

8. APROXIMACIONES ARQUEOMÉTRICAS AL ESTUDIO DE LOS MORTEROS DE LA ANTIGÜEDAD. PRESUPUESTOS METODOLÓGICOS Y ENSAYO DE APLICACIÓN A LA CONSTRUCCIÓN ROMANA DEL VALLE DEL GUADALQUIVIR

Esther Ontiveros - *Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*
Oliva Rodríguez - *Universidad de Sevilla*

Abstract

Archaeometry today is a fully developed and well established discipline. In the case of mortars, however, perhaps its development has traditionally been more closely linked to the problems associated with the intervention and conservation of Cultural Assets. In any case, we should take advantage of that experience to explore in greater depth aspects of considerable importance for the characterisation of ancient construction processes and technological development; methods that, in the final analysis, inform us of socioeconomic structures and historical junctures at different moments and in different territories. The project, which has been developed around the architecture and construction of the Roman towns in the Guadalquivir Valley, has been an excellent laboratory in which to initiate research into areas of common interest in the fields of materials science and archaeology.

específico o comparativo, con la aplicación de criterios adecuados de caracterización (composición mineralógica, química, física, etc.), permite agrupar los materiales según su naturaleza, aportando así datos de interés referentes a las técnicas de fabricación y métodos constructivos utilizados, según su época y lugar de procedencia y uso. Es importante conocer previamente la funcionalidad de los morteros en obra, ya que sus propiedades varían notablemente en función de su uso como medio de unión y/o consolidación de unidades de albañilería, como revestimiento, enlucido, etc. Estos aspectos van a marcar diferencias composicionales y de comportamiento estructural, de gran interés en la investigación arqueológica.

La caracterización de los morteros mediante el uso de técnicas de análisis de tipo mineralógico, geoquímico y físico está resultando de utilidad tanto para profundizar en el conocimiento al respecto de la tecnología empleada en la elaboración de estos materiales como también para recuperar estas técnicas constructivas ancestrales, fundamentales en el ámbito de la conservación de los bienes culturales, en consonancia con la revalorización de las buenas prácticas en construcción. Estos aspectos constituyen actualmente una de las líneas de mayor interés en el ámbito de la investigación de morteros históricos.

Aprovechando la experiencia en ese campo, la ya consolidada colaboración entre investigadores del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico y la Universidad de Sevilla se ha concretado en los últimos años, entre otros ámbitos, en la caracterización de diferentes materiales empleados en la construcción romana en las ciudades del valle del Guadalquivir y sus entornos. De entre ellos, el estudio de los morteros presenta enormes posibilidades tanto desde el punto de vista del desarrollo y el ensayo metodológicos como del de la respuesta dada a problemas arqueológicos e históricos concretos. De los análisis realizados hasta el momento, con escenarios de excepción en construcciones monumentales de la ciudad de Itálica (Santiponce, Sevilla), es posible obtener valiosa información sobre aspectos

1. Introducción

La arqueología, en su intento de avanzar sobre el conocimiento del pasado, ha necesitado de las ciencias experimentales y del avance científico experimentado en las últimas décadas para su desarrollo. Así, en los años ochenta del siglo pasado surge la arqueometría, ciencia con aplicaciones desde el ámbito de la geología, la química, la física y la biología, entre otras, a cuestiones de índole histórica. De esta forma, de manos de la arqueología y otras ciencias sociales se configura actualmente como el prototipo de una ciencia plenamente multidisciplinar.

En este marco, los morteros antiguos constituyen actualmente una línea de investigación de gran interés en el ámbito de la ciencia de los materiales, debido a la información que a través de ellos se puede obtener sobre la evolución tecnológica experimentada por este material a lo largo de la historia. Su estudio individual

1. El trabajo se incluye en el proyecto de investigación del Plan Nacional I+D+i del Ministerio de Economía y Competitividad (HAR2012-36963-C05-04) *Urbes en transformación. Definición del paisaje urbano de las ciudades romanas del valle del Guadalquivir a través del análisis de las soluciones arquitectónicas: materiales, técnicas y esquemas productivos*, y el correspondiente Proyecto General de Investigación de la Consejería de Educación, Cultura y Deporte de la Junta de Andalucía.

relativos a conocimientos tecnológicos, áreas y rutas de abastecimiento o inversiones y costes de obra, entre otros.

2. La relevancia de los estudios sobre morteros antiguos

Los restos arqueológicos de carácter arquitectónico constituyen hoy en día una importante fuente de información sobre el periodo o época histórica en el que se concibieron, y son testigos además de la tecnología local y los avances de los métodos constructivos con el paso del tiempo. Es precisamente este creciente interés el que, incluso, ha dotado en los últimos años de personalidad propia a una aproximación, originada de la *arqueología de la arquitectura*, más incisiva en cuestiones relativas al proceso constructivo de la obra, así como a aspectos de carácter socioeconómico: la arqueología de la construcción (Pizzo 2009).

Los morteros, en general, son mezclas homogéneas de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos o agregados (arenas) y agua en proporciones adecuadas, y además pueden contener aditivos (Gaspar 1996). El resultado final es un material compuesto por una serie de granos embebidos en una matriz de naturaleza variable, con una textura semejante a la que presentan las rocas sedimentarias.

Los morteros han desempeñado un papel crucial en la historia de la construcción (Rodríguez Gordillo 2005). Su avance ha estado condicionado a la época y el entorno geográfico, incidiendo en el desarrollo tecnológico experimentado desde la prehistoria hasta la actualidad.

Las materias primas tienen gran importancia en el proceso de fabricación de los morteros: de sus características dependen, en gran parte, su calidad y propiedades como material de construcción. El conglomerante es el encargado de dotar a este material de la capacidad de endurecerse y a la vez de hacerlo trabajable; el árido, a su vez, es el componente granular responsable de estabilizar el volumen, hacer de relleno y disminuir la retracción del mortero durante el secado.

El interés arqueológico que despierta este material se centra en poder conocer el uso preferencial de los materiales, los criterios seguidos en su selección y la incidencia de aspectos socioeconómicos, ya que esta información puede contribuir a la adecuada interpretación de los parámetros constructivos de las edificaciones históricas, siempre que se pueda establecer una relación material-época más o menos precisa. Para ello es necesaria una valoración crítica de los datos obtenidos con las diversas técnicas de análisis en combinación con las hipótesis histórico-arqueológicas (De la Torre 1995).

La arqueometría es, por tanto, la ciencia aplicada que centra su investigación en los aspectos de caracteri-

zación e identificación de materiales, formas y tecnología de elaboración, procedencia de las materias primas, explotación de recursos naturales y su uso preferencial, por medio de la aplicación de técnicas experimentales. Para cubrir estos objetivos, esta disciplina se auxilia de la geología, la química, la física y la biología, fundamentalmente, ciencias orientadas al estudio del medio físico/biológico y de utilidad para conocer la gestión de los recursos naturales por parte del hombre.

Los avances tecnológicos más importantes relacionados con la tecnología de elaboración de morteros tuvieron lugar con la aparición del fuego, y la posibilidad de calcinar ciertas piedras (caliza o aljez, piedra de yeso), lo que propició el descubrimiento de la cal y el yeso como conglomerantes. Este hito histórico permitió generar, a partir de una pasta moldeable y fácilmente manipulable, un producto capaz de endurecerse y comportarse como un material pétreo natural.

A partir de este momento el hombre fue adicionando otras sustancias, como agregados y aditivos, con la finalidad de mejorar las propiedades de esta pasta en estado fresco y optimizar su comportamiento físico-mecánico en estado endurecido.

La evolución tecnológica que ha experimentado este material de construcción se remonta en torno a 6.500 años. A lo largo de ese prolongado espacio de tiempo la técnica ha evolucionado desde morteros elaborados a base de tierra compactada y fibras vegetales (fig. 1), pasando por el uso de la cal y el yeso (conglomerantes más utilizados a lo largo de la historia de la construcción), y finalmente su mejora con el empleo de aditivos tanto orgánicos como inorgánicos para ir perfeccionando sus prestaciones.

El área geográfica, como responsable de la disponibilidad de determinadas materias primas, ha contribuido al avance tecnológico de unas tipologías de morteros frente a otras. Un ejemplo lo tenemos en Egipto (Lucas y Harris ²1999, 48 ss.), donde la escasez

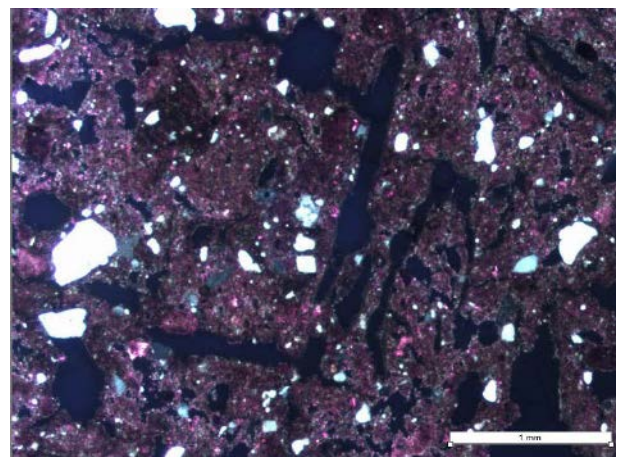


Figura 1. Mortero de tierra con fibras orgánicas. Yacimiento arqueológico de Guadalteba, Málaga.

de afloramientos calizos propició el avance tecnológico de los morteros de yeso frente a los de cal. Otro sería el empleo de material volcánico ligado a áreas geográficas de los ámbitos griego e itálico que, en último término, favoreció el descubrimiento de las propiedades hidráulicas en los morteros y la capacidad de endurecerse bajo el agua (Oleson *et al.* 2004) (fig. 2), de enorme relevancia en la construcción de infraestructuras portuarias.

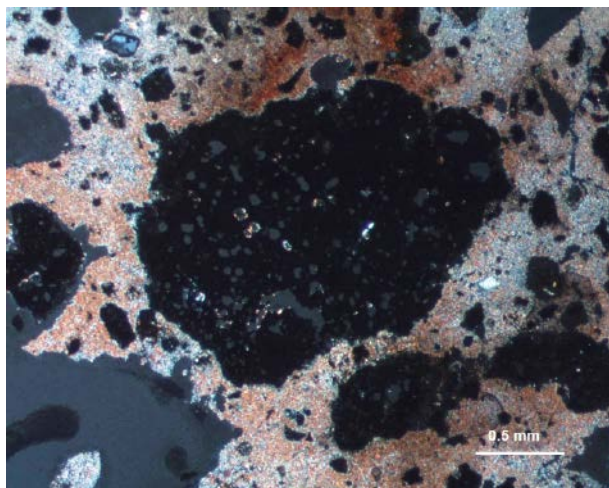


Figura 2. Mortero romano con adición de puzolanas negras. Teatro Greco de Villa Adriana (Tívoli, Roma).

Por otra parte, las necesidades constructivas y su funcionalidad en obra han hecho que sus propiedades se hayan ido adaptando a dichos requerimientos. Así, por ejemplo, como ligante o material de unión de unidades de construcción, tales como sillares, mampuestos y ladrillos, para la fabricación de muros de altura y espesor considerables, como parte de tapiales (fig. 3), o como material para el acabado de superficies. Por este

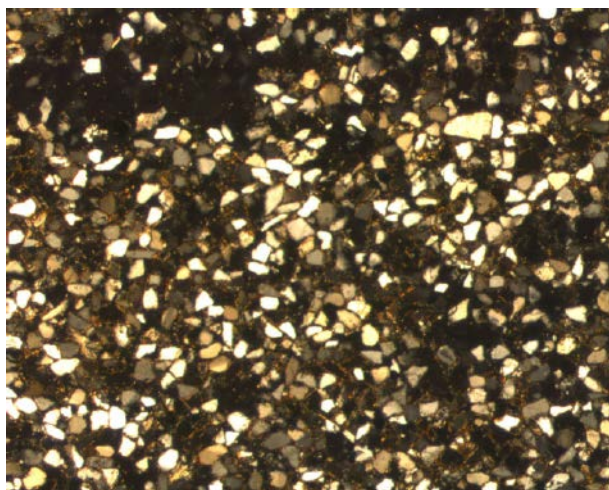


Figura 3. Tapial localizado en la cimentación de la iglesia de San Dionisio de Jerez. Corresponde a restos de la edificación de época anterior al siglo XIV.

motivo, en la actualidad lo encontramos formando parte de innumerables construcciones históricas (Álvarez Galindo y Ontiveros 2007). De hecho, en la construcción romana, sin duda, los morteros serán grandes protagonistas de su arquitectura de la mano, especialmente, de dos técnicas edilicias a las que supieron dar una difusión generalizada en la práctica totalidad de los territorios del Imperio y en todos los ámbitos de la arquitectura, tanto pública monumental como privada. Nos referimos al *opus caementicium* (Lamprecht 1985), que constituyó una verdadera revolución por su versatilidad constructiva y a las nuevas posibilidades que ofreció a la arquitectura y a la edificación con ladrillo, donde los morteros juegan un papel decisivo como elemento de ligado de las piezas en los paramentos, pero también como conglomerante en el núcleo, al interior de los paramentos.

Para concluir, es preciso incidir en que el estudio arqueométrico de los morteros antiguos tiene como finalidad establecer sus características mediante el estudio de sus parámetros composicionales y propiedades físicas, utilizando distintas técnicas de caracterización, al tiempo que se analiza su contexto histórico (Flores y Herrera 2000). Esto implica, en primer lugar, el establecimiento de la formulación original, con la localización de las materias primas utilizadas y su tratamiento; en segundo lugar, la datación de dichos morteros mediante una lectura de estratificación paramental adecuada, y, posteriormente, la determinación de sus propiedades físicas a fin de poner de manifiesto su comportamiento estático y estructural, resistencia a la degradación y estado de conservación (Álvarez Galindo 1997; Hansen *et al.* 2003).

3. Metodología

El interés por los morteros antiguos surge, desde el punto de vista de su caracterización estructural, en el simposio organizado por el ICCROM (Roma, 1981), relacionado con la necesidad alarmante de conservar adecuadamente la arquitectura histórica. Desde este momento se comienza a aplicar métodos de investigación analítica, desarrollados ya ampliamente con anterioridad en la caracterización de la piedra.

Al tratarse de un material reelaborado, este requiere, para su confección, del uso de distintos componentes (agregados, conglomerantes, aditivos, etc.) y una formulación previa, lo que hace que la metodología aplicada se vaya definiendo de manera progresiva. La comunidad científica propone métodos basados en análisis químicos, mineralógico-petrográficos, de propiedades físicas mediante el uso de técnicas como FRX, ICP, métodos termogravimétricos, microscopía óptica y electrónica, análisis de la porosidad, porometría, propiedades hídricas y mecánicas, etc. (Peroni

et al. 1981; Alessandrini *et al.* 1992; Rassineux *et al.* 1989; Charola y Henriques 1999; Meucci y Rossi-Doria 1982; Middendorf *et al.* 2000). En algunos casos se han propuesto ensayos normalizados, destacando RILEM para la caracterización y los ensayos de morteros históricos (Bartos *et al.* 2000; Álvarez Galindo y Ontiveros 2007). La finalidad es determinar la composición de los morteros y su comportamiento físico y estructural.

No obstante, en la bibliografía se insiste en la necesidad de que esta información técnica deba estar conectada con la documentación histórico-arqueológica, a fin de poder rentabilizar estas analíticas y que tengan realmente aplicaciones arqueométricas (Van Balen *et al.* 2010).

3.1. Trabajo de campo

La metodología a desarrollar debe incluir una *fase de campo* que contemple la observación detallada del edificio/yacimiento o conjunto arquitectónico con anterioridad a la toma de muestras (Torre López 1994), además de un conocimiento previo sobre su historia material (aspectos histórico-arqueológicos). Esto permitirá la programación adecuada del muestreo y la selección de las técnicas de análisis más adecuadas, de acuerdo a los objetivos planteados por la investigación. Sin duda alguna, ello está también unido al empleo realista, rentable y responsable de los medios humanos y económicos actualmente a disposición. La toma de muestras se rige por el siguiente principio: las muestras aisladas y débilmente identificadas no tienen valor científico, ya que los resultados que se pueden obtener de ellas con la aplicación de distintas técnicas de análisis no pueden resolver las cuestiones que la investigación plantea. Por esta razón, es importante su sistematización: muestras con siglas identificativas, perfectamente documentadas y registradas fotográficamente, así como la evidencia clara de la dispersión del material y la cantidad de muestra necesaria para el estudio, en relación con su representatividad en el contexto del edificio y con la funcionalidad de las fábricas y su relevancia en la construcción.

En la conservación de bienes culturales es importante el registro de cualquier manifestación de su materialidad que permita obtener la máxima información posible en el presente pero que, de igual forma, a la luz de los nuevos avances, haga viable su uso en futuras investigaciones. En este sentido, la toma de muestras debe cumplir los siguientes requerimientos:

- La extracción debe realizarse con un número mínimo de tres muestras por tipo. Este número estará en función de la heterogeneidad del material y de las necesidades de la analítica. La cantidad, según las distintas técnicas, puede oscilar entre 10 y 20 g o 100 y 500 g (Martín Pérez 1990).

- El registro debe incluir la descripción, la procedencia, el sistema de toma de muestras, las condiciones de conservación e información adicional.
- En la descripción se debe indicar la tipología, la funcionalidad, las características (disgregada o cohesionada) y el estado de conservación (alterada o sana), así como su procedencia, su situación en el inmueble acompañado de documentación gráfica, las condiciones de exposición y los materiales de contacto (piedra, ladrillo, etc.).
- El mortero es un material heterogéneo (árido-ligante-agua, más posibles aditivos) del que desconocemos *a priori* sus propiedades en conjunto y las características de sus componentes originales. Durante la preparación de las muestras, para su estudio en laboratorio, hay que partir de la base de que este material debe estudiarse como una unidad y como un conjunto de elementos: árido o agregados y conglomerante, entre otros.

3.2. Fase de laboratorio

La caracterización de morteros aborda aspectos tan importantes como el estudio del conglomerante, relativo a su composición, tecnología de obtención y proporción, y del árido o agregados, al respecto de su naturaleza composicional, granulometrías, propiedades físicas, etc. Estas operaciones se incluyen dentro de la fase de laboratorio.

La microscopía óptica, junto con las técnicas de análisis mineralógico y químico, como técnicas complementarias a ella, son las más resolutivas para la caracterización composicional de los morteros (fig. 4).

El estudio textural mediante microscopía óptica de los morteros históricos abarca la identificación constitucional y la organización de los elementos que lo integran, incluyendo tanto elementos sólidos como espacios vacíos. Esta técnica se ha venido utilizando desde hace ya más de un siglo y medio para la caracterización de la piedra natural y, dada su versatilidad, ha sido utilizada para la caracterización de morteros antiguos (Alessandrini *et al.* 1992; De la Torre 1995; Ontiveros *et al.* 1996).

La observación de los morteros en lámina delgada a través del microscopio petrográfico nos permite analizar los siguientes aspectos: la composición de los áridos, la matriz y, en algunos casos, los aditivos; la determinación del tamaño, la forma del árido y su cuantificación (granulometría); el estado de cristalinidad del aglomerante y los fenómenos de disolución del mismo; el estudio de la zona de contacto entre la matriz y el árido y el grado de interacción; la identificación de los componentes de alteración (sales); la

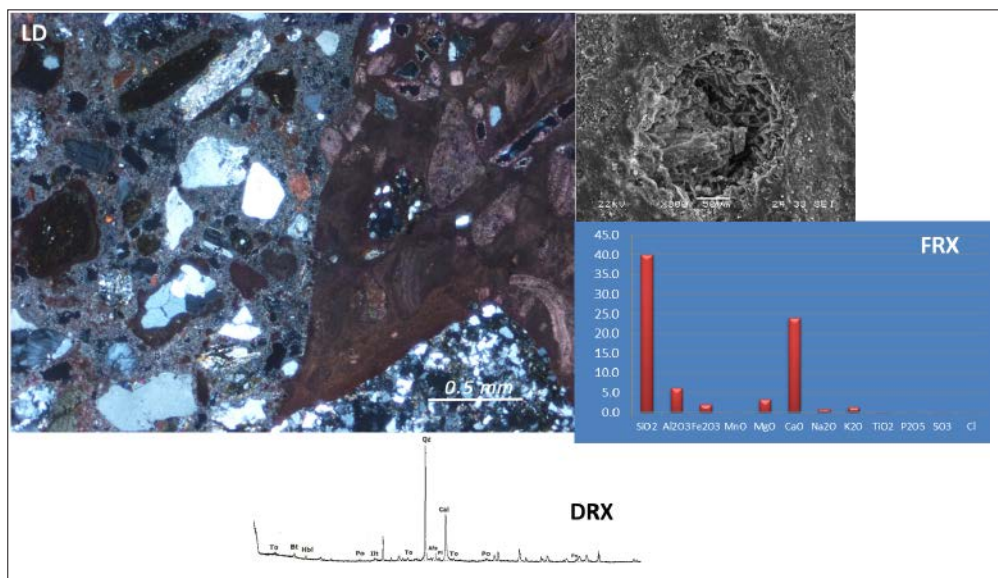


Figura 4. Aplicación de las técnicas de naturaleza petrográfica, mineralógica y química en el estudio de morteros. Caso: substrucciones sobre el cerro de San Antonio, ciudad romana de Itálica (Santiponce, Sevilla), siglo II d. C.

cuantificación de la macroporosidad del material, la presencia de fisuraciones, la pérdida del ligante y las disgregaciones.

La difracción de rayos X es de utilidad, ya que permite obtener datos semicuantitativos de la composición mineralógica global del mortero, complementando la información obtenida a través de la microscopía petrográfica. Dentro de los distintos métodos experimentales de difracción de rayos X, el más provechoso para el análisis de morteros es el de polvo cristalino. Este método permite identificar las fases minerales presentes en las muestras (cuarzo, calcita, dolomita, portlandita, brucita, etc.) y asociarlas a la composición del árido, el aglomerante, los aditivos o las sales de alteración, siempre que se haga una correlación adecuada de los resultados con otras técnicas (microscopía óptica, análisis químicos y SEM-EDX).

Esta técnica ha sido ampliamente utilizada para la caracterización mineralógica de morteros antiguos por numerosos autores (Meucci y Rossi Doria 1982; Masazza y Testolin 1981; Alessandrini *et al.* 1992; Charola y Henriques 1999; Rassineux *et al.* 1989; De la Torre 1995; Ontiveros *et al.* 1996; 1999; entre otros). La cuantificación de las distintas fases existentes en las muestras se basa en la intensidad de las líneas de difracción, directamente relacionada con la cantidad de cada sustancia cristalina presente en la muestra, aunque también influyen otros factores: el tamaño de la partícula, el grado de cristalinidad, la orientación preferencial de algunas fases minerales, la absorción de radiación, etc. Es preciso hacer la interpretación de los resultados de forma cuidadosa, debido a las características que presenta este material. Hay que tener en cuenta los aspectos texturales *de visu* (el tamaño del árido), que van a condicionar la cantidad de muestra a analizar, a fin de que los datos reflejen de forma proporcional la composición global de las

muestras. Algunos autores proponen eliminar tan solo los áridos de gran tamaño (De la Torre 1995), o bien todos y solo analizar las fracciones finas (referido fundamentalmente al conglomerante). En cualquier caso, estos aspectos deben quedar claramente referidos en los resultados.

El método de agregados orientados (Normal 34/91) es de utilidad para determinar la presencia de componente arcilloso.

Las microscopías electrónicas de alta resolución, por ejemplo SEM, permiten el microanálisis puntual o por microáreas y, por consiguiente, observaciones a grandes aumentos sobre las morfologías cristalinas del conglomerante, características del sistema poroso, del mismo modo que detectan componentes que se encuentran en bajas proporciones, lo que puede desvelar aspectos sobre su tecnología de fabricación y estado de conservación. Estas observaciones se concretan en el grado de carbonatación de los morteros, la existencia de microfracturas (intra- o intercristalinas), la interfase árido-ligante (fenómenos de reacción árido-ligante y grado de adhesión de la pasta), la evaluación del estado de conservación mediante la observación y el microanálisis de minerales de neoformación (sales) o esferas de contaminación, y la acción del biodeterioro (presencia de algas y hongos) y su efecto sobre estos materiales, así como en la caracterización del sistema poroso mediante la observación de microporos. Además permite observar directamente los poros en «cuello de botella» (poros de gran tamaño con acceso pequeño), de gran importancia en el estudio del sistema poroso, que no se puede detectar con otras técnicas. Esta técnica no permite hacer estudios cuantitativos desde el punto de vista textural debido a la baja cantidad de muestra que es posible analizar normalmente en el caso de arquitecturas históricas; sin embargo, complementa de

forma significativa a otras técnicas como la difracción de rayos X, la microscopía óptica, los análisis químicos o la porosimetría de mercurio, contribuyendo de forma importante al conocimiento del material. Ha sido utilizado ampliamente por distintos autores (Alessandrini 1985; Alessandrini *et al.* 1992; Charola 1993; Marchese 1980; Rassineux *et al.* 1989; Desoye *et al.* 1979; De la Torre *et al.* 1992; Reller *et al.* 1992; Puertas *et al.* 1994; Ontiveros *et al.* 1999; entre otros).

Los datos geoquímicos son de interés como complemento de los datos mineralógicos, del mismo modo que los elementos traza pueden proporcionar datos a fin de identificar el área geográfica de procedencia de los materiales. La FRX y la ICP son técnicas ampliamente utilizadas y permiten conocer la composición elemental de los elementos químicos mayoritarios y minoritarios o trazas.

Cabe destacar igualmente la espectroscopía, FTIR, que permite identificar, por comparación con los estándares, la presencia de calcita, cuarzo, yeso, hidromagnesita, singenita, silicatos complejos, etc., en muestras de morteros antiguos (Álvarez Galindo y Ontiveros 2007). También es capaz de identificar los componentes de morteros con cierto grado de hidraulicidad, como los silicatos dicálcico y tricálcico o gehlenita (Lanas *et al.* 2004). Tiene asimismo utilidad cuando se trata de estudiar materiales sometidos a ensayos de alteración acelerados (Lanas *et al.* 2005). Debe tenerse en cuenta que los resultados obtenidos son en esencia cualitativos, ya que la cuantificación no resulta demasiado exacta.

Dentro de los análisis térmicos se incluye un grupo de técnicas consistentes en la medición de una determinada propiedad física de una sustancia y/o de sus productos de reacción en función de la temperatura, mientras la sustancia es sometida a un programa de temperatura controlado. Si la propiedad física que se mide es la masa de una muestra, se habla de *termogravimetría* (TG o ATG), mientras que si lo que se recoge es la diferencia de temperatura entre una sustancia y un material de referencia, se habla de *análisis térmico diferencial* (ATD o DTA). Pueden obtenerse simultáneamente ambos registros. De hecho, los análisis térmicos se han utilizado ampliamente en el análisis de morteros antiguos (Riccardi *et al.* 1998; Montoya *et al.* 2003). La facilidad para la detección, su gran sensibilidad, la pequeña cantidad de muestra requerida para los ensayos y la escasa preparación (y, por tanto, la velocidad en la obtención de los datos) hacen de ellas, técnicas muy útiles para la caracterización de morteros. La interpretación de los resultados está condicionada por la adecuada homogeneización del material.

Finalmente, las propiedades físicas de los morteros son de gran interés para su caracterización: la

granulometría es una propiedad fundamental que, en el caso de morteros históricos, se obtiene a partir de la disolución del conglomerante por medio de algún ácido, o, según los casos, también puede procederse a su disgregación manual. A partir de las curvas granulométricas obtenidas se puede determinar el CU (coeficiente de uniformidad), que marca el carácter graduado de la granulometría y su grado de compactación.

La capacidad de aplicación de una metodología exhaustiva para caracterizar de manera completa el comportamiento físico-mecánico de los morteros antiguos es limitada, debido a la cantidad a su vez limitada de material de la que normalmente se dispone para los ensayos normalizados, con relación al volumen mínimo necesario de muestra que muchos de ellos requieren. G. Alessandrini (1985) resalta que el gran interés que estos parámetros suscitan en morteros de intervención decrece de forma relevante en morteros antiguos, debido a que estos valores físicos se encuentran estrechamente relacionados con otras determinaciones (composición química y mineralógica) que sí se pueden establecer satisfactoriamente en estos materiales. A pesar de ello, algunos autores han puesto de manifiesto la posibilidad de llevar a cabo algunas caracterizaciones como la porosidad total, la porosimetría de mercurio, la permeabilidad al agua o la permeabilidad al vapor de agua, entre otros, parámetros todos ellos que nos pueden aportar una información significativa sobre las características físicas de estos materiales, aun en el caso de que las muestras no cumplan las condiciones normalizadas que requieren algunos ensayos.

Otras propiedades de interés son las *resistencias mecánicas*, que en los morteros históricos presentan ciertas limitaciones, ya que muchas de estas determinaciones requieren una cantidad de material, con forma y tamaño normalizado, que la mayoría de las veces no se puede extraer del edificio.

La *densidad aparente* refleja el contenido total de porosidad del mortero (expresado en %) y su significación radica en que esta condiciona la facilidad de circulación de agua y aire en su interior. La porosidad total y, más concretamente, la porometría (distribución del tamaño de poro) tiene una gran importancia en la caracterización de morteros, como en el caso de la piedra, ya que la distribución del tamaño de ellos controla de forma relevante el comportamiento en obra de este material (propiedades hídricas, permeabilidad al vapor de agua, etc.). La distribución del tamaño de poro en morteros suele ser compleja, ya que en ella inciden un gran número de factores, como el contenido y las características de la cal, la presencia de material arcilloso, la distribución del tamaño de los áridos y el estado de conservación que pueda presentar el material.

4. Aplicación a la arquitectura del valle del Guadalquivir. El caso italicense

4.1. Las estructuras analizadas

Ya desde el primer momento de redacción del proyecto de investigación sobre las técnicas constructivas en las ciudades romanas del valle del Guadalquivir² se creyó algo absolutamente prioritario incorporar en el equipo, como parte fundamental del mismo, a especialistas en diferentes ámbitos de la arqueometría aplicada a los materiales empleados en la construcción. Se pretendía así no solo rentabilizar las posibilidades de un estudio interdisciplinar como el aludido, donde las técnicas arqueométricas se pusieran al servicio de las problemáticas históricas, sino, además, testar dichos procedimientos como medios de conocimiento en sí mismos.

Para ello era preciso partir de unos casos de estudio cuyo conocimiento, tanto histórico como estructural y arquitectónico, fuera relativamente adecuado, así como su estado de conservación aceptable. Ello, al margen de las limitaciones ya señaladas en lo que respecta a la cantidad de muestra que es posible tomar de edificaciones antiguas, especialmente para las pruebas de resistencia mecánica. Sin duda, el mejor laboratorio disponible era la ciudad romana de Itálica, donde, a la monumentalidad de las estructuras, se le unía el estudio intenso de algunas de ellas y la existencia de parámetros cronológicos bastante fiables.

Como punto de partida se ha tomado, por tanto, una gran substrucción monumental localizada en la cima del conocido como cerro de San Antonio, en el

solar del actual pueblo de Santiponce, reconocible en forma de un contundente frente en elevado al norte del teatro romano (Rodríguez Gutiérrez 2004, 273-277) (fig. 5), en la ladera oriental de la colina. Se trata de los restos de una gran terraza de cimentación sobre la que, muy probablemente, se abrió una gran plaza con edificio de culto central, a la manera del vecino *Traianeum*, este, en el solar de la ampliación adrianea de la ciudad (Jiménez Sancho e. p.). En cualquier caso, también comparte con él el momento de construcción: comienzos del siglo II d. C., dentro de lo que parece ser una gran renovación de espacios ya monumentales de antiguo, en el solar elegido para la fundación de la ciudad en tiempos republicanos.

Al proceder al estudio arquitectónico, ha sido preciso tener en cuenta que las estructuras conservadas y susceptibles de ser analizadas se limitan tan solo al frente oriental de la que debió de ser la totalidad de la compleja terraza. Esta se extendería sobre buena parte de la superficie del cerro, a juzgar por diferentes evidencias puntuales a las que se ha tenido acceso en intervenciones preventivas y prospecciones de superficie (Jiménez Sancho *et al.* 2013, 281-286). La entidad de la obra puede explicarse por varios factores, entre ellos el interés por fijar la pendiente de la ladera y crear así un límite estable, dado que nos encontramos ante un *tell* urbano, recrecido en buena parte de manera artificial a lo largo de la época republicana.

Por tanto, el sector mejor conservado del conjunto ha sido construido, en su práctica totalidad, en *opus caementicium* (fig. 6). Corresponde a dos muros paralelos de 1,20 m de espesor que distan entre sí 4,40 m.



Figura 5. Vista general de la estructura aterrazada objeto de estudio, sobre la ladera oriental del cerro de San Antonio (foto: Consejería de Cultura, Junta de Andalucía).

2. *Vid.* n. 1.



Figura 6. Detalle de las características morfológicas del conjunto, a base de potentes muros paralelos y riostras transversales.

A su vez, ambos están unidos por una suerte de tirantes perpendiculares de anchura variable (60-90 cm). Todo ello configurado a modo de grandes cajones de 8,20 m de anchura. Los dos muros principales culminaban a diferente altura, por lo que el desnivel se ve reflejado en las propias riostras, de superficie inclinada descendente. Los cajones, rellenos con tierra, quedaron sellados por una gruesa capa también en *opus caementicium*, en pendiente hacia el este, a modo de rampa. Este tramo norte-sur, a su vez, se quiebra en ángulo recto en ambos extremos en forma de sendos muros, también paralelos y de características semejantes a los primeros, a excepción de las riostras intermedias, de las que carecen.

Entre los aspectos más significativos del conjunto se encuentran las improntas de tablazones y encofrados de madera empleados para levantar la estructura, lo que ha permitido aventurar aspectos de los procedimientos seguidos en obra (fig. 7). En buena parte se trató de zanjas excavadas en el terreno, forradas por tablas horizontales unidas mediante costeros verticales que, una vez vertida la masa, quedaron allí abandonados. En la composición de la fábrica los *caementa* son de naturaleza diversa, predominando los fragmentos de rocas metamórficas, ígneas, donde son visibles clastos de granitos y calcarenita, con presencia más ocasional y localizada de fragmentos de ladrillo y *tegulae*.

4.2. La fase de muestreo

A pesar de que, como se ha señalado anteriormente, lo conocido y exhumado hasta la fecha tan solo corresponde a una pequeña parte de lo que pudo haber sido esta gran plataforma, la toma de muestras (fig. 8)

se ha llevado a cabo de acuerdo a una estudiada selección, a fin de responder a una serie de cuestiones tanto morfológicas como estructurales:

- Posible composición diferencial de los morteros según elementos estructurales (muros maestros, tirantes transversales, plataformas oblicuas, rellenos, lechadas de cal y costras calcáreas).
- Carácter homogéneo o heterogéneo de las fábricas a diferentes alturas de la estructura, así como en diferentes puntos de su desarrollo en espesor.
- Selección de muestras en otros edificios de la ciudad que compartan funciones estructurales similares (cimientos) y/o cronología, a fin de realizar un estudio comparativo (termas mayores, anfiteatro, *traianeum*, *tetrapylon*, casa de la exedra).
- Selección de muestras complementarias necesarias para la identificación de las fuentes de origen de los materiales. Para ello se han analizado tanto piedras presentes entre los *caementa* como materiales en las fuentes de origen: la Fm. geológica margas azules en el solar de la ciudad y las calcarenitas del Mioceno superior que rodean la cuenca del Guadalquivir.

La mayor parte de las muestras se han tomado de las zonas externas de los muros; no obstante, allí donde ha sido posible, por existir roturas posteriores, se han recogido asimismo de los núcleos internos. Por último, algunas de las muestras corresponden a una serie de fenómenos de enorme interés: en las capas superficiales de las fábricas, en contacto con las piezas en madera del encofrado, se conserva una capa (a modo de lechada de cal), de espesor milimétrico; a su vez, también presente en la impronta de las tablas



Figura 7. Detalle de las improntas de las tablas horizontales y los costeros verticales de madera sobre la fábrica.



Figura 8. Fase de muestreo en campo en la estructura monumental sobre el cerro de San Antonio (foto: D. González Acuña, CAI).

y los costeros, a modo de costras calcáreas, adheridas a restos de madera mineralizada. El análisis de estas capas ha resultado de gran relevancia, ya que ha informado de procesos mecánicos y tecnológicos seguidos en la construcción de las estructuras, como se verá más adelante.

4.3. Analíticas y resultados preliminares

Se ha pretendido, por tanto, conocer las áreas de abastecimiento de materiales por medio de la caracterización de la composición mineralógica y química, así como definir el proceso constructivo. Asimismo el reconocimiento de las propiedades físicas que presentan las fábricas ha hecho viable poder establecer

unas pautas tecnológicas comunes a las intervenciones de comienzos del siglo II d. C. en la ciudad. No obstante, la deseable ampliación del registro y el análisis de materiales de aspecto y técnica similares en otros edificios y ciudades más o menos próximos podrá corroborar una más que probable singularidad del proyecto aquí estudiado, vinculado, muy probablemente, con la comparecencia de albañiles de alta especialización, buenos conocedores del comportamiento de los materiales, asociado todo ello a una iniciativa arquitectónica de gran envergadura y no menos inversión.

Las analíticas realizadas, cuya exposición detallada y resultados han sido objeto de un estudio específico (Ontiveros *et al.* 2016), han consistido en las siguientes

tes pruebas, de acuerdo a los datos que se ha pretendido obtener. Las diferentes técnicas y ensayos han sido llevados a cabo en el CITIUS de la Universidad de Sevilla y los laboratorios del IAPH:

- Análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX). Obtención de difractogramas de rayos X en difractor de polvo modelo D8 Advance de la marca Bruker.
- Análisis químicos por fluorescencia de rayos X (FRX). Espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X marca PANalytical (modelo Axios) de tubo de Rh para el análisis elemental de muestras sólidas
- Análisis petrográficos mediante microscopía óptica de luz polarizada, sobre muestras en lámina delgada. Microscopio Leica, sistema Wetzlar con cámara de captura de imagen DMC2900. IAPH.
- Análisis microtextural a través del SEM con microanálisis puntual (EDX).
- Análisis granulométrico según Norma UNE-EN 933-1:2012³ para acceder a la distribución del tamaño de grano de los agregados y el cálculo del coeficiente de curvatura y el de uniformidad.
- Determinación de la densidad real a través de picnometría de helio (Pentapycnometer 5200e) y densidad aparente mediante pesada hidrostática. Con este último ensayo se ha determinado también la porosidad total al agua.
- Determinación de las propiedades hídricas: absorción libre de agua y desorción.
- Determinación de la porometría (distribución del tamaño de poro) mediante porosimetría de mercurio.
- Determinación de la resistencia mecánica solo a compresión, dada la limitación de material extraído para analíticas.

De la aplicación de todo lo anterior, combinado con el conocimiento disponible sobre la tecnología romana en este ámbito y la arquitectura italicense más en particular, se han identificado cuatro grupos de morteros diferentes, a partir de cuyo análisis se han obtenido, entre otros, los siguientes resultados:

- *En torno al origen de las materias primas y sus áreas de abastecimiento.* La procedencia de los materiales es fundamentalmente local. En las fábricas se han empleado agregados de arena de río propios de los lechos fluviales del Guadalquivir. Como aditivos se documentan fragmentos cerámicos, probablemente obtenidos de antiguos materiales de construcción. Se destaca especialmente la presencia de contenidos

elevados de margas azules, obtenidos de la propia base geológica italicense, a fin de mejorar las propiedades mecánicas de la fábrica resultante. La cal empleada parece poder proceder de los afloramientos de calcarenita localizados en la margen izquierda del Guadalquivir, asociados a la Fm. Calcarenitas de Niebla, muy probablemente de la zona de la hoy Alcalá del Río. En los encofrados se empleó madera de conífera, de buena calidad y crecimiento; la vía fluvial como medio de transporte, por flotación a favor de la corriente, hace bastante probable su origen en los bosques del área norte, como Cazorla.

- *Sobre propiedades físicas de los materiales.* La carbonatación de los materiales es casi completa, y es la responsable de las buenas propiedades físicas que presentan. La granulometría gradada de forma adecuada, como es el caso de esta construcción, incide de forma muy significativa en la densidad, la porosidad y la resistencia mecánica de los morteros. La cal agregada a las fábricas no se encontraba totalmente apagada, es muy posible que se hubiera agregado como cal viva, parcialmente semihidratada, de acuerdo a las necesidades del proceso constructivo, favorable, incluso, en el caso de cimentaciones y muros de contención. De hecho, la adición de cal en estas condiciones incide de forma relevante en los procesos de removilización y precipitación secundaria de carbonato en poros y microfisuras. Sobre los muros se documenta una delgada capa de carbonato cálcico que actúa a modo de una película de protección frente a los agentes de alteración externos. El tamaño de poro detectado favorece la impermeabilización del muro pero a la vez permite su transpiración, evitando la condensación del agua en su interior.
- *Al respecto de los procedimientos técnicos y tecnológicos empleados en la construcción.* Se identifica un acusado esmero en la selección granulométrica de los agregados; aunque se trata de una obra homogénea en calidades y composición de los morteros, se observan ciertos matices en elementos con diferente función estructural. Las lechadas de cal que se formaron en la superficie de los muros, en contacto con las tablones de madera, así como los restos de madera mineralizada, presentan estructuras internas que denotan el ejercicio de una presión artificial sobre el material vertido para la construcción. Los datos parecen poder hablar

3. AENOR. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado / Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method*, 07.11.2012.

de un proyecto unitario y bien planificado, con una cuidada selección de materiales así como depuradas y experimentadas técnicas en la fabricación y procesamiento de los conglomerantes. Las fábricas resultantes de esta cuidada selección y proporción de los componentes se caracterizan por su impermeabilidad y resisti-

vidad. Ambas habrían sido propiedades buscadas intencionadamente por los responsables de la obra, no solo por su monumentalidad y necesidad de perdurabilidad sino, más aún, por su expuesta posición en la cima de una de las mayores elevaciones de este sector de la ciudad, abierto al valle del Guadalquivir.