solução de resíduos de EPS: obtida mediante a dissolução de EPS descartado durante a reabilitação energética de fachadas por meio do Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior (SATE). O EPS utilizado nesses trabalhos costuma apresentar condutividade térmica de 0,037 W/m·K, densidade entre 15 e 20 kg/m<sup>3</sup>, bem como resistência à compressão de 0,06 MPa. A dissolução foi realizada utilizando dois solventes diferentes,

acetato de etila e solvente universal, obtendo-se assim dois tipos de solução, dsA e dsB, respectivamente. Por um lado, o acetato de etila (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>) apresenta pureza de 99,5% e densidade de 900 kg/m<sup>3</sup>. O solvente universal é composto por uma combinação de hidrocarbonetos voláteis (tolueno, metanol, acetato de metila) e apresenta densidade de 850 kg/m<sup>3</sup>. As soluções (dsA e dsB) foram preparadas na razão EPS/solvente de 1:2 em massa, obtendo-se densidades de 700 kg/m<sup>3</sup> e 660 kg/m<sup>3</sup> para dsA e dsB, respectivamente.

## 2.2 Programa experimental

O programa experimental realizado abrange a caracterização físico-química, física e mecânica dos compósitos elaborados, bem como a avaliação ambiental dos compósitos obtidos, por meio dos seguintes ensaios:

- **Caracterização física:** determinaram-se a densidade aparente, a dureza superficial Shore C, o módulo de Young (MOE<sub>us</sub>) e a condutividade térmica. Essa caracterização foi obtida em corpos de prova normalizados RILEM de 40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup>.  
A densidade aparente, conforme a norma UNE 102042:2023, foi obtida a partir do volume, medindo-se os corpos de prova com auxílio de um paquímetro com precisão de 0,01 mm, e da massa, com uma balança eletrônica de precisão de 0,01 g.  
A dureza superficial Shore C foi obtida seguindo as indicações da norma UNE-EN 13279-2:2014, com auxílio de um durômetro. As medidas foram realizadas em duas das faces longitudinais dos corpos de prova que estiveram em contato com o molde durante a pega, obtendo-se um total de cinco medidas em cada face.  
O módulo de Young dinâmico foi determinado pelo método de ultrassom segundo a norma UNE-EN ISO 14146:2004. Para isso, utilizou-se um equipamento Ultrasonic tester E46 (Ibertest), permitindo obter a velocidade de propagação da onda, medida longitudinalmente no corpo de prova.  
A condutividade térmica foi obtida com um equipamento λ-Meter EP500e, seguindo as indicações da norma UNE-EN 12664. Para isso, foram utilizados corpos de prova de 150 × 150 × 30 mm<sup>3</sup>. O ensaio foi realizado durante 90 min após atingir regime estacionário a 10 °C, 25 °C e 40 °C.
- **Caracterização mecânica:** foram realizados ensaios de resistência à flexão e à compressão, bem como a obtenção de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEB).  
As resistências à flexão e à compressão foram determinadas segundo a norma UNE-EN 13279-2:2014 com uma prensa hidráulica AUTOTEST 200-10SW (Ibertest). Para a resistência à flexão, foram ensaiados três corpos de prova de cada dosagem, com dimensões de 40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup>, enquanto, à compressão, foram ensaiados seis corpos de prova para cada dosagem, com superfície de aplicação de carga de 40 × 40 mm<sup>2</sup>.  
As imagens de MEB foram obtidas com um microscópio Jeol JSM-820, equipado com análise EDX da Oxford e operando a 20 kV. As amostras foram recobertas com ouro em uma metalizadora Cressington 108auto para assegurar boa condutividade do feixe de elétrons.
- **Caracterização físico-química:** foram realizados análises termogravimétricas (ATG) e difração de raios X (DRX) dos compósitos. As ATG foram realizadas com um equipamento SDT Q600 (TA Instruments), desde a temperatura ambiente até 1000 °C, a uma taxa de 10 °C/min e utilizando atmosfera de ar com vazão de 100 ml/min.  
Para a DRX, utilizou-se um difratômetro Siemens Krystalloflex D5000 com monocromador de grafite com Cu-K<sub>α</sub>. O ensaio foi realizado na faixa entre 5° ≤ 2θ ≤ 60°, a cada 0,04° e 4 segundos por etapa. Adicionalmente, obteve-se o tamanho dos cristalitos a partir da largura máxima à meia altura dos picos de intensidade obtidos nos difratogramas (FWHM), segundo a equação de Debye-Scherrer (Patterson, 1939).

- Avaliação ambiental: foi realizada por meio da aplicação da análise de ciclo de vida (ACV), segundo as normas ISO 14040 e ISO 14044, empregando como unidade funcional 1 m<sup>2</sup> de painel para a execução de divisórias leves. Trata-se de uma análise que abrange desde a obtenção das matérias-primas até a produção do material (A1-A3). Foram utilizadas as declarações ambientais de produto (DAP) de todas as matérias-primas, exceto dos resíduos de EPS, os quais, por serem resíduos, não são computados no inventário. Da mesma forma, a energia utilizada na produção foi obtida da literatura (Romero-Gómez et al., 2023) para o caso específico do mix energético espanhol. Para a fase de transporte das matérias-primas até a fábrica, considerou-se um caminhão a diesel de 16–32 t (EURO 6). A avaliação foi realizada pelo método de análise do inventário do ciclo de vida, considerando apenas a categoria de impacto de potencial de aquecimento global (GWP).

### 2.3 Elaboração das amostras

A elaboração dos compósitos foi realizada seguindo os métodos e especificações indicados na norma UNE-EN 13279-2:2014. A relação água/gesso em todos os compósitos foi fixada em 0,7, obtida pelo ensaio da mesa de espalhamento. As soluções foram incorporadas na última fase do amassamento, obtendo-se uma integração total do resíduo em uma massa homogênea.

Após a pega dos compósitos, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em condições de laboratório, a  $23 \pm 2$  °C de temperatura e  $50 \pm 5\%$  de umidade relativa, durante sete dias. Previamente aos ensaios, os corpos de prova foram secos em estufa a  $40 \pm 2$  °C durante 24 horas. Nas dosagens preparadas, apresentadas na Tabela 1, observa-se que foi realizada uma substituição da massa de gesso pelas diferentes soluções de resíduos de EPS, de forma progressiva, até 22,7% em massa do aglomerante, com o objetivo de obter um material com maior proporção de materiais recuperados, favorecendo a redução do uso de matérias-primas virgens. Desse modo, aposta-se na aplicação dos princípios da economia circular na elaboração de novos compósitos de construção, contribuindo para a redução dos resíduos acumulados em aterros por meio de sua revalorização.

Tabela 1. Dosagens empregadas na elaboração dos compósitos estudados.

Compósito	Gesso (g)	Água (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 E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados gerados pelo programa experimental proposto, bem como sua discussão.

### 3.1 Caracterização física

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de dureza superficial e MOEus de todos os compósitos elaborados.

Tabela 2. Resultados de MOE<sub>us</sub> e dureza superficial dos compósitos elaborados.

Compósito	MOE <sub>us</sub> (MPa)	Dureza superficial (unid. 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 na Tabela 2, o MOE<sub>us</sub> se reduz consideravelmente ao incorporar as diferentes soluções aos compósitos. O compósito Y0.7-dsB-100 foi o menos afetado, com redução de 34,5%, seguido dos compósitos Y0.7-dsA100, Y0.7-dsA200 e Y0.7-dsB-200, este último com redução de 47,8%. Essa redução no MOE<sub>us</sub> indicaria um aumento das descontinuidades internas do material, provocado pelo polímero dissolvido (López Pedrajas et al., 2022). Outras pesquisas observaram resultados semelhantes ao introduzir outros resíduos leves, como o EPS em estado sólido (Porrás Amores et al., 2019).

Quanto à dureza superficial, os resultados mostram uma redução menos acentuada nas amostras, com redução máxima no compósito Y0.7-dsA200, cuja dureza foi 15,4% inferior. Nesse caso, ambas as soluções tiveram efeitos semelhantes no material de gesso. Em outras pesquisas nas quais se introduz material reciclado na matriz de gesso, essa diminuição não é tão evidente, por não se produzir um material homogêneo durante o amassamento (De San Antonio, 2017).

A seguir, a Figura 1 apresenta os resultados de densidade aparente e condutividade térmica dos compósitos elaborados, bem como resultados provenientes de estudos semelhantes nos quais resíduos de EPS foram incorporados em estado sólido a compósitos leves de gesso. Além disso, são indicados os valores estabelecidos pela norma UNE-EN 13279-1 para gessos leves (800 kg/m<sup>3</sup>) e a condutividade térmica associada a essa densidade (260 mW/m·K).

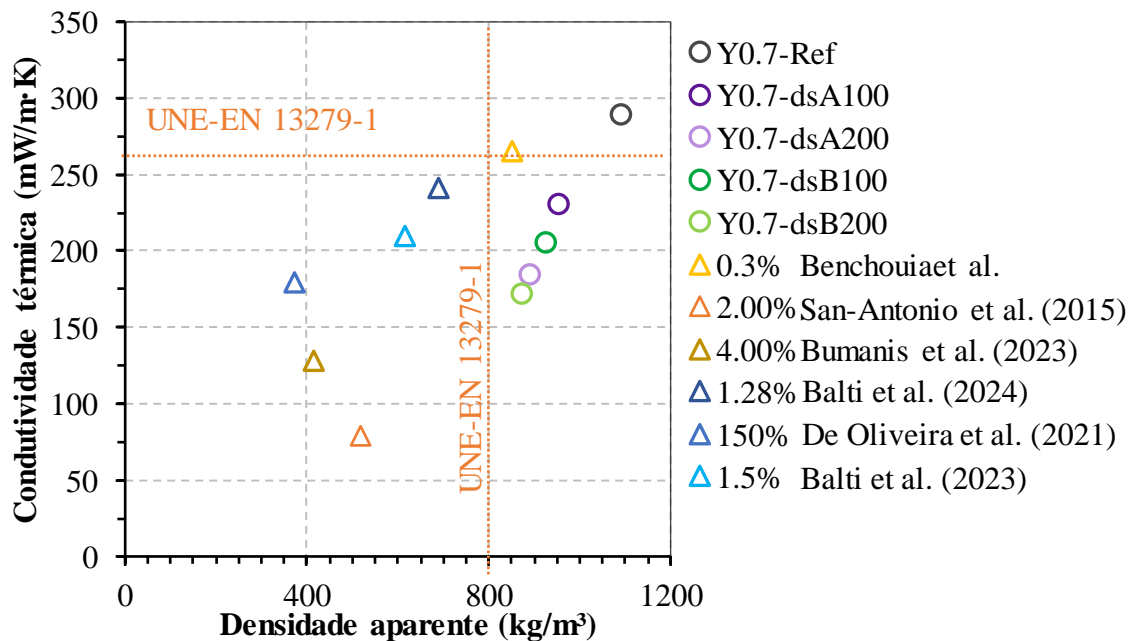


Figura 1. Resultados de densidade aparente e condutividade térmica dos compósitos elaborados, em comparação com outros estudos semelhantes (percentuais de adição de EPS em relação à massa do aglomerante).

Como se observa na Figura 1, todos os compósitos desenvolvidos apresentaram valores de densidade aparente e condutividade térmica inferiores aos da referência. Todos os compósitos alcançaram valores de densidade aparente entre 850 e 950 kg/m<sup>3</sup>, enquanto as condutividades térmicas variaram entre 170 e 230 mW/m·K. Cabe destacar que os compósitos Y0.7-dsB apresentaram valores mais reduzidos nessas propriedades em comparação com seus homólogos Y0.7-dsA, obtendo-se valores progressivamente menores à medida que aumentava a proporção de dissolução nos compósitos.

Ao comparar esses resultados com outras pesquisas semelhantes, observa-se que os compósitos obtidos nesta pesquisa estão alinhados com outros estudos, com redução da condutividade térmica e da densidade à medida que aumenta a quantidade de material reciclado incorporado. No entanto, observa-se que, para condutividades térmicas análogas, a densidade obtida nos compósitos desenvolvidos nesta pesquisa é significativamente superior. Além disso, o percentual de adição de material reciclado empregado nesta pesquisa é mais elevado, o que aumenta o percentual de recuperação e revalorização de resíduos. Cabe salientar que condutividades térmicas excessivamente baixas (abaixo de 150 mW/m·K) estão relacionadas a densidades muito baixas (abaixo de 600 kg/m<sup>3</sup>), o que costuma repercutir negativamente no desempenho mecânico dos compósitos, podendo até inviabilizá-los tecnicamente (del Río-Merino et al., 2022).

### 3.2 Caracterização mecânica

Na Figura 2, são apresentados os resultados de resistência à flexão e à compressão dos compósitos de gesso elaborados; além disso, foram incorporados resultados de outros estudos semelhantes. Adicionalmente, foram assinaladas as resistências mecânicas mínimas estabelecidas pela norma UNE-EN 13279-2, correspondentes a 1 MPa para resistência à flexão e 2 MPa para resistência à compressão.

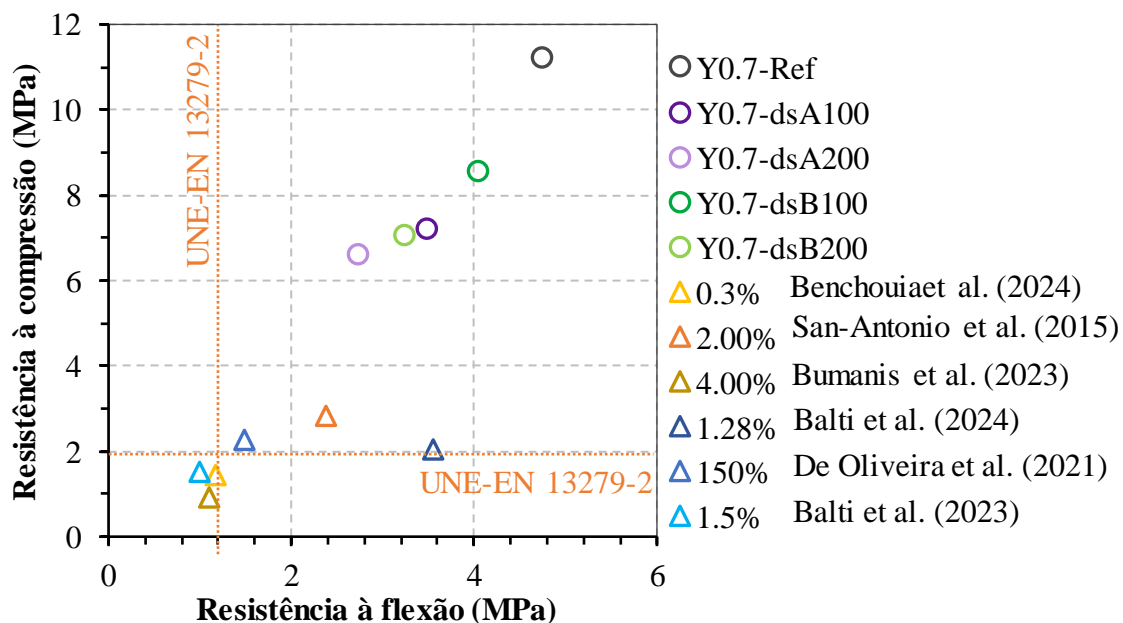


Figura 2. Resultados de resistência à flexão e à compressão dos compósitos elaborados, em comparação com outros estudos semelhantes (percentuais de adição de EPS em relação à massa do aglomerante).

Na Figura 2, observa-se que a incorporação da solução de EPS reciclado reduz progressivamente as resistências mecânicas à medida que aumenta essa solução nos compósitos, sendo essa redução mais significativa nos compósitos Y0.7-dsA. A menor resistência à flexão e à compressão foi obtida no compósito Y0.7-dsA200, com redução de 42,5% e 41,3% em relação à referência,

respectivamente. Já no caso mais favorável (Y0.7-dsB100), a redução foi de 14,7% e 23,7% para resistência à flexão e à compressão, respectivamente. Assim, fica evidente que a propriedade mais afetada nos compósitos foi a resistência à compressão em todos os casos.

Ao analisar pesquisas em que a incorporação do resíduo é realizada em fase sólida, observa-se uma degradação crítica das propriedades mecânicas. Diversos compósitos analisados mal atingem o limite mínimo de resistência à flexão de 1 MPa. Essa deficiência é particularmente evidente no ensaio de compressão, no qual a baixa aderência interfacial entre as partículas sólidas de EPS e a matriz gera pontos preferenciais de ruptura que comprometem a integridade estrutural do material. Consequentemente, esses compósitos costumam apresentar valores inferiores ao limite normativo de 2 MPa estabelecido pela norma (UNE-EN 13279-2:2014). Esse comportamento contrasta de forma notável com os resultados obtidos na presente pesquisa, na qual as propriedades mecânicas não apenas atendem à norma, como duplicam ou até triplicam os valores reportados em estudos anteriores.

A seguir, na Figura 3, são apresentadas imagens obtidas por MEB do compósito de referência e dos compósitos com maiores teores de solução (Y0.7-dsA200 e Y0.7-dsB200).

Na Figura 3(a), observa-se a matriz da amostra de referência, com alguns poros, porém compacta em termos gerais. Também se distinguem os cristais aciculares característicos do sulfato de cálcio dihidratado (Lanzón et al., 2022). Por outro lado, nas Figuras 3(b) e 3(c), a matriz aparece muito mais porosa, com grandes vazios entre os cristais, o que explicaria a redução das propriedades mecânicas dos compósitos. Também é possível observar, em ambos os casos, certo encurtamento e espessamento dos cristais de gesso, aspecto já observado em estudos anteriores (Zaragoza-Benzal et al., 2023), confirmando os resultados obtidos para o tamanho médio dos cristalitos. A principal diferença observada entre os compósitos com diferentes soluções é que, enquanto no compósito Y0.7-dsA200 a matriz aparece mais desagregada, no compósito Y0.7-dsB200 ela apresenta uma matriz mais coesa, embora a dissolução produza certas aglomerações de cristais em forma de esfera. Ambas as situações estariam afetando os comportamentos mecânicos observados (López Pedrajas et al., 2022).

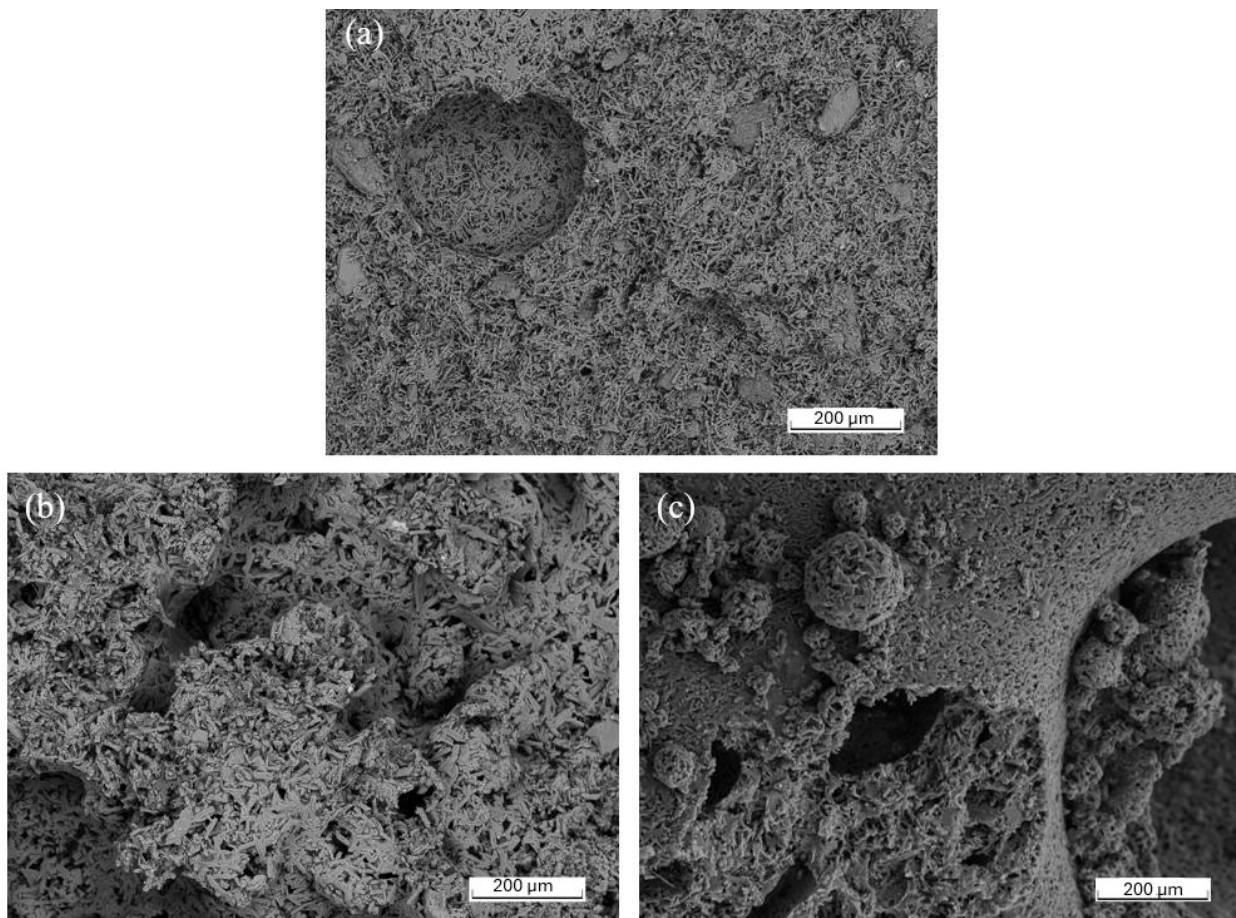


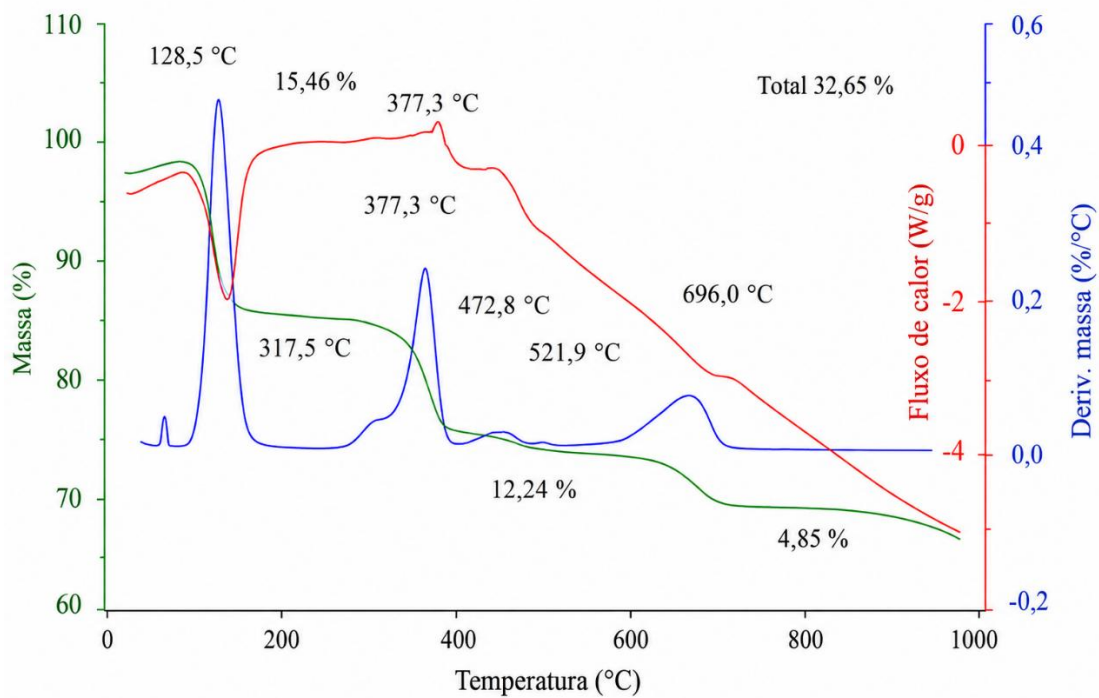
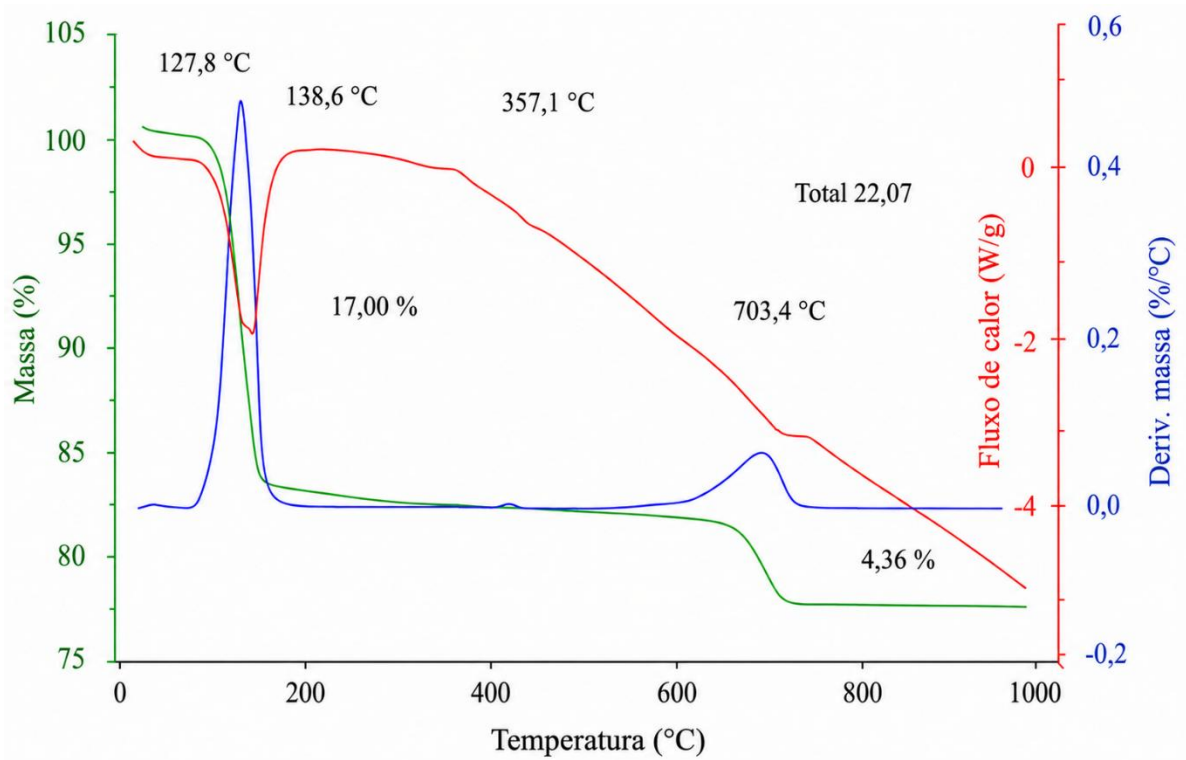
Figura 3. Imagens de MEB com aumento de 250× dos compósitos: (a) Y0.7-Ref, (b) Y0.7-dsA200, (c) Y0.7-dsB200.

### 3.3 Caracterização físico-química

A Figura 4 apresenta as análises termogravimétricas, nas quais a linha verde representa a perda de massa, a linha azul a derivada da perda de massa e a linha marrom indica o fluxo de calor. O ensaio foi realizado na amostra de referência e nas amostras com maior teor de EPS dissolvido (Y0.7-dsA200 e Y0.7-dsB200).

Como se observa na Figura 4, a amostra de referência apresenta perda total de massa de 22,07%. Em primeiro lugar, ocorre uma primeira perda de massa (16,99%) em um processo endotérmico correspondente à transformação do sulfato de cálcio dihidratado em sulfato de cálcio hemidratado e, por fim, em anidrita. No intervalo entre 250 e 550 °C, um evento exotérmico sem perda de massa associada indica a transformação da anidrita  $\alpha$  em anidrita  $\beta$ . Por último, ocorre uma pequena perda de massa (4,36%) de forma endotérmica, na faixa de temperatura de 550 °C a 700 °C, correspondente à transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio.

Nas amostras com solução de EPS reciclado, a perda de massa aumenta para 32,65% e 29,45% nas amostras Y0.7-dsA200 e Y0.7-dsB200, respectivamente. Nessas amostras, ocorre um evento exotérmico correspondente à combustão do polímero incorporado. Nesse processo, observam-se dois eventos distintos de perda de massa, o primeiro entre 250 °C e 550 °C, e o segundo entre 550 °C e 750 °C, embora, no caso da amostra Y0.7-dsA, em ambos os eventos, a perda de massa seja maior. No entanto, a velocidade máxima de perda de massa é semelhante em ambos os casos.



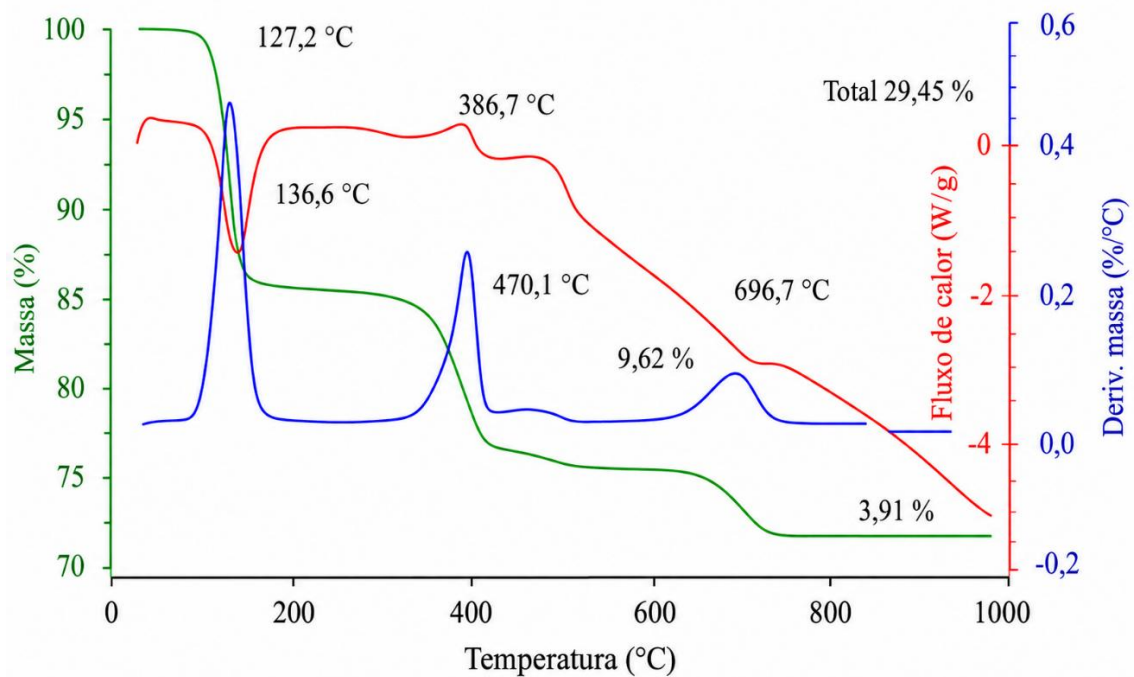


Figura 4. Resultados das análises termogravimétricas de: (a) Y0.7-Ref., (b) Y0.7-dsA200, (c) Y0.7-dsB200.

A Figura 5 apresenta os difratogramas correspondentes a todas as amostras realizadas nesta pesquisa; além disso, a Tabela 3 apresenta o tamanho médio dos domínios cristalinos das amostras.

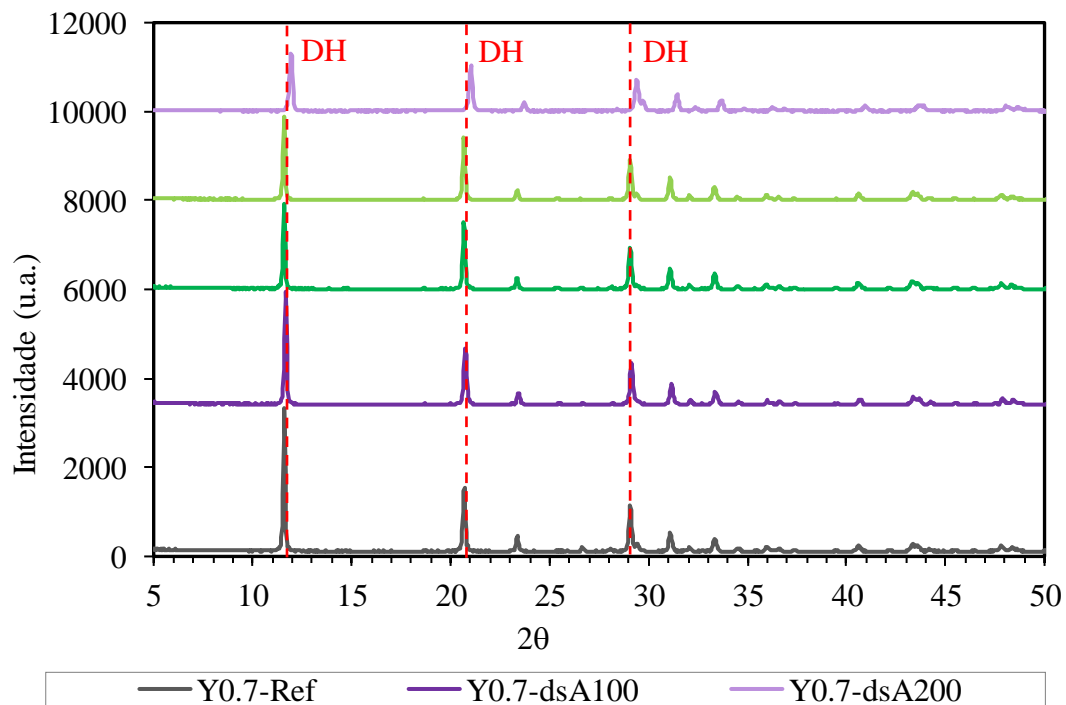


Figura 5. Difratogramas das amostras elaboradas nesta pesquisa, indicando os principais ângulos de difração dos cristais de dihidrato (DH).

Como mostra a Figura 5, todos os compósitos apresentam os picos correspondentes ao sulfato de cálcio dihidratado com maior intensidade nos ângulos de difração  $2\theta = 12^\circ$ ,  $21^\circ$  e  $29^\circ$  (Strydom e Potgieter, 1999). Nas amostras com substituição do gesso por dsA e dsB, ocorre diminuição da intensidade dos picos, maior à medida que aumenta a substituição nas amostras. No compósito Y0.7-dsA100, esse efeito não é tão evidente; contudo, ao aumentar a substituição, na amostra Y0.7-dsA200, a intensidade dos picos é a mais afetada, sendo a menor entre todas as amostras ensaiadas. Por sua vez, a Tabela 3 complementa esses resultados, pois o tamanho médio dos cristalitos coincide com as intensidades observadas na Figura 5.

Tabela 3. Tamanho médio (D) dos domínios cristalinos ordenados das amostras.

Amostra	Posição do pico ( $2\theta$ , graus)	FWHM (graus)	Tamanho do 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

Em todas as amostras com incorporação das diferentes soluções, ocorre redução do tamanho dos cristalitos em relação à referência. Nas amostras Y0.7-dsA100 e Y0.7-dsB100, a diminuição é pouco perceptível, enquanto, ao aumentar a quantidade de dissolução, torna-se mais evidente. O compósito Y0.7-dsA200 foi o mais afetado negativamente nesse aspecto. A modificação do crescimento dos cristalitos ao incluir polímeros em dissolução foi observada por Pedrajas et al. (López Pedrajas et al., 2022), que apontaram encurtamento dos cristais.

### 3.4 Avaliação ambiental

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos na ACV, referentes às emissões de CO<sub>2</sub> equivalente (GWP) na elaboração de 1 m<sup>2</sup> de placa com os compósitos de gesso projetados.

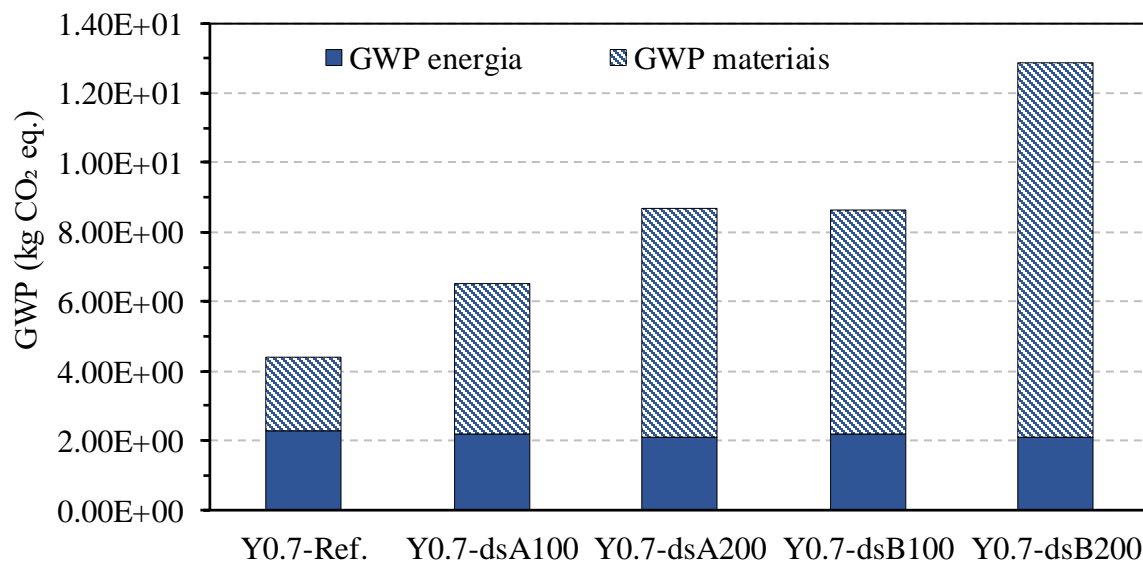


Figura 6. Resultados obtidos para a categoria GWP, considerando materiais e energia para a produção de 1 m<sup>2</sup> de placa com cada um dos compósitos elaborados.

Os resultados apresentados na Figura 6 evidenciam que, durante a produção das placas com os compósitos que incluem a dissolução, a energia necessária diminui ligeiramente em relação à referência, devido à redução da densidade do material. Por outro lado, as emissões correspondentes aos materiais aumentam significativamente nesses mesmos compósitos, principalmente devido ao impacto dos solventes empregados, sendo esse aumento maior no caso da solução dsB. Esses resultados destacam que, embora os compósitos obtidos apresentem propriedades técnicas interessantes, é necessária a busca por outros tipos de solventes com menor impacto ambiental que possam reduzir as emissões obtidas.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foi realizada uma caracterização completa de um novo compósito de gesso no qual se realizou uma substituição parcial da massa de gesso por diferentes soluções de EPS reciclado. A partir da campanha experimental realizada, podem-se extrair as seguintes conclusões:

- Os compósitos com solução de EPS produzem uma alteração microestrutural no material, aumentando sua porosidade à medida que aumenta a quantidade de solução incorporada. A solução dsA produziu maior desagregação do compósito, enquanto a solução dsB tendeu a formar aglomerações dos cristais de gesso.
- O aumento da porosidade gera redução da densidade aparente e da condutividade térmica, sendo mais significativo no caso das soluções dsB. Da mesma forma, o MOEus e a dureza também são afetados, seguindo a mesma tendência e reduzindo-se de maneira progressiva à medida que aumenta a substituição da massa de gesso pelas soluções.
- Em todos os casos, os cristais de gesso foram afetados, com redução de seu tamanho médio, sendo esse efeito mais significativo no caso dos compósitos Y0.7-dsA. Além disso, as ATG revelam maior perda de massa nesses mesmos compósitos, correspondente à combustão do polímero.
- Por fim, os compósitos que incluem as soluções aumentaram a quantidade de emissões de gases de efeito estufa, principalmente devido ao uso de solventes como matéria-prima. Neste ponto, torna-se essencial a busca por solventes alternativos com menor impacto ambiental.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Assistência à Pesquisa da Faculdade de Ciências Geológicas da Universidade Complutense de Madrid pelo apoio na interpretação das imagens de MEB e por sua disponibilidade para a realização desses ensaios.

#### 6. REFERÊNCIAS

- 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.jobe.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>
- Porrás 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>