

INFORME DEL PROYECTO REF.SV-23-GIJÓN-1-14

Estudio de soluciones innovadoras para sistemas de rehabilitación de edificios protegidos y patrimonio industrial basadas en morteros de cal aditivados: REHABIN

Fechas inicial y final del proyecto:

01 / 09/ 2023 al 31 / 12/ 2023

Investigador/a Principal:

María Placeres González Martínez

Otros investigadores:

Matías Álvarez Rodríguez

Felipe Pedro Álvarez Rabanal

Alfonso Lozano Martínez Luengas

Mar Alonso Martínez

Diana Movilla Quesada

Personal contratado:

Dana Rodríguez García

Fechas inicial y final de contratación:

01 / 09/ 2023 al 31 / 12/ 2023

Empresas o instituciones colaboradoras:

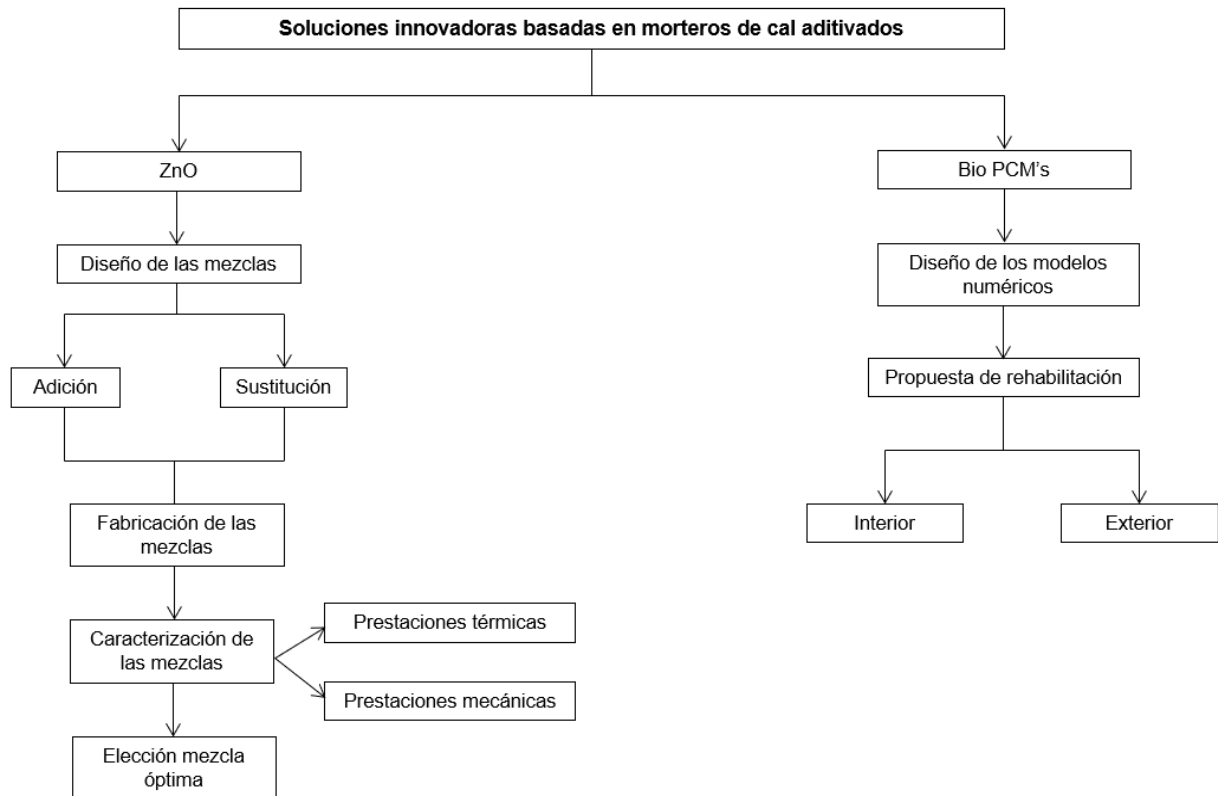
Oficina Técnica Astur

Estudios y Proyectos

Redes sociales de investigadores y empresas:

LINKEDIN: GICONSIME-UNIOVI

Resumen Gráfico



Memoria descriptiva del proyecto

1. Resumen ejecutivo

La descarbonización del sector de la construcción es en la actualidad una necesidad que abordan multitud de grupos de investigación. En este sentido, existen multitud de actuaciones sobre nueva construcción, diseño de nuevos procesos constructivos y nuevos materiales que permitan mejorar las prestaciones de la obra nueva reduciendo el impacto medioambiental de estas. Sin embargo, en España, en Asturias y en concreto en la ciudad de Gijón existen importantes obras, edificios y elementos que forman parte de nuestro patrimonio y cuyo mantenimiento es necesario para su conservación. Cuando se ejecuta una intervención de conservación existe una lista de prioridades que dejan un poco de lado la reducción del impacto medioambiental, entre estas se encuentra el mantenimiento de la esencia del elemento protegido, garantizar la estabilidad y seguridad. En la ciudad de Gijón existen varios elementos de carácter patrimonial que presentan o son susceptibles de presentar problemas estructurales o de mantenimiento.

Por tanto, este proyecto consistió en la realización de un estudio de soluciones innovadoras para sistemas de rehabilitación de edificios protegidos y patrimonio industrial basadas en morteros de cal aditivados. Para ello, se diseñaron mezclas de morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO.

Las nanopartículas de ZnO permiten que las mezclas capturen CO₂ mejorando la sostenibilidad del material y haciéndolos un material realmente valioso para entornos urbanos en los que los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero son elevadas. Una vez realizado el diseño de las mezclas se procedió a la fabricación de varias mezclas, comprobando las prestaciones de todas ellas. Para ellos se realizaron ensayos de caracterización térmica y mecánica. Otro parámetro condicionante fue la trabajabilidad de los morteros, directamente relacionado con el contenido de agua presente en la mezcla. Fue necesario realizar varios reajustes del diseño debido al incumplimiento de las expectativas de las probetas durante los ensayos de caracterización. Paralelamente, se desarrollaron modelos numéricos con materiales de cambio de fase (PCM's) que dieron lugar propuestas de rehabilitación interior y exterior.

Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Tipo	Objetivo	Grado de consecución
Principal	Diseño de nuevas mezclas de morteros de cal aditivados	100%
Específico	Diseño de mezclas de mortero de cal aditivadas con subproductos industriales (nanopartículas de ZnO)	100%
Específico	Caracterización de la trabajabilidad de los morteros de cal aditivados con ZnO.	100%
Específico	Caracterización mecánica de las mezclas de los morteros de cal aditivados con ZnO	100%
Específico	Caracterización térmica de las mezclas de los morteros de cal aditivados con ZnO.	100%
Específico	Determinación experimental de la capacidad de captación de CO ₂ de los morteros de cal aditivados con ZnO	0%
Específico	Incorporación de PCMs a las mezclas de morteros de cal	20%
Específico	Caracterización experimental del comportamiento térmico de morteros de cal con bio-PCMs.	20%
Específico	Caracterización experimental de las prestaciones mecánicas de morteros de cal aditivados con bio-PCMs	0%
Específico	Diseño de soluciones innovadoras para rehabilitación empleando morteros de cal aditivados (climatología de Gijón)	80%

Tabla 1. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

La determinación experimental de la capacidad de captación de CO₂ de los morteros de cal aditivados con ZnO no pudo llevarse a cabo debido al problema de funcionamiento que se dio en la cámara de carbonatación durante el mes de noviembre de noviembre, quedando inhabilitada para la realización de ensayos.

Por otro lado, el grado de consecución del objetivo correspondiente a la caracterización experimental del comportamiento térmico de morteros de cal con bio-PCMs no ha sido del 100% debido a que las mezclas no han resultado exitosas al presentar problemas de fugas. Este objetivo ha derivado en la combinación de materiales de cambio de fase macroencapsulados y morteros de cal como revestimiento. Se han hecho diseños preliminares del comportamiento térmico de estas soluciones empleando la caracterización experimental de PCMs macroencapsulados y técnicas de modelado numérico FEM como se describirá con mayor detalle posteriormente.

2. Tareas realizadas:

ID	Descripción	MESES			
		1	2	3	4
Fase 1	Diseño de mezclas de mortero de cal aditivadas	X			
Tarea 1.1	Diseño de las proporciones para morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO	X			
Tarea 1.2	Diseño de los modelos numéricos para morteros de cal aditivados con bio-PCMs	X			
Tarea 1.3	Diseño de la campaña experimental	X			
Fase 2	Fabricación de mezclas de morteros de cal aditivados	X	X		
Tarea 2.1	Fabricación de probetas cúbicas de las mezclas de mortero aditivados con nano partículas de ZnO diseñadas en la T1.1	X	X		
Fase 3	Caracterización de las mezclas de morteros de cal aditivados			X	X
Tarea 3.1.	Ensayos de caracterización de las prestaciones mecánicas de los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO: resistencia a compresión, trabajabilidad, porosidad y densidad.			X	
Tarea 3.2.	Ensayos de caracterización de las prestaciones térmicas de los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO: conductividad térmica.				X
Fase 4	Análisis de los resultados obtenidos en la caracterización experimental y elección de la mezcla óptima				X
Tarea 4.1	Análisis estadístico de los resultados obtenidos en los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO				X
Tarea 4.2	Análisis de los resultados obtenidos de los modelos numéricos en los morteros de cal aditivados con bio-PCMs				X
Tarea 4.3.	Selección de las mezclas óptimas para su aplicación en rehabilitación en la ciudad de Gijón				X
Fase 5	Modelado de soluciones de rehabilitación basadas en morteros de cal aditivados				X
Tarea 5.1.	Diseño de propuesta de rehabilitación estructural				X
Tarea 5.2.	Diseño de propuesta de rehabilitación energética				X

Fase 6	Divulgación				
Tarea 6.1.	Publicaciones en redes sociales del grupo				
Tarea 6.2.	Contribución aceptada en REHABEND 2024: "Macroencapsulated phase change materials as novelty solution for energy retrofit of heritage buildings"				

Figura 1. Planificación del proyecto

- **Fase 1: Diseño de mezclas de mortero de cal aditivadas**
 - **Tarea 1.1. Diseño inicial de las mezclas de mortero de cal aditivadas: mezclas de control**

Se realizaron tres probetas de control con diferentes porcentajes de agua. Se partió de un porcentaje inicial de un 22% obteniendo muy baja resistencia a compresión (<2 MPa) y alta porosidad. Se aumentó la cantidad de agua al 25 % logrando aumentar la resistencia a compresión a 3 MPa. Sin embargo, teniendo en cuenta la posterior aplicación de los morteros como revestimiento en la rehabilitación de edificios de patrimonio histórico, se busca una mejor trabajabilidad. Se aumentó el porcentaje de agua a 30%. Aunque la resistencia compresión disminuye ligeramente (2,5 MPa) su trabajabilidad se incrementa de forma considerable por lo que se escoge como dosificación de control para la realización de las posteriores mezclas aditivadas.

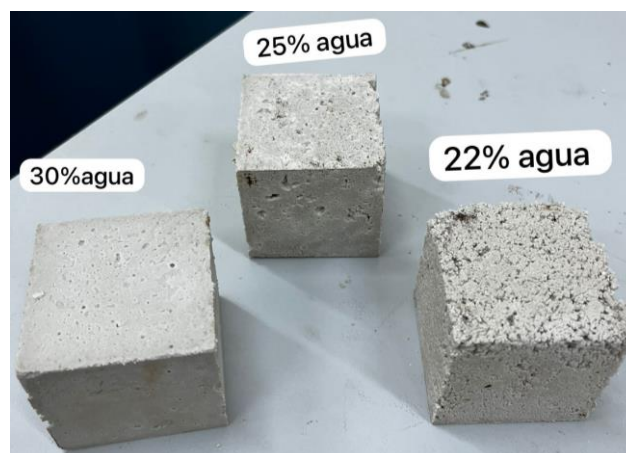


Figura 2. Dosificaciones iniciales de las probetas cúbicas.

○ **Tarea 1.2. Diseño de las proporciones para morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO.**

Las proporciones definitivas de los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO tanto en adición como en sustitución se resumen en la Tabla 2. En primer lugar, se muestra la cantidad (g) de cal, arena y agua empleada en la mezcla. Seguidamente, se incluyen los porcentajes (0.5, 1, 1.5 y 2%) y el peso de nanopartículas de ZnO que se decide aditivar.

MEZCLA-sustitución	CAL (g)	arena (g)	agua (g)	ZnO (%wt)	ZnO (g)
00_control	320.00	1024.00	288.00	0.00	0.00
LsD22_Zn-0.5	318.40	1024.00	288.00	0.50	1.60
LsD22_Zn-1	316.80	1024.00	288.00	1.00	3.20
LsD22_Zn-1.5	315.20	1024.00	288.00	1.50	4.80
LsD22_Zn-2	313.60	1024.00	288.00	2.00	6.40

MEZCLA-adición	CAL (g)	arena (g)	agua (g)	ZnO (%wt)	ZnO (g)
00_control	320.00	1024.00	288.00	0.00	0.00
LsD22_Zn-0.5	320.00	1024.00	288.00	0.50	1.60
LsD22_Zn-1	320.00	1024.00	288.00	1.00	3.20
LsD22_Zn-1.5	320.00	1024.00	288.00	1.50	4.80
LsD22_Zn-2	320.00	1024.00	288.00	2.00	6.40

Tabla 2. Proporciones definitivas de las mezclas de mortero

○ **Tarea 1.3. Diseño del modelo numérico de fachada para morteros de cal incorporando bio-PCMs**

Las mezclas de morteros de cal con PCMs no han resultado exitosas puesto que presentan problemas de fugas. Este objetivo ha derivado en la combinación de materiales de cambio de fase macroencapsulados y morteros de cal como revestimiento. Se han hecho diseños preliminares del comportamiento térmico de estas soluciones empleando la caracterización experimental de PCMs macroencapsulados y técnicas de modelado numérico FEM analizando dos propuestas de rehabilitación exterior (Figura 4) e interior (Figura 5). Los modelos numéricos desarrollados en este proyecto estudian un análisis térmico transitorio que modela cinco días tipo de invierno y verano para dos tipos de envoltentes rehabilitadas con PCM. Se persigue una solución que presente un comportamiento activo y minimice la oscilación térmica del interior.

Modelo numérico de fachada sin rehabilitar

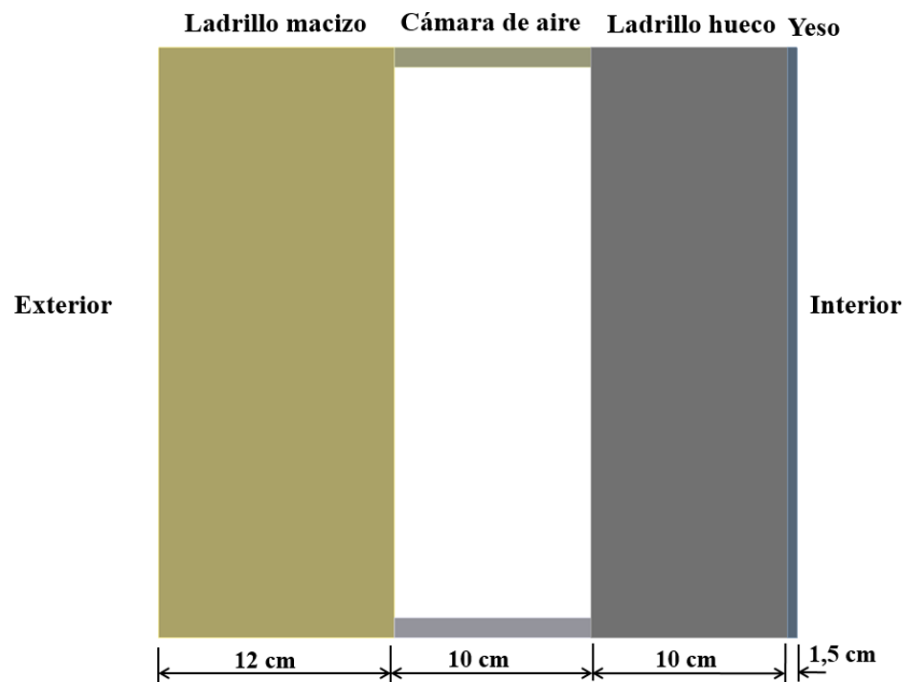


Figura 3. Modelo numérico de fachada sin rehabilitar

Modelo numérico de fachada con rehabilitación exterior

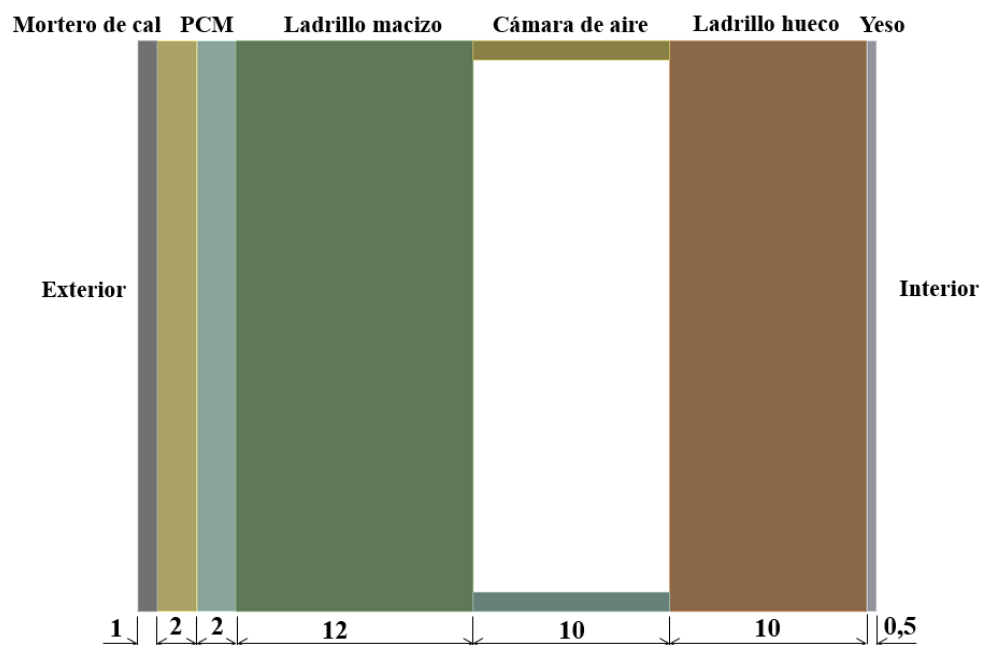


Figura 4. Modelo numérico de fachada con rehabilitación exterior

Modelo numérico de fachada con rehabilitación interior

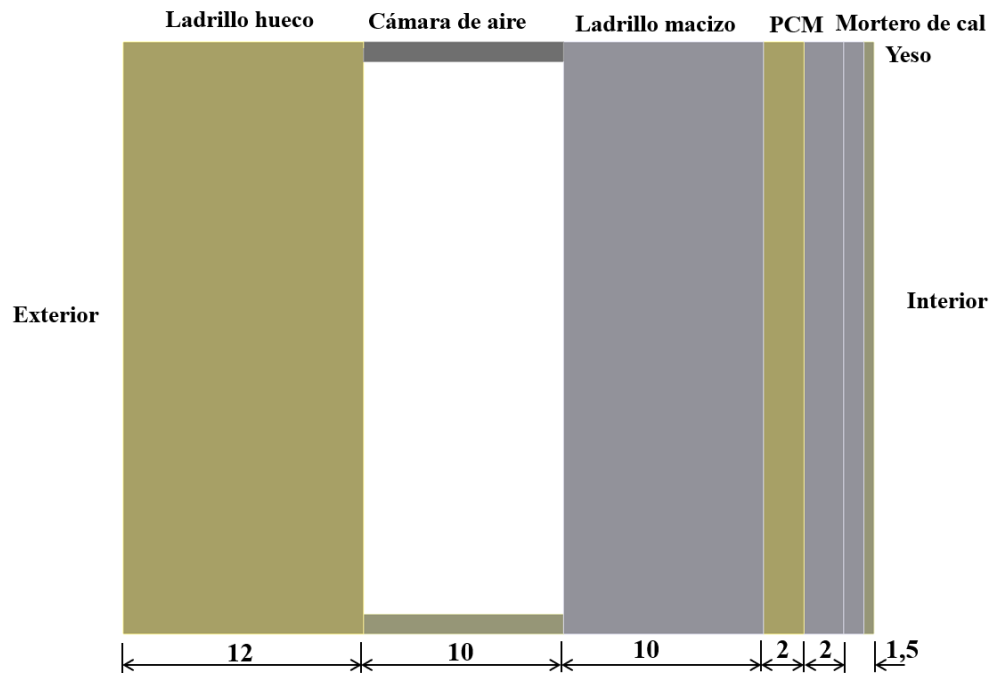


Figura 5. Modelo numérico de fachada con rehabilitación interior

- Fase 2. Fabricación de mezclas de morteros de cal aditivados.
 - Tarea 2.1. Fabricación de probetas cúbicas de las mezclas de mortero aditivados con nano partículas de ZnO diseñadas en la T1.1

En cada amasada se realizaron 6 probetas (Figura 6)

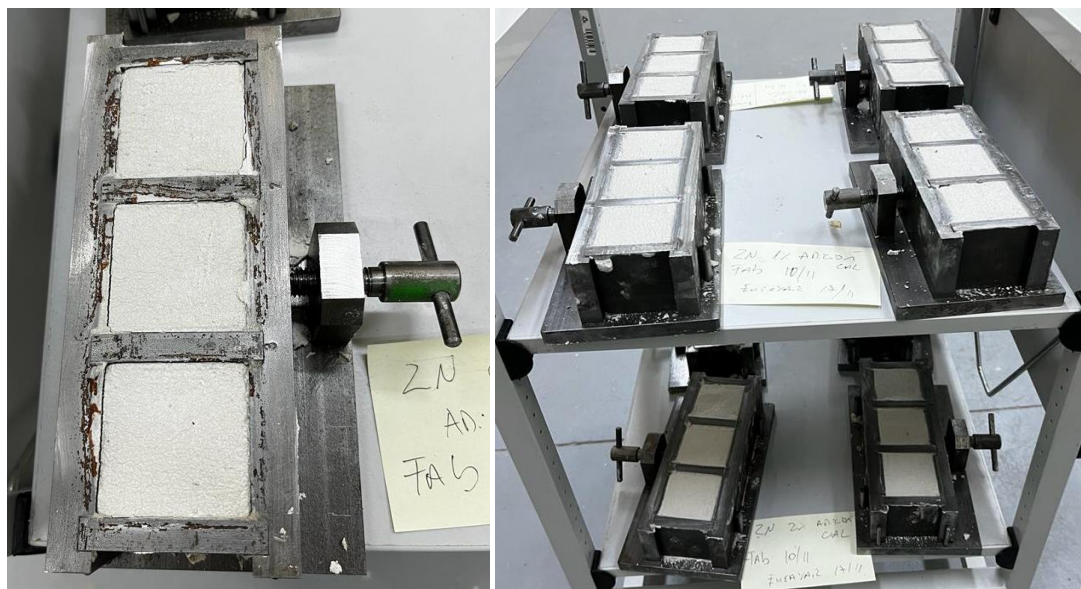


Figura 6. Fabricación de las probetas cúbicas de mortero aditivado con nano partículas de ZnO

Las mezclas fueron desmoldadas después de 24 horas curando a temperatura ambiente e introducidas en la cámara de atmósfera controlada (Figura 7). Los parámetros de temperatura y humedad establecidos fueron:

- Temperatura 20°C
- Humedad 95%



Figura 7. Fraguado de las mezclas

Pasados siete días las mezclas fueron extraídas de la cámara de atmósfera controlada. En la Figura 8 se muestran las probetas preparadas para la realización de los ensayos de la Fase 3.



Figura 8. Preparación de las probetas para la realización de los ensayos

- **Fase 3. Caracterización de los morteros de cal aditivados**

- **Tarea 3.1. Ensayos de caracterización de las prestaciones mecánicas de los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO: resistencia a compresión, trabajabilidad, porosidad y determinación de la densidad.**

Se realizan los ensayos a compresión (Figura 9) y posteriormente se determina la densidad de las mezclas con un picnómetro de Helio.



Figura 9. Ensayos a compresión de las mezclas

- **Tarea 3.2. Ensayos de caracterización de las prestaciones térmicas de los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO: conductividad térmica.**

Se muelen los restos de mezclas ensayadas a compresión con un molino de bolas con el objetivo de medir su conductividad en polvo. Para ello se empleó el medidor de conductividad térmica de la marca C –Therm empleando la técnica modificada de la fuente plana transitoria. En la Figura 10 se muestran las mezclas en polvo sobre las que posteriormente se midió su conductividad, así como la instalación para realizar las medidas (Figura 11 y Figura 12).



Figura 10. Mezclas en polvo para la medida de conductividad térmica

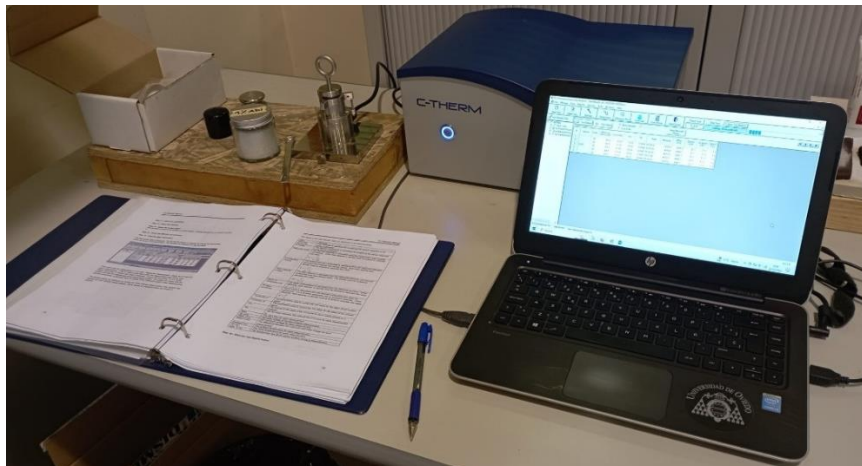


Figura 11. Instalación para la medida de la conductividad de las mezclas



Figura 12. Detalle de la instalación para la medida de la conductividad en la mezcla 2% adición

3. Resultados obtenidos:

A continuación, se resumen los resultados de este proyecto derivados de las tareas realizadas que se han descrito anteriormente. En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, con el objetivo de reducir el tiempo de fabricación de las probetas, cabe destacar que fueron desmoldadas y ensayadas después de siete días de fraguado tal y como permite la norma. Sin embargo, los valores de resistencia a compresión no son tan altos como lo serían con 28 días de fraguado. En primer lugar, fueron ensayadas las probetas de control, es decir, aquellas sin adición ni sustitución de ZnO. La resistencia a compresión media de esta mezcla fue de 2,86 MPa. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos a compresión para cada una de las mezclas aditivadas.

En la Figura 13 se representa la resistencia a compresión en el caso de las mezclas de sustitución, representando en el eje de abscisas el porcentaje de ZnO que se añadió a la mezcla y en el eje de ordenadas la resistencia a compresión en MPa. Se puede observar como estos valores se encuentran en un rango comprendido entre 0.3 y 0.4 MPa. La resistencia máxima a compresión se corresponde con las mezclas en las que se añade un 1 y 1.5% de nanopartículas.

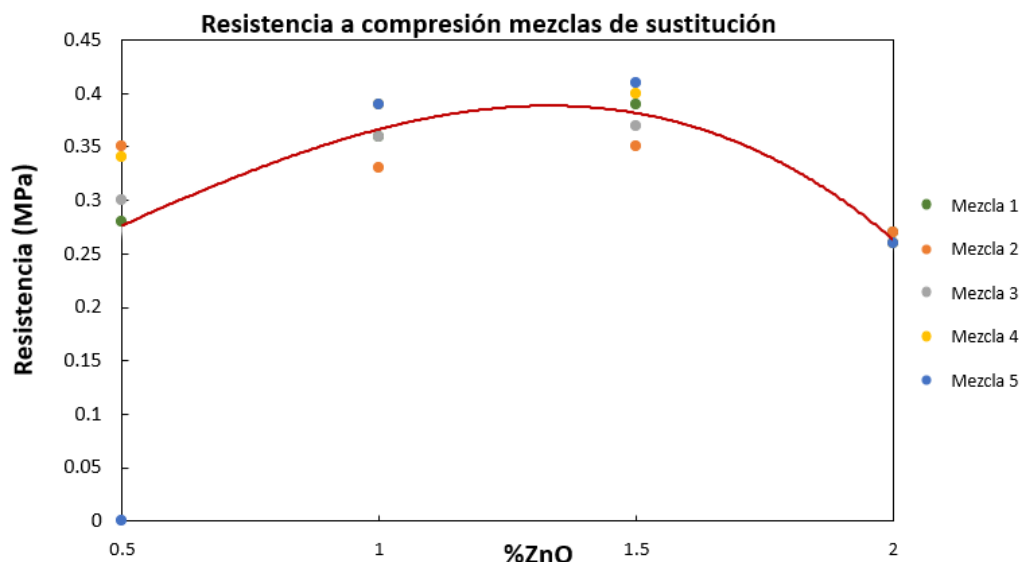


Figura 13. Resistencia a compresión de las mezclas de sustitución

Por otro lado, en la Figura 14 se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a compresión en mezclas de adición. En este caso el rango de valores se incrementa ligeramente, llegando a alcanzar los 0.45 MPa. Los valores máximos se corresponden con las mezclas en las que se añaden un 1.5 y 2% de nanopartículas.

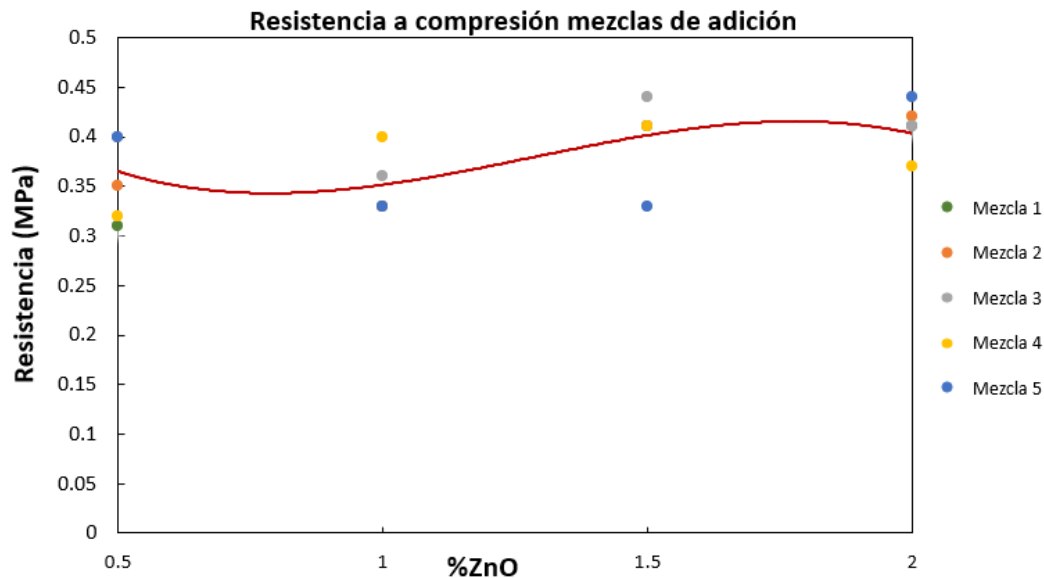


Figura 14. Resistencia a compresión de las mezclas de adición

En la Tabla 3 se recogen los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las prestaciones mecánicas de los morteros de cal aditivados con nanopartículas de ZnO.

Mezcla	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m·K)
Control	2549,8	0,084
1% Adición	2460,8	0,119
1% Sustitución	2666,8	0,094
2% Adición	2663,2	0,086
2% Sustitución	2667,2	0,096

Tabla 3. Resultados de densidad y conductividad para las diferentes mezclas

Por tanto, es importante remarcar que aun incluyendo las nanopartículas de ZnO, se mantienen valores de conductividad térmica aceptable para este tipo de materiales. Además, se le añade la ventaja de que actúan como captadores de CO₂. Por lo tanto, el beneficio medioambiental es muy reseñable.

En cuanto a los modelos numéricos con PCMs macroencapsulados, en primer lugar, se recogen en la Tabla 4 las propiedades de los materiales introducidos en los modelos numéricos. Como se puede observar el calor específico del PCM es función de la temperatura (Figura 15)

Material	Conductividad térmica, λ (W/m·°C)	Calor específico (J/kg·°C)	Densidad (kg/m ³)
Ladrillo macizo	0.96	1000	2170
Ladrillo hueco	0.44	1000	930
Mortero de cal	0,084	1000	2549,8
PCM21 (sólido/líquido)	0.2	f(temp)	880/770

Tabla 4. Propiedades de los materiales

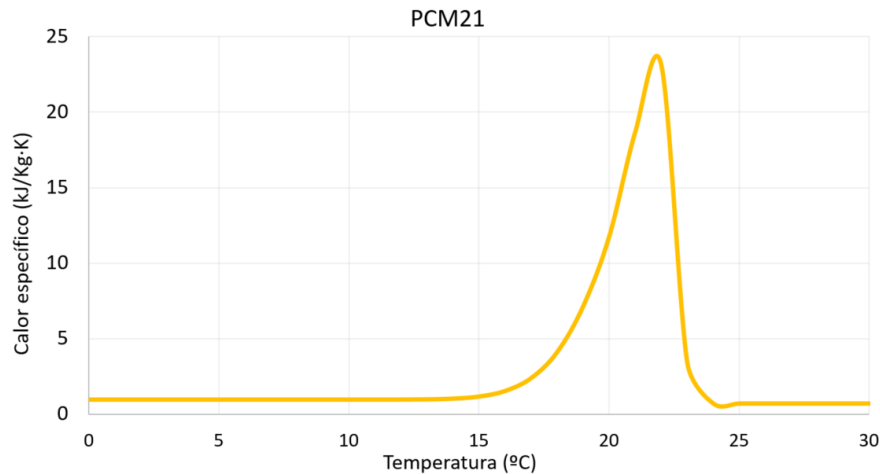


Figura 15. Capacidad calorífica efectiva equivalente para el PCM utilizado.

En la Figura 16 se muestran los resultados correspondientes a las diferentes propuestas de rehabilitación que se han descrito anteriormente. La fachada original presenta una oscilación térmica en torno a 1 °C en condiciones de verano y casi 0.93 °C en condiciones de invierno, cayendo en este último caso la temperatura media 11 °C aproximadamente. Sin embargo, se puede ver como la rehabilitación interior reduce de manera importante la oscilación térmica presente en la fachada original (72.36%), pasando de 0.991 °C a 0.274 °C de oscilación máxima. En invierno mejora de igual forma con el uso de PCMs por el interior, siendo la oscilación térmica un 70.14 % menor que en la envolvente original. La temperatura media en invierno también presenta un ascenso significativo con respecto a la temperatura media interior del cerramiento sin rehabilitar lo cual también afecta al confort interior.

En el caso de la rehabilitación exterior, los resultados son menos satisfactorios en cuanto a temperatura media interior. Si bien es cierto que la oscilación térmica se minimiza significativamente (93.67% en verano y 70.68 % en invierno), las temperaturas medias en ambos casos alcanzan los 18.135 °C en verano y 10.721 °C en invierno. Por tanto, el comportamiento del PCM consigue que, durante su cambio de fase, la temperatura se estabilice y la transferencia de calor se reduzca, mejorando con ello el confort térmico interior.

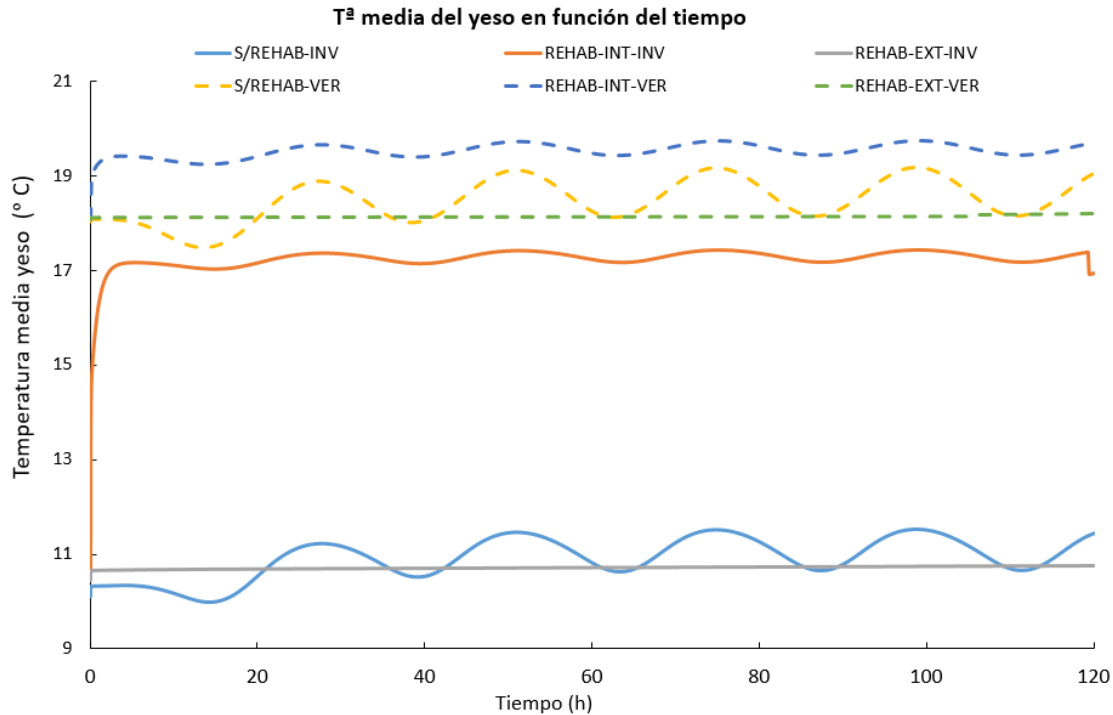


Figura 16. Evolución de la temperatura media (°C) medida en el yeso

4. Trabajos o necesidades futuras

El diseño de nuevas soluciones de rehabilitación adecuadas a nuestra climatología es una línea de desarrollo muy novedosa que, supone un punto de partida en sistemas constructivos que diferenciarán a la ciudad y a las entidades que aborden las diferentes actuaciones en la misma. El proyecto, fundamentalmente por su corta no presenta como objetivo llegar a un nivel de madurez tecnológica elevado desarrollando prototipos. Sin embargo, se considera un primer paso para ofrecer alternativas para las que pueden ser las técnicas de un futuro cercano.

5. Divulgación de los resultados

Los resultados de los proyectos se divulgarán en el año 2024 a través de publicaciones o congresos. Entre estos, se encuentra el congreso Iberoamericano REHABEND2024 que se celebrará en mayo de 2024 y tendrá lugar en Gijón. El investigador Alfonso Lozano pertenece a la organización y la IP del proyecto ya ha enviado una propuesta de ponencia relacionada con la temática de este proyecto titulara: "Macroencapsulated Phase Change Materials as novelty Solution for energy retrofit of heritage buildings". El resumen enviado ha sido aceptado, y el artículo extendido se enviará en los próximos meses.

Además, el equipo investigador hará divulgación del proyecto tanto en su página web: Construcción Sostenible, Simulación y Ensayo GICONSIME - Proyectos (uniovi.es) como en sus Redes Sociales LINKEDIN GICONSIME-UNIOVI

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
"Macroencapsulated Phase Change Materials as novelty solution for energy retrofit of heritage buildings".	Matías Álvarez Rodríguez Alfonso Lozano Martínez-Luengas Placeres González-Martínez Juan José del Coz Díaz Mar Alonso Martínez Dana Rodríguez García	Com. Oral	REHABEND2024	Gijón, mayo 2024
Estudio de soluciones innovadoras para sistemas de rehabilitación de edificios protegidos y patrimonio industrial basadas en morteros de cal aditivados: REHABIN	Dana Rodríguez García Placeres González-Martínez Matías Álvarez Rodríguez Felipe Pedro Álvarez Rabanal Alfonso Lozano Martínez Luengas Mar Alonso Martínez Diana Movilla Quesada	Charla Invitada	Jornadas de Proyectos IUTA	Gijón (Spain), May 2022

Memoria económica:

1. Gastos:

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	4.000 €
TOTAL GASTOS	4.000 €

2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	4.000 €
TOTAL INGRESOS		4.000 €