

Métodos para la limpieza física, química y biológica de las fábricas de piedra de monumentos históricas.

El caso de San Lorenzo del Real de Burgos

Methods for physical, chemical and biological cleaning of historic stone-masonry monuments

J. Garabito^{(*)(**)}, J. M. Manso^(**), Á. Rodríguez^(**), J. C. Garabito^(**), V. Calderón^(**)

RESUMEN

El presente artículo muestra el proceso de restauración de las fábricas de piedra en monumentos históricos. La intervención tiene que llevarse a cabo de acuerdo a la personalidad del monumento, recuperando su aspecto original. En este artículo se describe el proceso de restauración de la fachada principal de la Iglesia de San Lorenzo el Real en Burgos (España), como un ejemplo de monumento histórico situado en ambientes urbanos. En primer lugar, se realiza una investigación histórica y se recopila toda la documentación existente tanto de su evolución constructiva como de la naturaleza de sus materiales. Caracterizamos las diferentes variedades de piedra caliza y analizamos los morteros de juntas de las fábricas de piedra. Una vez conocidas las características y propiedades de los materiales y su grado de deterioro, se establecen los métodos de limpieza a utilizar. Las actuaciones realizadas han conseguido recuperar el monumento, con la restauración de la fachada principal.

655-7

Palabras clave: Metodología de limpieza de piedra; piedra caliza; mortero tradicional; monumentos históricos.

SUMMARY

The restoration process of historic stone-masonry monuments is described in this article. The intervention has to be conducted according to the specific character of the monument while recovering its original appearance. The restoration process of the principal facade of the Church of San Lorenzo el Real, Burgos (Spain) is described in this article, as an example of a historical monument located in an urban environment. In the first place, the history was researched and a compilation was made of all the extant documentation on its constructive evolution and the nature of its materials. We characterized the different types of limestone and we analyzed the mortar bonds in the masonry. Once the characteristics and the properties of the materials were known and their degree of decay, cleaning techniques were selected. The programme of work successfully renovated the church building, through the restoration of its main façade.

Keywords: Cleaning methodology; limestone; traditional mortar; historic churches.

(*) Arquitecto Director de la Santa Iglesia Catedral Basílica de Burgos (España).

(**) Escuela Politécnica Superior-Universidad de Burgos (España).

Persona de contacto/Corresponding author: jgarabito@ubu.es (J. Garabito)

1. Fachada principal de la Iglesia de San Lorenzo el Real.

1. INTRODUCCIÓN

Los edificios históricos situados en el medio urbano sufren habitualmente una serie de procesos patológicos comunes de diferente naturaleza, tales como contaminación atmosférica, acciones de la fauna y antrópicas, y la presencia de vegetación, que alteran las características de los materiales con los que se han construido y que contribuyen a su deterioro y degradación (1) (2) (3).

La contaminación atmosférica, procedente en la mayor parte de los casos de los combustibles fósiles (4), produce alteraciones importantes en los materiales y es la responsable del deterioro tan acusado del patrimonio histórico en el último siglo.

Es destacable la acción que producen los seres vivos, especialmente las aves que tienen su hábitat en el entorno urbano, que depositan sobre la piedra residuos orgánicos agresivos tanto por su naturaleza como por su composición. La vegetación también contribuye al deterioro de las fábricas, desintegrando los materiales que coloniza y acumulando humedades que favorecen las alteraciones de naturaleza química en el material.

También contribuye a la degradación la propia acción del hombre, ya sea por el uso inadecuado, por las intervenciones restauradoras desafortunadas o por el descuido generalizado de las labores de conservación (5).

En este artículo se expone el proceso de restauración de la fachada de la Iglesia de San Lorenzo el Real, con materiales y procedimientos que son aplicables a las fábricas de piedra de los monumentos históricos españoles, mediante la utilización de técnicas de diagnóstico del estado de conservación no destructivas y tratamientos de intervención apropiados para la limpieza de las fábricas originales de piedra natural en edificios históricos, respetuosos con el espíritu y el trabajo de los artistas y maestros de obras que lo construyeron.

2. OBJETIVOS DE LA INTERVENCIÓN

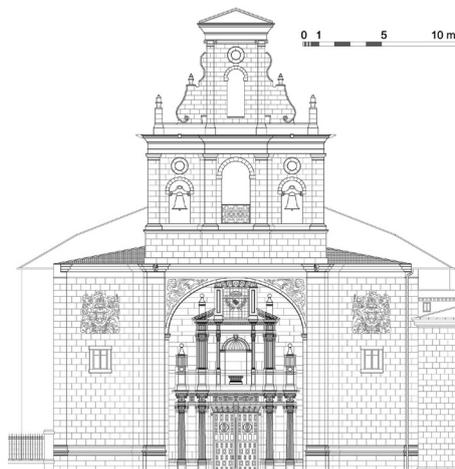
La intervención pretende restaurar la fachada del templo, utilizando técnicas adecuadas a la naturaleza de los materiales originales usados en su construcción (6). Para ello tenemos en cuenta los siguientes objetivos:

1. Reunir la documentación necesaria para conocer en profundidad la historia del templo y las técnicas utilizadas en su construcción.

2. Estudio de las características de los materiales que componen la fachada. Este estudio se centra en la caracterización de la piedra y de los morteros utilizados en la construcción de muros.
3. Análisis de los agentes patógenos que han alterado el material, llevando a cabo una descripción experta de las áreas afectadas.
4. Elección de los tratamientos y técnicas de restauración, basado en los estudios previos, así como equipos y productos que se utilizan en la intervención.

3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA IGLESIA DE SAN LORENZO DEL REAL

La Iglesia de San Lorenzo el Real es un templo de culto cristiano de estilo barroco emplazado en el casco histórico de la Ciudad de Burgos, España (Figura 1).



San Lorenzo fue en sus orígenes un templo de la Compañía de Jesús, antiguo colegio jesuita de San Salvador, construido entre 1684 y 1694 en sustitución de un edificio anterior de menores proporciones. La obra fue costeada con el patrocinio y mecenazgo de D.^a Francisca de San Vitores y erigida por los maestros Bernardo de Hazas y Francisco del Pontón (7). Tras la expulsión de los jesuitas de España a finales del siglo XVIII, la iglesia se convirtió en parroquia diocesana.

Esta construcción es una obra típicamente barroca, construida completamente de nueva planta, y sin ningún condicionante de los templos anteriores que en este solar existieron. Desarrolla una estructura de planta centralizada, con un trazado octogonal, rodeado por capillas. Este espacio central se encuentra delimitado por cuatro esbeltos pilares cruciformes. Su cubierta se resuelve con una cúpula con linterna, dispuesta sobre un anillo moldurado de perfil quebrado, sujeto por ménsulas y pechinas en las esquinas.

Aunque el edificio es una obra barroca, en la portada principal se aprecia un aspecto clasicista. Esta fachada principal se concibe con grandes columnas y pilastras de orden corintio, remates en bolas y frontón partido por una ventana, sobre el que se abre una hornacina con el santo titular. Dos grandes escudos flanquean la portada, tal y como se aprecia en la Figura 1. Es singular la solución arquitectónica de situar la torre, un prisma macizo más ancho que largo, de manera que prolongue la fachada en uno de sus lados que, a su vez, es rematado con una espadaña. La piedra utilizada en la composición de la portada es *facies Hontoria*, caliza también empleada en la construcción de la cercana Catedral de Burgos.

4. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN Y ESTUDIO DE LOS PROCESOS PATOLÓGICOS

Las Iglesias históricas de Castilla están situadas en el centro de las ciudades, expuestas a la acción de gases de combustibles procedentes de vehículos y calefacciones, que junto a las variaciones atmosféricas propias del clima continental poco húmedo (8), provoca que su aspecto sea el de un edificio muy afectado por el deterioro medioambiental.

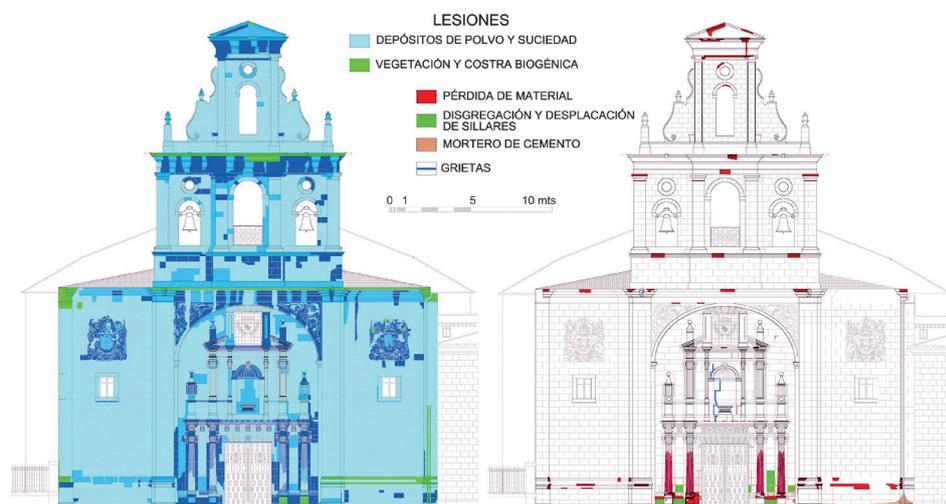
Para conocer el estado del edificio y determinar los principales procesos patológicos que afectan a la fachada (9), se hace un estudio profundo de la misma y se recoge toda la documentación existente sobre anteriores intervenciones. Las primeras observaciones permiten afirmar que la fachada de la Iglesia de San Lorenzo el Real adolece de afecciones propias de los edificios históricos ubicados en los núcleos urbanos de las ciudades (10).

La suciedad que impregna la superficie de la piedra, las cornisas y los resaltes de los relieves es abundante y está formada por polvo, hollín y excrementos de palomas y cigüeñas, éstas últimas residentes habituales en la torre, especialmente en la espadaña y en la linterna que corona la cúpula.

La humedad también es notoria en las zonas en las que se acumula la suciedad, así como las plantas menores, que han colonizado la superficie de la piedra. Musgo y líquenes aparecen por amplias zonas de la fachada, especialmente en zonas protegidas, cornisas y el zócalo.

La experiencia nos muestra que la piedra se encuentra afectada por la acción del agua de lluvia, por lavado y por la acción del hielo, muy habitual este último durante

2. Mapeado de las lesiones de la fachada de San Lorenzo.



3. Colonización biogénica y vegetación.

gran parte del año por las bajas temperaturas registradas en esta zona geográfica (11).

Una descripción pormenorizada de estos procesos patológicos se expone a continuación (Figura 2).

4.1. Humedades

Las humedades producidas por el agua de lluvia son una de las principales causas del deterioro que sufre la piedra con la que se construyó la iglesia. Se puede observar el diferente aspecto que presenta la piedra expuesta a la intemperie de la piedra protegida en el interior del templo.

Es notorio el alto grado de deterioro de los elementos decorativos más expuestos situados en el cuerpo superior de la fachada, como es el caso de los pináculos, que se encuentran muy dañados superficialmente. Debido al continuo lavado por el agua de lluvia se ha producido el arrastre de las partes más blandas de la piedra, y ha propiciado la presencia de ampolladuras y escamas, llegando a la pérdida de material en las zonas más delicadas.

Un efecto de deterioro mecánico evidente ha sido la acción del hielo (12). Son muchos los sillares que presentan pérdida de material, por la acción del hielo al congelarse el agua que penetra en los poros de la piedra y es en el zócalo de la fachada donde el efecto del hielo ha producido los mayores deterioros. Este fenómeno ha sido probablemente aumentado por la presencia de la sal que se utiliza para deshelar durante el invierno. En esa zona se observan múltiples reparaciones realizadas durante el siglo XX con morteros de cemento lo que, lejos de solucionar el problema, lo ha agravado aún más, especialmente por la acción de las sales formadas en las zonas reparadas.

Es también evidente la acción del agua combinada con sales, hollín y gases de combustión. La degradación de la piedra caliza debida a la acción de contaminantes atmosféricos es bien conocida (13). La conversión del anhídrido sulfuroso en anhídrido sulfúrico y su actuación sobre la caliza (carbonato cálcico), transformándola posteriormente en sulfato cálcico (yeso) (14) se evidencia en las zonas superficiales de los sillares y relieves (15).

Este proceso se produce sobre todo en las zonas no lavadas directamente por el agua de lluvia, pero indirectamente afectadas por la humedad, como es el caso de las columnas y basas de la portada de acceso al templo.



3

Por otra parte, la presencia de morteros de cemento, muy utilizados en las restauraciones llevadas a cabo durante el siglo pasado, tanto para el rejuntado de las fábricas como para la reintegración de pequeños volúmenes, también ha sido un importante factor de deterioro. La acción de la humedad sobre estos morteros de cemento provoca la formación de sales en la piedra caliza, lo que produce su lenta degradación (16).

Este efecto se aprecia con gran intensidad en el cuerpo inferior de la fachada, donde anteriores intervenciones para rellenar las juntas de los sillares con mortero de cemento y la presencia de agua capilar procedente del suelo han provocado una evidente alteración de los sillares y su práctica descomposición superficial (17) (18).

Por último, la pérdida de material en las cornisas y guardapolvos provoca la circulación del agua de lluvia por caminos imprevistos, que humedecen la piedra situada en cotas inferiores.

4.2. Suciedad

Como ya se ha explicado, las partículas de suciedad, polvo y hollín se acumulan fundamentalmente en las zonas más protegidas de las fachadas, como son las zonas inferiores de las cornisas, guardapolvos y relieves, es decir, en zonas donde no llega el agua de lluvia y no se produce el lavado de las mismas. Una primera observación permite identificar las zonas de máxima acumulación de suciedad en los elementos labrados como escudos, relieves y enjutas.

La suciedad en principio es sólo un factor de deterioro estético pero, combinado con la humedad, constituye causa de degradación. La formación de costras negras de carácter yesífero favorece procesos de alteración físico-químicos en la superficie de la roca, provocando su reblandecimiento y posterior pérdida de volumen (19). Este proceso se observa también en zonas determinadas de la fachada, aunque no de forma generalizada.

4.3. Vegetación y costra biogénica

La vegetación se desarrolla principalmente en las zonas de la piedra donde se han producido fisuras, grietas o pérdida de material. También en las juntas de los sillares en las que ha desaparecido el mortero. La humedad acumulada contribuye al crecimiento de plantas y pequeños arbustos (Figura 3).

Las colonias de musgo y líquenes se localizan en las cornisas de la zona superior, en

las canaletas de evacuación del agua de lluvia y en los huecos de los paramentos lisos, en los vierteaguas en los pináculos y en la balaustrada. Las plantas mayores y arbustos han colonizado las zonas horizontales donde el polvo y la suciedad acumulados han propiciado el crecimiento de semillas aportadas por las deposiciones de aves.

Se observan roturas de la matriz rocosa por la acción de las raíces de pequeños arbustos, algunos muy evolucionados y desarrollados.

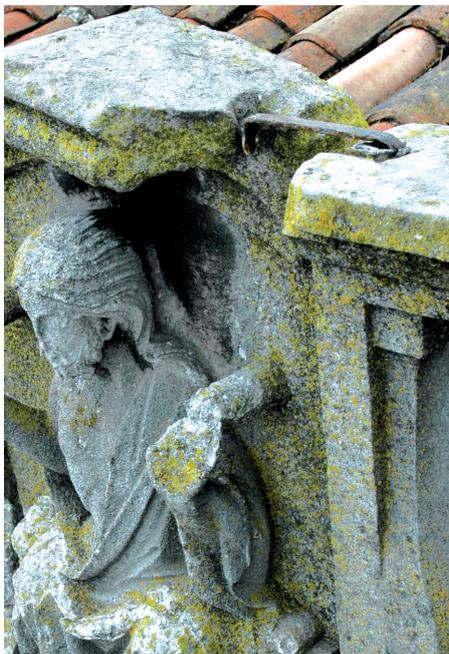
4.4. Oxidación de elementos metálicos

También se evidencia la presencia de oxidaciones en los elementos metálicos tales como grapas, anclajes y vástagos, utilizados para el atado y sujeción de los elementos escultóricos de la fachada (Figura 4). Se observa especialmente en las grapas y anclajes de hierro, lo que ha producido la fisuración y rotura como consecuencia del incremento de volumen del proceso de oxidación del hierro, dando lugar al desprendimiento y caída al suelo de pequeños fragmentos pétreos.

Esta lesión se ha producido también en los elementos decorativos superiores, es decir, en balaustrada y pináculos.

4.5. Biodepósitos

La última lesión relevante que se aprecia en la inspección visual son los depósitos orgánicos generados por las aves que anidan y viven en los alrededores de la iglesia, ya sea en forma de excrementos o de restos de aves muertas.



4

La presencia de palomas y cigüeñas es muy abundante y han hecho de la iglesia su hábitat natural. En el momento de la intervención se contabilizaron cinco nidos de cigüeña ubicados en la fachada de la iglesia, en la torre y en su linterna.

Los efectos de deterioro más evidentes son la acumulación de excrementos y la consiguiente obturación de pesebrones, canales y bajantes de la cubierta por los objetos desprendidos, traídos para la construcción de los nidos.

5. ESTUDIOS PREVIOS A LA INTERVENCIÓN ACTUAL

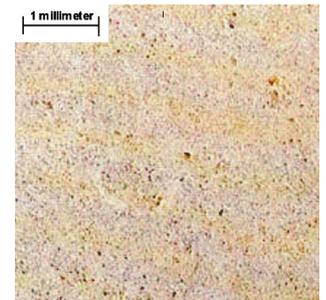
Conocidas los procesos patológicos que afectan a la fachada principal de la iglesia de San Lorenzo el Real, comunes a los edificios históricos de similares características que hemos mencionado anteriormente, y después de estudiar la documentación recogida respecto de las actuaciones acometidas en anteriores intervenciones, se establece un programa de trabajo que se detalla a continuación:

- Caracterización de las propiedades petrológicas y de composición de la piedra utilizada en la fachada principal.
- Determinar la naturaleza de las costras superficiales de la piedra y las posibles afecciones del sustrato pétreo.
- Estudio de los morteros utilizados en el sentado de las fábricas de piedra, analizando su naturaleza, composición y el tipo de conglomerante utilizado en su dosificación.
- Selección de las técnicas de limpieza y de los tratamientos más adecuados a las características de los materiales caracterizados con su grado de deterioro.

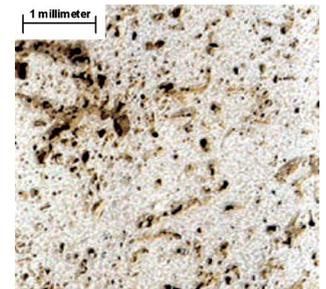
La intervención restauradora seguirá el criterio de la mínima alteración de los materiales tratados, conservando en lo posible su naturaleza original, y respetando en todo momento el espíritu de los artistas que idearon este monumento.

6. ESTUDIO DE LOS MATERIALES PÉTREOS DE LA FACHADA DE SAN LORENZO EL REAL

Al analizar la documentación recogida para el estudio previo de la intervención arquitectónica restauradora, se observa que en la fachada principal de la Iglesia se utilizaron dos tipos de piedras calizas de diferente naturaleza y composición: piedra Caliza de Páramo en la ejecución de los paramentos lisos y piedra Caliza de Hontoria en los paramentos labrados (Figuras 5 y 6) (Tabla 1).



5



6

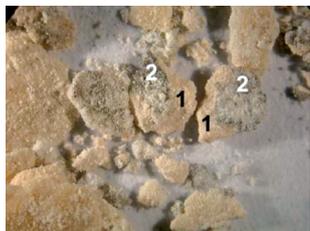
4. Oxidación de grapas de hierro en anclajes.

5. Aspecto de la "Caliza de Hontoria".

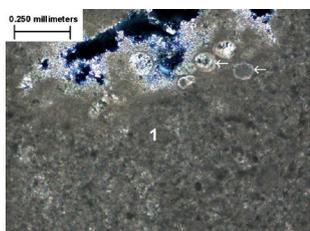
6. Aspecto de la "Caliza de Páramo".



7



8



9



10

- 7. Muestra de caliza de páramo con contra superficial.
- 8. Material pétreo disgregado (1) y costra superpuesta (2).
- 9. Micrita (1) con inclusión de carécidos (flechas).
- 10. Sales superficiales en la "Caliza de páramo" descohesionada.

Tabla 1.

	Caliza De Páramo	Caliza De Hontoria
Densidad	2,51 g/cm ³	2,14 g/cm ³
Coefficiente de absorción	1,9%	6,8 %
Resistencia mecánica a compresión	62,21 MPa	23,0 MPa
Resistencia mecánica a flexión	0,97 MPa	1,420 MPa
Resistencia al desgaste	9,46 mm	7,11 mm
Resistencia al impacto	25,00 cm	23,35 cm
Módulo de heladicidad	0,07 %	0,08 %

Con el objetivo de confirmar la naturaleza del material pétreo utilizado y para determinar las técnicas y procedimientos de restauración más apropiados a la composición química y estado de la piedra, se hace un estudio mineralógico y petrológico sobre ella. Se ha distinguido en el análisis entre la zona interior, de carácter pétreo, y la costra superficial de tonalidad más oscura, que se aprecia en amplias zonas de la superficie de la fachada.

De igual forma, se analizan los morteros de juntas en las diferentes zonas de la sillería de la fachada, tanto de la parte más superficial como del interior, con el objetivo de comprobar si ha habido sustitución de material en intervenciones precedentes. Se han tomado muestras tanto del mortero de junta como de algunos recubrimientos localizados en distintas zonas de la fachada.

Se realiza una descripción de la textura y naturaleza mineralógica de la roca, preparando láminas delgadas de las muestras recogidas, mediante microscopía óptica de luz transmitida.

Las fases cristalinas de las muestras estudiadas se han identificado mediante Difracción de Rayos X (XRD), sobre polvo desorientado obtenido por molturación de las muestras. Para ello se empleó un difractor Siemens D 5000 que cuenta con un programa de identificación automática de

fases apoyado en una base de datos JPDS-PDF2 con 137.000 patrones de fases cristalinas de referencia (subbase mineral con 15.800 patrones). Se ha utilizado radiación K α Cu, monocromador de grafito, una diferencia de potencial en el tubo de 40 kV y una intensidad de 20 mA en el filamento; los análisis se han realizado en el intervalo 2 θ : 2-62°.

También se ha utilizado la microscopía electrónica de barrido y el microanálisis mediante espectrometría de dispersión de Rayos-X (SEM-EDX), para el estudio de la textura y composición de las muestras de los recubrimientos y de la roca caliza utilizada en los relieves de fachada, con más alteraciones observadas. El equipo empleado fue JEOL JSM 6400.

Los resultados de los análisis mineralógicos tanto macroscópicos y microscópicos, así como de la composición de los materiales ensayados en cada una de las rocas y morteros analizados, han sido los siguientes:

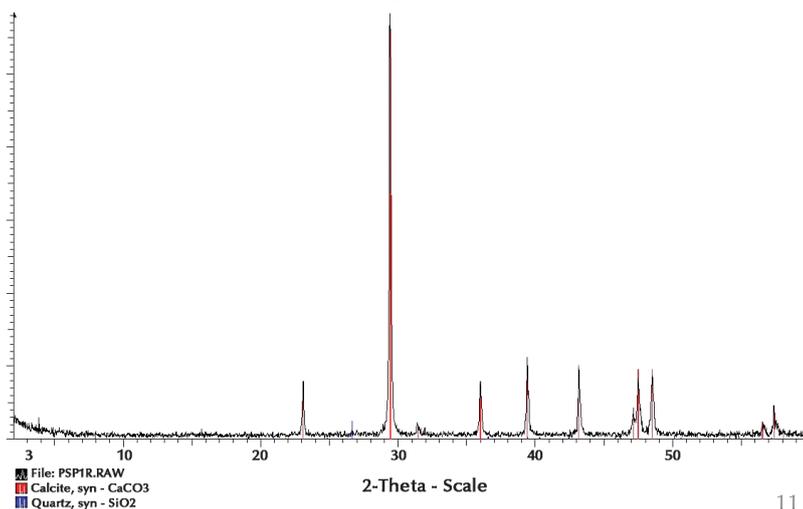
6.1. Material pétreo de las fachadas

6.1.1. Piedra caliza de páramo

De la documentación recogida se deduce que la piedra caliza de páramo utilizada en la ejecución de los paramentos lisos de la fachada de la Iglesia es originaria de Carcedo de Burgos, localidad próxima a la ciudad de Burgos. Es conocida como Piedra de Carcedo y en la actualidad todavía se comercializa. Este tipo de piedra ha sido empleada en numerosas edificaciones de Castilla.

Esta roca es calificada como "caliza de páramo" y es dura, compacta y muy homogénea, en transición a una facies marmórea, de naturaleza micrítica, con inclusiones de cuarzo y óxidos de hierro. Al estar situada en la fachada está muy afectada por una costra superficial de espesor variable y tonalidad marrón oscuro, con señales de microdisolución (Figura 7).

Para el estudio se toma una muestra de la zona menos degradada, en la que la roca conserva su cohesión (Figura 7), y otra



11

de roca descompuesta muy alterada, con principios de desintegración (Figura 8). En ambos casos también se toman muestras de las costras que las cubren.

La microscopía óptica de transmisión permite observar que la muestra cohesionada es una roca carbonatada de grano fino (micrítica), con restos fósiles y presencia de granos de cuarzo. La micrita supone el 80% de la composición de la muestra analizada, con distintos grados de cristalización y un tamaño de partícula inferior a $4\ \mu\text{m}$ en las zonas no recristalizadas, y tamaños entre $4\ \mu\text{m}$ y $8\ \mu\text{m}$ en los núcleos con material recristalizado.

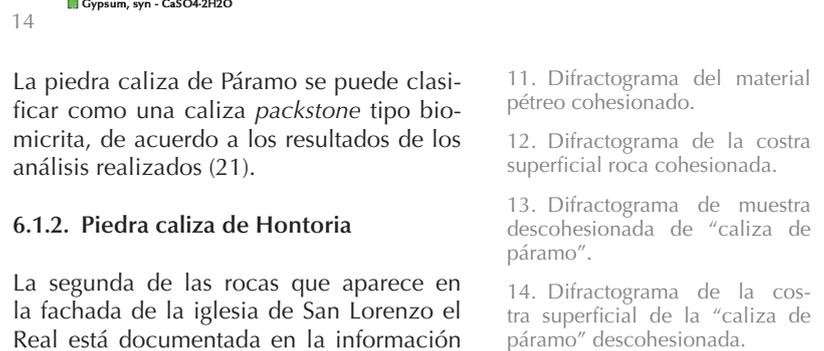
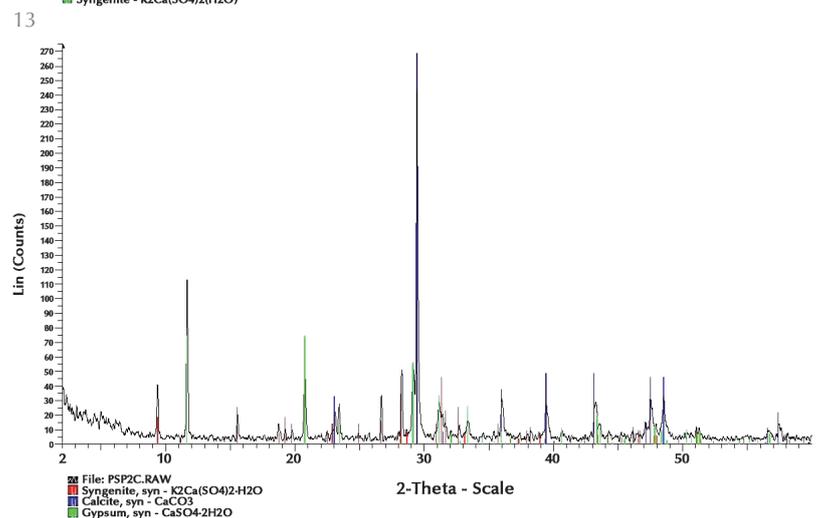
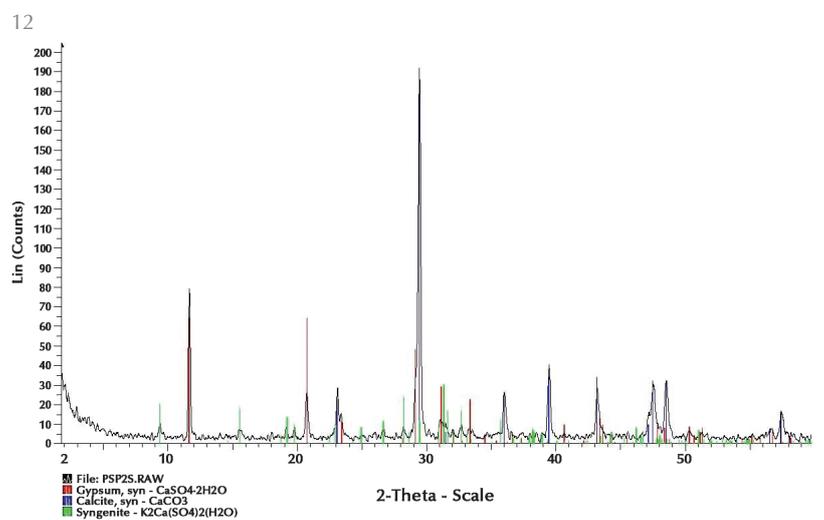
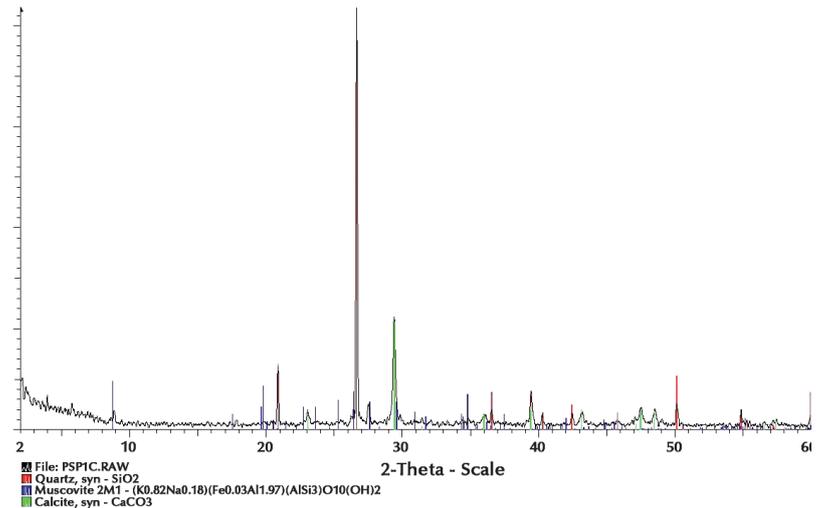
Junto con la micrita se localizan restos algales, como tubos de caráceas y peloides micríticos de tamaños variados, junto con zonas porosas (20) relacionadas con actividad algal, representando estos compuestos en su conjunto el 10% de la muestra analizada (Figura 9). Alguno de los poros de origen algal y tamaño irregular se observan rellenos de un cemento de carbonato cálcico, compuesto por cristales de esparita de un tamaño próximo a las $30\ \mu\text{m}$.

Aparecen también pequeñas inclusiones de óxidos de hierro próximas a las zonas porosas y agrietadas de escaso desarrollo, junto con granos de cuarzo de tamaño limo y arena muy fina ($62\text{-}125\ \mu\text{m}$).

El análisis por Difracción de Rayos-X muestra una composición de la muestra de roca muy homogénea, en la que el mineral mayoritario es calcita, con minoritarias reflexiones de cuarzo (Figura 11). La muestra de costra superficial contiene también calcita en el sustrato pétreo, acompañada de trazas de cuarzo y moscovita (Figura 12).

La muestra de roca descohesionada y con material pulverulento está localizada sobre una base caliza de color crema, grano fino y muy homogénea (Figura 10). Está compuesta en su mayor parte por material carbonatado suelto y deposiciones salinas. La costra de suciedad que cubre la muestra también contiene este material salino (Figura 10).

Los difractogramas correspondientes al material descohesionado (Figura 13) muestran formaciones de calcita en el sustrato y de yeso en la costra, coherentes con un proceso de yesificación, además de reflexiones de singenita $[(\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O})]$. En la costra que la cubre, además de la calcita y la singenita, se observan importantes cúmulos de yeso, siendo éste el componente principal de esta capa superficial (Figura 14).



La piedra caliza de Páramo se puede clasificar como una caliza *packstone* tipo biomicrita, de acuerdo a los resultados de los análisis realizados (21).

6.1.2. Piedra caliza de Hontoria

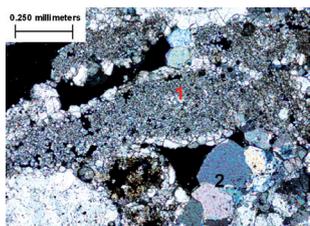
La segunda de las rocas que aparece en la fachada de la iglesia de San Lorenzo del Real está documentada en la información

11. Difractograma del material pétreo cohesionado.

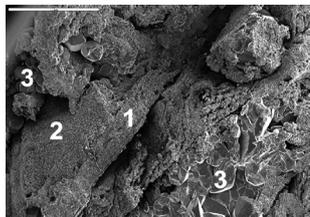
12. Difractograma de la costra superficial roca cohesionada.

13. Difractograma de muestra descohesionada de "caliza de páramo".

14. Difractograma de la costra superficial de la "caliza de páramo" descohesionada.



15



16

15. Caliza de Hontoria: Agregado microesparítico (1) formado por cristalización de la micrita y esparita (2) y cemento de calcita.

16. Caliza de Hontoria: Imagen SEM donde se observa una concha cristalizada (1), cemento esparítico (2) y calcita esparítica (3).

recogida como una “Caliza de Hontoria”, extraída en la localidad burgalesa de Hontoria de la Cantera (22). Esta piedra se ha utilizado en los monumentos más singulares de la provincial de Burgos, como en la Catedral de Burgos, que es la única catedral española declarada como Patrimonio de la Humanidad por la Unesco.

Esta roca se localiza principalmente en los paramentos labrados de la portada y, como en el caso anterior, se encuentra recubierta de una costra negra de espesor irregular.

Para confirmar su origen se analiza macroscópica y microscópicamente tomando muestras tanto del sustrato pétreo como de la pátina que la recubre.

Se toman muestras de roca representativas y se analizan microscópicamente observando que se trata de una roca caliza de grano fino, con presencia de bioclastos muy fragmentados (50%) y ortoquímicos que se corresponden con una cementación

calcítica (Figura 16). Es abundante la presencia de bivalvos con textura multicapa, espinas de equinodermos, briozoos y foraminíferos, todos ellos recristalizados. Los tamaños oscilan entre los 500 y 600 μm.

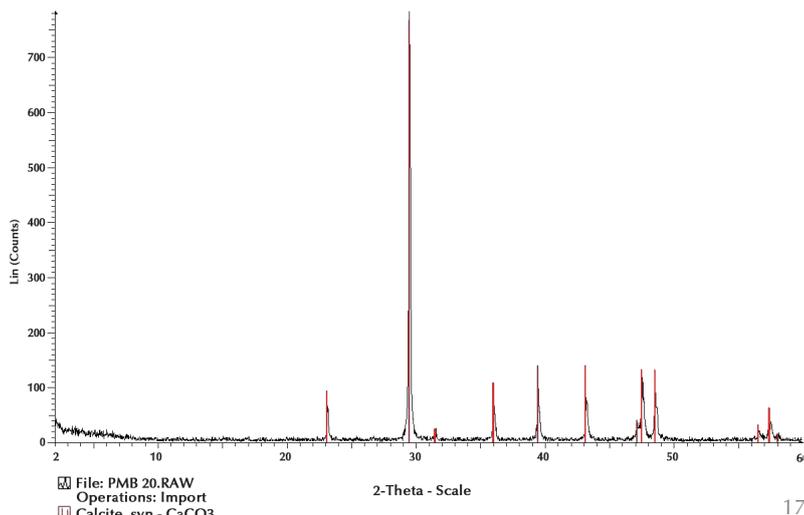
Junto con estos componentes aparecen también peloides redondeados de tamaño comprendido entre 200 y 300 μm y con texturas recristalizadas a microesparita, probablemente de origen algal (Figura 15). De igual forma, se observan concentraciones de micrita y microesparita (15%) de tamaño inferior a 10 μm, procedente probablemente de la recristalización de la primera (Figuras 15, 16 y 17).

Todos los indicios analizados demuestran que las muestras se corresponden con una caliza packstone tipo bioesparita (21).

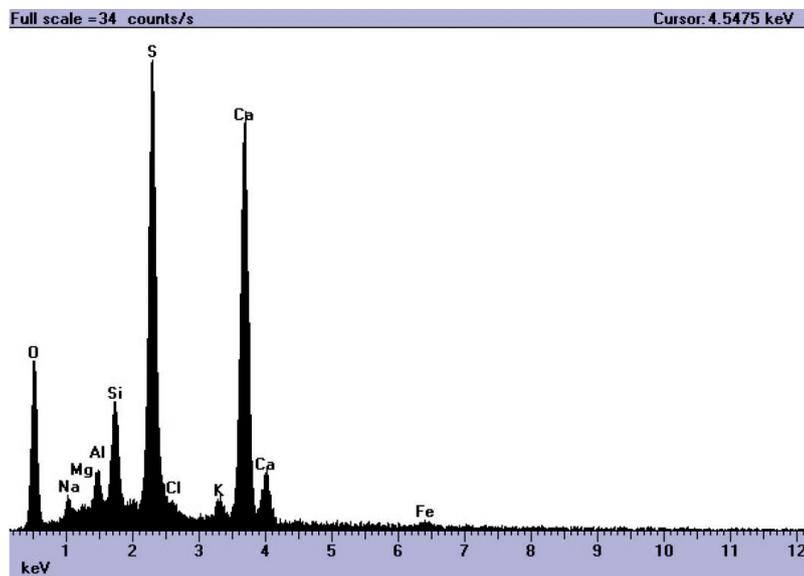
Las capas que recubren el sustrato calizo son de color gris y marrón, translúcidas, de textura homogénea y un espesor máximo de 165-170 μm, y medio de 80-90 μm y se analizan tras la recogida de muestras por raspado. El estudio de su composición mediante microscopía electrónica indica que está compuesto por yeso (Figura 18).

La capa oscura exterior más o menos translúcida también está compuesta por yeso (Figura 19) y presenta un espesor medio entre 50-60 μm, estando separada de la anterior capa de color marrón grisáceo por una delgada pátina de arcillas, oxalatos y cal de 10 μm de espesor.

Las pátinas de color anaranjado, con zonas claras salpicadas de partículas rojizas y negras están compuestas por concentraciones de yeso y pequeños porcentajes de partículas de arcilla y oxalatos. Los puntos negros son partículas de suciedad procedentes de contaminantes atmosféricos que configuran una última capa superficial oscura, discontinua y de escaso espesor (Figuras 20 y 21).



17



18

6.2. Morteros de juntas y recubrimientos

Para el estudio de los morteros utilizados en el sentado de la fábrica de piedra de la fachada se analizan muestras representativas de diferentes zonas del paramento. Se toman dos muestras superficiales de mortero de juntas (M-1, M-2) y otras dos del interior (M-3, M-4) (Tabla 2), y se realizan los correspondientes análisis para determinar sus características.

Las muestras analizadas se corresponden con morteros de cal fabricados con áridos silíceos de diferente granulometría (Tabla 3). El color predominante es el beige en diferente tonalidades que van desde el

oscuro al muy claro. Las muestras M-1 y M-2 son fácilmente deleznable entre las manos, mientras que las muestras M-3 y M-4 están más cohesionadas.

El estudio microscópico de las cuatro muestras de mortero nos muestra en todos los casos la presencia de carbonato cálcico procedente de la carbonatación de la cal en forma de calcita, esparita o micrita, observando en algunos casos la presencia de caliches carbonatados (Figuras 22 y 23).

El árido es fundamentalmente silíceo, de naturaleza cuarcífera, 90% monocristalina y 10% policristalina, de origen metamórfico (cuarcita), observándose la presencia de otros componentes minoritarios tales como feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo cristalino o moscovita, junto con trazas de circón y turmalina (Figuras 24 y 25) (Tabla 4).

Por el contenido de cal en la preparación, los morteros M-1 y M-2 son de carácter magro, mientras que las muestras correspondientes a los morteros M-3 y M-4 presentan mayor proporción de cal en la dosificación, por lo que son de composición más grasa (23).

El tamaño de grano de los áridos silíceos contenidos en las cuatro muestras de morteros es variable y responde a una mezcla de diferentes tamaños de arenas. La distribución porcentual se recoge en la Tabla 3.

El resultado de los análisis se corresponde con las propiedades y características de un mortero de cal fabricado con una arena silíceo de grano fino acompañada de una pequeña fracción de arcilla y feldespatos.

Tabla 2. Características macroscópicas de los morteros de juntas de superficie e interior

Muestra	Color	Textura	Cohesión
M-1	Beige oscuro	Deleznable	Deficiente
M-2	Beige claro	Deleznable	Deficiente
M-3	Beige muy claro	No deleznable	Buena
M-4	Beige muy claro	No deleznable	Muy buena

Tabla 3. Granulometría del árido de los morteros (% en peso)

Tamaño	M-1	M-2	M-3	M-4
> 2 mm			4,4	
1-2 mm			1,7	0,8
1-0,5 mm	1,5	1,7	6,1	4,1
0,5-0,25 mm	33,8	32,8	29,3	35,3
0,25-0,125 mm	36,4	28,7	29,9	31,6
0,125-0,062 mm	12,3	15,6	14,2	14,1
< 0,062 mm	16,1	20,2	14,2	16,1

Tabla 4. Características microscópicas de los morteros de juntas

Muestra	Carbonatación	% Cal	% Sílice	Feldespatos	Otros	Tipo
M-1	CO ₃ Ca (Esparita) Presencia de Caliches	30-35	50	Plagioclasa Feldespato Potásico	Moscovita Clorita	Magro
M-2	CO ₃ Ca (Calcita)	30-35	40	Plagioclasa Feldespato Potásico	Moscovita Cuarzo cristalino	Magro
M-3	CO ₃ Ca (Micrita) Presencia de Caliches	50	30-35	Plagioclasa Feldespato Potásico	Cuarzo cristalino Circón	Graso
M-4	CO ₃ Ca (Esparita) Presencia de Caliches	40-45	40-45	Plagioclasa Feldespato Potásico	Moscovita Cuarzo, Turmalina	Graso

La relación cal/árido original es próxima al 50/50 y las formaciones cristalinas de su estructura microscópica son muy parecidas en todos los casos.

7. CRITERIOS DE INTERVENCIÓN: TÉCNICAS DE LIMPIEZA Y RESTAURACIÓN

Una vez realizado el estudio y caracterización de los materiales presentes en la fachada del monumento, en este caso de la iglesia de San Lorenzo el Real, así como el mapeado de las diferentes lesiones que afectaban a la misma, (Figura 2) el criterio seguido en el proceso de limpieza y consolidación ha sido el de "mínima intervención", (24) (25), limitándose a una limpieza general de la fachada, con el objetivo de igualar las diferentes áreas, respetando las pátinas antrópicas (10).

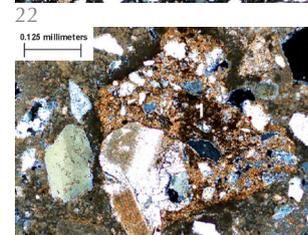
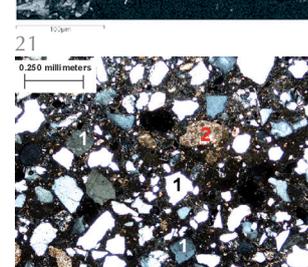
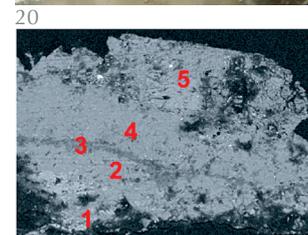
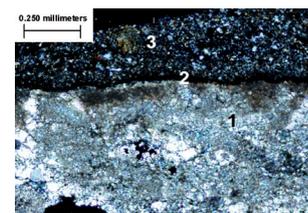
La reintegración de volúmenes pétreos deteriorados se ha limitado a lo imprescindible, ya que se ha centrado en elementos que cumplen una función en la canalización y evacuación de aguas de escorrentía.

La intervención se planificó en seis fases sucesivas:

- Preconsolidación
- Tratamiento de las juntas
- Limpieza
- Tratamiento biocida
- Hidrofugación
- Entonación y protección superficial

7.1. Preconsolidación

Los trabajos de intervención se iniciaron con la preconsolidación de los elementos



17. Caliza de Hontoria: Difractograma del sustrato pétreo.

18. Microanálisis de la pátina externa de la "Caliza de Hontoria".

19. Roca caliza (1) con una fina capa de pátina (2) y costra de naturaleza yesífera (3).

20. Detalle general del recubrimiento (el recuadro rojo se corresponde con la imagen SEM de la Figura 21).

21. Imagen SEM con sustrato calizo (1), capa de yeso (2), una fina capa de cal y tierra (3), otra capa de yeso (4) y otra capa rojiza de yeso porosa y más superficial (4).

22. Muestra de mortero M-1 donde se aprecia el predominio del árido silíceo (1) sobre el sustrato carbonatado (2), alguno en forma de caliches.

23. Muestra de mortero M-3 donde se observan fragmentos de roca carbonatada (1), con grano de cuarzo y fragmentos fósiles carbonatados.

24. Difractograma de la muestra M-1 de mortero de juntas de la superficie.

25. Difractograma de la muestra M-3 de mortero de juntas del interior.

pétreos y paramentos rocosos con material descohesionado o con un alto grado de deterioro, antes de realizar los tratamientos de limpieza. Los elementos decorativos tales como escudos, enjutas, capiteles, cornisas y el entablamento fueron tratados con un consolidante comercial, compuesto de

Esteres Etílicos del ácido Silícico [Si(OEt)₄]_n, disueltos en white spirit. La reacción de este producto con la humedad atmosférica produce la formación de un Gel de Sílice, que establece una fuerte unión química con el soporte (26).

Las características y propiedades así como los principios activos del consolidante Estel 1000 se muestran en la Tabla 5.

7.2. Tratamiento de las juntas

En general, el tratamiento de las juntas de muros y elementos ornamentales fue el siguiente:

En primer lugar se eliminaron las zonas reintegradas en las intervenciones anteriores con mortero de cemento o de resina, así mismo se eliminó el polvo, hollín, materiales orgánicos e incluso los morteros descompuestos o degradados.

El material degradado se eliminó manualmente hasta alcanzar el material sano, utilizando cepillos y aire con una presión moderada. Se tuvo especial cuidado de no dañar los labios de los sillares.

A continuación, las caras internas de la sillería se desengrasaron con disolventes (alcohol tricloroetileno, etilo) y se humedecieron con el fin de prepararlos adecuadamente para el rejuntado posterior.

El rejuntado se realizó con mortero tradicional de cal, compatible con los morteros existentes (27) compuesta de grasa cal, dosificado en peso 1:1, con agregado de sílice compuesta de cuarzo de color claro con tamaño de grano similar al tipo mortero M-2.

Por último se cepillaron la superficie de las juntas antes de que curase el mortero.

7.3. Limpieza

El tratamiento de limpieza inicial se realiza con agua a baja presión, para evitar afectar a las zonas preconsolidadas, utilizando cepillos no abrasivos, lo que permite eliminar los depósitos de polvo, la suciedad procedente de la contaminación y los excrementos de aves. En las zonas de difícil acceso, se utilizó un aspirador-depresor de aire.

Posteriormente, se procedió a actuar con microabrasión de precisión en toda la fachada, excepto en las zonas tratadas con Laser Artlight, evitando alterar la pátina presente sobre la caliza (28), asimismo, en ciertas zonas, se lleva a cabo una limpieza química (Tabla 6) (Figura 26).

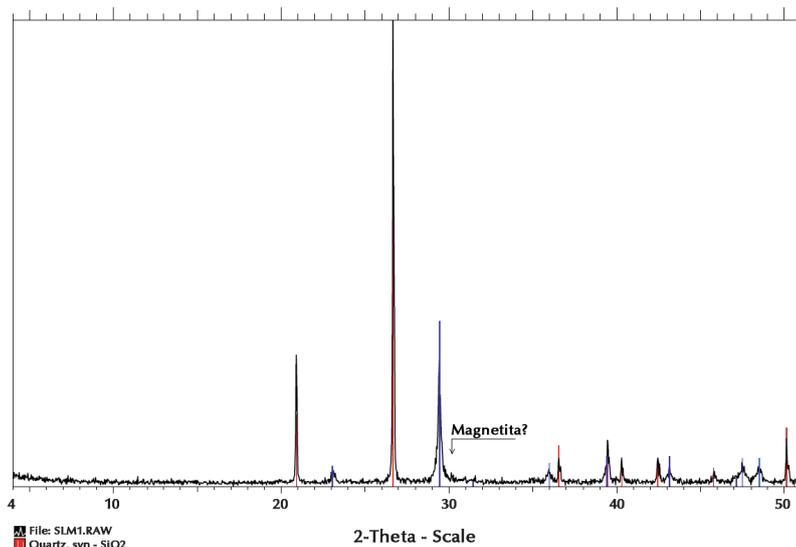
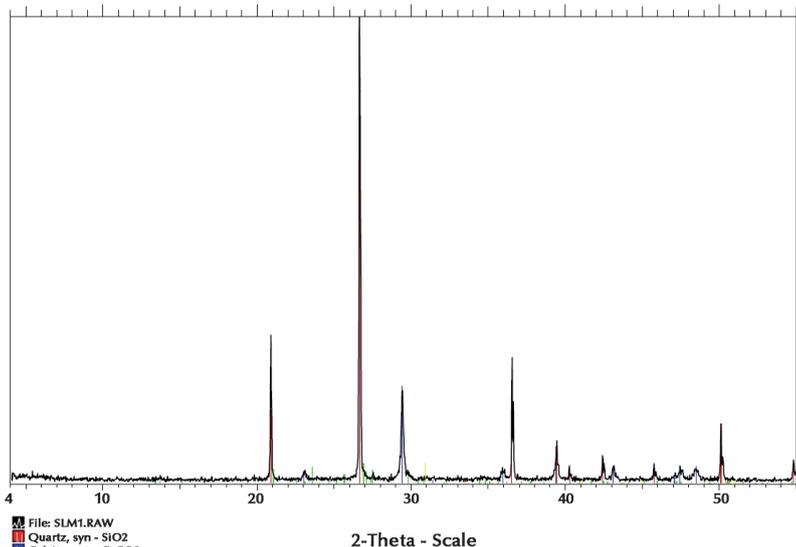


Tabla 5. Propiedades y principios activos del consolidante Estel 1000

Datos Físicos	
Principios activos	Tetra-etil-orto-silicato
Contenido principios activos	75 %
Solvente	White Spirit D40
Viscosidad, cp 20 °C	4,9
Densidad (Kg/l)	0,95
Residuo seco (%)*	mínimo 35 %

* Determinación efectuada según normativa BRITISH BOARD OF AGREEMENT ESTANDAR (BBA)

Tabla 6. Procedimientos de limpieza

Procedimientos de Limpieza	Área
Microproyección de partículas	En general, muros de fábrica de sillería y molduras
Limpieza Láser	Zonas ornamentadas o delicadas
Limpieza química	Áreas con costra negra
Tratamiento Biocida	Zonas afectadas por colonizaciones biológicas, tales como cornisas, gárgolas y pináculos.

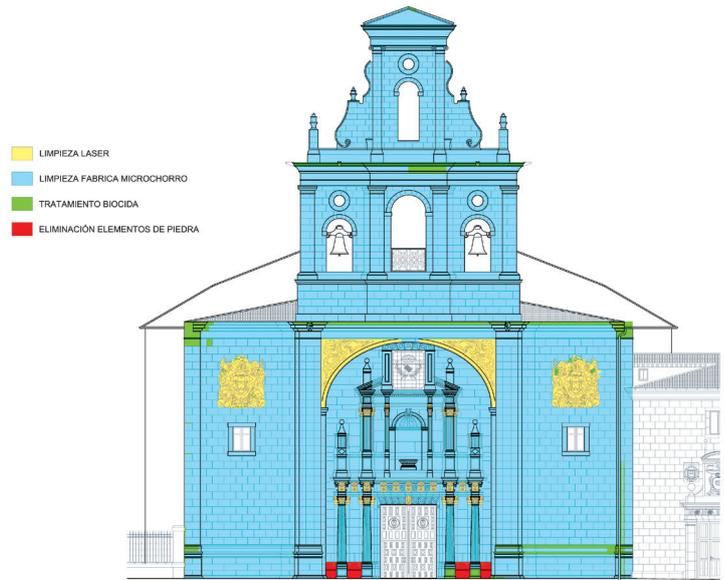
7.3.1. Limpieza mecánica.

Microproyección de partículas

Para la eliminación puntual de las concreciones, costa negra y suciedad adherida, se empleó microchorro de alta precisión y materiales de baja abrasividad (29).

Para la elección del abrasivo más adecuado y no afectar a la pátina natural del material se realizaron catas de limpieza en diferentes zonas de la fachada. Los resultados determinaron utilizar en el proceso de limpieza abrasivos que fueron distribuidos según el grado de suciedad y estado del soporte, cuyas características físico-químicas se detallan en las Tablas 7 y 8 que ordenados de forma creciente por su agresividad fueron:

1. Piedra pómez (PP). Abrasivo natural obtenido por trituración y posterior molienda de Piedra Pómez, de baja densidad y bajo poder abrasivo. Utilizado puntualmente en zonas de valor artístico, en las que se necesitada una limpieza muy controlada. Grado de suciedad bajo.
2. Microesferas de vidrio (MV). Utilizado puntualmente en zonas de valor artístico, en las que se necesitada una limpieza muy controlada. Grado de suciedad bajo. Utilización generalizada en la limpieza de la portada, en los paramentos lisos o con una labra sencilla. Grado de suciedad medio.
3. Silicato de aluminio (SA). Silicato de aluminio granulado procedente de cámara de combustión, lavado, secado y clasificado. Químicamente neutro. Tiene una friabilidad media, por lo que produce poco polvo. Puntualmente usado en paramentos lisos, en zonas con un grado de suciedad medio/alto, alto.
4. Olivino (O). Mineral compuesto casi en su totalidad de Silicato de Magnesio. Tiene una dureza media y es friable, por lo que produce polvo. Puntualmente usado en paramentos lisos, en zonas con un grado de suciedad medio/alto, alto.



26

7.3.2. Limpieza con láser

En las zonas más delicadas (30) y en las ornamentadas tales como los escudos o las dos enjutas (Figuras 27 y 28), se utilizó el método de "desincrustación fotónica", empleando un láser de fibra óptica especialmente diseñada para ser utilizado en la restauración LASER ARTLIGHT, con una potencia de 103 W/cm², longitud de onda de 1062 nm y una frecuencia de 3-10sP/A. Para facilitar los trabajos se empleó un equipo láser móvil tipo mochila, láser de clase 4 (31).

26. Procedimientos de limpieza de la fachada de San Lorenzo.

27. Proceso de limpieza láser de escudo.

28. Limpieza láser de capitel de la portada.



27



28

7.3.3. Limpieza química

La costra negra localizada en los escudos y enjutas se ha tratado con productos químicos neutralizados en húmedo, evitando los

Tabla 7. Características químicas de los abrasivos

Análisis Químico %										
Abrasivo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO/ Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO	Na ₂ O	K ₂ O	Otros	H ₂ O
PP	71,00	12,80	1,75	1,36			3,23	3,83		3,88
MV	72,5	0,4	0,2	9,8			13,7	0,1		
SA	49	28	9	6	2	1,5	1	3,5		
O	41	0,5	7,3	0,2	48				3	

Tabla 8. Características físicas de los abrasivos

Análisis Físico				
Abrasivo	Dureza Mohs	Densidad aparente g/cm ³	Peso específico g/cm ³	Índice de Friabilidad
PP	5-6	0,7	2,3	Alto
MV	6-7	1,48	2,5	4
SA	6	1,35	2,5	8
O	6,5-7	1,7	3,3	11

29. Estado de la fachada antes de la intervención.

30. Estado de los capiteles y del entablamento después de la intervención.

reactivos con ph. inferior a 5 o mayor de 8, así como los que por su naturaleza y composición pudieran generar sales solubles, muy perjudiciales para la piedra (32).

El agente básico utilizado para el tratamiento químico de la piedra es Mora Poulitice AB52, desarrollado por el Instituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro de Roma.

En el caso de las sales localizadas en el zócalo, la limpieza se realizó mediante aplicaciones sucesivas de papetas de Silicato de Magnesio Hidratado (Sepiolita, $Si_6Mg_4O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$), con procedimiento "Air-less", consistente en aplicar sucesivas capas del producto para extraer las sales depositadas. Se realizan controles después de cada aplicación hasta la estabilización de los niveles de iones.

7.4. Tratamiento biocida

Las zonas afectadas por colonias biológicas de carácter vegetal tales como musgo, algas, mohos y líquenes, se trataron con algicidas y fungicidas de amplio espectro, aplicando una disolución previa de Aldehído Fórmico al 1% con pulverizador "Air-less", y un segundo tratamiento a base de Amonio Cuaternario en disolución hidroalcohólica al 3-5% aplicado con fumigadores para favorecer su penetración en los intersticios de los elementos labrados de difícil acceso. Los restos biológicos secos se eliminaron mecánicamente.

Las zonas tratadas fueron las cornisas, vierteaguas y los pináculos, donde el agua se deposita con mayor facilidad.

7.5. Hidrofugación

Se tomó especial cuidado aplicando un hidrofugante, Silo 111, en las áreas que están especialmente expuestas al agua de lluvia, tales como las gárgolas y las superficies horizontales de las cornisas e impostas. Este hidrofugante está compuesto por Organosiloxanos Oligoméricos de bajo peso molecular formulado en Aguarrás Mineral Desaromatizado, con el fin de lograr una alta impregnación de los poros superficiales del material bajo tratamiento y una penetración determinada mediante la circulación a través de la red capilar de la piedra (20) y el mortero.

El material elegido actúa mediante un efecto hidropelente por reacción de policondensación con la humedad atmosférica (26).

La elección de este tipo de hidrofugante se justificó por la ausencia de elementos filomógenos y variaciones cromáticas sobre la piedra, así como una larga duración en el tiempo.

7.6. Entonación y protección superficial

Para conseguir una entonación y protección superficial eficaz de todo el conjunto de la fachada se procedió a impregnar los paramentos de piedra y las juntas de mortero con una solución acuosa de hidróxido de cal ($Ca(OH)_2$) y pigmentos naturales, utilizando un pulverizador manual. La técnica fue la aplicación en diferentes capas, a modo de veladuras, hasta conseguir la entonación adecuada.

La dosificación de los reactivos y de los pigmentos naturales utilizados se determinó mediante ensayos en los dos tipos de piedra, "Caliza de páramo" y "Caliza de Hontoria", hasta conseguir la entonación más apropiada para el conjunto de la composición arquitectónica de la fachada, tanto de los paramentos lisos como de los motivos labrados (Figuras 29 y 30).



29



30

Tabla 9. Intervención: metodología y resultados

Metodología Y Resultados			
Lesión	Causa	Actuación	Resultado
Pérdida de material	Humedad	Preconsolidación (silicato de etilo) Hidrofugación (elementos expuestos) Patinado (hidróxido de cal)	Estabilización de la piedra Protección de la fábrica Entonación de paramentos
	Acción del hielo		
	Contaminación atmosférica (yesificación)		
	Presencia de mortero de cemento Pórtland	Sustitución por mortero tradicional de cal	Saneado de las juntas de sillares
Suciedad	Residuos de combustibles fósiles	Limpieza de costra negra (mecánica, láser, química)	Control de los procesos de deterioro de la piedra
	Biodepositos		
	Vegetación, costra biogénica	Tratamiento biocida (sales cuaternarias)	

8. RECAPITULACIÓN FINAL

Finalizada la intervención restauradora, los resultados obtenidos permiten afirmar que se han conseguido los objetivos establecidos al inicio del proceso, como se recoge en la Tabla 9.

Los paramentos pétreos, una vez caracterizados mediante los estudios petrológicos pertinentes, se han tratado con los métodos de limpieza adecuados, respetando en todo momento la naturaleza del material y las pátinas formadas en el proceso envejecimiento.

Los morteros utilizados en el rejuntado presentan características semejantes a la de los utilizados en el proceso de construcción. Todas las juntas de sillares se han saneado con mortero de cal con árido silíceo de granulometría semejante a la del mortero original, marcando los límites de aplicación sin invadir el material pétreo y rehundiendo la junta para resaltar el porte de los sillares, así se han dispuesto en un plano inferior a la superficie de la piedra.

Los hidrofugantes utilizados se han aplicado por impregnación para asegurar su penetración en la piedra y el cierre de la porosidad

aparente superficial. Las zonas más expuestas al agua de lluvia se han impermeabilizado aplicando un hidrofugante hidrorrepelente que no altera el aspecto de la piedra y su estabilidad cromática.

Se ha conseguido una entonación general de conjunto uniforme e integrada, evitando el contraste de tonalidad entre paramentos y respetando en todo momento la diferente apariencia de los tipos de material pétreo utilizados.

Para concluir podemos decir que ha sido logrado el objetivo de no alterar la naturaleza de los materiales con los productos químicos utilizados en los diferentes tratamientos descritos en este artículo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Dirección General de Patrimonio de la Junta de Castilla y León la financiación aportada para la restauración de la portada de la Iglesia de San Lorenzo y su implicación en la recuperación y conservación del patrimonio arquitectónico. También queremos agradecer la colaboración de la parroquia de San Lorenzo y de la empresa que ha ejecutado la intervención, Cabero Edificaciones S.A.

REFERENCIAS

- (1) Grossi, C. M., Eibert, R. M., Díaz-Pache F. (1998). Decay and durability of building stones in urban environments. *Materiales de Construcción*, 48 (252): 5-25. doi:10.3989/mc.1998.v48.i252.461.
- (2) Alonso, F. J., Eibert, R. M., Ordaz, J., Vázquez, P. (2006). Analysis of stone material damages in buildings. *RECOPAR*, 3: 5-25.
- (3) Monjo, J. (2007). Durabilidad vs Vulnerabilidad. *Informes de la Construcción*, 59(507): 43-58. doi:10.3989/ic.2007.v59.i507.
- (4) Nord, A. G., Svardh, A., Tronner, K. (1994). Air pollution levels reflected in deposits on building stone. *Atmospheric Environment*, 28(16): 2615-2622. [http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90435-9](http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(94)90435-9).
- (5) Alvarez, J. M., Garabito, J. (2005). La restauración de la Iglesia de Santa María la Real de Aranda de Duero (Burgos). *Castilla y León 2000-2004 Restaura*. pp. 79-88. Junta de Castilla y León, Valladolid.
- (6) González, A. (1996). La restauración de la iglesia de Santa María del Castillo de Castelldefels (Barcelona, España). *Informes de la Construcción*, 48(445): 33-49. doi:10.3989/ic.1996.v48.i445.
- (7) Garcia, I. (1952). Breves notas históricas sobre el origen y fundación de la parroquia de San Lorenzo el Real. *Boletín Institución Fernán González*, 119: 171-180.
- (8) Eibert, R. M., Díaz-Pache, F., Grossi, C. M., Alonso, F. J., Ordaz, J. (2001). Airborne particulate matter around the Cathedral of Burgos (Castilla y Leon, Spain). *Atmospheric Environment*, 35(2): 441-452. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00113-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00113-8).
- (9) Alonso, F. J., Díaz-Pache, F., Eibert, R. M. (1994). Interacción piedra-ambiente, 1.^a parte: formas de alteración desarrolladas sobre la piedra de la catedral de Burgos. *Informes de la Construcción*, 46(433): 5-18. doi: 10.3989/ic.1994.v46.i433.
- (10) Garabito, J., Garabito, J. C. (2008). La restauración de la fachada de la Iglesia de San Lorenzo de Burgos. *Castilla y León 2004-2006 Restaura*. pp. 195-198. Junta de Castilla y León, Valladolid.
- (11) Barros, L.A. (2000). Modes and mechanisms of rock weathering. *5th international symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean basin*, pp. 3-6. Seville, Spain.

- (12) Ruedrich, J., Kirchner, D., Siegesmund, S. (2011). Physical weathering of building stones induced by freeze-thaw action: a laboratory long-term study. *Environmental Earth Sciences*, 63(7-8): 1573-1586. doi 10.1007/s12665-010-0826-6.
- (13) Hutchinson, A.J., Johnson, J.B., Thompson, G.E., Wood G.C., Sage P.W., Cooke M.J. (1993). Stone degradation due to wet deposition of pollutants. *Corrosion Science*, 34(11): 1881-1898, [http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90025-C](http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X(93)90025-C).
- (14) Amoroso, G.C., Fassina, V. (1993). Stone Decay and Conservation. Atmospheric Pollution, Cleaning and Protection. *Materials Science Monographs*, 11. Elsevier, Amsterdam.
- (15) Rodríguez-Navarro, C., Sebastian, E. (1996). Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation. *Science of the Total Environment*, 187(2): 79-91. [http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05124-8](http://dx.doi.org/10.1016/0048-9697(96)05124-8).
- (16) Winkler, E.M. (1987). Weathering and weathering rates of natural stone. *Environmental Geology and Water Sciences*, 9(2): 85-92. doi 10.1007/BF02449939.
- (17) Prikryl, R., Weishauptová, Z., Novotná, M., Prikrylová, J., Št'astná, A. (2010). Physical and mechanical properties of the repaired sandstone ashlar in the facing masonry of the Charles Bridge in Prague (Czech Republic) and an analytical study for the causes of its rapid decay. *Environmental Earth Sciences*, 63(7-8): 1623-1639. doi 10.1007/s12665-010-0819-5.
- (18) Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (2000). Investigation of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1): 45-58, [http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074\(99\)00118-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074(99)00118-1).
- (19) Grossi, C.M., Esbert, R.M., Díaz-Pache, F., Alonso, F.J. (2003). Soiling of building stones in urban environments. *Building and Environment*, 38(1): 147-159. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00017-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00017-3).
- (20) Alonso, F.J., Esbert, R.M., Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Boletín Geológico y Minero*, 98(2): 84-95.
- (21) Folk R.L. (1959). Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 43: 1-38.
- (22) Marcos, R.M., Esbert, R.M., Alonso, F.J., Díaz-Pache, F. (1993). Características que condicionan el comportamiento de la caliza de Honoria (Burgos) como piedra de edificación. *Boletín Geológico y Minero*, 104(5): 123-133.
- (23) Faria, P., Henriques, F., Rato, V. (2008). Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3): 338-346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2008.03.003>.
- (24) Rivera-Blanco, J. (2008). *De Varia restaurazione: teoría e historia de la restauración arquitectónica*. Abada. Madrid.
- (25) Jokilehto, J. (1988). Conservation principles and their theoretical background. *Durability and building materials*, 5(3-4): 267-277.
- (26) Luque, A., Cultrone, J., Sebastian, E., Cazalla, O. (2008). Evaluación de la eficacia de tratamientos en el incremento de la durabilidad de una calcarenita bioclástica (Granada, España). *Materiales de construcción*, 58(292): 115-128. doi: 10.3989/mc.2008.41607.
- (27) Luxan, M.P., Dorrego, F. (2004). Caracterización y selección de morteros en la restauración de la Portada de los Reyes (Benavente, Zamora). *Materiales de Construcción*, 24(273): 35-44. doi:10.3989/mc.2004.v54.i273.
- (28) Bromblet, P., Labouré, M., Orial, G. (2003). Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration of carved portals in France over the last 10 years. *Journal of Cultural Heritage*, 4(1): s17-s26. [http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01222-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01222-0).
- (29) Vergès-Belmin, V. (1997). Comparison of three cleaning methods-Microsandblasting, chemical pads and Q-switched YAG laser-On a portal of the cathedral Notre-Dame in Paris, France. *Lasers in the Conservation of Artworks*: 17-24 (LACONA I), (SPEC. ISSUE).
- (30) Weeks, C. (1998). The 'portail de la Mère-Dieu' of Amiens Cathedral: Its polychromy and conservation. *Studies in Conservation*, 43(2): 101-108.
- (31) Sabatini, G., Giamello, M., Pini, R., Siano, S., Salimbeni, R. (2000). Laser cleaning methodologies for stone façades and monuments: Laboratory analyses on lithotypes of Siena architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1): s9-s19. [http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074\(00\)00144-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074(00)00144-8).
- (32) Moropoulou, A., Tsiourva, Th., Bisbikou, K., Tsantila, V., Biscontin, G., Longega, G., Groggia, M., Dalaklis, E., Petritaki, A. (2002). Evaluation of cleaning procedures on the facades of the Bank of Greece historical building in the center of Athens. *Building and Environment*, 37(7): 753-760. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00058-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00058-0).

* * *