Criterios generales de intervención en monumentos de piedra

BEATRIZ HORTIGÓN FUENTES
ARQUITECTA

La piedra ha sido utilizada desde antiguo como material de construcción por su durabilidad y resistencia. En la actualidad, la contaminación ha producido graves alteraciones en la misma, poniendo en peligro la integridad de nuestro patrimonio histórico-artístico. El proceso de intervención deberá incluir los tratamientos adecuados que devuelvan al material su resistencia original y la cohesión entre sus partículas teniendo en cuenta que cada obra presenta una problemática diferente, sin olvidar la importancia de un adecuado y continuo mantenimiento.

Stone has been used since remote ages as a construction material due to its durability and resistance. Nowadays, pollution is introducing severe damage in stone works and is also harming the artistic legacy of our cities. This paper proposes a restoration process that includes adequate treatment to restore the original resistance and cohesion of the material. It also stresses the importance of an adequate maintenance process.

"... *Estos testimonios preciosos del pasado serán respetados, en primer lugar, por su valor histórico y sentimental. También porque algunos de ellos contienen en sí una virtud plástica en la que se ha incorporado el genio del hombre en el más alto grado de intensidad. Forman parte del patrimonio humano, y quienes lo detentan o están encargados de su protección tienen la responsabilidad y la obligación de hacer cuanto sea lícito para transmitir intacta esa noble herencia a los siglos venideros.*"

Carta de Atenas, 1933

Desde hace 7000 años la piedra ha sido utilizada por el hombre como material de construcción, junto con la madera y el adobe, por su gran durabilidad y resistencia a lo largo del tiempo.

Sin embargo, en la actualidad, la polución ambiental y la contaminación de las aguas subterráneas ha producido graves alteraciones en la misma, poniendo en peligro la integridad de nuestro patrimonio histórico-artístico.

Podríamos afirmar que el agua es el principal enemigo de la piedra (figura 1), en relación directa con la solubilización de sales y su posterior cristalización por efecto de evaporación (eflorescencias y subeflorescencias). Especial cuidado hay que tener con las aguas de ascendencia capilar, portadora de diversas sales solubles, entre las que destacan los nitratos y sulfatos alcalinos que emanan del subsuelo y producen en la superficie depósitos de color blanco, poco coherentes, que se eliminan con un simple lavado o cepillado.

En zonas costeras las sales más peligrosas son los cloruros y sulfatos de magnesio, que precisan gran cantidad de agua para su cristalización provocando un aumento de retención de humedad en el interior de la piedra. Las sales más solubles cristalizan antes de llegar a la superficie formando **subeflorescencias**. Las tensiones originadas en los poros del material produce fenómenos de pulverización y disgregación de la materia, con desprendimiento posterior de la misma por pérdida de adherencia (exfoliaciones).

La industrialización contamina la atmósfera con dos agentes especialmente dañinos para la piedra (figura 2): los iones SO_2 y SO_3, transformados en ácidos en presencia de agua, y los derivados del carbón y el petróleo.

El grado de alteración producido por estos depósitos de suciedad, llamados usualmente costras, depende de la profundidad de penetración y de la capacidad de reacción de sus componentes en presencia de agua para formar sales solubles.

El problema se agrava en el caso de las piedras de naturaleza calcárea, especialmente en las de formación sedimentaria (calizas y calcarenitas), en las que la elevada cantidad de poros accesibles favorece la circulación de agua en su interior. El carbonato cálcico constituyente de su materia es disuelto por los ácidos existentes en el agua de lluvia produciendo fenómenos de alveolizaciones en calizas puras y de arenizaciones en las calcarenitas. Detrás de las sales cristalizadas la piedra puede estar gravemente alterada, por lo que el proceso de restauración deberá incluir la aplicación de un tratamiento de consolidación, previo o posterior a la limpieza, que le devuelva al material su resistencia original y la cohesión entre sus partículas.

La acción del ácido sulfúrico sobre los materiales calizos puede llegar a producir yeso (sulfato cálcico dihidratado), proceso que lleva consigo un aumento de volumen del 32% en la sal base (sulfato cálcico anhidro), y que si se produce en el inte-

rior de la piedra puede llegar a ocasionar fisuras y dislocaciones de la estructura.

Conviene diferenciar estas costras de la pátina de envejecimiento que la propia piedra crea como protección con el paso del tiempo y que se manifiesta por un simple oscurecimiento superficial de la tonalidad, siendo su conservación la decisión más óptima.

Otro factor de alteración importante son los agentes biológicos (figura 3): microorganismos o bacterias, organismos superiores o plantas y animales (fundamentalmente insectos y aves), que bien de forma directa o por ocasionar o acelerar las reacciones químicas comentadas anteriormente traen consigo la destrucción de la piedra.

Los animales depositan con sus excrementos fuertes cargas de azufre y amoniacos, que gracias al agua pueden penetrar en el interior de la piedra. Especialmente grave es el tema de las palomas cuyas deposiciones pueden provocar el rebose de los sistemas de evacuación de aguas en cubiertas y fachadas. Conviene controlar su número o impedirles un fácil acceso a los puntos más singulares del edificio, así como diseñar estos sistemas de evacuación por exceso, lo más protegidos posible y de fácil registro para su constante mantenimiento.

En este breve recorrido por las principales causas de alteración de la piedra no conviene olvidar las de origen térmico, aunque dentro de las citadas son las que producen daños de menor cuantía y gravedad. La gran inercia térmica que posee este material hace que cuando las temperaturas son extremas la cara exterior del muro se caliente muy rápidamente mientras que la interior permanece fría. Esto provoca dilataciones incompatibles en el material que pueden provocar fisuraciones internas, fundamentalmente en piedras de mayor compacidad como son los granitos y los mármoles.

Figura 1
Eflorescencias provocadas por cristalización de las sales contenidas en las aguas de ascensión capilar. (Catedral de Jaén)

La caracterización química nos proporciona datos muy interesantes respecto a los elementos integrantes de la piedra, la naturaleza de las distintas alteraciones y la aplicación en procesos de restauración anteriores de productos incompatibles con el material.

Respecto a las características mecánicas la determinación de la resistencia a compresión, flexión, etc. no sólo nos sirve para determinar las características portantes del elemento sino también para darnos una idea del grado del alteración de la piedra, dato muy importante que, complementado con los resultados de los ensayos de naturaleza física y química nos permite determinar la técnica de consolidación más adecuada. Los ensayos de dureza por rayado y ultrasonidos presentan como ventaja su ejecución "in situ", sin necesidad de extraer probetas, y nos pueden servir para tener una idea general de las puntos más débiles y de los diferentes grados de alteración en el monumento. Los resultados obtenidos deben ser interpretados solamente de manera complementaria a los obtenidos en laboratorio, aunque pueden ser muy útiles para garantizar una adecuada y significativa extracción de probetas en el monumento.

Para la colocación de aplacados o

CARACTERIZACIÓN DE LA PIEDRA

Conviene recordar que dentro de las innumerables normas y técnicas generales recomendadas en una obra de restauración, cada obra presenta una problemática diferente. Frente a esta generalización habrá que actuar de manera individualizada, siendo fundamental, previo a la elección del proceso de intervención un contacto directo con el monumento. A través de una exhaustiva inspección ocular determinaremos una adecuada campaña de toma de muestras que nos proporcione datos sobre los diferentes litotipos existentes, las alteraciones que presentan y su grado de afección.

Los datos obtenidos se complementarán con una profunda investigación histórica y ambiental, que nos ayudará a determinar, por un lado, las canteras de origen y las técnicas constructivas utilizadas y, por otro, las condiciones del entorno que han favorecido estas alteraciones.

En la caracterización física de una piedra es muy importante la determinación de su porometría; una porosidad alta no tiene porqué ser un agravante si la interconexión entre poros es mínima o, lo que es lo mismo, la mayoría de ellos son inaccesibles, lo que dificulta la circulación de agua y la entrada de agentes contaminantes. La determinación de la capacidad máxima de absorción o retención de agua y de su facilidad de evaporación nos es de gran utilidad para saber la proporción de poros accesibles respecto a poros totales, permitiéndonos realizar comparaciones entre la piedra sana y la piedra alterada, en la que aumenta el número, tamaño y conexión entre ellos. Todos estos datos son muy útiles, y no deben perderse nunca de vista a la hora de la elección de un determinado método de limpieza y de la aplicación de tratamientos hidrofugantes.

reposición de volúmenes se hace cada vez más imprescindible la determinación de la adherencia, que nos permite conocer la idoneidad de un material de agarre o unión o de los añadidos que se dispongan en el proceso de restauración.

CRITERIOS DE INTERVENCIÓN

El primer paso para la conservación es una buena limpieza. La elección del sistema dependerá del tipo de piedra y del grado de suciedad y deterioro que presente. La exposición posterior de las técnicas de consolidación no implica que su aplicación siempre se realice tras el proceso de limpieza. A veces se antoja necesario una preconsolidación de la piedra alterada para afrontar con garantías un adecuado proceso de limpieza.

Los diferentes métodos de limpieza podrían englobarse en dos grandes grupos. Por un lado las técnicas basadas en la utilización de agua, bien en estado puro o combinada con productos químicos y, por otro, los sistemas mecánicos, llamados así por la utilización de maquinaria de distinta naturaleza, con mención especial a la proyección de abrasivos. La clasificación en uno u otro grupo no tiene carácter exclusivo, existiendo métodos que participan de ambas características. Así, la eficacia del agua puede ser incrementada mediante su proyección a presión y, por contra, la proyección de abrasivos puede ser amortiguada mediante su combinación con agua.

Las precauciones a la hora de utilizar el agua como principal producto de limpieza deben extremarse en piedras de alta porosidad, llevando un exhaustivo control del tiempo de aplicación y el grado de penetración en el material. El uso de agua atomizada reduce en gran medida la alteración del elemento a limpiar, siendo aconsejable en zonas donde los depósitos de suciedad, al fijarse con las

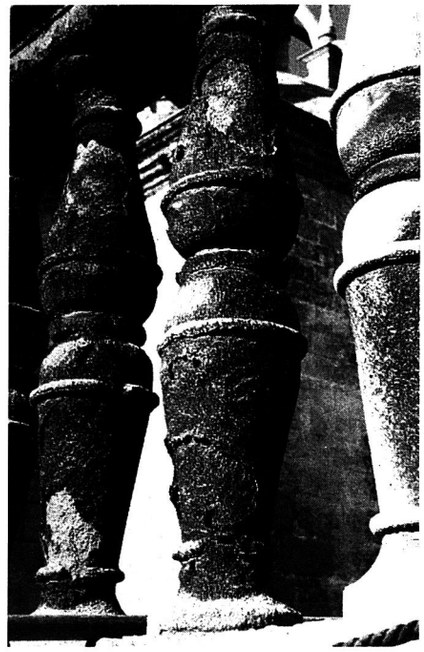

Figura 2
Alteración muy usual en piedra: costras acompañadas de exfoliaciones. Las costras de suciedad crean una película que impide la transpiración de la piedra y provoca la cristalización de sales en la interfase material base-costra, provocando tensiones que terminan por desprender esta última. (Catedral de Sevilla)

Figura 3
Biocostra constituida por líquenes y musgos. (Glorieta de San Diego. Sevilla)

sales, han creado una costra densa y fuertemente adherida, de dureza a veces mayor que la de la propia piedra, y cuya eliminación con abrasivos conllevaría un fuerte riesgo de pérdida del material base.

La aplicación de productos químicos como complemento a un método de limpieza acuoso debe ser objeto de un continuo seguimiento, cuidando especialmente su grado de acidez, no siendo aconsejable el uso de los que posean un pH superior a 10. Un detergente excesivamente ácido conlleva el riesgo de formación de sales solubles en las piedras calcáreas, siendo aconsejable su uso únicamente en rocas no activas como los granitos y las rocas silíceas.

Tras su aplicación, es fundamental efectuar un lavado de la superficie, normalmente con agua atomizada, para evitar restos de sustancias reaccionantes en los poros de la piedra. Como criterio general se debe restringir su utilización a los casos en los que la dificultad para eliminar la suciedad haga inviable cualquier otro método, teniendo siempre la precaución de realizar ensayos previos y exigiendo garantías de la casa fabricante.

Mención especial merecen los productos espesantes (figura 4). Su finalidad es lograr pastas que aplicadas sobre la suciedad actúan a modo de apósitos o cataplasmas solubilizando las sales y, al mismo tiempo, absorbiéndolas por medio de arcillas de elevada absorción. Su mayor inconveniente es la lentitud del proceso, que puede durar incluso días, por lo que, a pesar de su carácter inocuo, su utilización se reduce a zonas puntuales en las que sería muy complicado alcanzar la profundidad adecuada con otro tipo de técnica.

La limpieza mediante proyección de abrasivos, utilizado a veces de forma indiscriminada por su rapidez y eficacia en la eliminación de costras gruesas y muy adheridas, afecta gravemente a relieves y policromías, sin

olvidar el grave riesgo que conlleva su utilización en piedras de escasa dureza, pudiendo provocar pérdidas de material de varios mm de espesor, independientemente del alto grado de contaminación ambiental que lleva implícito debido a la gran cantidad de polvo que genera.

Condiciones fundamentales a tener en cuenta son la presión y el tiempo de aplicación y el diámetro, la dureza y composición neutra del árido utilizado. Como alternativa a la proyección de granos de arena se encuentra el microchorreado con partículas que posean un diámetro y una dureza menor que la sílice, tales como cáscaras de huevo o frutos secos, óxidos de vidrio, etc.

Como métodos especiales de limpieza cabe citar la utilización de los rayos láser, los ultrasonidos y la técnica del microondas, que está dando muy buenos resultados para la extracción de sales solubles. El proceso en que se basa es, como su propio nombre indica, similar al funcionamiento de un microondas de cocina ordinario. En una primera fase se produce un aporte de agua a la piedra hasta llegar al estado de saturación para posteriormente ser calentada hasta temperatura de evaporación, proceso en el que se produce un arrastre hacia el exterior de las sales existentes en sus poros internos.

Tras este breve análisis de las principales técnicas de limpieza, conviene recordar el estado en el que va a quedar la piedra tras el proceso. Nos encontraremos con una piedra carente de suciedad y sales solubles, pero expuesta de nuevo a la entrada de los agentes que provocaron su alteración. La limpieza exige la apertura de sus poros, tanto mayor cuanto más profunda y adherida esté la costra y, en relación directa, más abrasivo sea el sistema utilizado.

Es por tanto que se hace necesario la aplicación de un tratamiento hidrofugante como barrera ante la

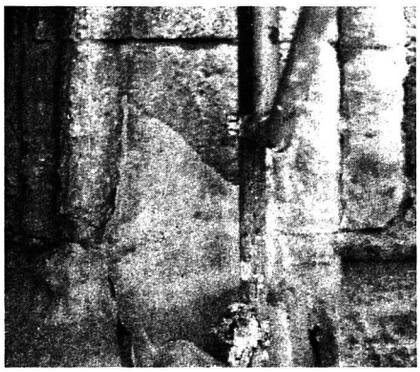

Figura 4
Preconsolidaciones mediante gasa y resina acrílica paraloid B-72 (Iglesia de Santa Ana. Sevilla)

El mercado actual ofrece un amplio abanico de productos a nivel de hidrofugación y consolidación, destacando por su eficacia y uso habitual los consolidantes organosilíceos y los tratamientos protectores con siliconas.

Frente a otros tratamientos exclusivamente de naturaleza orgánica (resinas y polisiloxanos) o inorgánica (bicarbonato de calcio, aluminatos, etc.), los consolidantes a base de silicio podrían considerarse como compuestos químicamente mixtos. A partir de compuestos orgánicos, siloxanos, precipitan en sílice amorfa, de naturaleza inorgánica. Su gran poder de penetración y fundamentalmente su buen comportamiento frente al agua nos ofrece, en principio, garantías suficientes a la hora de aplicar un tratamiento de conservación.

RESTITUCIÓN

Aunque el criterio de intervención en la fábrica de piedra, en lo que a edificios históricos se refiere es el de la conservación, a veces, el alto grado de deterioro en determinadas piezas, tanto a nivel funcional como decorativo, hace imprescindible su restitución.

Ante la dificultad que en la mayoría de los casos supone el localizar la cantera de origen, que en el peor de posibilidad de una nueva entrada de agua, lo que anularía en un breve plazo de tiempo los efectos de la limpieza. En caso de que tras la suciedad eliminada nos encontremos con material alterado, la protección se deberá complementar con un tratamiento de consolidación, cuya única finalidad es, como ya se dijo anteriormente, devolverle su cohesión y resistencia primitivas, procurando conseguir una buena adherencia entre la piedra sana y la piedra alterada.

Las principales propiedades exigibles a estos tratamientos son:

– Impermeabilidad al agua en estado líquido y permeabilidad al vapor, permitiendo la transpiración de la fábrica y reduciendo así el riesgo de condensaciones.

– Penetración adecuada, en el caso de los consolidantes llegando hasta la parte sana. Si el producto no penetra lo suficiente, en la interfase entre zona tratada y no tratada se produce un cambio de propiedades, tales como la porosidad o el acceso al vapor de agua y al agua líquida. Si la zona tratada se reduce a una capa superficial la acumulación del consolidante disminuye la porosidad provocando en la interfase la cristalización de sales por evaporación del agua, que causan exfoliaciones (desprendimiento en placas) de la parte consolidada.

– Compatibilidad con el material base, no provocando reacciones con los componentes de la piedra ni dañando su estructura interna.

– Menor alterabilidad que la piedra tratada, no aumentando la cantidad de poros accesibles de la misma. La alterabilidad de la piedra tratada debe ser inferior a la de la piedra sin alterar, ya que en caso contrario sería preferible su sustitución.

– Resistencia similar a la de la piedra sana, propiedad ésta no tan importante en los hidrofugantes, pues su finalidad es simplemente la protección.

los casos es probable que esté agotada, y, dentro de ella, una piedra con características similares a la que va a ser sustituida, la tendencia actual es la restitución de volúmenes mediante morteros pétreos de fábrica.

Al igual que ocurre con los tratamientos protectores, existe una amplia gama de productos industrializados, fundamentalmente con la utilización de resinas epoxídicas o de poliéster como conglomerante y árido procedente de la trituración de piedra con características similares a la original.

En piedras de alta porosidad, es más conveniente la reposición con morteros específicos fabricados en el propio taller de restauración, siendo fundamental que posean una densidad y dureza igual o menor que la piedra sobre la que se van a aplicar, para evitar de este modo tensiones entre ambos materiales. Para conseguir resultados efectivos se hará necesario en la mayoría de los casos una preconsolidación del material base.

El comportamiento de estos morteros ante los agentes atmosféricos es, en la mayoría de los casos, mejor que el de la propia piedra, por lo que pueden ser muy útiles para la reposición de estatuaria o elementos ornamentales que se haya decidido trasladar al interior o para reconstruir, si poseemos la documentación gráfica necesaria, determinadas piezas que se hayan perdido por completo.

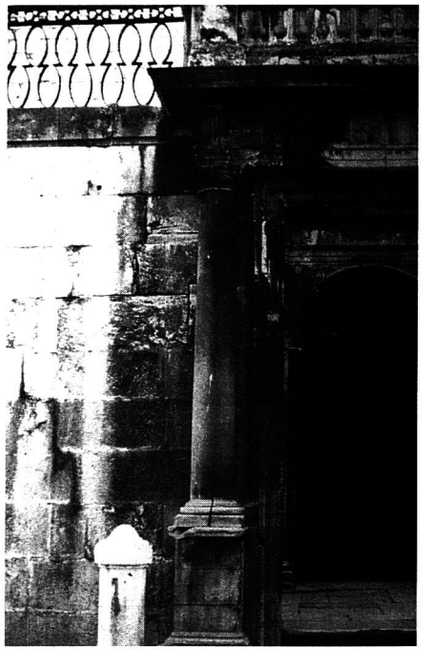

Figura 5
La incorrecta evacuación de las aguas de cubierta puede provocar lavados diferenciales en fachadas que, independientemente del peligro de penetración de agua en el interior de la piedra, produce un efecto antiestético. (Catedral de Jaén).

CONCLUSIONES

Como conclusión, cabe decir que estos criterios generales de intervención no tienen ninguna utilidad, incluso pueden acelerar los mecanismos de alteración, si previamente no hemos elaborado un diagnóstico correcto en todas y cada una de las partes del monumento, en base a una exhaustiva inspección ocular que nos ayude a identificar los tipos de piedra y las alteraciones existentes y una adecuada toma de muestras, extrayendo probetas tanto de piedra sana, tanto del monumento como de la cantera de origen si fuera posible, como de piedra alterada, y ensayando en laboratorio cualquier técnica que se decida ejecutar durante el proceso de restauración.

Tampoco conviene olvidar la importancia de un adecuado y continuo mantenimiento, a nivel de revisión periódica de los productos de conservación aplicados, de una correcta evacuación de las aguas de cubierta (figura 5), de dispositivos que eviten el acercamiento de aves, de establecimiento de barreras de ascensión capilar, etc. En general, un control sobre los factores que puedan provocar la aparición de nuevas alteraciones sobre el monumento restaurado.