

## Los morteros históricos del castillo de Cifuentes (Guadalajara, España)

## As argamassas históricas do castelo de Cifuentes (Guadalajara, Espanha)

## The historical mortars of the castle of Cifuentes (Guadalajara, Spain)

**CRISTINA MAYO  
CORROCHANO\***   
**DAVID SANZ ARAUZ** 

ETS, Arquitectura, Universidad  
Politécnica de Madrid, España

\*[cristina@estudiomayo.com](mailto:cristina@estudiomayo.com)

### Resumen

En el presente artículo se exponen los resultados de los análisis de caracterización mineralógica y petrográfica de los morteros de las fábricas y revestimientos del Castillo de Cifuentes. Este consta de cinco torres y un patio de unos 400 m<sup>2</sup> con una puerta de influencia islámica. Con el paso del tiempo ha sufrido diversas modificaciones hasta su actual estado de abandono. Englobado en un estudio más amplio de materiales y estado de conservación, este estudio nos permite diferenciar varios tipos de morteros que se corresponden con diferentes etapas constructivas: un núcleo de la fábrica del patio con mortero de yeso posiblemente de origen musulmán; la construcción principal del castillo, con morteros de cal y arena con impurezas arcillosas y fragmentos cerámicos; una etapa de reparación con morteros de cal que recrecen el núcleo central del muro del patio; y un último revestimiento con mortero de cal y yeso acabado con mortero de yeso gris.

### Resumo

Este artigo apresenta os resultados das análises de caracterização mineralógica e petrográfica das argamassas de alvenaria e de revestimento do Castelo de Cifuentes. O castelo é composto por cinco torres e um pátio de cerca de 400 m<sup>2</sup> com um portal de influência islâmica. Ao longo do tempo, sofreu várias modificações até ao seu estado atual de abandono. Como parte de um estudo mais amplo dos materiais e estado de conservação, este estudo permitiu distinguir vários tipos de argamassas que correspondem a diferentes fases de construção: um núcleo do pátio com argamassa de gesso, possivelmente de origem muçulmana; a construção principal do castelo, com argamassa de cal e areia com impurezas argilosas e fragmentos cerâmicos; uma fase de reparação com argamassa de cal que recria o núcleo central da parede do pátio; e uma cobertura final com argamassa de cal e gesso acabada com argamassa de gesso cinzento.

### Abstract

This paper analyses the results of the mineralogical and petrographic characterization of the rendering and masonry mortars from Cifuentes Castle. The castle has five towers, a 400 m<sup>2</sup> courtyard and an Islamic influence main door. During the centuries several modifications have been done, reaching nowadays a state of almost abandonment. As part of a broader study of the materials and conservation state of the castle, this study allows us to differentiate several types of mortars that correlate with different construction periods of the monument: the core of the masonry of the courtyard wall made with gypsum mortar, and possibly with an Islamic origin; the main construction period of the castle, that used lime mortars with clay impurities and ceramic fragments; a reparations period with lime mortars that get thicker the core masonry of the courtyard; and a final rendering with lime and gypsum mortar finished with a layer of grey gypsum mortar.

### PALABRAS-CLAVE

Morteros históricos  
Morteros de yeso  
Morteros hidráulicos  
Fortificaciones

### PALAVRAS-CHAVE

Argamassas históricas  
Argamassas de gesso  
Argamassas hidráulicas  
Fortificações

### KEYWORDS

Historic mortars  
Gypsum mortars  
Hydraulic mortars  
Fortifications

## Introducción

Los ensayos de caracterización de muestras de morteros históricos es una parte indispensable en los proyectos de intervención en patrimonio. Por una parte, ayudan a establecer una cronología relativa de las distintas fases constructivas, complementando los trabajos arqueológicos. Por otra parte, clarifican el diagnóstico sobre el estado de conservación. Estos datos de composición y estado de conservación orientan las decisiones de intervención, en especial las relacionadas con los materiales a emplear, que han de ser los de mayor compatibilidad con los existentes.

Pese a que la caracterización de morteros históricos es un campo científico bien establecido y con gran desarrollo en las últimas décadas [1-3], su aplicación práctica continúa presentando dificultades. La intervención en fábricas históricas con argamasas de unión y/o revestimientos de cal o yeso ha planteado severos problemas debido a la falta de conocimiento de la mayoría de los proyectistas sobre las técnicas y los materiales empleados en épocas históricas y a la escasa compatibilidad de los morteros basados exclusivamente en cementos de tipo portland con los materiales de las fábricas antiguas [4-5].

En muchos casos los materiales encontrados en las fábricas históricas tienen mejores prestaciones y un comportamiento más satisfactorio que las soluciones actuales, estando adaptados a los sistemas constructivos propios de cada caso y al ambiente [6].

En los últimos años se han publicado numerosos estudios sobre la metodología de caracterización de los morteros históricos [7-8]; y sobre los requerimientos estéticos y funcionales para los que deben estar preparados los morteros de reparación diseñados ad hoc [9-11], todo ello en especial relación con el comité de RILEM TC 167-COM *Caracterización de morteros antiguos con respecto a su reparación*, que ha venido operando sobre este tema en los últimos años y que han dado lugar a cinco conferencias internacionales sobre morteros históricos: Historical Mortar Conference, Lisboa 2007, Praga 2010, Glasgow 2013, Santorini 2016, Pamplona 2019.

En general con estos trabajos ha quedado bien establecido que se debe procurar la compatibilidad de los nuevos morteros con las estructuras preexistentes, actuando desde el nivel más abstracto (filosofía de la intervención) al más práctico (diseño de materiales). Cualquier intervención debe estar guiada por varios principios: filosofía de la restauración, requerimientos conceptuales, requerimientos funcionales y técnicos [10].

El caso de los morteros históricos de yeso –muy abundantes en el patrimonio español– tiene una problemática particular. Tras la pérdida de su empleo como material de revestimiento fue un material que prácticamente cayó en el olvido por la industria debido a la aparición de los cementos tipo Portland de mayor facilidad de trabajo para mano de obra no especializada. Este tipo de material ha tenido una investigación muy ligada al entorno geográfico en donde la presencia de morteros de yeso es más intensa debido a la abundancia geológica de depósitos de yeso natural. Las zonas con mayor incidencia en Europa occidental son: España, Francia, Alemania, Italia.

Los estudios sobre los morteros de yeso comienzan con trabajos relacionados con la decoración y la aplicación tecnológica [12-13] reseñando algunos casos concretos [14-16]. En Alemania la investigación se intensifica en los años noventa con varias publicaciones [17-23] y recientemente los trabajos de Vinzenzina, Cardoso y Freire.

Sobre la caracterización de morteros específicamente en castillos y fortalezas se han realizado diversos trabajos de interés aplicando distintas técnicas analíticas en base a técnicas petrográficas [24], siguiendo esta línea de investigación, en España se han publicado estudios similares sobre castillos medievales [25-27].

A las citadas técnicas petrográficas se ha sumado el análisis digital de imágenes, que permite determinar de un modo semicuantitativo la porosidad, a la vez que se observa su morfología, al igual que también estimar la relación entre las fracciones inertes y los

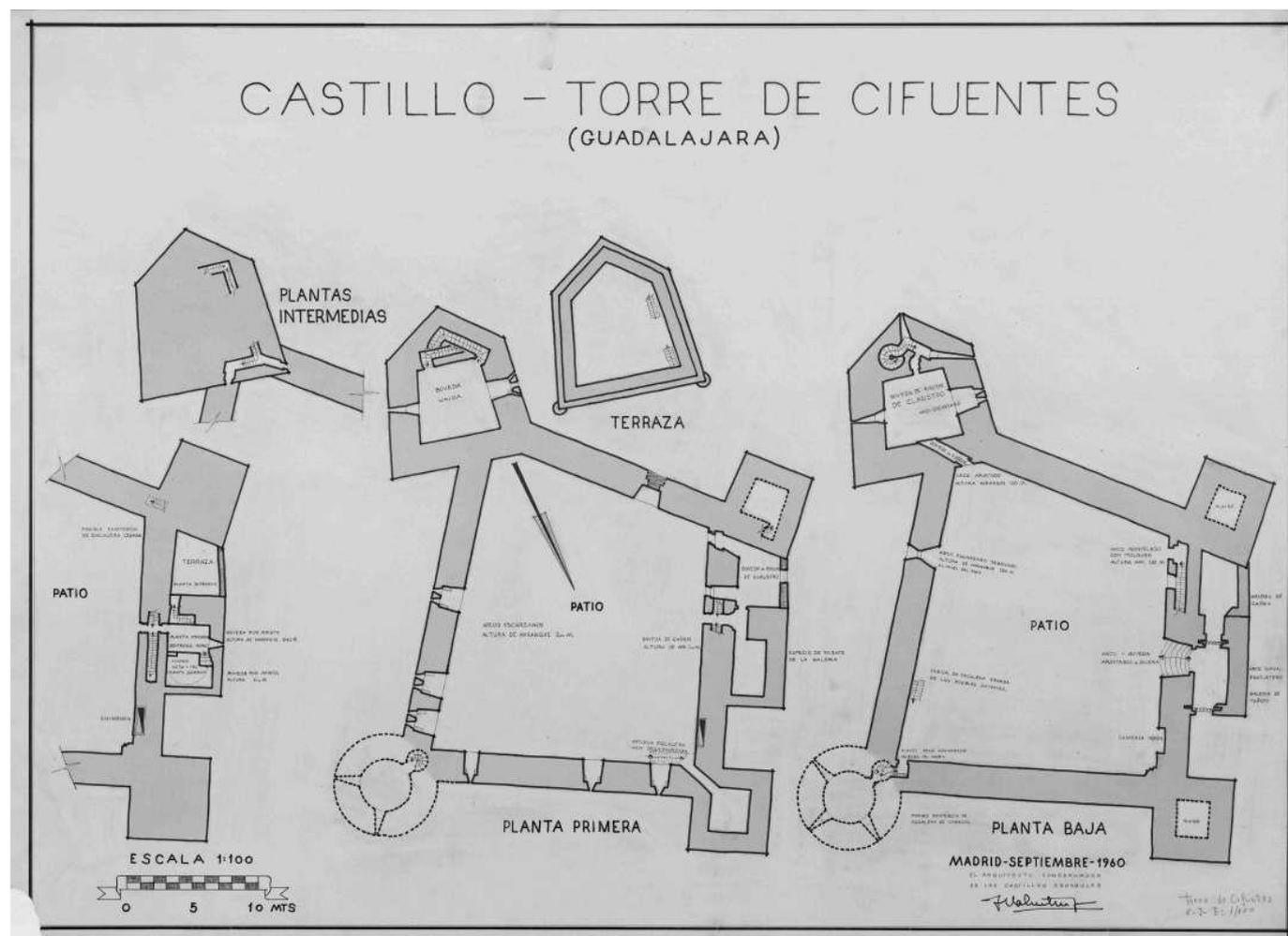
conglomerantes a partir de la misma muestra en lámina delgada. En este artículo nos hemos basado en los trabajos de Lindqvist y Sandström [28] y de Middendorf, Schade y Krauss [29].

En este trabajo se han caracterizado morteros a base de cal y a base de yeso a través de la secuencia de análisis: Difracción de Rayos X, Estereomicroscopía de secciones pulidas, Microscopía Óptica de Polarización y análisis de la porosidad mediante el análisis digital de imágenes de láminas delgadas; lo que ha permitido describir los aspectos compositivos y texturales de las muestras.

### Breve historia del Castillo de Cifuentes

El castillo, cuya construcción original se fecha en las primeras décadas de 1300 según informes arqueológicos recogidos en la memoria [30], se sitúa en un cerro en forma de meseta al este del pueblo de Cifuentes. Esta localización se escogió por motivos militares de alta visibilidad y abundancia de surgencias de agua. Se pueden distinguir tres espacios defensivos: el recinto amurallado, el albacar y el castillo propiamente dicho con su foso.

El castillo en sí consta de cinco torres (Figura 1), una de ellas más prominente –la torre del homenaje– y de planta pentagonal al exterior y cuadrada al interior, que junto con su puerta en doble codo permiten suponer una influencia de la arquitectura defensiva medieval musulmana. Otra de las principales torres es un torreón circular macizo que acompaña a la torre del homenaje en el flanco este del castillo [30].



**Figura 1.** Plano de las plantas baja y primera del Castillo de Cifuentes realizado por Valentín Gamazo en 1960 (Planoteca del Instituto de Patrimonio Nacional de España, recogido en Maruri [30]).

## Materiales y métodos

### Muestras

Con el objeto de valorar el estado de conservación de los materiales empleados en los distintos sistemas constructivos se tomaron diez muestras de cada ubicación seleccionando la más significativa para realizar los ensayos en el laboratorio (Tabla 1 y Figura 2).

### Difracción de Rayos X

El equipo empleado para la obtención de los datos de difracción de rayos X es un difractorómetro Bruker modelo D8 ADVANCE. Los diagramas de difracción de polvo para caracterizar la mineralogía de las muestras se han obtenido en un intervalo angular de 2 a 65 °, un tamaño de paso de 0,02 ° y un tiempo por paso de 1 s.

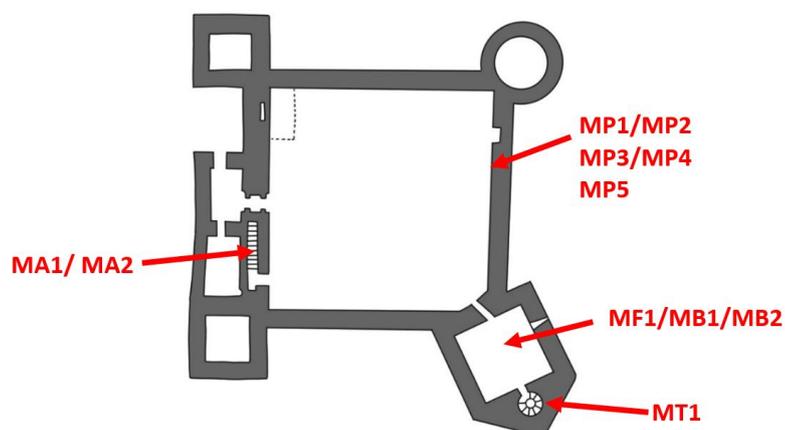
El análisis mineralógico y la determinación de las proporciones relativas de cada fase (análisis semicuantitativo) se ha realizado siguiendo el método de Chung [31-32] y utilizando el software EVA de Bruker.

### Microscopía óptica

Para este estudio se ha empleado un microscopio óptico digital Crenova UC012C que nos permite cubrir un rango de zoom de 20 × a 300 ×. Esto nos permite observar en una primera aproximación a bajas ampliaciones la estructura de las muestras, porosidad y granulometría.

**Tabla 1.** Muestras tomadas en el castillo de Cifuentes, Guadalajara, España.

Muestra	Ubicación	Elemento constructivo: mortero
MP1	Muro / Patio interior del castillo / Zona más exterior	De junta
MP2	Muro / Patio interior del castillo / Zona media	De junta
MP3	Muro / Patio interior del castillo / Zona interior	De junta
MP4	Muro del patio interior	De revestimiento exterior
MP5	Muro del patio interior	De revestimiento exterior
MB1	Forjado primero del torreón	De revestimiento interior
MB2	Forjado primero del torreón	De junta
MF1	Torreón	De junta
MT1	Escalera que da acceso al torreón	De junta
MA1	Forjado primero del adarve	De revestimiento interior
MA2	Escalera del adarve	De junta



**Figura 2.** Planta del castillo de Cifuentes. Localización de las muestras tomadas.

### Microscopía petrográfica

Para este estudio se ha empleado microscopios petrográficos ZEISS Primotech operado con un *software* Matscope del Centro de Apoyo a la Investigación de Técnicas Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid. Los objetivos utilizados en el estudio han sido los de 50 × y 100 × aumentos.

### Análisis digital de imágenes

El análisis digital de imágenes ha sido sobradamente empleado en otros sectores científicos para el diagnóstico, conteo de partículas, medición y análisis estadístico [33-34].

Mediante un mapeado de las láminas delgadas se analizan los espacios vacíos y del sistema poroso de las muestras. La descripción de los espacios vacíos se realiza dentro de su contexto textural, es decir relacionándolos con el resto de los componentes sólidos del mortero.

Así mismo se realiza un análisis cuantitativo del volumen poroso o de parámetros del sistema poroso. En este caso las determinaciones se realizan a partir de imágenes bidimensionales. Los espacios vacíos (poros y fisuras) son considerados como un componente más del mortero y se pueden cuantificar sus elementos texturales (tamaño, forma, entre otros) de forma similar a como se realiza para los restantes componentes.

Para este estudio se ha empleado un microscopio óptico digital conectado a un ordenador, lo que nos permite directamente almacenar las imágenes obtenidas y poder fácilmente procesarlas con *software* de tratamiento de imágenes.

Con la idea de tener un mayor tamaño de muestra a analizar de cada mortero, se realiza un mapeado completo de cada lamina delgada. Para ello tomamos fotografías secuencialmente de toda la lámina delgada con el microscopio óptico para posteriormente, mediante *software* especializado en el tratamiento de imágenes, unir todas las imágenes y recomponer la sección completa. De este modo obtenemos un mapa completo de la lámina delgada con una resolución de 8000 × 14000 píxeles que nos permiten alcanzar mayor detalle en el análisis.

Una vez obtenida la imagen completa, esta es analizada mediante el programa ImageJ con el que podemos analizar la porosidad, proporción árido/conglomerante y distribución granulométrica.

La porosidad puede ser fácilmente analizada con los histogramas, más aún si se emplea una tinción azul en la resina de la lámina delgada. Esto ayuda al *software* a discernir entre poro y muestra:

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{S_p}{S_s}$$

$S_p$ : Numero de píxeles de poro

$S_s$ : Numero de píxeles de toda la sección

Para establecer la relación árido/conglomerante y la distribución granulométrica del mortero se requiere un pre-procesado de la imagen. Muchos áridos no se diferencian claramente del conglomerante por tener un color similar, por lo que es necesario marcarlos cuidadosamente en el *software* de imagen.

Otro problema a tener en cuenta es la separación de los granos; ya que si la muestra tiene una gran cantidad de agregado es difícil de analizar. Si los granos están muy juntos, el programa ImageJ no puede separarlos y percibe dos granos como uno. Esta conexión debe cortarse cuidadosamente con el *software* de imagen.

En consecuencia, la relación árido/conglomerante y el análisis granulométrico de los áridos de los morteros mediante análisis digital de imágenes requieren un complejo pre-procesado de las imágenes previo a su interpretación mediante ImageJ:

$$\frac{V_{\text{Arido}}}{V_{\text{Conglomerante}}} = \frac{S_{\text{Arido}}}{S_{\text{Conglomerante}}}$$

$S_{\text{Arido}}$ : Numero de píxeles de áridos

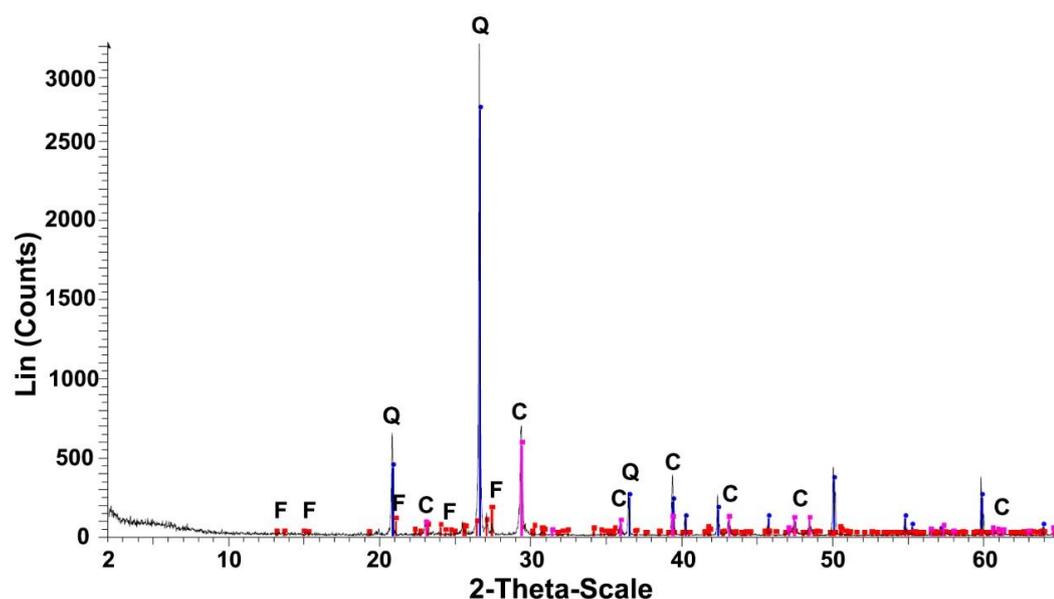
$S_{\text{Conglomerante}}$ : Numero de píxeles del conglomerante

## Resultados y discusión

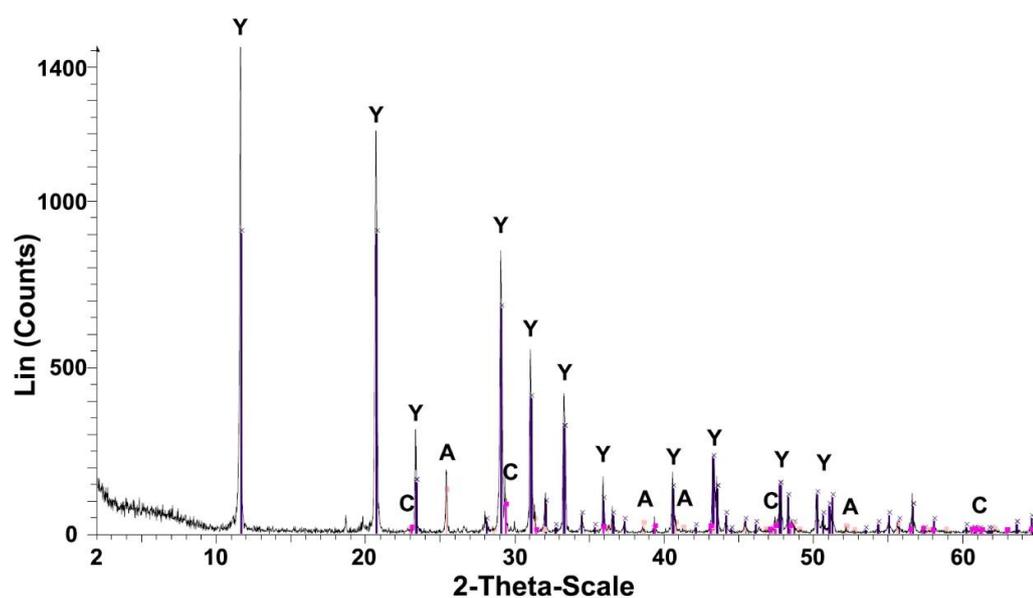
Para una correcta caracterización de los materiales empleados en el castillo se han realizado una secuencia de análisis en el laboratorio a todas las muestras extraídas.

### Difracción de Rayos X (DRX)

Analizando los resultados obtenidos observamos como el muro de fábrica del patio interior del castillo presenta una argamasa de mortero de yeso en el interior del muro (MP3) (Figura 3). Y como ese núcleo fue revestido a posteriori por un mortero de cal y arena con impurezas arcillosas y fragmentos cerámicos (MP1 y MP2) (Figura 4).



**Figura 3.** Difractograma de la muestra MP1 en el que se pueden identificar las líneas de difracción correspondientes a la calcita (C) (color rosa en el diagrama), al cuarzo (Q) (azul) y a la microclina (feldespato) (F) (rojo).



**Figura 4.** Difractograma de la muestra MP3 en el que se identifica yeso (Y) como principal constituyente (color morado en el diagrama), con anhidrita (A) no rehidratada (salmón) y calcita (C) como mineral complementario (rosa).

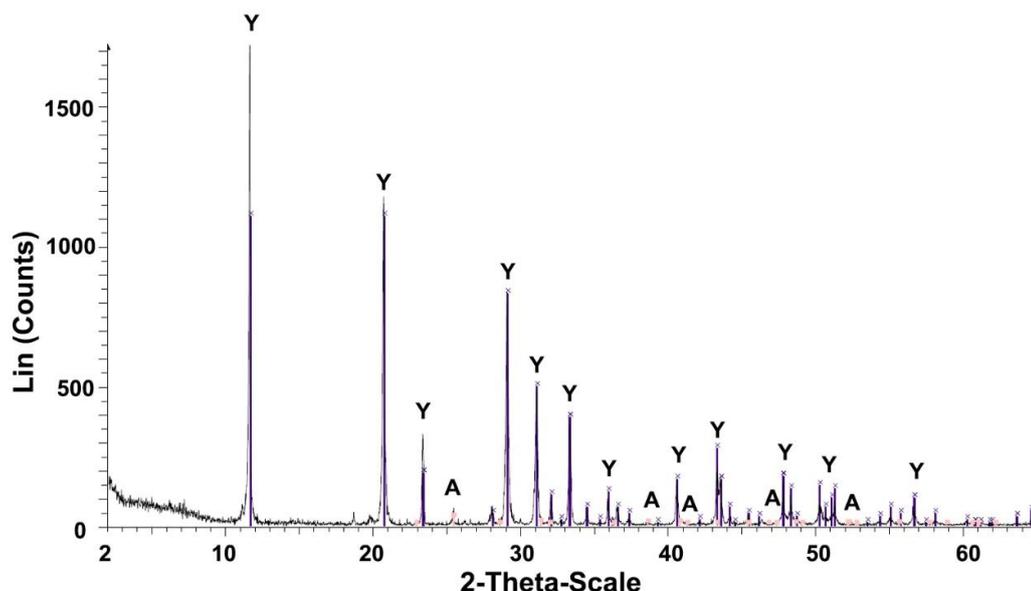


Figura 5. Difractograma de la muestra MP5. Mortero de yeso (Y) (color morado en la gráfica) con restos de anhidrita no rehidratada (A) (salmón).

Por último, dicha fábrica fue revestida con un mortero de trabadillo de cal y yeso (MP4) acabada con un mortero de yeso gris (MP5) (Figura 5) muy similar al mortero de revestimiento inferior del forjado primero encontrado en el torreón.

Por otro lado, se observan morteros de cal y arena muy similares en el torreón (MB2, MF1 y MT1) y en el adarve (MA1 y MA2) (Figura 6). Así mismo los morteros de junta de las distintas áreas presentan pequeñas diferencias (Figura 6).

### Microscopía óptica

Se observan numerosos fragmentos cerámicos en los morteros de cal (MP1, MP2, MB2, MF1, MT1, MA1 y MA2) (Figura 7), ausentes en los morteros de yeso del interior del muro y de revestimiento del forjado del torreón y de dicho muro.

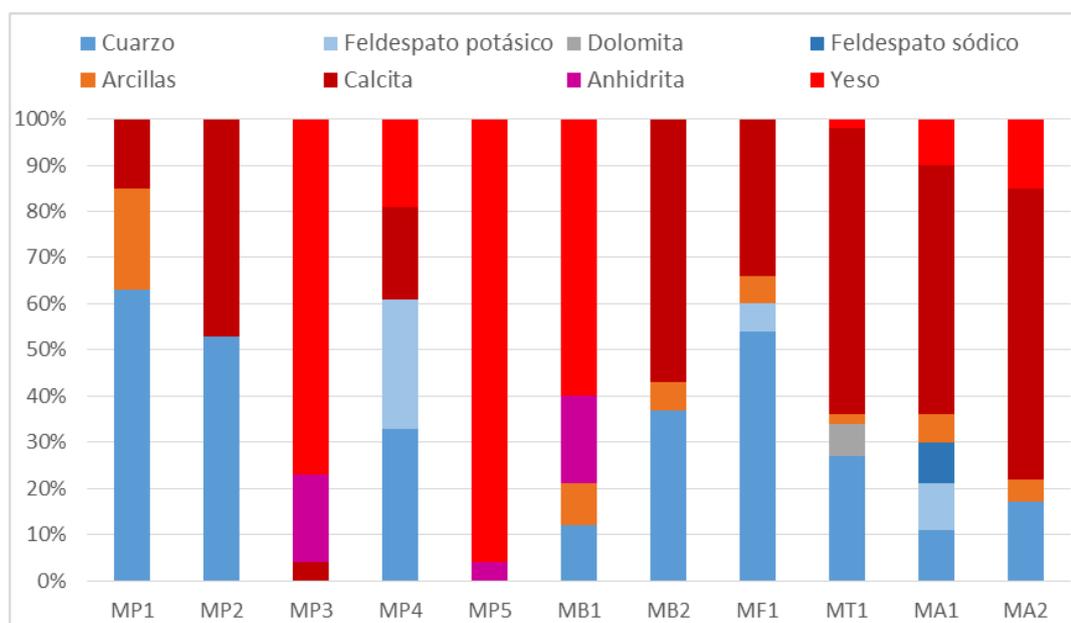
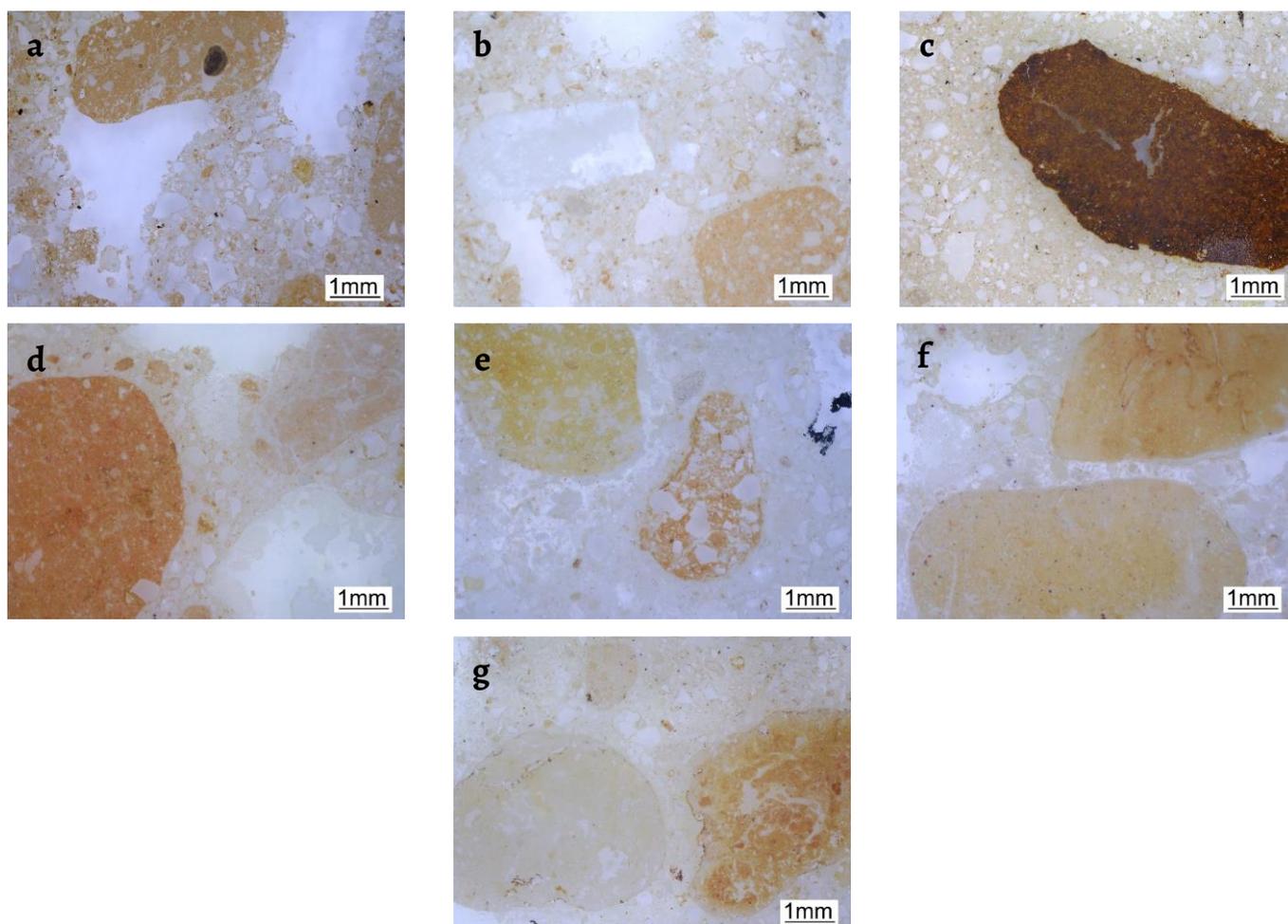
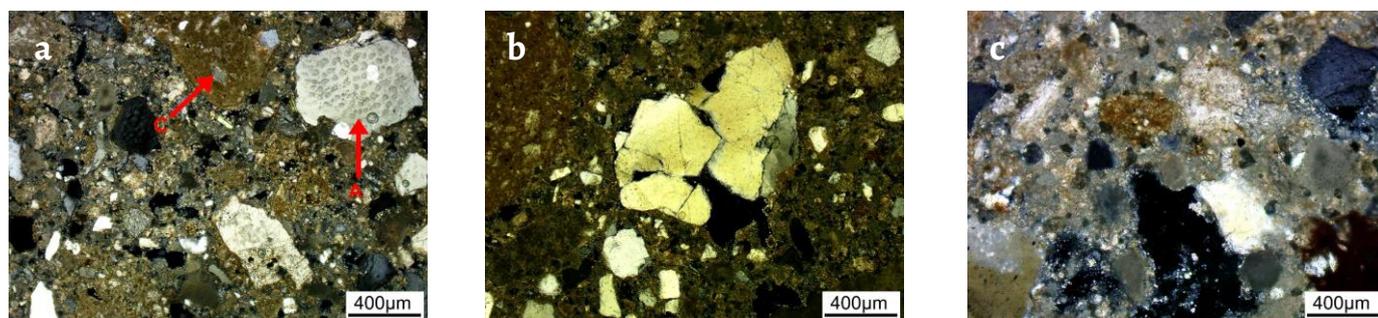


Figura 6. Comparativa de los resultados obtenidos en los análisis de DRX de las diferentes muestras.



**Figura 7.** Detalle de fragmentos cerámicos encontrados en los morteros: a) MP1; b) MB2; c) MB2; d) MF1; e) MT1; f) MA1; g) MA2.



**Figura 8.** Imágenes del microscopio petrográfico (50 × nicoles cruzados): a) Muestra MP1, zona con presencia de fragmentos cerámicos (C) y áridos calizos de origen orgánico (A); b) Muestra MP2, detalle de un cristal de cuarzo de gran tamaño; c) Muestra MP2, detalle de una de las zonas con arcillas y se observan cristales de belita no hidratada en la matriz del mortero.



**Figura 9.** Imágenes del microscopio petrográfico: a) Muestra MP3, detalle de fragmento cerámico; b) Muestra MP3, detalle de cristales de anhidrita parcialmente rehidratada; c) Muestra MP5, muestra la presencia de cristales de anhidrita.

### Microscopía petrográfica

Se han observado, no solo la presencia de fragmentos cerámicos, sino también la presencia de áridos de cuarzo de gran tamaño (Figura 8b), feldespatos y calizos de origen orgánico (Figura 8a). Así mismo se observan cristales de belita no hidratada en la matriz como resultado de la presencia de impurezas arcillosas en los morteros de cal (Figura 8c).

En el caso de los morteros de yeso, se observan también fragmentos cerámicos, aunque de menor tamaño y frecuencia (Figura 9a), así como cristales de yeso y anhidrita propios de los morteros de yeso tradicionales (Figura 9b y 9c).

Los morteros de junta de fábrica tanto del patio como del adarve, son morteros de cal y arena con una cantidad importante de arcilla y fragmentos cerámicos muy visibles al microscopio, tanto en estereomicroscopía, como en microscopía petrográfica. Estos fragmentos no parecen ser añadidos artificiales para lograr una mayor hidráulica dada su forma subredondeada, lo que descartaría un origen por machaqueo de una cerámica previa [34]. En cambio, la similitud formal entre zonas arcillosas mezcladas con carbonatos poco cristalinos y las manchas cerámicas sugiere un origen en la cocción de calizas con impurezas para la fabricación de la cal [35].

### Análisis de la porosidad y granulometría

A partir de los resultados obtenidos observamos como, aun teniendo una porosidad cuantitativamente similar en todas las muestras, cualitativamente presentan ciertas diferencias (Tabla 2).

Los morteros de yeso (MP3, MP5 y MB1) tienen diferentes porosidades debido a su aplicación constructiva. Mientras que el mortero MP3 es un mortero de junta de interior del muro que requiere cierta fluidez de la pasta para su puesta en obra, los morteros MP5 y MB1 son revestimientos que precisan menos cantidad de agua, por lo tanto presentan menor porosidad y además han sido trabajados en superficie por repretado lo que elimina parte de los poros.

Los morteros de cal y arena más antiguos por su posición estratigráfica (MP1 y MP2) tienen una porosidad relativamente alta y muy parecida entre ellos tanto en poros totales como en distribución paramétrica por tamaños. El resto de muestras presentan una porosidad menor a excepción del mortero MA1 que muestra signos de una ejecución de menor calidad.

Por otro lado, examinando los resultados obtenidos del análisis digital de imagen de la granulometría de las muestras se observa cómo en los morteros de yeso empleados como recubrimiento (MP5 y MB1) existe una cantidad de material inerte (impurezas-áridos) propia de los yesos tradicionales con un diámetro no superior a 1 mm, lo que pudo permitir la ejecución de un acabado más fino.

El mortero MP4 es un mortero mixto de cal y yeso con baja relación árido/conglomerante dado su carácter ornamental como acabado del patio en una determinada época histórica.

El mortero MA1, aun siendo un mortero de revestimiento, presenta una relación árido/conglomerante alta con un elevado porcentaje de áridos gruesos (> 4mm). Esto posiblemente se debe a que se encuentra en una zona de paso entre dos de las torres de vigilancia de la fachada oeste, lejos de las zonas nobles del castillo.

En cuanto a los morteros de junta de las diferentes zonas del castillo, estos muestran una relación árido/conglomerante mayor, lo que aumenta su resistencia mecánica. No obstante, ninguno de los morteros de junta analizados contiene un árido con un tamaño mayor de 4 mm de diámetro (Tabla 3).

**Tabla 2.** Cartografía y análisis digital de imagen de las láminas delgadas. Estimación de la porosidad (P (%)) como relación en superficie de los poros frente a la parte compacta de cada muestra. Distribución de los poros de las muestras teniendo en cuenta el sumatorio de las áreas de los poros con unos diámetros de Feret determinados (> 4mm, > 2mm, > 1mm, > 500µm, 250 µm, 125 µm, 63 µm y resto).

	P (%)	Ø de los poros	Porosidad
<b>MP1</b>	22,4		
<b>MP2</b>	22,5		
<b>MP3</b>	17,0		
<b>MP4*</b>	16,7		
<b>MP5*</b>	8		
<b>MB1*</b>	8,1		
<b>MB2</b>	4,8		
<b>MF1</b>	6,2		
<b>MT1</b>	13		
<b>MA1*</b>	23,2		
<b>MA2</b>	8,1		

**Tabla 3.** Cartografía y análisis digital de imagen de las láminas delgadas. Estimación de la proporción árido/conglomerante (A/C) como relación en superficie de los áridos (o fragmentos inertes) frente a la parte del conglomerante de cada muestra. Distribución granulométrica de las muestras teniendo en cuenta el sumatorio de las áreas de los áridos con unos diámetros de Feret determinados (>4mm, >2mm, >1mm, >500µm, 250 µm, 125 µm, 63 µm y resto).

	A/C	Granulometría	Áridos
<b>MP1</b>	0,58		
<b>MP2</b>	1,12		
<b>MP3</b>	0,32		
<b>MP4*</b>	0,39		
<b>MP5*</b>	0,08		
<b>MB1*</b>	0,06		
<b>MB2</b>	0,11		
<b>MF1</b>	0,37		
<b>MT1</b>	0,27		
<b>MA1*</b>	1,06		
<b>MA2</b>	0,25		

## Conclusiones

Los datos obtenidos permiten alcanzar algunos resultados respecto a la composición, textura y porosidad de los morteros del Castillo.

Desde el punto de vista compositivo, constructivo y estratigráfico se aprecian cuatro grandes grupos de morteros:

- Morteros de junta de yeso: MP3;
- Morteros junta de cal y arena: MP1, MP2, MB2, MF1, MA2 y MT1;
- Morteros de revestimiento de cal y arena con un contenido en yeso como impureza y/o adición: MP4 y MA1;
- Morteros de revestimiento exclusivamente de yeso: MP5 y MB1 (revestimiento interior de yeso tradicional con impurezas arcillosas y restos de anhídrita sin hidratar), situados cronológicamente y estratigráficamente sobre todos los demás. Considerando el MP5 por su composición y características petrográficas como el más moderno de todos.

El mortero MP3 se encuentra en el centro del muro del patio (Figura 2), lo que permite suponer que está en la zona más antigua de la construcción. Teniendo en cuenta que en Castilla en el 1300 y debido a las guerras con los reinos musulmanes se levantan y refuerzan fortificaciones sobre antiguos establecimientos militares y se generaliza una tipología con torres y almenas [30], es posible que esta muestra nos indique un posible núcleo musulmán de yeso. Es un mortero de yeso histórico, identificado con claridad por la presencia de grandes cristales de termoanhídrita no rehidratada (Figura 9b). El mortero MP5 tiene la misma composición, pero se trata de un mortero de revestimiento situado cronoestratigráficamente como última capa de la fábrica.

Sobre este núcleo se produciría la construcción del resto del Castillo, datada históricamente y atribuida al Conde Don Juan Manuel, que correspondería con los morteros del Torreón: MB2, MF1 y MT1, que a su vez son coincidentes en composición, textura y propiedades con el mortero de junta (MA2) y de revestimiento (MA1) encontrado en el Adarve. Aquí tendríamos la etapa de mayor importancia en la construcción del Castillo, con morteros de junta que guardan grandes similitudes en composición, relación árido/conglomerante, y porosidad.

Finalmente se puede identificar una última fase en la que se revestirían algunas zonas con un mortero de yeso de textura similar: MB1, en la torre y MP5 en el patio. Ambos morteros presentan una porosidad muy baja del 8% y una baja relación árido/conglomerante (0,06 - 0,08) con un porcentaje mayoritario de áridos con un diámetro no superior a 1mm que permiten obtener un acabado más fino durante su aplicación.

Desde el punto de vista metodológico se comprueba la utilidad del análisis digital de imágenes como complemento a los estudios petrográficos. También conviene resaltar la importancia de la microscopía óptica como medio idóneo para discernir dudas que presenta la difracción de rayos X o los métodos químicos en general. El papel de la porosidad y las relaciones árido/conglomerante, así como la forma de los áridos y la textura de las matrices permiten reconocer mejor similitudes y diferencias entre grupos complejos de morteros.

## REFERENCIAS

1. Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Moundoulas, P.; Aggelakopoulou, E., 'Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars', in *Proceedings of International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry*, Delft (2005) 278-291, <https://www.rilem.net/images/publis/proo067-025.pdf> (acceso en 2021-12-08).
2. Apostolopoulou, M.; Aggelakopoulou, E.; Bakolas, A.; Moropoulou, A., 'Compatible mortars for the sustainable conservation of stone in masonries', in *Advanced Materials for the Conservation of Stone*, eds. M. Hosseini & I. Karapanagiotis, Springer, Cham (2018) 97-123, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72260-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72260-3_5).
3. Kumar, D. N.; Pancharathi, R. K., 'Material Characterization of Ancient Mortar and Renovation of Heritage Structures for Sustainability—A State-of-the-Art Review', in *Advances in Sustainable Construction Materials* 68 (2020) 43-58, [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3361-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3361-7_4).

4. Schueremans, L.; Cizer, Ö.; Janssens, E.; Serré, G.; Van Balen, K., 'Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects. Research and practice', *Construction and building materials* **25**(12) (2011) 4338-4350, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.008>.
5. Papayianni, I., 'The longevity of old mortars', *Applied Physics A* **83** (2006) 685-688, <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3523-2>.
6. Hughes, D.C.; Weber, J.; Kozłowski, R., 'Roman Cement for the Production of Conservation Mortars', in *2nd Conference on Historic Mortars - HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop*, RILEM Publications SARL, Praga (2010) 1043-1050.
7. Veiga, R.; Aguiar, J.; Santos Silva, A.; Carvalho, F., 'Methodologies for characterization and repair of mortars of ancient buildings', in *Proceedings of the 3rd International Seminar Historical Constructions*, Universidade do Minho, Guimarães, (2001) 353-362.
8. Hees, R.; Binda, L.; Papayianni, I.; Toumbakari, E., 'Characterisation and damage analysis of old mortars', *Materials and Structures* **37** (2004) 644-648, <https://doi.org/10.1007/BF02483293>.
9. Van Balen, K.; Papayianni, I.; Van Hees, R.; Binda, L.; Waldum, A., 'Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars', *Materials and Structures* **38** (2005) 781-785, <https://doi.org/10.1007/BF02479291>.
10. Veiga, R.; Velosa, A.; Magalhes, A., 'Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation', *Construction and Building Materials* **23**(1) (2009) 318-327, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003>.
11. Baronio, G.; Binda, L., 'Study of the pozzolanicity of some bricks and clays', *Construction and Building Materials* **11**(1) (1997) 41-46, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(96\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(96)00032-3).
12. Bustamante, R.; González, F.; Lasheras, F.; Sanz-Arauz, D., 'Revestimiento de los patios madrileños, soluciones y alternativas', in *Actas de las Jornadas de Investigación en Construcción, Madrid* (2005) 191-198.
13. Livingston, R.; Wolde-Tinsae, A.; Chaturbahai, A., 'The use of gypsum mortar in historic buildings', *Structural repair and maintenance of historical buildings II 1* (1991) 157-165.
14. Luxan, M. P.; Dorrego, F.; Laborde, A., 'Ancient gypsum mortars from St. Engracia (Zaragoza, Spain): Characterization. Identification of additives and treatments', *Cement and Concrete Research* **25**(8) (1995) 1755-1765, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00171-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00171-9).
15. Raymond, M., 'El enlucido exterior de yeso en las rehabilitaciones de las fachadas de París', *Informes de la construcción* **38**(382) (1986) 35-39, <https://doi.org/10.3989/ic.1986.v38.i382.1740>.
16. Association ouvrière des Compagnons du Devoir, *La plâtrerie, le staffet et le stuc*, Librairie du Compagnonnage, Paris (1994).
17. Genestar, C.; Pons, C., 'Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterization', *Journal of Cultural Heritage* **4**(4) (2003) 291-298, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2003.02.001>.
18. Lucas, G., 'High-temperatures gypsum plaster on historic exteriors. A plea for gypsum', *ZKG International* **56**(8-9) (2003) 54-65.
19. Lucas, G., 'The special features of high-temperatures gypsum mortar as a building material', *ZKG International* **56**(8-9) (2003) 78-85.
20. Middendorf, B., 'Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum: current knowledge and perspective', *Geological Society London, Special Publications* **205** (2002) 165-176, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.205.01.13>.
21. Zier, H.; Auras, M., *Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden*, Wissenschaftlich-Technische aplege, München (2008).
22. Arens, P., *Untersuchung und Entwicklung von Gipsmörteln für den Außenbereich unter besonderer Berücksichtigung der Wasserresistenz*, Disertación doctoral, Universität Siegen. (2002), <https://dspace.uni-siegen.de/handle/ubsi/141> (acceso en 2021-12-08).
23. Karoglou, M.; Bakolas, N.; Kouloumbi, A.; Moropoulou, A., 'Reverse engineering methodology for studying historic buildings coatings: The case study of the Hellenic Parliament neoclassical building', *Progress in Organic Coatings* **72**(1-2) (2011) 202-209, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.01.008>.
24. Ponce-Antón, G.; Cruz Zuluaga, M.; Angel Ortega, L.; Agirre Mauleon, J., 'Petrographic and Chemical–Mineralogical Characterization of Mortars from the Cistern at Amaiur Castle (Navarre, Spain)', *Minerals* **10**(4) (2020) 311-327, <https://doi.org/10.3390/min10040311>.
25. Parra, S. J. D.; Sanz-Arauz, D. S., 'El Castillo de Overa. Simbiosis de cal y yeso', in *Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*, Instituto Juan de Herrera, Madrid (2017) 427-436.
26. Villanueva, L.; Sanz-Arauz, D.; Mora, S., 'La construcción medieval y renacentista en las puertas del conjunto amurallado de Moya (Cuenca)', in *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Instituto Juan de Herrera, Madrid (2005) 1115-1121.
27. Lindqvist, J.; Sandström, M., 'Quantitative analysis of historical mortars using optical microscopy', *Materials and Structures* **33** (2000) 612-617, <https://doi.org/10.1007/BF02480600>.
28. Middendorf, B.; Schade, T.; Kraus, K., 'Quantitative Analysis of Historic Mortars by Digital Image Analysis of Thin Sections', *Restoration of Buildings and Monuments* **23**(2) (2017) 83-92, <https://doi.org/10.1515/rbm-2016-0011>.
29. Maruri, A., *Castillo de Cifuentes. Análisis y estado de conservación*, Trabajo fin de grado en Arquitectura, Departamento Construcción y Tecnología Arquitectónica, Universidad Politécnica de Madrid (2019), <https://oa.upm.es/55884/> (acceso en 2021-12-08).
30. Chung, F., 'Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis', *Journal of Applied Crystallography* **7** (1974) 519-525, <https://doi.org/10.1107/S0021889874010375>.
31. Chung, F., 'Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. II. Adiabatic principle of X-ray diffraction analysis of mixtures', *Journal of Applied Crystallography* **7** (1974) 526-531, <https://doi.org/10.1107/S0021889874010387>.
32. Mertens, G.; Elsen, J., 'Use of computer assisted image analysis for the determination of the grain-size distribution of sands used in mortars', *Cement and Concrete Research* **36**(8) (2006) 1453-1459.
33. Middendorf, B.; Schade, T.; Kraus, K., 'Quantitative analysis of historic mortars by digital image analysis of thin sections', *Restoration of Buildings and Monuments* **23**(2) (2017) 83-92, <https://doi.org/10.1515/rbm-2016-0011>.

34. Gonzalez Cortina, M.; Villanueva Domínguez, L., 'Aired-time and chamotte hydraulic mortars', *Materiales de Construcción* **52**(266) (2002) 65-76, <https://doi.org/10.3989/mc.2002.v52.i266.335>.
35. Leslie, A. B.; Hughes, J. J., 'Binder microstructure in lime mortars: implications for the interpretation of analysis results', *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* **35**(3) (2002) 257-263, <http://dx.doi.org/10.1144/1470-923601-27>.

RECIBIDO: 2021.5.20

REVISTO: 2021.6.14

ACEPTADO: 2021.12.11

ONLINE: 2022.1.20



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-SinDerivados 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.