

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y FÍSICA DE COMPUESTOS DE YESO Y GEL DE SÍLICE PARA EDIFICIOS MÁS SALUDABLES

MECHANICAL AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF GYPSUM-SILICA GEL COMPOSITES HEALTHIER BUILDINGS

Blanca María Ferreiro Gil⁽¹⁾, Immaculada Pallás Juliach⁽²⁾, César Porras Amores⁽³⁾, Paola Villoria Sáez⁽⁴⁾, Manuel Alejandro Pedreño Rojas⁽⁵⁾, María Jesús Morales Conde⁽⁶⁾

¹ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Edificación, Madrid, España.

² Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Edificación, Madrid, España.

³ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Edificación, Dpto. Construcciones Arquitectónicas y su control, Grupo de investigación TEMA, Madrid, España. c.porras@upm.es

⁴ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Edificación, Dpto. Construcciones Arquitectónicas y su control, Grupo de investigación TEMA, Madrid, España. paola.villoria@upm.es

⁵ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Edificación, Dpto. Construcciones Arquitectónicas y su control, Grupo de investigación TEMA, Madrid, España. alejandro.pedreno@upm.es

⁶ Universidad de Sevilla, E.T.S. Arquitectura, Dpto. Construcciones Arquitectónicas I, Sevilla, España. mmorales@us.es

RESUMEN

El cambio climático está influyendo cada vez más en la calidad del ambiente interior al alterar el funcionamiento de los edificios, las necesidades de ventilación y el comportamiento de los contaminantes. El aumento de las temperaturas y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos contribuyen a concentraciones elevadas de contaminantes interiores, como compuestos orgánicos volátiles (COV) y otras sustancias nocivas. Estos contaminantes representan riesgos graves para la salud, especialmente en edificios herméticos y energéticamente eficientes, donde el intercambio natural de aire es limitado. En respuesta a estos desafíos, ha crecido el interés por las estrategias pasivas, entre ellas el uso de materiales de construcción capaces de reducir y neutralizar contaminantes interiores, mejorando así la calidad del aire sin aumentar el consumo energético.

Este trabajo de investigación presenta una revisión del estado de la cuestión sobre diversos áridos con capacidad de reducción de contaminantes y analiza la incorporación de gel de sílice en una matriz de yeso y escayola con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del compuesto. Para ello, se realizaron ensayos de densidad aparente, resistencia a compresión, resistencia a flexión y dureza superficial. Se analizaron muestras con diferentes proporciones de gel de sílice para determinar la dosificación óptima con propiedades mejoradas o similares a los yesos tradicionales.

Los resultados revelan que el gel de sílice, el carbón activado y la sepiolita, han sido estudiados por su potencial para reducir contaminantes y han sido integrados en elementos constructivos. En particular, se puede incorporar hasta un 20% en peso en una matriz de yeso, manteniendo las propiedades de referencia y superando los valores mínimos de la normativa. Los hallazgos resaltan la importancia de seleccionar materiales no solo por su comportamiento mecánico, sino también por su capacidad en la preservación de ambientes interiores saludables.

Palabras clave: escayola, construcción regenerativa

ABSTRACT

Climate change is increasingly influencing indoor environmental quality by altering building operations, ventilation needs, and pollutant behavior. Rising temperatures and more frequent extreme weather events

contribute to elevated concentrations of indoor contaminants such as volatile organic compounds (VOCs) and other harmful substances. These pollutants pose serious health risks, particularly in airtight and energy-efficient buildings where natural air exchange is limited. In response to these challenges, growing attention has turned to passive mitigation strategies, including the use of construction materials capable of adsorbing and neutralizing indoor pollutants, thereby improving indoor air quality without increasing energy consumption.

This study presents a state-of-the-art review of various aggregates able to reduce air contaminants and investigates the incorporation of silica gel into a gypsum matrix in order to evaluate the mechanical behavior of the resulting compound. To this end, bulk density, compressive strength, flexural strength, and superficial hardness tests were conducted. Samples with varying proportions of silica gel were analyzed to determine the optimal dosage for improving or keeping similar properties compared to traditional gypsums.

Results reveal that several sorptive materials, such as silica gel, activated carbon, and sepiolite, have been explored for their potential to be integrated into construction elements like plasters, mortars, and panels. In particular, silica gel can be incorporated up to 20%wt in a gypsum matrix keeping the properties similar to the reference sample and above the minimum values established by the regulation. The findings underscore the importance of selecting a material not only for structural and thermal performance, but also as active components in keeping healthy indoor environments.

Keywords: plaster, regenerative construction

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 40 % del consumo energético global, el 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y más del 30% de los residuos generados (UNEP, 2020). Esta industria también depende de manera intensiva de recursos naturales como minerales, agua y energía.

Por otro lado, la mejora de la calidad del aire interior es hoy en día un objetivo prioritario dentro del diseño arquitectónico sostenible. Sin embargo, el aumento en los estándares de eficiencia energética ha promovido edificaciones más herméticas, lo cual, aunque reduce pérdidas térmicas, ha derivado en un incremento de problemas relacionados con la calidad del aire interior (Wargocki et al., 2002). Una calidad del aire interior deficiente se ha vinculado directamente con el síndrome del edificio enfermo, que se asocia con síntomas respiratorios, alergias y fatiga debido a la acumulación de contaminantes como COVs, humedad excesiva y partículas en suspensión, con implicaciones graves para la salud y el confort de los ocupantes (Salthammer et al., 2018; Wolkoff, 2018).

En este contexto, los materiales higroscópicos, como ciertos tipos de yesos, arcillas y compuestos naturales, han demostrado ser eficaces en la estabilización de la humedad relativa interior y en la reducción de la concentración de contaminantes volátiles. Estos enfoques están alineados con las estrategias de edificación regenerativa y diseño biofílico, donde los materiales de construcción no solo cumplen funciones estructurales o estéticas, sino que también promueven entornos más saludables, confortables y sostenibles (Lechner, 2015; GhaffarianHoseini et al., 2018). En este contexto, los acabados interiores pueden contribuir activamente a la purificación del aire. El yeso, tradicionalmente empleado en revestimientos y particiones interiores, ha sido recientemente explorado como soporte para aditivos funcionales. Existen ejemplos comerciales, como las placas Active Air® de Placo®, que incorporan tecnologías que descomponen formaldehído (Saint-Gobain, 2022).

Diversas investigaciones han analizado la incorporación de materiales adsorbentes en matrices de construcción con el objetivo de reducir la concentración de contaminantes en ambientes interiores. Entre los aditivos más utilizados se encuentran la sepiolita, el carbón activado, el óxido de manganeso y, especialmente, el gel de sílice, debido a su elevada área superficial y su capacidad de adsorción de compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Zhang et al., 2020; Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Estas adiciones permiten desarrollar materiales con funciones pasivas de purificación del aire interior, a través de mecanismos tanto físicos como químicos.

En concreto, el gel de sílice es un material amorfo, poroso, con una gran área superficial (hasta 800 m²/g), estructura tridimensional abierta y alta afinidad por moléculas polares. Su incorporación en morteros, cementos y materiales cerámicos ha sido explorada para mejorar tanto propiedades funcionales como

mecánicas (Tang et al., 2018; Yu et al., 2019). En el contexto de la calidad del aire interior, el gel de sílice contribuye a la adsorción pasiva de COVs mediante mecanismos físicos (adsorción en su red microporosa) e interacciones químicas débiles con grupos silanol ($-\text{SiOH}$) presentes en su superficie (Zhang et al., 2020).

Además de su capacidad de purificación, el gel de sílice puede contribuir a la regulación pasiva de la humedad, un aspecto clave en el confort térmico y la salud ambiental, especialmente cuando se incorpora en forma de polvo fino que mejora la interacción con la matriz del material (Yu et al., 2019).

2. OBJETIVOS

Este trabajo busca generar un impacto positivo en el entorno construido. Para ello, la presente investigación se centra en la mejora de la calidad del aire interior de los edificios mediante el uso de compuestos de yeso modificados con gel de sílice. El objetivo principal es evaluar el potencial del gel de sílice como adición a compuestos de yeso, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas al tiempo que se contribuye a la sostenibilidad regenerativa en edificación.

3. MATERIALES Y PLAN EXPERIMENTAL

En este apartado se presentarán los materiales utilizados, así como las fases del plan experimental. Los materiales utilizados fueron:

- Yeso grueso y escayola, concretamente yeso tipo B1 y escayola E-35 proporcionados por la empresa Placo® Saint Gobain.
- Gel de sílice blanco suministrado en dos formatos, granulado (Gr) 3-5mm de la marca Carme y polvo (P) 0.04-0.063mm de la marca LABBOX.

Para realizar el plan experimental se elaboraron 18 mezclas de yeso y escayola, de los cuales se confeccionaron tres probetas prismáticas $4 \times 4 \times 16 \text{ mm}^3$ para cada compuesto (tabla 1). Para la preparación de muestras se utilizaron moldes prismáticos normalizados (UNE-EN 13279-2:2014) y procedimientos de amasado estandarizados con curado a $23 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ y $50 \pm 5 \%$ de humedad relativa durante 7 días. Las muestras se elaboraron con yeso y escayola con adiciones de gel de sílice en distintos formatos en proporciones del 5 al 40 %. Transcurrido el periodo de curado, se realizaron los ensayos. Se midió la densidad aparente seca, resistencia a flexión y compresión siguiendo la norma UNE-EN 13279-2:2014.

Con estas dosificaciones de agua y conglomerante, el gel de sílice en formato granulado se pudo añadir hasta un 40% sobre el peso del conglomerante garantizando la trabajabilidad de la pasta. Por el contrario, para los compuestos con gel de sílice en formato polvo solo se pudo añadir hasta un 10% y 20% en el yeso y escayola respectivamente, por lo que de las 18 mezclas realizadas se analizaron y elaboraron probetas de 15.

Tabla 1. Características de los compuestos elaborados con adición de gel de sílice

Num.	Compuesto	Matriz	Relación a/y	Tipo de gel de sílice	% de adición de gel sobre el peso de yeso
1	Y-REF	Yeso	0.60	-	-
2	Y-GSg 5	Yeso	0.60	Granulado	5%
3	Y-GSg 10	Yeso	0.60	Granulado	10%
4	Y-GSg 20	Yeso	0.60	Granulado	20%
5	Y-GSg 40	Yeso	0.60	Granulado	40%
6	Y-GSp 5	Yeso	0.60	Polvo	5%
7	Y-GSp 10	Yeso	0.60	Polvo	10%
8	E-REF	Escayola	0.80	-	-
9	E-GSg 5	Escayola	0.80	Granulado	5%
10	E-GSg 10	Escayola	0.80	Granulado	10%
11	E-GSg 20	Escayola	0.80	Granulado	20%
12	E-GSg 40	Escayola	0.80	Granulado	40%
13	E-GSp 5	Escayola	0.80	Polvo	5%

Num.	Compuesto	Matriz	Relación a/y	Tipo de gel de sílice	% de adición de gel sobre el peso de yeso
14	E-GSp 10	Escayola	0.80	Polvo	10%
15	E-GSp 20	Escayola	0.80	Polvo	20%

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos realizados permitieron evaluar el efecto de la incorporación de gel de sílice (G.S.) en dos formas —granulado y en polvo— sobre las propiedades físicas y mecánicas del yeso, comparando los resultados con una muestra de referencia sin adición. A continuación se analizan los resultados de densidad aparente, resistencia a flexión y resistencia a compresión.

En la Figura 1 se muestran los valores de densidad aparente obtenidos. Los resultados muestran valores similares a los compuestos de referencia. En general, las muestras formuladas con gel de sílice en polvo presentan valores de densidad ligeramente superiores respecto a sus equivalentes con gel de sílice granulado, lo cual se atribuye a una mejor dispersión del gel de sílice en la matriz de yeso y a una menor porosidad.

Las muestras de referencia Y-REF y E-REF presentan densidades de $1,16 \text{ g/cm}^3$ y $0,99 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. En los compuestos de yeso, la incorporación de gel de sílice en polvo no modifica de forma significativa la densidad, mientras que en la escayola se observa un ligero incremento progresivo con el contenido gel de sílice en polvo, alcanzando un valor máximo de $1,05 \text{ g/cm}^3$ con 20 % de GS-p.

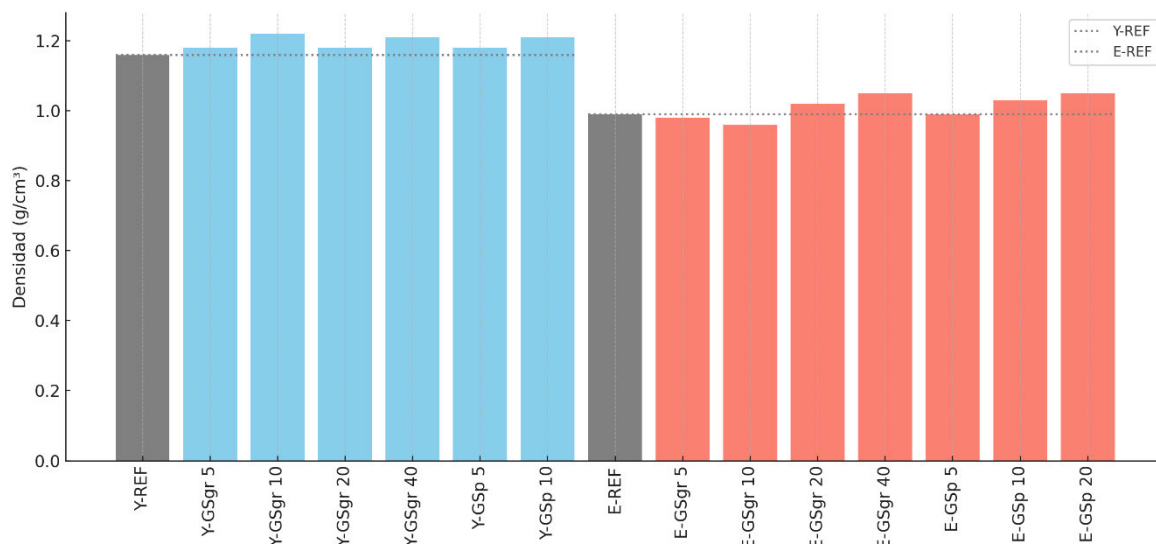


Figura 1. Densidad media por composición con barras de error estándar (g/cm^3).

La figura 2 muestra las resistencias a flexión medias obtenidas para todos los compuestos analizados. La resistencia a flexión de los compuestos muestra una tendencia decreciente al aumentar la proporción de gel de sílice granulado, tanto en el yeso como en la escayola. No obstante, todos los valores superan el mínimo establecido por normativa.

Por el contrario, los compuestos con gel de sílice en polvo presentan un comportamiento más favorable, especialmente con la escayola. La incorporación de 10% de gel de sílice en polvo alcanza el valor más alto de resistencia a flexión ($5,01 \text{ MPa}$), superando incluso a la muestra de referencia en un 41%. Esto podría deberse a un efecto de refuerzo mecánico producido por la distribución fina del gel de sílice en la matriz. Esto indica que el gel de sílice en polvo no solo no debilita la matriz, sino que incluso puede mejorar su cohesión interna, probablemente por una distribución más homogénea y una mejor interacción con los cristales del yeso.

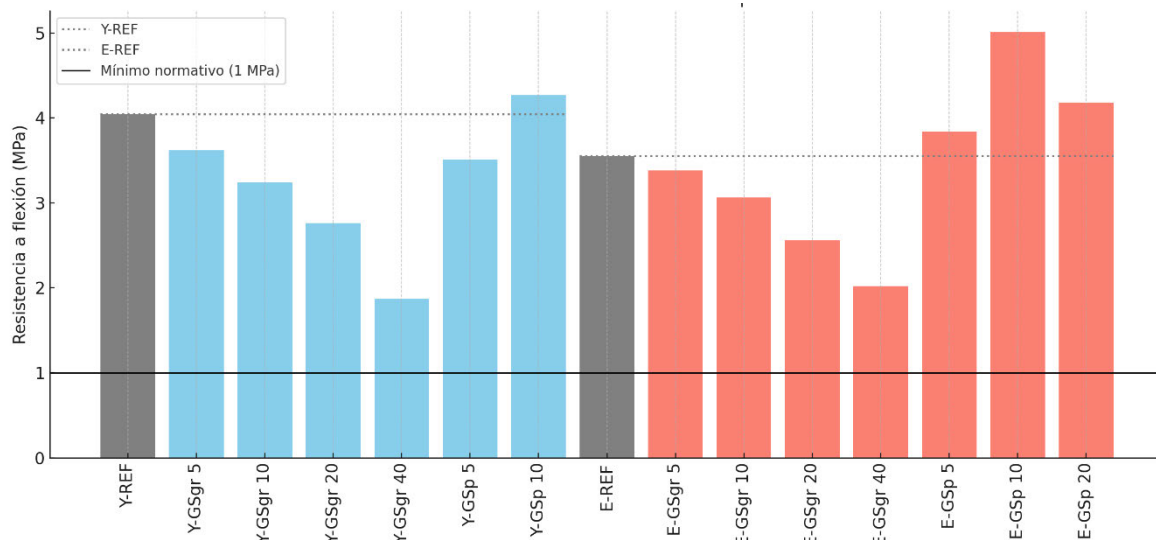


Figura 2. Resistencia a flexión por composición (MPa).

En la Figura 3, se observa una tendencia similar en cuanto a la resistencia a compresión. En términos de resistencia a compresión, los resultados con gel de sílice en polvo reflejan una clara mejoría con respecto a los valores de referencia, tanto para el yeso como para la escayola. La muestra E-GSp 20 en concreto, alcanzó el valor más alto (14,85 MPa), superando en un 76,3% el valor de la referencia E-REF (8,42 MPa).

Al igual que en flexión, las muestras con gel de sílice granulado al 40 % muestran resistencias significativamente más bajas, aunque en todos los casos se mantuvieron por encima del umbral mínimo de 2 MPa exigido por normativa. Este resultado confirma que el uso de gel de sílice en polvo permite no solo mantener, sino incluso mejorar significativamente la resistencia mecánica respecto a la muestra sin adiciones, mientras que el gel granulado tiende a debilitar la estructura, especialmente en altas proporciones.

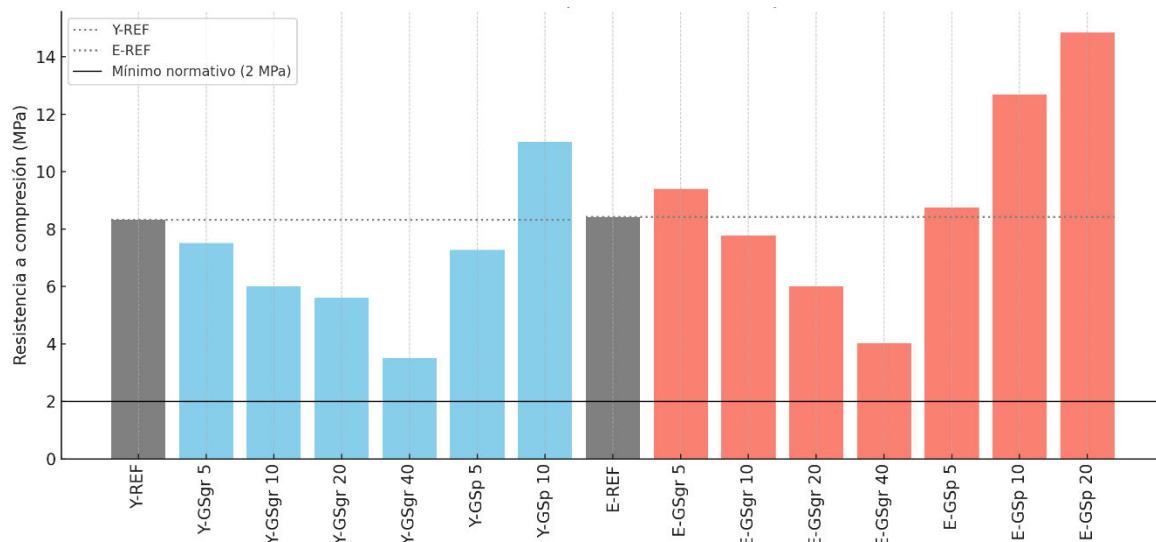


Figura 3. Resistencia a compresión por composición (MPa).

5. CONCLUSIONES

La incorporación de gel de sílice como adición en matrices de yeso o escayola permite modificar sus propiedades mecánicas, con diferencias significativas según la forma (granulado/polvo). En concreto, de los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Es posible incorporar hasta un 40% de gel de sílice granulado y un 10 o 20% de gel de sílice en polvo en compuestos de yeso o escayola, para su utilización como material de construcción, ya

que su comportamiento mecánico sobrepasa los valores mínimos establecidos en la normativa y mantienen una densidad aparente similar a los yesos tradicionales.

- Los mejores resultados de resistencia mecánica se obtuvieron con la adición de 10 y 20% de gel de sílice en polvo, tanto en compuestos de yeso como de escayola. No obstante, los resultados resaltan la resistencia obtenida con los compuestos de escayola donde la resistencia a flexión aumentó 41 % y la compresión un 76% con respecto a la referencia.
- En contraste, los compuestos con gel de sílice granulado, especialmente a altas dosificaciones (40 %), mostraron una disminución de la resistencia aunque los valores obtenidos fueron siempre por encima de la mínima establecida en la normativa.

En definitiva, el gel de sílice en polvo muestra un comportamiento favorable en todas las propiedades analizadas, superando a la muestra de referencia en resistencia y manteniendo una densidad similar a la referencia. En cambio, el gel granulado reduce ligeramente la densidad pero no mejora las propiedades mecánicas, lo que puede ser útil en aplicaciones que requieran aligeramiento, pero no cuando se prioriza la resistencia.

AGRADECIMIENTOS

Estos resultados son parte del proyecto de I+D+i PID2022-138002OA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y “FEDER Una manera de hacer Europa”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GhaffarianHoseini, A., AlWaer, H., Omrany, H., GhaffarianHoseini, A., Tookey, J., & Wang, Z. (2018). Sick building syndrome: Are we doing enough? *Building and Environment*, 144, 135–157. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1461060>
- Lechner, N. (2015). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Nano-engineered concrete: A review on materials and techniques for air-purifying and self-cleaning surfaces. *Construction and Building Materials*, 25(2), 582–590.
- Salthammer, T., Uhde, E., Schripp, T., Schieweck, A., Morawska, L., Mazaheri, M., ... & Weschler, C. J. (2018). Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution. *Environment International*, 118, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.009>
- Saint-Gobain (2022). Placo® Active Air: Solución para mejorar la calidad del aire interior. <https://www.saint-gobain.es>
- Tang, Z., Zhang, Y., Li, L., & Chen, X. (2018). Application of mesoporous silica in building materials: Effects on air purification and mechanical properties. *Building and Environment*, 138, 1–10.
- Wolkoff, P. (2018). Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(3), 376–390. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.015>
- Yu, C., Li, S., Wang, X., Zhang, L., & Han, X. (2019). Silica gel-based composite building materials for humidity control and VOC adsorption. *Journal of Building Engineering*, 25, 100827.
- Zhang, H., Wang, J., Li, J., & Fang, J. (2020). Silica-based materials for indoor air purification: Adsorption mechanisms and modification strategies. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121375.