



DESARROLLO DE MATERIALES CEMENTICIOS ECOEICIENTES, CON BAJO IMPACTO Y ALTA DURABILIDAD

DEVELOPMENT OF ECO-EFFICIENT CEMENTITIOUS MATERIALS WITH LOW-IMPACT AND HIGH DURABILITY

(EcoCeMat)

Proyecto PID2021-125810OB-C22 financiado por MCIN/ AEI
/10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa

Proyecto desarrollado en:

Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química

Grupo de investigación "Comportamiento en Servicio de Materiales"

Resumen:

Las arcillas, ricas en aluminosilicatos, pueden actuar como precursor en cementos activados alcalinamente, siendo una alternativa al cemento Portland (PC) y un recurso natural abundante. Sin embargo, la activación térmica a temperaturas elevadas (500-850 °C) limita la sostenibilidad del proceso por su alto consumo energético. La activación de la arcilla mediante procesos alternativos no térmicos supondría un ahorro energético. El proyecto EcoCeMat profundizará en los procesos mecánicos y/o químicos de deshidroxilación de las arcillas a bajas temperaturas, para incrementar las fases amorfas y la actividad de los aluminosilicatos y su disponibilidad para la posterior formación de las fases cementantes N(C)ASH. Conseguida la activación no térmica de las arcillas, se pretende aumentar el uso sostenible del material precursor en: (a) la formulación de cementos activados alcalinamente (AAC) alternativos al PC, (b) substituyendo total o parcialmente la arcilla activada térmicamente utilizada en los cementos a base de arcilla calcinada (limestone calcined clay cement, LC³), y (c) la utilización de estos materiales cementantes alternativos en la formulación de morteros.

Los cementos de base fosfato son otra alternativa prometedora al PC. Entre ellos, destacan los cementos de fosfato de magnesio y potasio (MPC), con propiedades muy competitivas. El proyecto EcoCeMat propone el desarrollo de MPC empleando residuos refractarios generados por la industria siderúrgica como fuente de óxido de magnesio, concretamente el conocido como volteo de Tundish, refractario básico (rico en MgO) que recubre la artesa en el paso previo a la colada continua del acero. Además, también se considera la adición de otros residuos ricos en Si y Al, que podrían formar silico-aluminatos fosfatopotásicos de magnesio (Si-Al-MPC) y/o silico-aluminatos de magnesio (MSAH). Esto abre una nueva línea de investigación para la formulación de materiales conglomerantes a partir de recursos secundarios. Estableciéndose una sinergia entre el desarrollo de ambos tipos de materiales cementantes alternativos, se pretende estudiar el efecto de las arcillas activadas no térmicamente y el Tundish en los AAC. De este modo se puede formular morteros híbridos innovadores alternativos al PC.

En cualquier caso, el desarrollo de todos estos tipos de morteros de interés medioambiental implica, para su utilización industrial, profundizar en su durabilidad y previsible comportamiento en servicio. EcoCeMat plantea un estudio muy completo sobre el comportamiento al desgaste, frente a ciclos hielo-deshielo y a fenómenos de carbonatación. Además, plantea un estudio de pasivación y corrosión en ellos de barras corrugadas de acero inoxidable y acero al carbono que abriría la puerta para el empleo de estos nuevos materiales en estructuras armadas.

Tras completar el estudio con análisis de ciclo de vida, se planteará el uso de los nuevos materiales cementantes con las características técnicas y durabilidad requeridas, pero con menor huella ambiental y su uso para diferentes soluciones constructivas (e.g. materiales de reparación, preconformados y/u hormigones arquitectónicos).

En conclusión, el proyecto multidisciplinar EcoCeMat pretende desarrollar conglomerantes alternativos al PC con aplicaciones en el campo de la construcción y obra civil, asegurando la ecoeficiencia de los materiales cementantes y su durabilidad. Esto contribuirá a la sostenibilidad y competitividad del sector de la construcción.

Abstract:

Clays, rich in aluminosilicates, can act as a precursor in alkaline activated cements, being an alternative to Portland cement (PC) and an abundant natural resource. However, thermal activation at high temperatures (500-850 °C) limits the sustainability of the process due to its high energy consumption. The activation of the clay by means of alternative non-thermal processes would suppose an energetic saving. The EcoCeMat project will delve into the mechanical and/or chemical dehydroxylation processes of clays at low temperatures, to increase the amorphous phases and the activity of the aluminosilicates and their availability for the subsequent formation of the cementitious N(C)ASH phases. Once the non-thermal activation of the clays has been achieved, it is intended to increase the sustainable use of the precursor material in: (a) the formulation of alkaline activated cements (AAC) alternative to PC, (b) totally or partially replacing the thermally activated clay used in limestone calcined clay cements (LC³), and (c) the use of these alternative cementing materials in the formulation of mortars.

Phosphate-based cements are another promising alternative to PC. Among them, the magnesium and potassium phosphate (MPC) cements stand out, with very competitive properties. The EcoCeMat project proposes the development of MPC using refractory waste generated by the steel industry as a source of magnesium oxide, specifically the one known as tundish tumbling, a basic refractory (rich in MgO) that covers the tundish in the step prior to continuous casting of steel. In addition, the addition of other residues rich in Si and Al is also considered, which could form magnesium phosphate-potassium silico-aluminates (Si-Al-MPC) and/or magnesium silico-aluminates (MSAH). This opens a new line of research for the formulation of binder materials from secondary resources.

Establishing a synergy between the development of both types of alternative cementing materials, it is intended to study the effect of nonthermally activated clays and tundish in AAC. In this way, innovative hybrid mortars can be formulated as alternatives to PC. In any case, the development of all these types of mortars of environmental interest implies, for their industrial use, deepening their durability and foreseeable behaviour in service. EcoCeMat proposes a very complete study on the wear behaviour, against freeze-thaw cycles and carbonation phenomena. In addition, it proposes a study of passivation and corrosion of corrugated stainless steel and carbon steel bars embedded in those mortars that would open the door for the use of these new materials in reinforced structures. After completing the study with life cycle analysis, the use of new cementitious materials with the required technical characteristics and durability, but with a smaller environmental footprint, would be planned for their use in different construction solutions (eg repair materials, preformed and/or architectural concretes).

In conclusion, the multidisciplinary project EcoCeMat aims to develop alternative binders to PC with applications in the field of construction and civil engineering, ensuring the eco-efficiency of cementitious materials and their durability. This will contribute to the sustainability and competitiveness of the construction sector.

Comunicación / dissemination:

A) ARTÍCULOS (JCR)

1. S. Shagñay, A. Bautista, F. Velasco, I. Ramón-Álvarez, M. Torres-Carrasco. **“Influence of the early-age length change of alkali-activated slag mortars on the corrosion of embedded steel”**. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 13 (2024) 178-195. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2260794>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/39786>]

Aspectos destacados:

- Se han probado morteros de escoria activados con álcali, fabricados de cinco maneras diferentes (relación fija de Na_2O).
- El comportamiento a retracción de los morteros está relacionado con la corrosión del acero embebido.
- La inmersión cíclica en NaCl favorece la difusión y precipitación de cloruros en morteros reforzados.
- La morfología de las picaduras está relacionada con el transporte de cloruros a través de grietas, microfisuras y/o porosidad.
- El *waterglass* (con un ratio molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 0.8) o el Na_2CO_3 son opciones prometedoras para activar la escoria en morteros reforzados con acero al carbono.

2. I. Ramón-Álvarez, S. Sánchez-Delgado, I. Peralta, A. Caggiano and M. Torres-Carrasco. **“Experimental and computational optimization of eco-friendly mortar blocks for high temperature thermal energy storage of concentrated solar power plants”**. Journal of Energy Storage, 71 (2023) 108076. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108076>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <http://hdl.handle.net/10016/38578>]

Aspectos destacados:

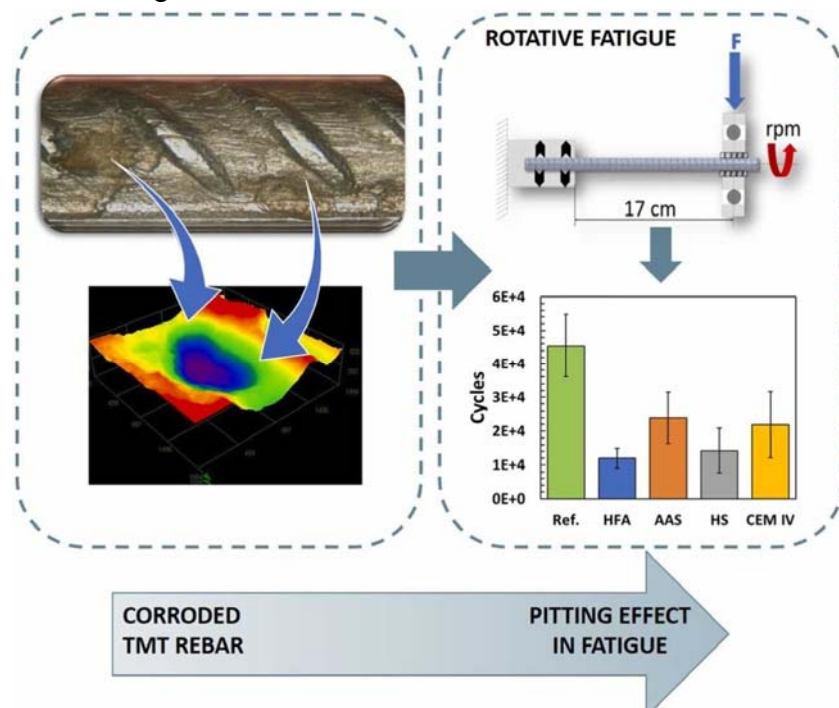
- Nuevos materiales alternativos al cemento Portland para su uso como medios de almacenamiento térmico.
- Uso de simulaciones de elementos finitos para estudiar el diseño óptimo del almacenamiento.
- Evaluación de propiedades mecánicas y térmicas de los morteros tras su exposición a ciclos térmicos.
- Ahorro de material al reducir el volumen del bloque y la superficie del intercambiador de calor.
- Mejora de la eficiencia operativa y la capacidad dinámica de los bloques de almacenamiento.

3. I. Ramón-Álvarez, S. Shagñay, D. Serrano, A. Caggiano, M. Torres-Carrasco, S. Sánchez-Delgado. “**Manufacturing and performance of eco-efficient cementitious blocks for thermal cycling in thermal energy storage**”. Case Studies in Thermal Engineering 61 (2024) 104947. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104947>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/46999>]

4. S. Shagñay, A. Bautista, M. Torres-Carrasco, F. Velasco. “**Corrosion of ribbed carbon steels in ecological mortars and its influence on their rotative fatigue behaviour**”. Construction and Building Materials, 426 (2024) 136055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136055>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/46460>]

Aspectos destacados:

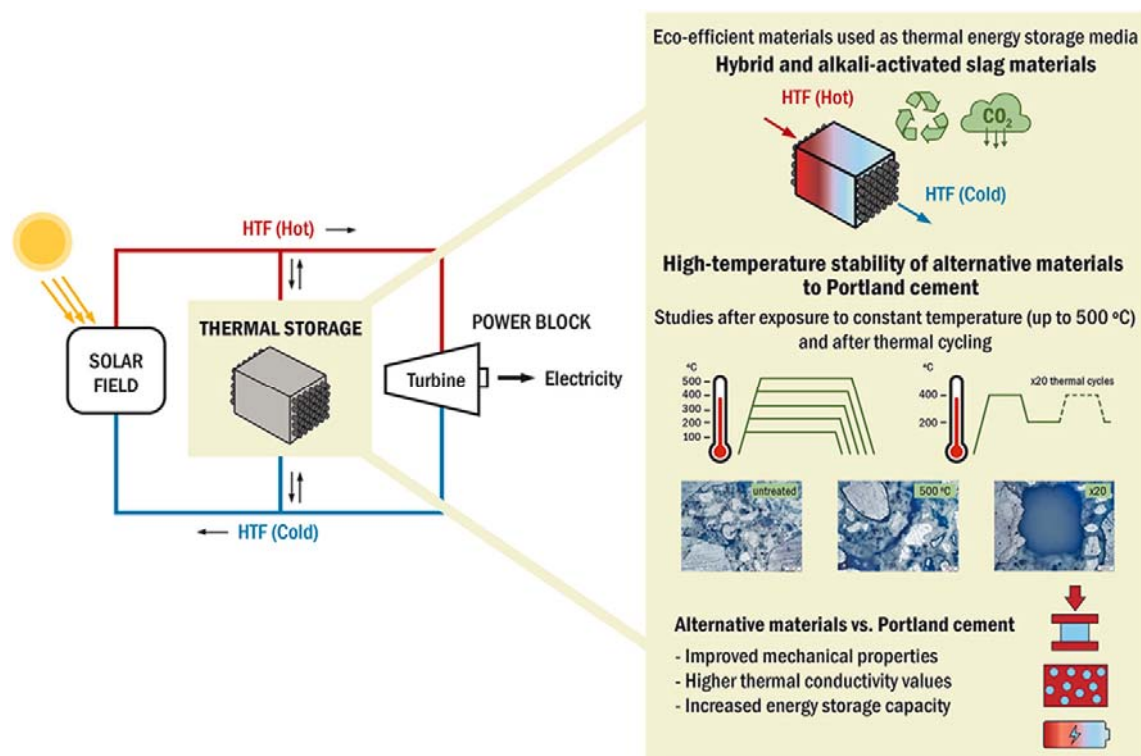
- Se evaluaron tres morteros reforzados ecológicos tras 17 meses de inmersión en NaCl.
- El análisis opto-electrónico de las picaduras se relaciona con los cloruros libres totales y el pH de los aglomerantes.
- La fatiga de las barras corroídas en morteros activados alcalinamente es similar a la del cemento tipo IV.
- El bajo pH de los morteros híbridos con bajo contenido de clínker es responsable de una menor durabilidad del acero.
- La resistencia a la fatiga se relaciona tanto con la velocidad como con la morfología de la corrosión.



5. I. Ramón-Álvarez, S. Sánchez-Delgado, M. Torres-Carrasco. **“Viability of hybrid and alkali-activated slag materials for thermal energy storage: Analysis of the evolution of mechanical and thermal properties”**. Journal of Building Engineering, 95 (2024) 110073.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110073>
 [Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/46506>]

Aspectos destacados:

- Caracterización de materiales cementantes para su uso como medios de almacenamiento térmico.
- Comportamiento mecánico y térmico de morteros ecoeficientes tras tratamientos térmicos.
- Comparación entre la exposición a altas temperaturas y ciclos térmicos.
- Mejora operativa de sistemas alternativos en comparación con el mortero de cemento Portland.



6. R. Naderi, A. Bautista, S. Shagñay, F. Velasco. “**Licorice (*Glycyrrhiza glabra*) as corrosion inhibitor of carbon steel reinforcing bars in mortar and its synergic effect with nitrite**”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 129 (2024) 620–633. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.017>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/39814>]

Aspectos destacados:

- Se exploran las sinergias de un nuevo inhibidor de corrosión ecológico para el acero en hormigón.
- Se realiza una monitorización electroquímica en disolución y en morteros con cloruros.
- Todos los inhibidores probados reducen la velocidad de corrosión mediante un mecanismo anódico.
- La mezcla de 50 % de regaliz + 50 % de Na_2NO_2 es especialmente eficaz.
- No se observa ningún efecto relevante en la porosidad del mortero con adiciones de regaliz de hasta el 0,2 %.

7. J. Mañosa, M. Torres-Carrasco, J.C. Córdoba, A. Maldonado-Alameda, J.M. Chimenos. “**In-situ characterization of early hydration of low-carbon cements containing thermally and mechanically activated kaolin**”. Construction and Building Materials, 457 (2024) 139469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139469>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/46785>]

Aspectos destacados:

- La incorporación de arcilla activada mecánicamente mejoró la hidratación temprana.
- La arcilla activada mecánicamente mostró una actividad puzolánica acelerada en comparación con la arcilla calcinada.
- La precipitación de carboaluminatos se produjo antes en el cemento adicionado con arcilla activada mecánicamente.
- La resistencia del cemento de arcilla calcinada con piedra caliza con arcilla activada mecánicamente fue mayor que con arcilla calcinada.

8. A. Cruz-Hernández, F. Velasco, M. Torres-Carrasco, A. Alfocea-Roig, J. Formosa, A. Bautista. “**Passivation of galvanized and carbon steels in phosphate mortars manufactured with alternative MgO sources**”. Journal of Building Engineering, 111 (2025) 113303. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113303>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/47780>]

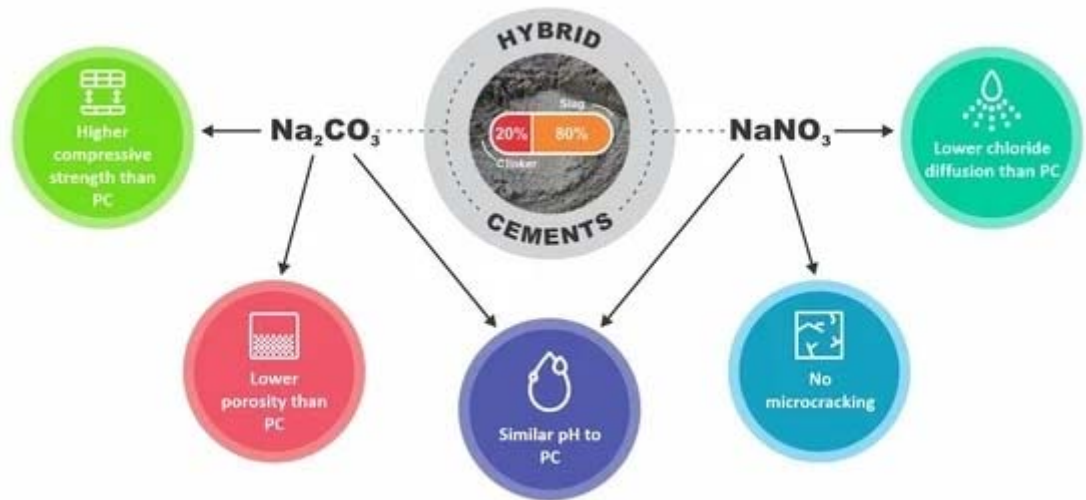
Aspectos destacados:

- Los cementos de fosfato de magnesio y potasio ecológicos se formulan con MgO procedente de residuos de desbaste de artesa de acería.
- También se estudian cementos de fosfato de magnesio y potasio a partir de polvo de ciclón con MgO y morteros de cemento Pórtland tipo II.
- Se utilizan aceros al carbono y galvanizados corrugados como refuerzos en los cementos de fosfato de magnesio y potasio alternativos.
- La monitorización mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) de los sistemas de mortero reforzado se realiza a alta humedad relativa durante 4 meses.
- Los aceros al carbono y galvanizados son pasivos en cementos de fosfato de magnesio y potasio a partir de residuos de desbaste de artesa.

9. I. Ramón-Álvarez, E. Batuecas, D. Serrano, A. Caggiano, S. Sánchez-Delgado, M. Torres-Carrasco. “**Sustainable cementitious alternatives for thermal energy storage: slag-based alkali-activated and hybrid materials**”. Materiales de Construcción, 75 (2025) e362. <https://doi.org/10.3989/mc.2025.401224>
[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/47619>]

10. A. Cruz-Hernández, F. Velasco, M. Torres-Carrasco, A. Bautista. **“Hybrid Mortars Activated with Alternative Steel-Compatible Salts: Impact on Chloride Diffusion and Durability”**. Applied Sciences, 15 (2025) 8055. <https://doi.org/10.3390/app15148055>

[Repositorio en abierto de la UC3M: <https://hdl.handle.net/10016/47818>]



B) SEMINARIOS

1. M. Torres-Carrasco. “Aplicaciones de los materiales de construcción: almacenamiento térmico solar e inmovilización de residuos radioactivos”. Instituto Álvaro Alonso Barba (Univ. Carlos III de Madrid). 21-Dic-2022.

C) CONFERENCIAS INVITADAS

1. M. Torres-Carrasco. “Empleo de los materiales activados alcalinamente y cementos híbridos como sistemas de almacenamiento térmico solar”. Workshop - Development of alternative applications for alkali cements within the Circular Economy. Vila-Real (Portugal), 29-Mar-2023. Conferencia invitada.
2. S. Shagñay. “Geopolímeros eco-eficientes alternativos al cemento Portland: Caracterización y propiedades mecánicas”. X Congreso Internacional de Investigación “Semana de la Ciencia, Tecnología, Emprendimiento e Innovación” SECTEI (Escuela Politécnica Superior de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador). 25-Oct-2023.
3. A. Bautista. “Corrosión y protección de estructuras de hormigón armado”. Jornada de Materiales de Construcción (Univ. Rey Juan Carlos). 3-Nov-2023.
4. I. Ramón-Álvarez. “Búsqueda y desarrollo de materiales cementantes alternativos para el almacenamiento de energía térmica”. VI Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción. Madrid, 19-20/05/2025. Conferencia invitada.

D) ORGANIZACIÓN DE CONGRESOS, JORNADAS Y SEMINARIOS

V Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción - Workshop "Situación actual y perspectiva sobre los materiales de construcción". Madrid, 27-28/11/2023. Organizado por la Universidad Carlos III de Madrid.

Simposio “Materiales cementantes para una construcción más sostenible”. En el LIX Congreso Nacional de la SECV (Zaragoza, 11/14-Jun-2024).

VI Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción. Madrid, 19-20/05/2025.

E) CONGRESOS

1. A.P. Cruz-Hernández, J. Formosa, J. Giro, A. Alfocsa, F. Velasco, M. Torres-Carrasco, A. Bautista. “Durabilidad de armaduras en nuevos morteros ecológicos de fosfatos”. LIX Congreso Nacional de la SECV. Zaragoza, 11-14/06/2024.
2. A.P. Cruz-Hernández, F. Velasco, M. Torres-Carrasco, S. Shagñay, A. Bautista. “Influencia de la activación de cementos híbridos con Na_2CO_3 y con NaNO_3 en su comportamiento a retracción y reducción de microgrietas”. Congreso Nacional de Materiales (CNMAT24). Málaga, 25-28/06/2024.
3. I. Ramón Álvarez, D. Serrano, A. Caggiano, S. Sánchez Delgado, M. Torres-Carrasco. “Development of eco-friendly thermal energy storage blocks using industrial waste to enhance solar-based renewable energy integration”. Circularidad para un Mundo Abierto y Transversal (CIRMAT). Santa Cruz de Tenerife, 17-19 Octubre 2024. Póster y Conferencia seleccionada.
4. I. Ramón Álvarez, S. Sánchez Delgado, M. Torres-Carrasco. “New sustainable building materials for solar thermal energy storage”. Circularidad para un Mundo Abierto y Transversal (CIRMAT). Santa Cruz de Tenerife, 17-19 Octubre 2024. Póster y Conferencia seleccionada
5. A. Cruz Hernández, A. Bautista, Francisco J. Velasco, M. Torres Carrasco. “Activación de cementos híbridos con Na_2CO_3 y NaNO_3 : Efecto en su comportamiento de difusión de cloruros y resistencia al desgaste”. XII Jornadas de Jóvenes Investigadores (ICV-CSIC). Madrid, 24/10/2024.
6. I. Ramón-Álvarez, S. Sánchez-Delgado, M. Torres-Carrasco. “New Eco-Friendly Building Materials for Solar Thermal Energy Storage”. I Jornada Jóvenes Investigadores, Politécnica Nebrija. Madrid, 28 Noviembre 2024. Comunicación oral.
7. C. Blanco, A. Cruz, F. Velasco, M. Torres, J. Mañosa, J.M. Chimenos, A. Bautista. “Influencia del tipo de activación de las arcillas en morteros LC^3 sobre la corrosión del acero de refuerzo”. VI Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción. Madrid, 19-20/05/2025.

8. A. Cruz, F. Velasco, M. Torres, A. Bautista. “Activación de morteros híbridos de escoria de alto horno: propiedades relevantes para su uso en estructuras armadas”. VI Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción. Madrid, 19-20/05/2025.

9. J. Martínez-Ramírez, I. Ramón-Álvarez, M. Torres-Carrasco, S. Sánchez-Delgado. “Estudio y desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de energía térmica basados en LC³ y materiales de cambio de fase”. VI Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción. Madrid, 19-20/05/2025.

10. S. Martínez-Sánchez, I. Ramón-Álvarez, S. Ayora, M. Torres-Carrasco. “Evaluación de diferentes tipos de bacterias para mejorar la vida útil de morteros LC³”. VI Jornadas de Jóvenes Científicos en Materiales de Construcción. Madrid, 19-20/05/2025.

F) PREMIOS:

1. Primer Premio en la I Jornada de Jóvenes Investigadores organizada por la Universidad Politécnica Nebrija, otorgado a la mejor comunicación oral por el trabajo titulado “New Eco-Friendly Building Materials for Solar Thermal Energy Storage”

Adquisición de equipamiento:

1. Cámara para realizar ensayos de carbonatación

