

Premio SOCIEMAT Mejor Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería en Materiales 2025**CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS ROMANOS DEL YACIMIENTO DE AGRIGENTO (SICILIA)**

A. González-Moreira¹, F. D. Sanz-Arauz², S. López-Andrés³, Á. Ridruejo¹

¹Departamento de Ciencia de Materiales. ETSICCP. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Profesor Aranguren 3, 28040 Madrid; aitana.gonzalez@upm.es y alvaro.ridruejo@upm.es

²Departamento de Construcción y tecnologías arquitectónicas ETSAM Universidad Politécnica de Madrid Av Juan de Herrera 4, 28040 Madrid; david.sanz.arauz@upm.es

³CAI Técnicas geológicas Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas. C/ José Antonio Novais 12, 28040 Madrid; antares@ucm.es

Resumen: Este trabajo estudia morteros romanos de cal aérea procedentes de una vivienda en el barrio helenístico-romano de Agrigento (Sicilia). Se aplicaron técnicas de caracterización química y mineralógica (XRF, XRD, WAXS, SAXS), análisis microestructural (microscopía óptica y electrónica), ensayos mecánicos (nanoindentación) y térmicos, (TGA/DSC) y simulaciones numéricas mediante el método de campo de fases. Los resultados muestran composiciones dominadas por calcita con cuarzo, aragonito y yeso en proporciones variables, así como microestructuras heterogéneas con porosidad interconectada. Estos hallazgos permiten avanzar en el conocimiento del comportamiento de los morteros históricos tras largos procesos de envejecimiento natural.

Palabras clave: morteros romanos, cal aérea, caracterización, simulación numérica, patrimonio.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

La cal aérea constituyó uno de los materiales fundamentales en la arquitectura romana, utilizada en morteros, revestimientos y elementos decorativos. Su fabricación, basada en la calcinación de calizas y posterior apagado y carbonatación, permitió levantar estructuras de gran durabilidad, muchas de las cuales se conservan tras casi dos milenios [1]. El estudio de estos morteros ofrece una doble vertiente de interés: por un lado, contribuye al conocimiento de las tecnologías constructivas antiguas y de la selección de materias primas; por otro, proporciona información sobre los procesos de envejecimiento a largo plazo, difícilmente reproducibles en condiciones de laboratorio.

El barrio helenístico-romano de Agrigento (Sicilia), declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, constituye un marco excepcional para este análisis. En particular, el estudio se centró en fragmentos de morteros procedentes de muros y cornisas de una domus del siglo I d.C., seleccionados por carecer de valor decorativo y permitir ensayos destructivos.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la composición química y mineralógica, la microestructura y las propiedades mecánicas y térmicas de los morteros, complementando el análisis experimental con simulaciones numéricas del crecimiento cristalino de carbonato cálcico. De este modo, se busca comprender los criterios técnicos que guiaron a los constructores romanos y aportar información relevante para la conservación del patrimonio construido.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Las muestras objeto de estudio proceden del barrio helenístico-romano de Agrigento (Sicilia, Italia), un conjunto urbano datado entre los siglos I a.C. y I d.C. Se seleccionaron fragmentos de **muros y cornisas interiores y exteriores**, en todos los casos sin valor decorativo, lo que permitió realizar ensayos destructivos (Figura 1). La codificación de las piezas siguió un sistema que identifica el tipo de elemento (muro/cornisa), su localización (interior/exterior) y la presencia o ausencia de pigmento.



Figura 1. Conjunto de fragmentos del muro moldurados en mortero de cal.

2.1. Preparación de muestras.

Cada fragmento fue dividido en submuestras destinadas a diferentes técnicas. Se elaboraron **láminas delgadas petrográficas** para microscopía óptica, probetas pulidas para nanoindentación y polvos finos para análisis

químicos y difracción de rayos X. El acondicionamiento buscó preservar la heterogeneidad original del material.

2.2. Caracterización química y mineralógica.

La fluorescencia de rayos X (XRF) [2] permitió determinar la composición elemental, identificando los principales óxidos constituyentes. La difracción de rayos X en polvo (XRD) [2], complementada con WAXS (Figura 2) y SAXS [3], se utilizó para identificar fases cristalinas y estimar parámetros como el tamaño de cristalito y la fracción amorfa.

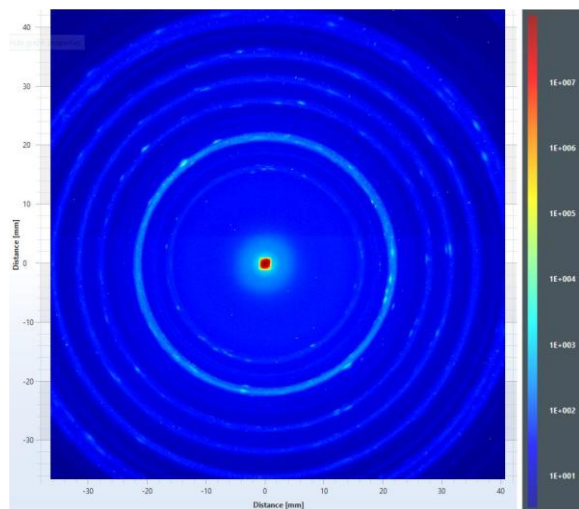


Figura 2. Empleo de un patrón de difracción 2D obtenido por WAXS para una muestra de mortero.

2.3. Caracterización microestructural.

La microscopía óptica sobre lámina delgada permitió describir la textura del mortero, la distribución de áridos y la presencia de restos fósiles marinos. La microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) [2] (Figura 3) aportó información a mayor resolución sobre interfaces árido-matriz, microfisuras, pigmentos y porosidad interconectada, cuantificada mediante análisis digital de imagen.

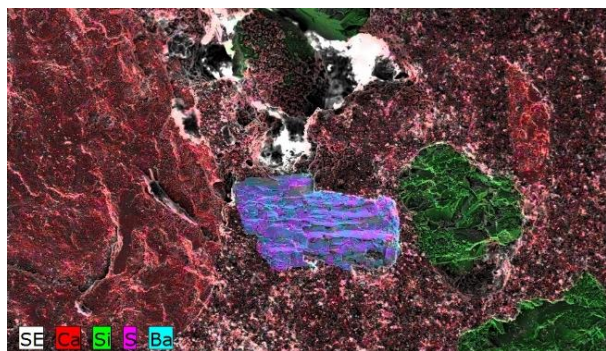


Figura 3. Cristales de barita (BaSO_4) observados en el análisis por SEM.

2.4. Propiedades mecánicas y térmicas.

La nanoindentación instrumentada [4] se aplicó sobre áreas seleccionadas de la matriz calcítica y de los áridos síliceos, obteniéndose valores locales de dureza y módulo de elasticidad. Este método permitió evaluar la heterogeneidad del material a escala micrométrica. El

análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC) [2] se emplearon para estudiar la estabilidad térmica de las fases y determinar el grado de carbonatación.

2.5. Simulación numérica.

Con el fin de complementar los resultados experimentales, se implementó un modelo de campo de fases mediante el entorno FEniCSx. [5,6] Se consideraron dos condiciones iniciales: (i) crecimiento a partir de un único núcleo y (ii) nucleación múltiple aleatoria. Se evaluó el efecto de parámetros como la anisotropía de la energía interfacial y la fuerza motriz sobre la cinética y morfología de los cristales de carbonato cálcico.

3. RESULTADOS.

3.1. Composición química y mineralógica.

El análisis por XRF mostró una composición dominada por CaO (65–72 %), acompañado de SiO_2 , Al_2O_3 y MgO en proporciones menores (Figura 4). La presencia de MgO en varias muestras sugiere el empleo de calizas dolomíticas como materia prima. Los difractogramas de XRD confirmaron la calcita como fase mayoritaria (74–87 %), junto con cuarzo (5–10%), aragonito y trazas de yeso. En algunos casos se identificaron restos fósiles carbonatados y áridos de origen marino, evidenciando la utilización de recursos locales.

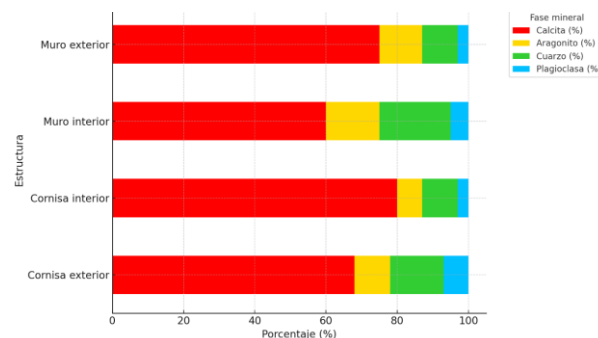


Figura 4. Composición mineralógica promedio según la procedencia arquitectónica de las muestras

3.2. Microestructura y porosidad.

Las observaciones en lámina delgada revelaron una matriz calcítica heterogénea con áridos de cuarzo de granulometría variable y distribución irregular. La microscopía electrónica puso de manifiesto la existencia de microfisuras interconectadas y porosidad global entre 7 y 13 %, con mayor densidad en muros interiores frente a cornisas exteriores (Figura 5). Se detectaron capas superficiales con pigmentos a base de óxidos de hierro y aluminio.

3.3. Propiedades mecánicas

Las medidas obtenidas por nanoindentación evidenciaron una elevada variabilidad entre zonas de matriz y áridos. La dureza osciló entre 0,06 y 0,55 GPa, mientras que el módulo de elasticidad se situó entre 2 y 26 GPa. En términos comparativos, las cornisas exteriores mostraron valores superiores de dureza y módulo respecto a los muros interiores, en concordancia con su menor porosidad y mayor fracción de cuarzo.

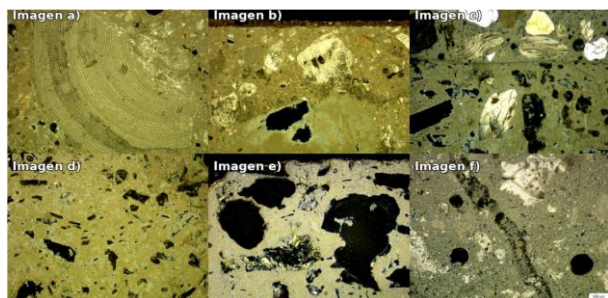


Figura 5. Ejemplos de microfotografías a escala de 200 μm en luz transmitida

3.4. Comportamiento térmico.

El análisis TGA/DSC mostró la descomposición de la calcita entre 645 y 800 °C, con pérdidas de masa atribuibles a la liberación de CO₂ (Figura 6). Estos resultados son coherentes con un elevado grado de carbonatación, propio de morteros antiguos. La presencia de aragonito en algunos difractogramas confirma transformaciones secundarias asociadas a procesos de recristalización.

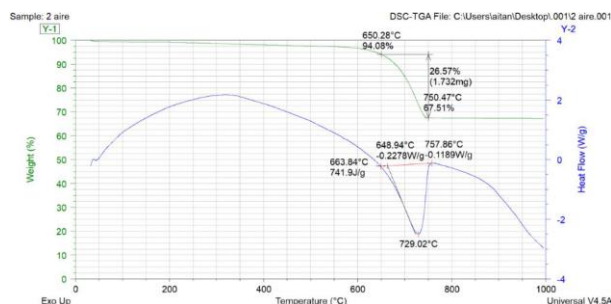


Figura 6. Ejemplo de la curva TGA-DSC del carbonato de calcio en atmósfera de aire.

4. DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos permiten establecer una interpretación coherente sobre la tecnología constructiva romana en Agrigento y los procesos de envejecimiento a largo plazo de los morteros. La composición mayoritariamente calcítica, combinada con áridos silíceos y fósiles marinos, confirma el uso de materias primas locales y un proceso de fabricación basado en la cal aérea, en concordancia con otras investigaciones sobre morteros romanos.

Las diferencias observadas entre muros interiores y cornisas exteriores sugieren un ajuste deliberado de la mezcla en función de la función arquitectónica. Las cornisas, más expuestas a la intemperie, presentan menor porosidad y mayor proporción de cuarzo, lo que se traduce en propiedades mecánicas superiores. Este patrón refleja un conocimiento empírico de la durabilidad de los materiales y un cierto grado de control técnico en la obra.

La microestructura heterogénea y la porosidad interconectada concuerdan con el carácter artesanal de la preparación de la cal y la mezcla, pero también pueden haber favorecido procesos de recarbonatación secundaria a lo largo de los siglos, contribuyendo a la consolidación

del material. La identificación de aragonito y yeso apunta a transformaciones post-deposicionales, posiblemente asociadas a variaciones ambientales y a la interacción con sales solubles.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la elevada dispersión de valores obtenidos por nanoindentación refleja la heterogeneidad intrínseca de estos morteros históricos. Sin embargo, la diferencia sistemática entre muros y cornisas confirma la influencia de la composición y la microestructura sobre el comportamiento mecánico.

Finalmente, los análisis térmicos corroboran el elevado grado de carbonatación, coherente con la edad de los materiales, y validan la resistencia del sistema calcítico frente a la degradación ambiental prolongada. Estos hallazgos ofrecen una base sólida para comprender tanto la tecnología original como los mecanismos de durabilidad a escala milenaria.

5. SIMULACIONES NUMÉRICAS.

Con el fin de complementar los resultados experimentales y explorar los mecanismos de cristalización, se implementó un modelo de campo de fases mediante elementos finitos en el entorno FEniCSx. Este enfoque permitió simular la nucleación y el crecimiento de cristales de carbonato cálcico bajo distintas condiciones iniciales y parámetros de control. Se consideraron dos escenarios principales: (i) crecimiento a partir de un único núcleo inicial (Figura 7) y (ii) nucleación múltiple aleatoria. En ambos casos, los cálculos reprodujeron patrones de crecimiento anisotrópico característicos de la calcita, influenciados por la anisotropía de la energía interfacial y por la magnitud de la fuerza motriz aplicada.

Los resultados muestran que un único núcleo favorece la formación de estructuras radiales con dominios cristalinos bien definidos, mientras que la nucleación múltiple genera una microestructura más homogénea, comparable a la observada en cornisas exteriores. Asimismo, el aumento de la anisotropía condujo a formas alargadas y facetadas, en coherencia con los patrones cristalográficos detectados mediante microscopía.

La comparación entre simulaciones y observaciones experimentales respalda la hipótesis de que la morfología final de los morteros romanos resultó de la combinación entre procesos de nucleación heterogénea y la evolución microestructural durante la carbonatación prolongada. Este marco numérico ofrece, además, un instrumento predictivo para estudiar la influencia de variables físico-químicas en la durabilidad de morteros históricos.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

El estudio de los morteros romanos procedentes del barrio helenístico-romano de Agrigento permite extraer varias conclusiones relevantes:

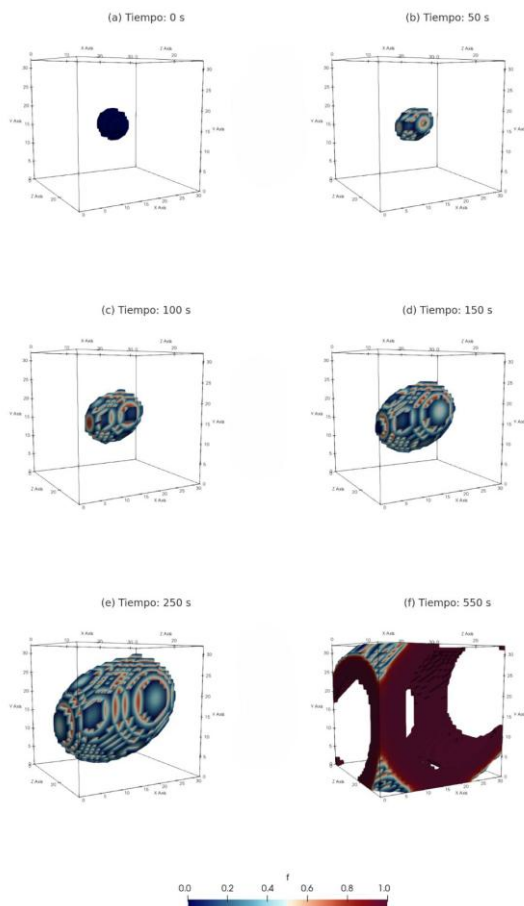


Figura 7. Evolución temporal de la fase sólida.

1. Los morteros presentan una composición mayoritariamente calcítica, acompañada de cuarzo, aragonito y yeso, lo que confirma el empleo de cal aérea con áridos de origen local, incluidos fósiles marinos.
2. La microestructura heterogénea y la porosidad interconectada evidencian técnicas artesanales de preparación, aunque también procesos de recarbonatación y consolidaciones posteriores.
3. Se observaron diferencias sistemáticas entre muros y cornisas, siendo estas últimas más compactas y resistentes, lo que sugiere un control intencional de la mezcla en función de la función arquitectónica.
4. Los ensayos mecánicos y térmicos confirmaron la elevada dispersión de propiedades locales, pero también la notable estabilidad de los morteros tras dos milenios de envejecimiento natural.
5. Las simulaciones de campo de fases reprodujeron patrones de nucleación y crecimiento coherentes con las observaciones experimentales, ofreciendo un marco predictivo para la comprensión de los procesos microestructurales.

Como conclusión el enfoque desde múltiples técnicas de caracterización llevado a cabo ha permitido observar y corroborar los resultados adquiridos aumentando su fiabilidad (Figura 8).

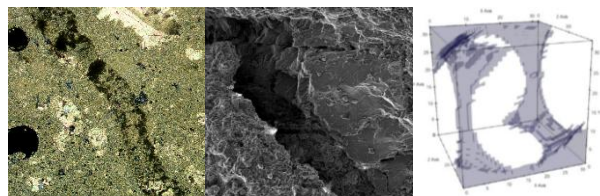


Figura 8. Estructuras con canales observadas mediante diferentes técnicas

En conjunto, este trabajo demuestra la sofisticación tecnológica de la construcción romana y aporta datos útiles para la conservación y restauración del patrimonio edificado. Como perspectiva futura, la integración de técnicas analíticas avanzadas con modelos numéricos más complejos permitirá evaluar la influencia de factores ambientales (humedad, sales, temperatura) en la degradación a largo plazo de los morteros históricos.

6. REFERENCIAS.

- [1] Moropoulou, A. B. A., & Bakolas, K. B. (2001). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 2(1), 45–58. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(01)01108-2)
- [2] Universidad Complutense de Madrid. (2023). *Metodología de Técnicas de Identificación y Caracterización Mineral (TICM) 2023–2024*. CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría.
- [3] Gutiérrez Moreno, A. (2011). *Microscopía óptica y electrónica aplicada a materiales de construcción patrimoniales*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC.
- [4] Oliver, W. C., & Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6), 1564–1583.
- [5] Moelans, N., Blanpain, B., & Wollants, P. (2008). An introduction to phase-field modeling of microstructure evolution. *Calphad*, 32(2), 268–294. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2007.11.003>
- [6] FEniCS Project. (2023). *DOLFINx API Docs*. *NewtonSolver.solve*. https://docs.fenicsproject.org/dolfinx/v0.6.0/python/_modules/dolfinx/nls/petsc.html#NewtonSolver.solve