

**UTILIDAD DEL GEÓLOGO
EN LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO
ARQUEOLÓGICO Y ARQUITECTÓNICO**

Sara Pavía Santamaría*

Susana Caro Calatayud**

A Mayela y Julio

INTRODUCCIÓN

La conservación del Patrimonio es tarea que ha de abordarse desde un punto de vista multidisciplinar. Y con esta perspectiva se ha elaborado este artículo, cuyo objetivo es definir los cauces por los que debe transcurrir el asesoramiento del geólogo en los proyectos de intervención y rehabilitación arquitectónica.

La conservación de todo edificio histórico, resto arqueológico o yacimiento geológico debe comenzar con el análisis de los materiales que lo constituyen. Poco se hará en beneficio de un objeto patrimonial si previamente no se conoce el material que lo forma, sus características, desperfectos y las causas que generan su destrucción.

La Geología es el estudio del origen, estructura y composición de la tierra. Todos los materiales de construcción históricos, así como los materiales tradicionales e inclu-

* Faculty of the Built Environment. DIT. Bolton Street. DUBLIN 1. Investigadora agregada del Instituto de Estudios Riojanos.

** Fundación Patrimonio Paleontológico de La Rioja. C/Portillo nº3. 26586 ENCISO (La Rioja). Investigadora agregada del Instituto de Estudios Riojanos.

so modernos como cementos y hormigones, proceden de la tierra y se usan o bien directamente (como la piedra) o ligeramente procesados. El ladrillo y las cerámicas no son mas que arcilla cocida, y la mayoría de los morteros y el hormigón se fabrican con piedra caliza quemada, óxidos y piedra machacada en forma de árido.

La Geología posee unas ramas, llamadas petrografía y mineralogía, que estudian la naturaleza y disposición de los minerales que forman las rocas. La principal herramienta de dichas ramas es el microscopio petrográfico: un microscopio óptico equipado con lentes especiales que permiten el estudio de láminas transparentes de piedra, ladrillo, morteros etc. para conocer su composición, porosidad y procesos de alteración mineral. En definitiva, del estudio detallado del material se deduce su calidad, procesos de alteración y motivos que provocan su degradación.

El campo de actuación del geólogo en la conservación del Patrimonio Histórico es el campo de la restauración y conservación de objetos construidos con piedra, ladrillo y mortero. En este campo la geología está orientada a:

- 1º- Caracterizar, mediante análisis, el material de construcción.
- 2º- Valorar su estado de conservación.
- 3º- Analizar los productos de alteración.
- 4º- Establecer los agentes y mecanismos que generan la destrucción de la roca u otro material.
- 5º- Elaborar la estrategia de conservación a seguir en función de los daños identificados y de las necesidades de la obra.

A continuación se describen los métodos y técnicas utilizados por el Geólogo en los trabajos de conservación así como las aplicaciones de la Geología en este campo.

FASES DE TRABAJO EN EL ESTUDIO Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO:MÉTODO Y TÉCNICAS

A- En un monumento o resto arqueológico la **1ª fase de trabajo** consiste en explorar el material que lo forma y a partir de los indicios, distinguir, catalogar y cartografiar las **formas de alteración** (fotografías 1, 2, 3, 4 y 5). De esta forma se valora el estado



Foto 1- Placas y escamas. Concatedral de Santa María La Redonda de Logroño.



Foto 2- Arenización. Columna de la Portada de San Jerónimo de la catedral de Santa María de Calahorra (La Rioja).



Foto 4- Costras negras en la fachada norte de la concatedral de Santa María La Redonda de Logroño. Ampollas y escamas.

Foto 5- Alvéolos y surcos. Fachada norte de la catedral de Santa María de Calahorra (La Rioja).

de conservación del edificio y se establecen zonas con prioridad y áreas donde la conservación es más delicada.

B- En el edificio la **2ª fase de trabajo** es la **toma de muestras**. Las muestras se seleccionan en función del tipo de piedra, ladrillo y/o mortero y de las formas de alteración. Así mismo se toman muestras en profundidad para averiguar como varía la composición de la roca sana (más profunda) y la misma alterada (más superficial).



Foto 3- Eflorescencias y criptoflorescencias salinas en ladrillo y mortero de la iglesia parroquial de San Miguel Arcángel de Alfaro (La Rioja). Las sales rebosan de las juntas..

C- La **3ª fase de trabajo**, que tiene lugar en el laboratorio, es el **análisis de las probetas**. Utilizando unas técnicas específicas se caracteriza el material desde el punto de vista mineralógico, petrográfico y físico y se establecen diferencias entre las zonas sanas y alteradas.



a) Con la técnica de microscopía óptica de polarización no solo se caracteriza el material (piedra, ladrillo, mortero) desde el punto de vista petrográfico sino que del mismo se deducen su origen; nivel de tecnología y procesado y edad aproximada. Las conclusiones obtenidas de este estudio tienen notables repercusiones en la conservación del patrimonio ya que por una parte permiten relacionar los desperfectos del material con su composición y estructura interna, y por otra parte marcan las pautas para fabricar reproducciones de los materiales o según sea el caso alterarlo a conveniencia.

b) La técnica de difracción de rayos-X sirve para calcular el tanto por ciento de cada mineral. Es muy útil para identificar minerales de la arcilla y sales.

c) La microscopía electrónica de barrido es una técnica complementaria al microscopio óptico de polarización con la ventaja de que con el microscopio electrónico se estudia la roca a gran aumento y en tres dimensiones. Además un equipo auxiliar de microanálisis de dispersión de rayos-X muestra la composición química elemental de la superficie de la muestra o de un punto en concreto. Es muy útil para observar los minerales, registrar procesos de alteración, identificar contaminantes, detectar microorganismos, estudiar minerales secundarios, poros... etc.

d) La técnica de porosimetría de inyección de mercurio es utilizada para estudiar los poros de la roca u otro material: porosidad total, tamaño de poro dominante, relación entre macroporos y microporos y grado de interconexión de los poros. De la porosidad depende la cantidad de agua tomada o cedida por el material y la cinética que regula dichos procesos. En general, la avidez por el agua, es responsable, en gran parte, del deterioro de la piedra, ladrillo y/o mortero.

D- La **4ª fase de trabajo** consiste en determinar las causas de la alteración; es decir los agentes y mecanismos que generan la destrucción del material de construcción. Es en esta etapa donde se correlacionan las variables que definen el microclima en el que se ubica el objeto con las características y defectos inherentes a la composición del material.

E- La **5ª y última fase de trabajo** es elaborar la estrategia de conservación a seguir en función de los daños identificados y de los procesos de alteración. Dicha etapa normalmente engloba los siguientes pasos:

a) **Pruebas que determinen que técnica es la mas apropiada para limpiar la roca.** En muchas ocasiones el agua está contraindicada para limpiar la piedra. Por ejemplo en el caso de la arenisca alterada de La Rioja, el agua introducida con los sistemas de limpieza favorece la disolución del cemento calcáreo de la roca y pone en funcionamiento otros mecanismos de alteración como la migración de sales solubles. Así mismo, el yeso, cuando ya ha pasado a ser un componente mas de la arenisca alterada, provoca junto a la humedad la destrucción de la piedra. En estos casos una técnica que puede ser apropiada para eliminar cierto tipo de suciedad en determinadas rocas es la desincrustación fotónica o limpieza con rayo láser; técnica que se utilizó en la portada de San Bartolomé de Logroño, la portada de San Jerónimo de la Catedral de Calahorra, fachada del Museo de La Rioja en Logroño... etc. Sin embargo si la piedra es coherente y no está alterada, la suciedad se puede eliminar, si los ensayos previos así lo aconsejan, proyectando a presión un abrasivo o utilizando otros sistemas de limpieza mas económicos. El sistema de limpieza adecuado depende del tipo de piedra, del tipo de suciedad y de la intensidad de ensuciamiento.

b) **Tratamientos para reparar la piedra.** Cuando la piedra está alterada es necesario incorporarle productos para repararla y mejorar su resistencia. Cada forma de rotura se restaura con un método específico, así:

- Las grietas se rellenan con resina y se sellan con mortero; de esta forma se eliminan las vías por las que entran los fluidos en la roca y se evita que se asiente vegetación. Las fisuras muy estrechas se sellan con mortero.

- Las placas y fragmentos sueltos se pegan con resinas, lo que evita que se pierda material de sillares, esculturas, yacimientos... etc. En ciertos casos además de pegar los fragmentos es necesario coserlos.

c) **Tratamientos para consolidar y, o hidrofugar la roca.** Una vez reparadas y limpias las probetas, se seleccionan y aplican los productos de prueba. Los consolidantes se usan para enriquecer a la piedra en material cementante. Son muy útiles en material cuya principal causa de alteración es la disolución del cemento que une sus granos minerales. Los hidrofugantes son efectivos para aislar a la piedra de la humedad y evitar que se fijen en la superficie de la misma partículas nocivas. Hay que obrar con mucha precau-



Fotografía 6- Aspecto de dos muestras de piedra de las canteras de Boñar (izquierda) y Sepúlveda (derecha) finalizado el ensayo de envejecimiento artificial acelerado de cristalización de sales. Ruptura de las probetas a favor de los planos débiles.



ción con estos productos que en modo alguno son milagrosos. Como señalan los expertos en restauración un tratamiento será tanto más eficaz cuanto mas penetre y produzca las menores modificaciones en las muestras una vez finalizados los ensayos de prueba a que se les somete.

d) **Ensayos de envejecimiento artificial acelerado.** Para averiguar si son eficaces los productos utilizados para reparar la piedra, consolidarla y, o hidrofugarla, se hacen en el laboratorio ensayos de envejecimiento artificial acelerado. Con estos ensayos se averigua la resistencia futura de la roca frente a la acción destructiva de la humedad, el hielo, las sales y la luz ultravioleta. La evolución y resultados de estas pruebas marcarán las pautas para elegir, en cada caso, el producto a aplicar.

Fotografía 7-Columna de la portada de San Martín de la concatedral de Santa María La Redonda de Logroño. La piedra fue colocada en contra del lecho de cantera.

e) **Búsqueda de canteras para reponer piedra o en su defecto buscar en el mercado material compatible.** Una vez localizadas las canteras se estudian las rocas desde el punto de vista petrográfico y se la somete a ensayos de envejecimiento artificial acelerado para averiguar su durabilidad o resistencia futura. La piedra que se extrae de cantera no siempre es la misma, pues a medida que avanza el frente normalmente cambia la composición y, o textura de la roca (fotografía 6). Una vez extraída la piedra hay que cuidar la colocación de las piezas de sillería en obra. Los bloques de piedra se colocan en el edificio como están en la cantera, es decir, “a hoja” o según el lecho de cantera, con el objeto de evitar la alteración prematura del sillar. Si los bloques se giran en obra, siendo la laminación entonces perpendicular al suelo, el agua penetra a través de las zonas lábiles interlaminares con facilidad, los procesos de alteración progresan y la separación del sillar en láminas es rápida, como se muestra en la fotografía 7 de la portada de San Martín de la concatedral de Santa María la Redonda de Logroño.

f) **Elaborar morteros iguales o similares a los utilizados en la construcción original** y ensayarlos para verificar su calidad o resistencia. En otros casos las exigencias de la obra precisan ensayar probetas cambiando la dosificación del árido-ligante o incluso con el mismo árido variando la granulometría.

APLICACIONES DE LA GEOLOGÍA EN LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO: EJEMPLOS

La Geología puede ser destinada a múltiples servicios dentro del campo de la conservación del patrimonio arquitectónico, geológico y arqueológico. A continuación se muestran varios ejemplos de sus aplicaciones.

1- Reemplazar sillería alterada en edificios; bloques de piedra en yacimientos arqueológicos.

En la práctica de conservación del Patrimonio es esencial determinar el origen del material utilizado en su construcción ya que en muchas ocasiones, es necesario introducir piedra nueva, como por ejemplo para reemplazar sillería alterada de castillos o iglesias o para reconstruir ortostatos de monumentos megalíticos. Por tanto en primer lugar hay que definir la procedencia del material. Es común encontrar evidencias del uso de materiales locales en la construcción del patrimonio sin embargo, en otros



Fotografía 8- Uso de material local en la isla de Innismurray. Afloramiento de arenisca local bien estratificada.



Fotografía 9- Uso de material local en la isla de Innismurray. Arenisca decorada: piedra de las maldiciones.

muchos casos, los materiales fueron transportados distancias considerables.

Un ejemplo que ilustra el uso de material local es el de la isla de Innismurray en la costa oeste irlandesa. Ahí, además del uso de la piedra autóctona de la isla, hay evidencias del uso de material local en morteros y ladrillos, como se muestra en las fotografías 8, 9 y 10. La arenisca local aflora bien estratificada, lo que permitió una explotación relativamente fácil. Con esta arenisca se construyeron el fuerte (posiblemente en la edad del hierro) y el conjunto monástico (que incluye la Iglesia, celdas, oratorio, altares, etc.). Las piedras decoradas del monasterio también se construyeron con esta arenisca, así como las piedras utilizadas para conjurar maldiciones y las casas de los pobladores de la isla.



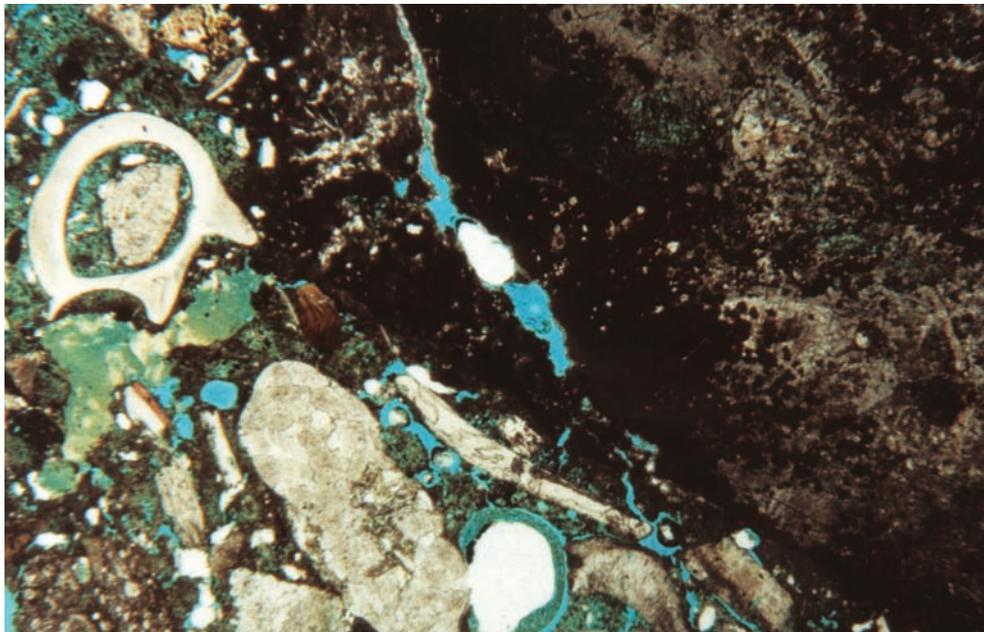
Fotografía 10- Imagen microscópica de un ladrillo de Innismurray con inclusiones de arenisca autóctona de la zona.

Incluso los ladrillos se fabricaron cociendo la tierra de la zona. Esto se dedujo del estudio científico del ladrillo el cual contiene inclusiones de arenisca: arenisca del mismo tipo que la autóctona de la isla.

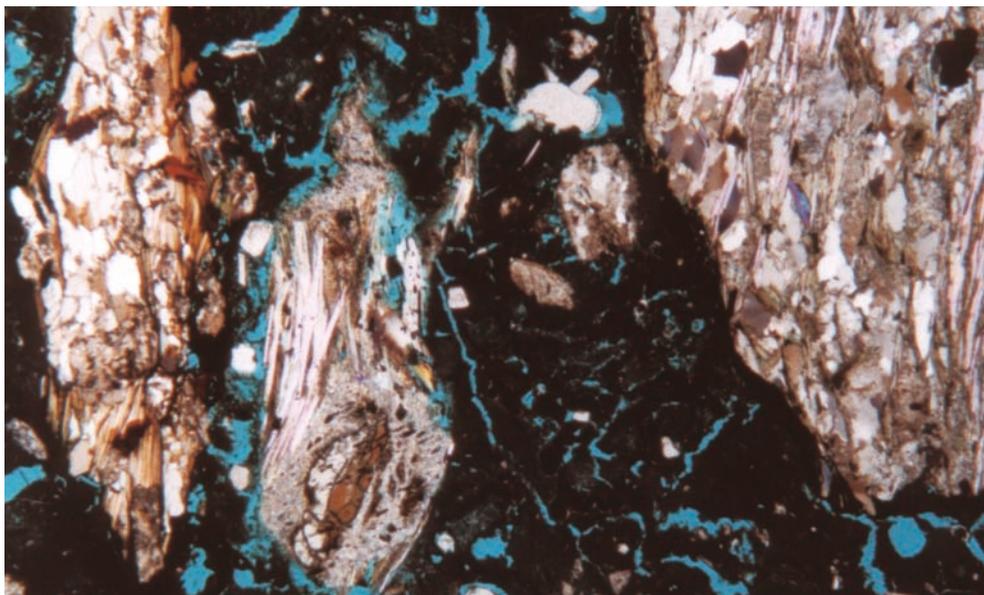
2- Dosificar y fabricar reproducciones de morteros históricos para conservar la fábrica del edificio o yacimiento.

El estudio científico de un mortero permite extraer resultados esenciales que hay que tener en cuenta a la hora de realizar labores de conservación. Por ejemplo, con el estudio petrográfico del mortero se pueden determinar: 1- La procedencia de la caliza utilizada para obtener la cal. 2- El tipo de cal que aglomera el mortero. 3- La T^a de calcinación. 4- El tipo de árido: origen y composición.

Se ha tomado como ejemplo un mortero medieval de un castillo situado al sur de Dublín (fotografía 11). El mortero conserva fragmentos de la caliza utilizada para obtener la cal, que no llegaron a calcinarse completamente en el proceso de elaboración de la cal. Además en dichos fragmentos hay fósiles cuya edad geológica es carbonífera, con lo que se dedujo que la cal se obtuvo por calcinación de una caliza carbonífera. Estos mismos fósiles se identificaron en afloramientos de caliza carbonífera próximos al Castillo, con lo que se dedujo que la fuente de caliza era local. De estos hallazgos se



Fotografía 11- Imagen microscópica de un mortero medieval de un castillo situado al sur de Dublin. Fragmento de caliza parcialmente calcinada en la zona superior derecha. También se observan el árido de grano fino (color blanco) y la fase oscura intergranular del ligante de cal.



Fotografía 12- Imagen microscópica de un mortero de cal irlandés del monasterio de la isla de High Island (posiblemente del siglo X). Árido angular de esquisto local triturado y rodeado de ligante de cal.

extraen además dos conclusiones fundamentales a la hora de conservar la fábrica del Castillo:

a) El mortero se hizo con una cal no hidráulica ya que al estudiar los afloramientos de caliza identificados como fuente de la cal se comprobó que la caliza era pura y, por tanto, la cal obtenida de su calcinación era no hidráulica.

Una cal hidráulica se obtiene de calcinar caliza con impurezas arcillosas mientras que una cal no hidráulica procede de la calcinación de caliza pura. Ambos tipos de cal producen morteros y argamasas con propiedades radicalmente distintas. Es esencial conocer el tipo de cal que aglomera un mortero, revoco o argamasa ya que no sólo determina las propiedades y conservación de los morteros sino que además, es básico a la hora de seleccionar los materiales base para diseñar reproducciones de mortero histórico.

b) La temperatura de calcinación de la caliza fue inferior a 900°C.

Por trabajo experimental se conoce que la calcita, componente principal de la piedra caliza (en ocasiones único componente), desaparece a temperaturas superiores a 900°C. El hecho de encontrar un fragmento de caliza parcialmente calcinado formando parte de la cal significa que la temperatura que alcanzó el horno fue próxima o inferior a 900°C.

Por tanto, si fuese preciso reproducir el ligante de estos morteros se debe obtener una cal no hidráulica a partir de la calcinación de una caliza carbonífera local pura a una temperatura aproximada de 900°C.

En la conservación del Patrimonio es fundamental determinar el tipo de árido que se usó en el mortero o revoco así como su origen y composición. Por ejemplo, la presencia de impurezas en el árido pueden causar la alteración del mortero y afectar la durabilidad de la piedra o ladrillo que constituye la fábrica del objeto patrimonial. Por otra parte, si se conocen la composición mineralógica y el origen del árido se pueden elaborar morteros compatibles con la piedra o ladrillo así como diseñar y fabricar réplicas exactas de morteros históricos. Incluso es posible modificar la dosificación y composición de la mezcla alterando a conveniencia las propiedades y durabilidad del mortero.

Por ejemplo, en el estudio petrográfico de un mortero de cal irlandés del Monasterio de la isla de High Island, datado en el siglo X, se observaron frag-

mentos angulares de árido que corresponden a un esquisto (fotografía 12). El esquisto es una roca metamórfica, la cual aflora en la isla, en las proximidades del monasterio, y que en este caso se trituró y se mezcló con cal para fabricar el mortero.

En definitiva, la presencia de determinados componentes suele indicar el origen del árido. Así, los fragmentos de conchas de bivalvos marinos encontrados en un mortero de cal apuntan la posibilidad del uso de arena de playa como árido para elaborar el mortero.

3- Fabricar reproducciones de ladrillos y cerámicas históricas.

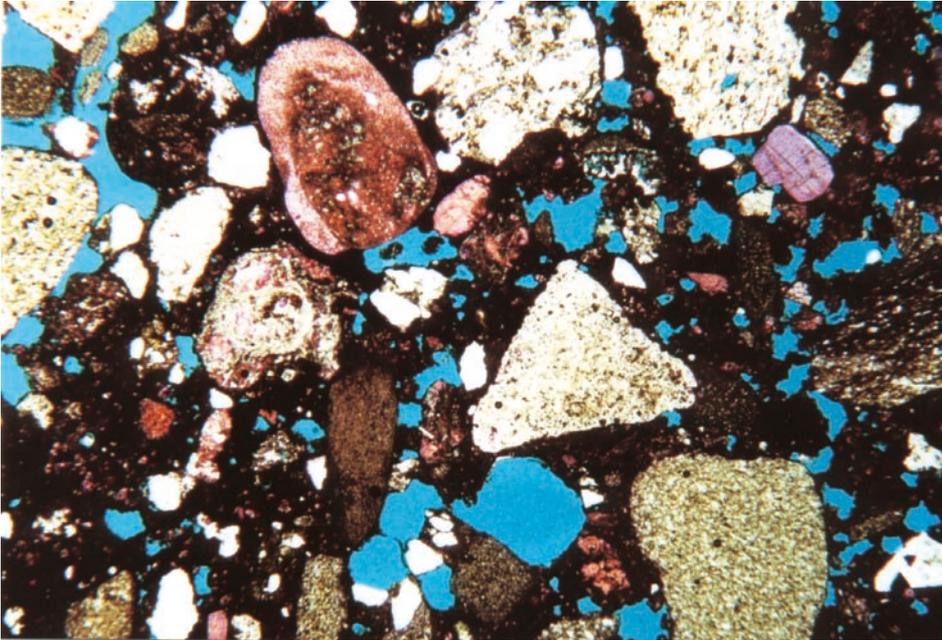
A partir del estudio detallado de la mineralogía y petrografía de un determinado ladrillo o cerámica así como de la mineralogía de arcillas cocidas en el laboratorio se deduce la composición de la arcilla usada para fabricar el ladrillo; el tipo de arcilla; su origen; origen del ladrillo; la temperatura de cocción; el tipo de horno y su atmósfera. Esta información es muy útil en estudios arqueológicos y para elaborar réplicas de ladrillos y cerámicas históricas.

4- Reproducir tecnologías antiguas.

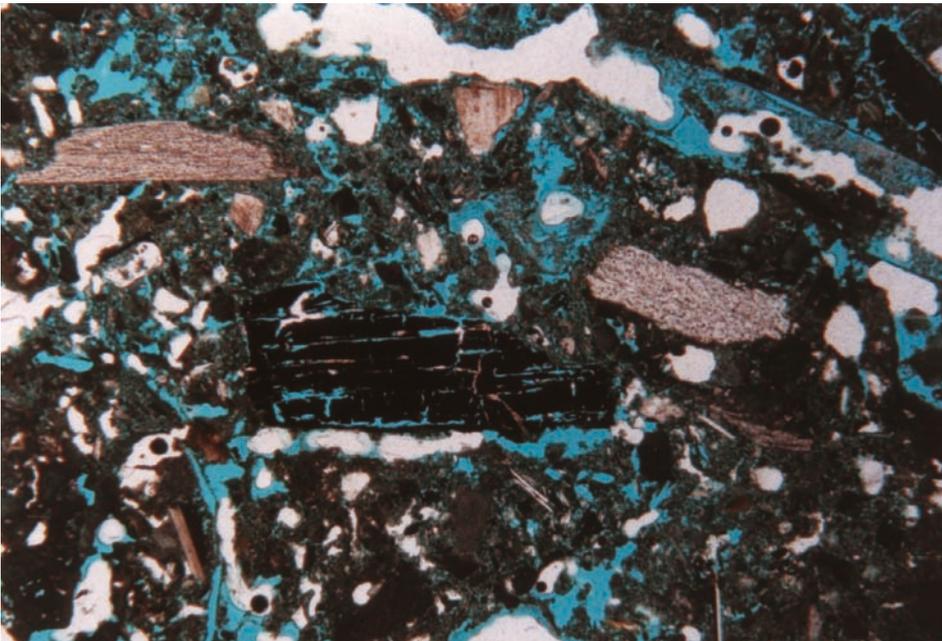
El estudio detallado del material histórico también permite averiguar el nivel de tecnología y procesado de los materiales en la antigüedad. Es muy útil para elaborar réplicas y para la práctica de tecnologías antiguas en labores encaminadas a la conservación del Patrimonio.

Por ejemplo el hecho de encontrar un fragmento cerámico en un mortero de cal pone en evidencia el uso de puzolanas que mejoran las propiedades cementantes de los ligantes de cal (fotografía 13). Las puzolanas son minerales ricos en sílice, con alúmina y hierro, que reaccionan con cal en presencia de agua para formar minerales insolubles con propiedades cementantes. El uso de puzolanas se atribuye en primera instancia a los romanos. El uso extensivo de puzolanas permitió a los romanos construir elementos estructurales de dimensiones magníficas enteramente de mortero o argamasa (hormigón romano). Existen muchos tipos de material puzolánico, su naturaleza y composición proporcionan más detalles sobre el nivel de procesado y el tipo de tecnología disponible cuando se elaboró el mortero.

En algunos morteros también se encuentran fragmentos de combustible fósil quemado (turba o madera) como se muestra en la fotografía 14. Previo estudio petrográfi-



Fotografía 13- Mortero de cal con fragmentos cerámicos (siglo XVI) visto a través del microscopio petrográfico.



Fotografía 14- Imagen microscópica de un fragmento de combustible fósil quemado (turba o madera) en un mortero de cal que data posiblemente del siglo X.

co, estos fragmentos se pueden interpretar como restos del combustible que se utilizó para calcinar la cal. Esto permite conocer la naturaleza del combustible (turba, madera o carbón) utilizado en el horno de calcinación lo que a su vez da idea del tipo de horno.

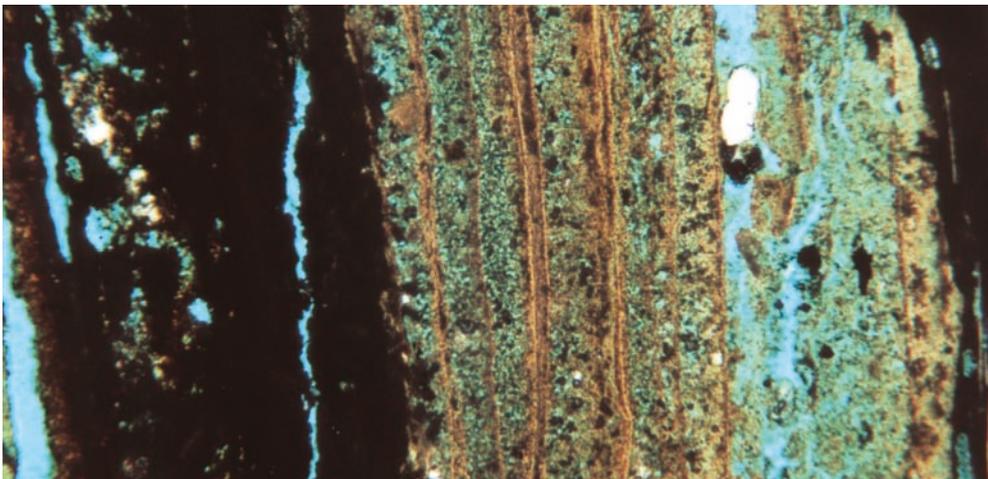
5- Datar edificios históricos o yacimientos arqueológicos.

La datación de objetos patrimoniales así como de edificios históricos y afloramientos arqueológicos tiene implicaciones históricas, arqueológicas y sociales, además de ser relevante en conservación. Por ejemplo para datar objetos patrimoniales se pueden usar los morteros bajo tres puntos de vista:

a) A partir de dataciones con el método del Carbono 14. Con este método se pueden datar elementos orgánicos (como madera quemada) presentes en el mortero. Sin embargo, en muchas ocasiones, es impracticable por varias razones, entre ellas por contaminación con el carbono de la cal o por ausencia de elementos orgánicos.

b) A partir del estudio de elementos o prácticas tecnológicas propias de determinadas épocas. Previamente hay que conocer el tipo y cantidades relativas de ciertos componentes de los morteros que pueden indicar su edad aproximada.

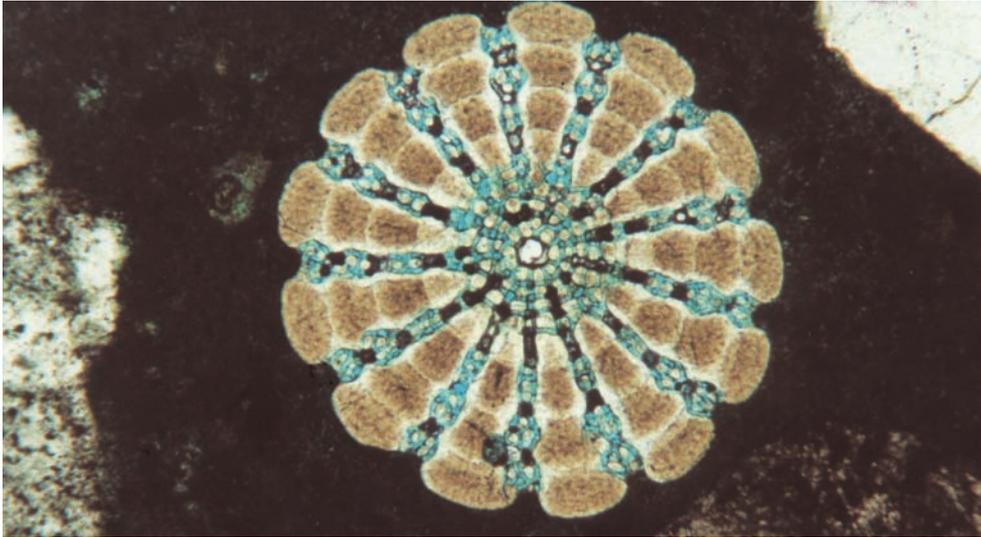
c) A partir de secuencias de revocos y morteros presentes en un edificio histórico o un yacimiento arqueológico aplicando el principio de la estratigrafía (fotografía 15). Estas dataciones relativas se pueden extrapolar a ciertas zonas



Fotografía 15- Imagen microscópica de las secuencias de capas de revocos del Faro de Hook (Irlanda) que se pueden datar relativamente aplicando el principio de la estratigrafía.

del yacimiento o edificio de edad desconocida. El revoco más antiguo es el más cercano al sustrato.

d) A partir de un determinado fósil o aditivo que se encuentre en varios revocos de la misma construcción (fotografía 16). Esto permite correlacionar, y por tanto datar, diferentes partes de un mismo afloramiento o edificio.



Fotografía 16- Sección transversal de un coral encontrado en varios revocos del faro de Hook (Irlanda) vista a través del microscopio petrográfico.

6- Asesorar en las decisiones que conciernen a la conservación del Patrimonio para establecer prioridades en cuanto a la conservación se refiere.

Determinados edificios, yacimientos u objetos situados en ambientes especialmente agresivos o con un estado de deterioro muy avanzado necesitan ser conservados con mucha más urgencia que otros objetos patrimoniales que se encuentren en ambientes más favorables o mejor conservados.

Los presupuestos destinados a conservar el Patrimonio son siempre limitados. Realizando estudios previos detallados se pueden encauzar los medios disponibles de una manera más sabia, ahorrando cantidades considerables de dinero en proyectos de conservación. Por ejemplo, no es necesario utilizar la técnica del rayo láser para limpiar la suciedad de todas las piedras sino que en muchos casos se pueden utilizar otros métodos más rápidos y económicos. Así mismo el estudio detallado de los morteros también puede resultar un ahorro considerable a la hora de realizar labores de conservación. Por

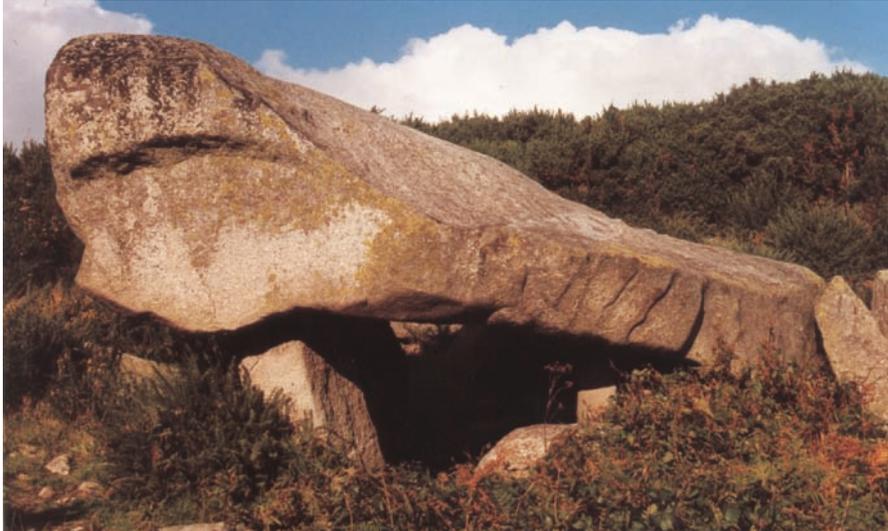
ejemplo, el interior de una Iglesia románica estaba revocado con un mortero gris de aspecto rígido e impermeable. Este mortero se pensaba eliminar y sustituir por uno de cal, compatible con la fábrica del edificio, con el gasto que ello supone. El estudio petrográfico y físico del mortero gris del edificio reveló que no se trataba de un mortero de cemento portland sino que era un mortero de cal con puzolanas, compatible en composición y propiedades con la fábrica del edificio. Como consecuencia, no fue necesario eliminar el mortero y revocar nuevamente la fábrica durante las obras de restauración.

Realizando estudios previos detallados se puede dar prioridad a un tipo de piedra sobre otro, o a un tipo de monumento, o incluso a una estructura en unas condiciones medioambientales especialmente agresivas. En esta línea, por ejemplo, una Sección de Patrimonio del Gobierno de Irlanda que administra presupuesto destinado a la conservación de monumentos creó en el año 1999 un proyecto de investigación de amplio espectro que incluye el análisis de la alteración de monumentos de diferentes edades, situados en distintos medioambientes y construidos con varios tipos de piedra. Este proyecto

tiene como objetivo asesorar las decisiones concernientes a la conservación, estableciendo prioridades necesarias para salvaguardar el patrimonio de una manera lógica y objetiva. El proyecto se está realizando en la Faculty of the Built Environment dirigido por la Doctora Sara Pavía. En los 10 primeros meses se inspeccionaron aproximadamente 80 monumentos de edades comprendidas entre la edad de piedra y la época postmedieval. Con este estudio de los monumentos se establecen pautas de conservación para actuar en cada caso, pero también se obtienen conclusiones generales que se pueden extrapolar a otros monumentos construidos con piedra semejante, situados en otras áreas que gozan de condiciones medioambientales similares. De este estudio se deduce, por ejemplo, la urgencia de preservar las lajas ornamentales de piedra caliza en la costa oeste irlandesa. En la costa oeste



Fotografía 17- Granito de Leinster de la Cruz de Moone (Irlanda) totalmente colonizado por algas.



Fotografía 18- Granito de Leinster del Dolmen de Kirtiernan (Irlanda) con escasa colonización biológica.

las condiciones climatológicas son extremas y los monumentos están expuestos a lluvias fuertes y ráfagas de viento huracanado durante gran parte del año. Las tormentas atlánticas son intensas y los monumentos están generalmente muy expuestos, ya que no existen accidentes geográficos que los resguarden de la fuerza de los elementos. Estas condiciones tan agresivas son responsables del elevado grado de disolución de la piedra caliza. Otro ejemplo de los resultados de este estudio es el caso del mismo granito, granito de Leinster, situado en dos entornos diferentes. Cuando se encuentra en un microclima resguardado de alta humedad relativa, está totalmente colonizado por algas (fotografía 17). Por el contrario en el granito del Dolmen de Kirtiernan, situado en un ambiente montañoso de alta humedad relativa pero expuesto y aireado, la colonización biológica es mínima (fotografía 18). De aquí se deduce que, en general, como medida protectora para el granito se dará prioridad al uso de biocidas en las áreas más resguardadas frente a las más expuestas.

VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE UN MATERIAL, TRATAMIENTO DE CONSERVACIÓN Y SISTEMAS DE LIMPIEZA

Al principio se ha mencionado la importancia de los ensayos de laboratorio para valorar la calidad del material así como la eficacia de los sistemas de limpieza y tratamientos de consolidación y protección.

El sistema de limpieza adecuado (química; físico-mecánica; láser) se elige en función de la resistencia y composición de la piedra; grado de suciedad y el estado en que se encuentra. En cualquier caso es necesario realizar ensayos en superficies de prueba in situ y/o en laboratorio. Las pruebas deben comenzar con las condiciones menos agresivas incrementándolas hasta conseguir remover la suciedad pero siempre sin afectar a la roca. Así se realizaron las pruebas de limpieza de la Iglesia de San Bartolomé de Logroño. Un limpiador adecuado para una determinada piedra puede ser fatal para otra. Por ejemplo, muchos edificios Georgianos de Dublín se construyeron con sillería de granito y elementos decorativos de caliza. Son rocas extremadamente opuestas en cuanto a composición y propiedades: la caliza es una roca porosa y alcalina mientras que el granito es impermeable y de composición ácida. Las labores de limpieza química se deben realizar sobre el granito sellando la caliza y viceversa, con el fin de no provocar nuevas alteraciones típicas de una limpieza agresiva.

Los ensayos de durabilidad son esenciales para valorar la calidad del material y su alteración futura; así como para predecir el comportamiento de nuevas mezclas de morteros, piedra consolidada, hidrofugantes, y resinas de inyección y fijación. Los resultados de los ensayos de laboratorio permiten decidir sobre la conveniencia o no de un material o un producto de conservación. Los ensayos de durabilidad consisten en la repetición periódica de ciclos que involucran los agentes erosivos externos: agua, hielo y sales solubles. Estos agentes se hacen actuar intensamente durante periodos cortos de tiempo en condiciones controladas. Intentan reproducir el stress causado por los agentes externos durante siglos en un espacio corto de tiempo. Estos ciclos se efectúan con morteros diseñados y elaborados en laboratorio, piedra consolidada, piedra hidrofugada, piedra natural...etc.

CONCLUSIONES

La geología ofrece la posibilidad de conocer con detalle la naturaleza, origen, composición y deterioro de los materiales históricos que constituyen nuestro Patrimonio. Dicho conocimiento sirve a su vez para plantear estrategias de conservación adecuadas y establecer prioridades a la hora de actuar en edificios, yacimientos y objetos arqueológicos. Además, también permite introducir material nuevo y soluciones conservadoras eficaces pero a la vez compatibles y respetuosas con el Patrimonio.

Además, con los estudios geológicos se aprenden técnicas constructivas y de procesado de materiales propios de siglos pasados que pueden ser muy útiles en las labores de conservación.

Agradecimientos

Al Instituto de Estudios Riojanos y a Juan Manuel Tudanca por organizar estas conferencias e invitarnos a participar en a ellas.

BIBLIOGRAFÍA

CARO CALATAYUD, S. (1994). *Piedra, ladrillo y mortero: Características y alteración. Alfaro, Calahorra y Logroño*. Instituto de Estudios Riojanos, Ciencias de La Tierra, 16, 322 p.

CARO CALATAYUD, S.; PASCUAL BELLIDO, N.; PAVÍA SANTAMARÍA, S. (1996). "Tráfico y alteración del material de construcción en la ciudad de Logroño, La Rioja" en *Zubía*, monográfico nº8, pp. 245-274.

CARO CALATAYUD, S.; PAVÍA SANTAMARÍA, S. (1998). "Alteración y conservación de los yacimientos de huellas de dinosaurio de La Rioja. "La Virgen del Campo" (Enciso) y "La Era del Peladillo" (Igea)" en *Zubía* nº16, pp. 199-232.

CARO, S.; PAVÍA, S.; GONZÁLEZ, L.I. (1997). *Práctica de conservación: Estudio previo y restauración*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de La Rioja. Logroño. 150p.

PAVÍA SANTAMARÍA, S. (1994). *Material de construcción antiguo de Logroño y La Rioja Alta: Petrografía, propiedades físicas, geología y alteración*. Instituto de Estudios Riojanos, Ciencias de La Tierra, 17, 257 p.

PAVÍA, S.; BOLTON, J. (2000). *Stone, brick and mortar*. Col. II. Wordwell Publications. Bray. 296 p