

Utilización de la piedra natural en restauración

Rafael Fort González

Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM)

Unidad Asociada Laboratorio Petrología Aplicada (CSIC-UA)

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad las rocas han sido utilizadas como materiales naturales de construcción. No sólo se ha usado en la parte ornamental de los interiores de los edificios, sino también en las fachadas y en la estructura de importantes monumentos históricos-artísticos de todas las épocas y estilos correspondientes a diferentes culturas. Los motivos de la elección de la piedra como materia prima venían dados, no sólo por razones de tipo estético, sino que además su aspecto de consistencia y dureza, permitía ser considerado como un material eterno, sin destrucción, siendo muy útil tanto en las construcciones militares como religiosas. Gracias a las características de la piedra muchas construcciones han llegado a nuestros días en condiciones muy aceptables a pesar de haber tenido que soportar conflictos bélicos, inclemencias climatológicas durante siglos, etc. En las últimas décadas los edificios construidos en piedra se deterioran más rápidamente, perdiendo una de sus cualidades valoradas en el pasado como es la perdurabilidad al paso del tiempo. Las nuevas condiciones a las que se someten a estos materiales, hacen que se aceleren los procesos de deterioro. Pero no todo patrimonio histórico-artístico realizado en piedra se degrada de igual forma, ya que depende muy directamente de la naturaleza de los materiales utilizados en su labra.

No todas estas rocas tienen la misma calidad para ser utilizadas como material de construcción, e incluso su uso queda restringido en función de sus características propias. Así una primera clasificación de la Piedra Natural utilizada en el patrimonio arquitectónico es la de **Piedra de construcción o de cantería** y **Piedra o Roca ornamental**. El primer término hace referencia a todo aquel material que puede ser incorporado en la estructura y fábrica del monumento, debido fundamentalmente a su resistencia mecánica, siendo su elaboración

sencilla de corte y labra. En la roca ornamental, aunque puede tener también esta cualidad se valora más sus posibilidades de decoración y de ornamentación, debido a la belleza que presenta al ser tallada y pulida, siendo colocada en zonas nobles del monumento y para su parte de adornos, esculturas, etc.

Una de las decisiones que hay que tomar cuando se pretende llevar a cabo la restauración y conservación del patrimonio arquitectónico es determinar la necesidad de la sustitución o restitución de la piedra natural que se encuentra deteriorada y definir la piedra nueva a utilizar (Figura 1). Esta decisión no puede ser realizada sin un conocimiento de las características del edificio en el que se va a intervenir. Este conocimiento tiene que realizarse desde tres perspectivas bien definidas (Figura 2).

1. Conocimiento histórico y artístico del monumento y sobre todo de la época constructiva en que se utilizó el material en que se quiere intervenir. Esto es de gran relevancia, ya que tenemos que valorar el interés, no solo artístico e histórico del elemento, sino también su antigüedad y el significado de porqué se eligió esta piedra para su construcción. Un dato importantísimo es saber la autenticidad y su relación con otras intervenciones realizadas en el pasado.
2. Conocimiento de las condiciones medio ambientales en que se encuentra el elemento a intervenir, ya que su comportamiento dependerá del ambiente agresivo en que se coloque. No será lo mismo la colocación de la piedra en revestimientos interiores del edificio, que en zonas exteriores, al igual que tampoco será lo mismo su colocación en el zócalo exterior que en una cornisa de la fachada. Es necesario conocer que agentes de deterioro afectan al elemento, teniendo presente que la acción del agua,



FIGURA 1. *Deterioro de la piedra en la cornisa del claustro de la Catedral de Cuenca.*

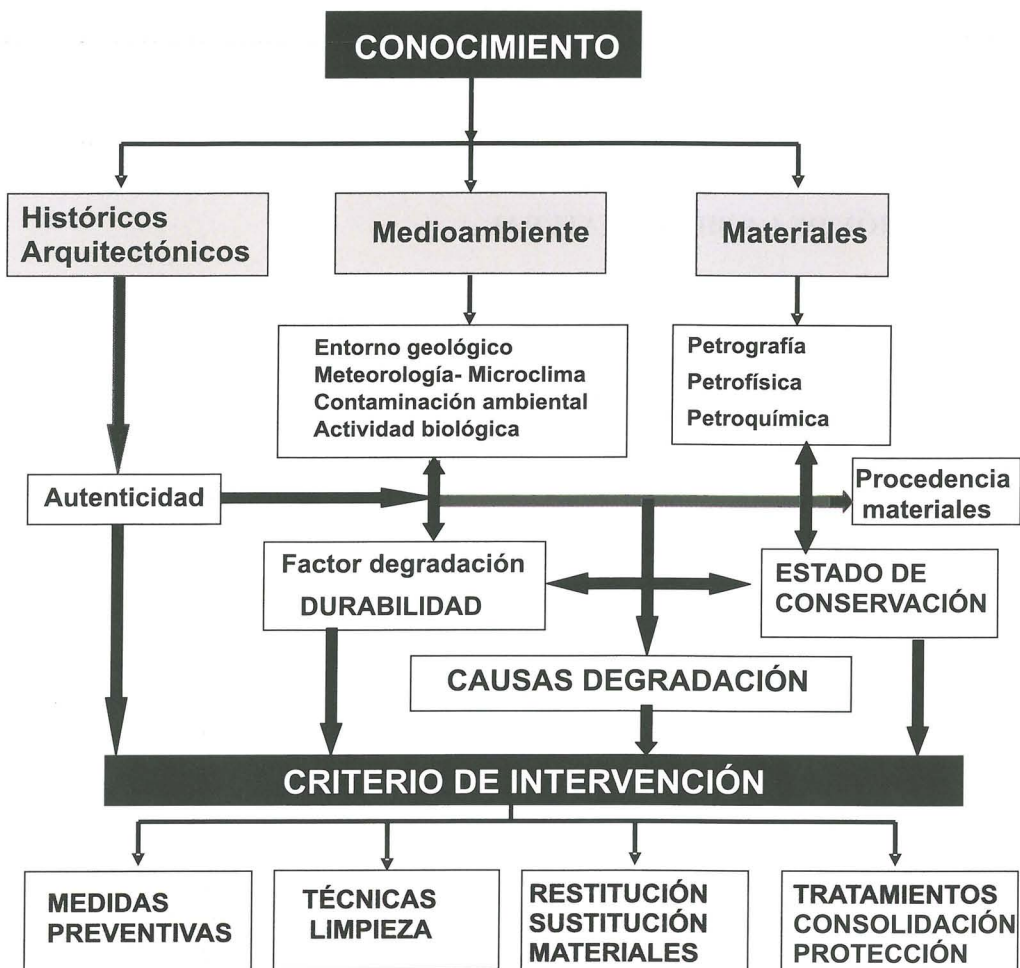


FIGURA 2. Criterios de intervención en la conservación y restauración del Patrimonio.

la contaminación atmosférica, la cristalización de sales y la actividad biológica son los agentes que mayor deterioro producen en los materiales. Por ello, según la incidencia de estos agentes de deterioro, y el grado de actuación conjunta, podremos establecer un factor de deterioro de los materiales, para así definir una evolución del comportamiento del material intentando establecer su periodo de vida útil.

3. Conocimiento de las propiedades intrínsecas de los materiales, ya que sus características texturales y composicionales, junto con sus propiedades petrofísicas inciden muy directamente en su capacidad de resistencia a los procesos de deterioro y por lo tanto afectan directamente a la vida útil del elemento.

Por todo ello, antes de proceder a la sustitución de cualquier elemento pétreo en un edificio histórico, es necesario definir la autenticidad y valor histórico-artístico del elemento, definir el grado de deterioro del mismo y su vida útil; y es imprescindible establecer las

causas del deterioro, por lo que es necesario conocer las condiciones medioambientales que afectan a la piedra y saber las características petrológicas del material. La degradación de los monumentos y de la piedra con los que están contruidos está muy directamente relacionada con las características petrológicas de las rocas y el medio ambiente en que se encuentra dentro del monumento.

UTILIZACIÓN DE LA PIEDRA NATURAL

La piedra es un material muy valorado en construcción tanto en obras nuevas como en la restauración del patrimonio arquitectónico. El uso de la piedra se ha incrementado en los últimos años siendo una de las actividades económicas con tendencia al crecimiento y siendo un recurso minero en alza. La utilización de la piedra es una fuente de riqueza de muchos pueblos y naciones. España es uno de los mayores productores de piedra natural, aunque en los últimos años ha perdido una cierta relevancia por la entrada competitiva de otros países como China y la India, pasando en el año 2001 a la cuarta posición de los países productores con un 12,7% de la producción mundial, por detrás de (25%), Italia (15%) y la India (14,7%) (Roc-Maquina, 2003).

España tiene una importante tradición extractiva de piedra de tal forma que la mayoría de nuestros monumentos están realizados mayoritariamente en piedra, compitiendo con las construcciones en ladrillo. El uso de la piedra en la antigüedad estaba limitado por su disponibilidad cerca de las obras y a los medios de labra y extracción que disponían. Se puede considerar como piedra tradicional de una ciudad aquella que se ha usado en las construcciones de sus monumentos históricos. La piedra tradicional utilizada configura el color y textura de las ciudades, marcando la percepción de su estética. Así se pueden destacar numerosas piedras tradicionales de construcción como son: Piedra de Boñar (León), Hontoria (Burgos), Campaspero (Valladolid), Calatorao (Zaragoza), Piedra de Villamayor (Salamanca), etc. En la Tabla 1 se muestra la relación de las piedras tradicionales de construcción más utilizadas en el patrimonio arquitectónico de España. Los mármoles es un recurso muy valorado para la decoración interna como para elementos escultóricos de las fachadas de muchos edificio. Se destacan los mármoles de Macael (Almería) y de Alconera (Badajoz), Cabra (Córdoba), Coín (Málaga), Almadén de la Plata (Sevilla), etc. Muchas de estas piedras siguen siendo utilizadas, tanto para las obras de restauración como para la obra nueva. Al igual que en el campo de obra nueva se aprecia una internacionalización de la procedencia de los materiales pétreos utilizados, en el campo de la restauración se tiende a utilizar, por lo general, piedra nacional. Igualmente se puede decir de la utilización de piedra natural en los cascos históricos para la pavimentación, en donde se utiliza adoquinado o enlosado, junto con los bordillos y escalones. La urbanización de estos entornos permite la incorporación de elementos de piedra como pueden ser parapetos, balaustradas, fuentes, esculturas, bancos, etc. También existe una fuerte demanda para la decoración de interiores con materiales que consigan un ambiente rústico para obras de rehabilitación.

El valor económico de la producción de la piedra natural en los últimos años se muestra en la Tabla 2. El valor más alto se produce en el año 2001, con una producción de 3.733 m€. (FDP 2001). En la figura 3 se muestra desglosado el destino de la producción de piedra natural en el año 2001, apreciándose que es el revestimiento de fachadas y de pavimentación el destino más importante. Estos porcentajes se mantienen, incrementándose el uso de piedra

TABLA 1
ALGUNAS PIEDRAS TRADICIONALES DE CONSTRUCCIÓN
EN EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO (CALIZAS Y ARENISCAS)

PERÍODO GEOLÓGICO	NOMBRE	MONUMENTO
Plioceno	Piedra de Godella (Valencia)	Torre de Quart
Mioceno	Piedra de Campaspero (Valladolid)	Castillo de Peñafiel
	Caliza de Colmenar (Madrid)	Palacio Real de Madrid y Aranjuez
	Piedra de Uncastillo (Zaragoza)	Termas romanas de “Los Bañales” (Zaragoza)
	Piedra de Santanyí (Palma de Mallorca)	Construcciones talayóticas de Danús
	Piedra del Marés (Islas Baleares)	Castillo de Bellver (Palma de Mallorca)
	Villalba de los Acores (Valladolid)	Monasterio San Pedro de Cardeña
	Piedra de Novelda (Alicante)	Palacio de Linares (Madrid)
	Piedra de Espera (Cádiz)	Catedral de Sevilla
	Arenisca Montjuïc (Barcelona)	Ayuntamiento de Barcelona
Oligoceno	Piedra de Floresta o Vinaixa (Lérida)	Seu Vella de Lérida
	Piedra de Tortosa (Tarragona)	Castillo de La Zuda (Tarragona)
Eoceno	Piedra Girona (Gerona)	Catedral de Gerona
Paleógeno	Piedra Villamayor o Franca (Salamanca)	Catedral de Salamanca
Cretácico	Piedra de Hontoria (Burgos)	Catedral de Burgos
	Piedra de Boñar (León)	Catedral de León
	Piedra del Parral o Zamarramala (Segovia)	Catedral de Segovia
	Piedra de Bernuy (Segovia)	Catedral de Segovia
	Piedra de Valdivieso (Burgos)	San Pedro de Tejada (Burgos)
	Piedra Silos (Burgos)	Monasterio de Silos
	Piedramuelle (Asturias)	Catedral de Oviedo
	Piedra de Sepúlveda (Segovia)	Palacio de la Granja (Segovia)
	Piedra de Redueña-Vellón (Madrid)	Puente de Talamanca de Jarama (Madrid)
	Piedra Salas (Burgos)	Salas de los infantes
Jurásico	Piedra de Calatorao (Zaragoza)	Castillo-palacio Calatorao
Triásico	Arenisca de Molina de Aragón	Puente de Molina de Aragón (Guadalajara)
Pérmico		
Carbonífero	Caliza de Montaña (Asturias)	Iglesia de San Juan y S.Pedro (Oviedo)
	Caliza Griotte (Asturias)	Basílica de Covadonga (Cangas de Onís)

En negrita areniscas.

TABLA 2
VALOR DE LA PRODUCCIÓN DE PIEDRA NATURAL

Año	Producción M€
2003	3.465
2002	3.721
2001	3.733
2000	3.583
1999	2.902
1998	2.820

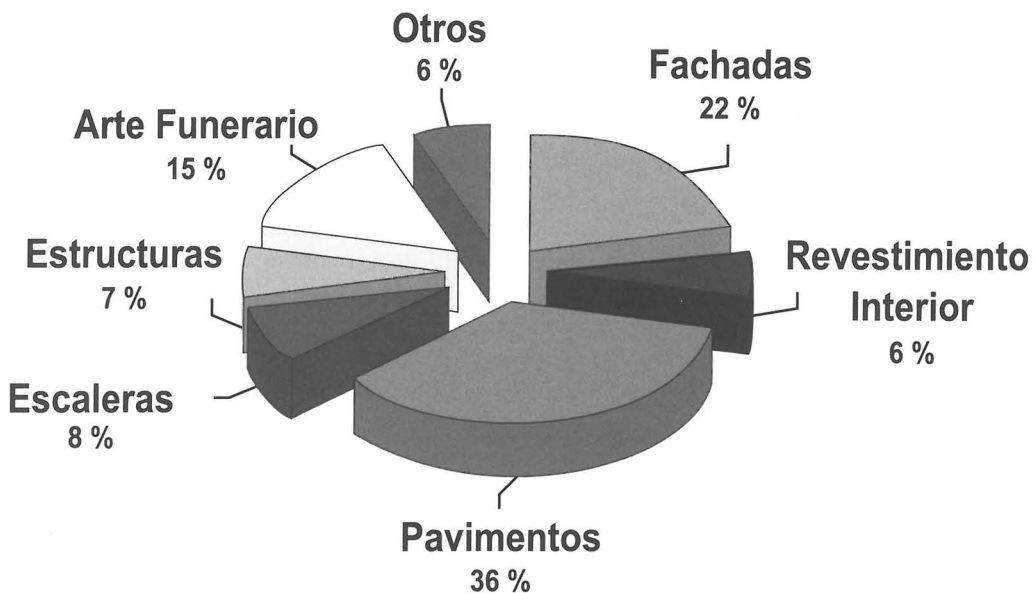


FIGURA 3. Distribución por el tipo de uso de la Piedra Natural producida en España en el año 2001.

para los revestimientos interiores. Actualmente la elaboración de placas para el revestimiento interior y exterior de los edificios es la forma en que se comercializan mayoritariamente los granitos y mármoles, incluido las calizas, llegando actualmente a constituir cerca del 75% de la forma de elaboración de este tipo de piedras. Parte de estas placas se utiliza para las obras de restauración. La elaboración de sillares es pequeña, no alcanzando más del 5% de la producción, que es similar a la producción de mampostería. La obtención de bordillos y adoquinados para pavimentación es del orden del 9%. Más del 80% de la producción de las

pizarras se destinan para piezas de techar dejando una pequeña producción para baldosas de pavimentación y para mampostería.

El gasto total para la conservación del patrimonio alcanza en el año 2001 una cifra de 1.747 m€. (Alonso y Martín, 2004). Las inversiones las realizan principalmente las administraciones públicas representando el 87% del total del gasto, alcanzando los 1.526 m€ (Figura 4). Estas inversiones crecen por encima del IPC ya que la inversión de las administraciones fue en 1998 de 1.165 m€, lo que representa un incremento en tres años del 23,7 %, presentando unas expectativas de seguir creciendo en el futuro.

De los gastos dedicados a la conservación del patrimonio, el mayor porcentaje se dedica a la conservación del patrimonio monumental, pero no existen estudios estadísticos sobre la inversión que se realiza específicamente en las intervenciones de sustitución y restitución de piedra deteriorada. En general estas intervenciones no suelen ser importantes y están muy limitadas, a no ser que sean actuaciones de intervención en el patrimonio arquitectónico para la reconstrucción de fachadas dentro de cascos antiguos o los trabajos de pavimentación de sus calles. Para la reconstrucción y ampliación de edificios emblemáticos se utiliza un volumen importante de piedra de construcción o de roca ornamental como puede ser, entre otros muchos ejemplos, la terminación de la Catedral de la Almudena, la ampliación del Banco de España o del Museo del Prado en Madrid. Estas actuaciones se dan en todas las provincias, pudiéndose citar la reconstrucción del Liceo de Barcelona o la ampliación del Ayuntamiento de Soria (Figura 5).

El bajo porcentaje de la sustitución de piedra dentro de las obras de restauración del patrimonio es debido a una serie de causas, siendo los criterios de intervención las más

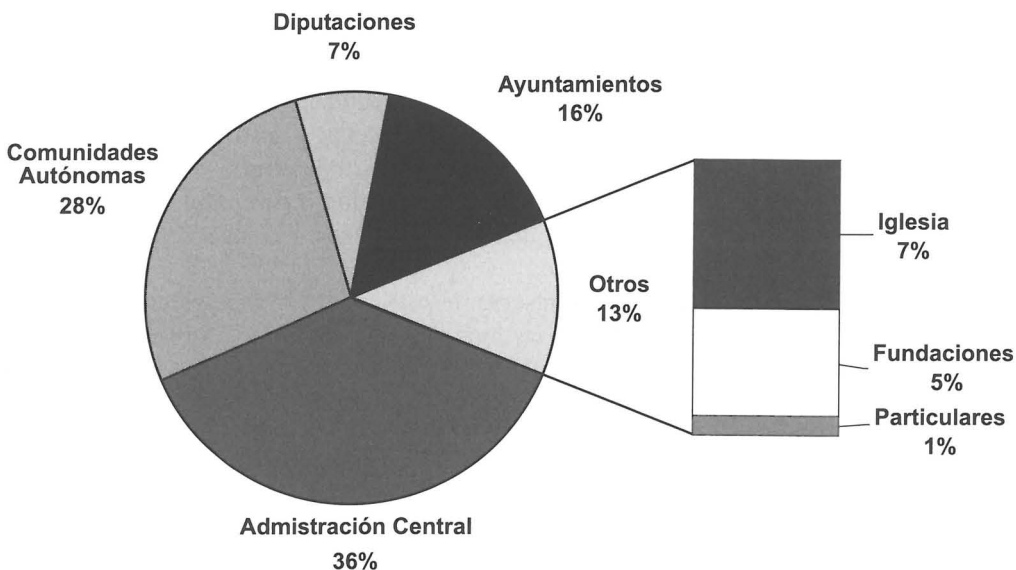


FIGURA 4. Distribución de Gasto en Patrimonio Histórico, en el año 2001, por diferentes organismos públicos y privados.



FIGURA 5. Utilización de piedra natural en la ampliación del Ayuntamiento de Soria (a) y del Banco de España en Madrid (b).

importantes. A pesar que en ocasiones el porcentaje económico en la restauración de un monumento dedicado a los trabajos de sustitución de piedra no supera el 1% del presupuesto total de la obra, es cierto que existe en los últimos años, una gran sensibilidad en llevar una correcta selección del material de sustitución, por lo que actualmente es muy frecuente que en los proyectos de restauración se incorporé una partida para el estudio de localización de la piedra de sustitución, con definición de las propiedades más adecuadas al monumento a intervenir.

DIFICULTADES DEL USO DE LA PIEDRA NATURAL EN LA RESTAURACIÓN

Los criterios de intervención en muchos casos limitan el uso de piedra natural ya que la tendencia actual es proceder a la conservación del monumento, tal como se encuentra sin realizar actuaciones de restauración con la reconstrucción y sustitución de elementos dañados a no ser que estos daños puedan acelerar el proceso de deterioro del monumento. Por ello únicamente se realizan intervenciones de sustitución o de complementación-restitución de elementos estructurales o de aquellos que protegen a la fachada de agentes de deterioro como son cornisas, impostas, etc.

La dualidad conservar-restaurar para preservar el patrimonio arquitectónico es una cuestión discutida desde finales del siglo XIX, en donde existen dos escuelas diferenciadas que han dados las pautas en el campo de la restauración (Martínez Justicia, 1996).

Desde antiguo ha existido necesidad de reconstruir elementos que habían sido dañados fundamentalmente por acciones bélicas entre los pueblos o la reutilización de piedra de otras edificaciones para reconstruir obras dañadas o para levantar un nuevo monumento. Por lo tanto la utilización de la piedra en la restauración de la construcción del patrimonio siempre ha existido.

Pero la base de los criterios de restauración moderna se inician en el siglo XIX. A mitad de este siglo existen dos teorías de restauración contrapuestas, defendidas por un lado por Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879) y de otro lado por John Ruskin (1819-1900).

Viollet-le-Duc defiende la restauración estilística, que permite la reconstrucción total del edificio a partir de los restos que quedan mediante analogías de estilos. Por el contrario Ruskin propone una conservación del monumento, dejarlo como está y únicamente intervenir para mantenerlo sin reconstruir ni alterar su fisionomía. Ruskin aboga por lo que se denomina restauración romántica, en donde se defiende que las ruinas son bellas. Desde esta perspectiva, la escuela francesa propiciaba la reconstrucción, para lo cual es necesaria la utilización de los materiales pétreos con los que estaba hecho el monumento, mientras que la escuela inglesa defiende la autenticidad histórica de los monumentos sin incorporar nada ajeno a ellos. Se puede indicar que en estos años la escuela estilística venció a la escuela romántica, influyendo en las restauraciones no sólo en Francia, sino que también en España.

A finales de este siglo aparece otra tendencia que intenta reconciliar ambas teorías, en donde se propone una restauración científica propuesta por el italiano Camilo Boito (1854-1933). Boito propone llevar a cabo la mínima intervención en el patrimonio, admitiendo nuevas adiciones en casos extremos, siempre y cuando queden perfectamente documentadas y diferenciadas del resto del edificio. En esta misma línea se encuentra Luca Beltrami (1854-1933) con la teoría de la restauración histórica, que se aproxima a la propuesta por Viollet-le-Duc, pero en este caso, no aceptando la reproducción de formas perdidas. A partir de esta teoría de restauración, Gustavo Giovannoni (1873-1947) introduce la importancia del entorno en que se encuentra el monumento y defiende la conservación de los cascos históricos de las ciudades.

En definitiva, estas teorías han establecido los puntos básicos para acometer una intervención en el patrimonio arquitectónico de interés histórico y artístico que son:

- Intervención mínima
- Respeto a la autenticidad
- Diferenciación de lo restaurado de lo original
- Considerar a cada obra como elemento individualizado en donde es difícil establecer reglas generales

A partir de estas teorías se promueve una mayor sensibilidad a la hora de proceder a las intervenciones de restauración de los monumentos, y se inicia la redacción de cartas de recomendaciones para orientar los criterios de intervenciones a realizar. Así apareció la **Primera Carta Restauro** en 1883 de Roma, recogándose en ella las propuestas de Boito, la **Carta de Atenas** en 1931, la **Carta internacional de Venecia** (1964) y la **Carta del Restauro** (1972), que es de obligado cumplimiento en toda Italia. Con la **Carta de Atenas**, que corresponde a las conclusiones de una Conferencia organizada por la Sociedad de Naciones, se inicia un movimiento internacional sobre la conservación del Patrimonio con la redacción de documentos por distintos organismos. En esta carta se indica la necesidad de respetar los conjuntos históricos artísticos, al igual que su perspectiva del entorno, indicando la conveniencia de utilizar todos los recursos tecnológicos disponibles para su protección. Igualmente indica que los materiales utilizados para la restauración deberán ser siempre reconocibles y diferenciados de los originales. La **Carta de Venecia**, en su artículo 9 indica: “La restauración es una operación que debe tener un carácter excepcional. Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos de un monumento y se fundamenta

en el respeto hacia los elementos antiguos y las partes auténticas”. En este artículo indica la importancia de mantener la **autenticidad** de la obra en su restauración. En el artículo 10 dice: “Cuando las técnicas tradicionales se revelan inadecuadas, la consolidación de un monumento puede asegurarse apelando a otras técnicas más modernas de conservación y de construcción, cuya eficacia haya sido demostrada científicamente y garantizada por la experiencia”.

La Carta del Restauro (1972), define como restauración “cualquier intervención destinada a mantener en eficacia, a facilitar la lectura y a transmitir íntegramente al futuro las obras y los objetos definidos”, en sus artículos 1 y 2. Esta carta establece en sus artículos 6 y 7, los trabajos de salvaguardia y restauración prohibidos y permitidos sobre las obras de arte. En Octubre de 1975 el Consejo aprueba en Ámsterdam la Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico, que es la base de las nuevas legislaciones sobre protección del Patrimonio en la mayoría de los países europeos. Estas cartas han sido la base para la redacción de diferentes legislaciones de protección del patrimonio de los países de la Unión Europea. En España quedan recogidas en la Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español, y en las diferentes normativas de las Comunidades Autónomas sobre Patrimonio Histórico

En el año 2002, el Instituto de Patrimonio Histórico Español, dependiente del Ministerio de Cultura estableció los “Criterios de Intervención en Materiales Pétreos” en donde se indica: “Únicamente será justificable la sustitución de aquellos elementos que por su avanzado estado de deterioro hayan dejado de cumplir su función estructural o de protección o, en casos excepcionales, de aquellos otros cuya conservación *in situ* resulte probadamente imposible. En cualquier caso, se considera la sustitución de elementos únicamente cuando los tratamientos de conservación del material pétreo no resulten efectivos”.

En definitiva, en estas actuaciones se diferencia entre dos conceptos importantes a tener en cuenta en las intervenciones en un monumento:

- **Restituir y sustituir** la piedra degradada para **restaurar** y/o poner en valor el elemento.
- **Consolidar y proteger** para **conservar** y ralentizar el proceso de deterioro de los materiales del monumento.

La tendencia actual es la de conservación y protección del monumento, llevando a cabo trabajos de restitución y sustitución de elementos pétreos en donde se afecta a elementos estructurales o elementos de protección de la fachada. Posteriormente se procede, cuando es necesario, a la consolidación superficial de los elementos dañados y se protegen por medio de tratamientos de biocidas y de hidrofugación o de protección de la fachada para evitar los actos vandálicos como las pintadas.

La restitución de un elemento consiste en la complementación de la parte perdida, por ejemplo la fragmentación de la esquina de una cornisa por medio del tallado de una nueva pieza que es ensamblada en la parte original de la cornisa. Esta actuación se realiza cuando el elemento a reponer es pequeño, mientras que la sustitución consiste en reponer toda la pieza de la cornisa deteriorada, una vez retirada. (Figura 6). Otra actuación muy frecuente es el cubrir la parte deteriorada con placas de Piedra Natural (Figura 7).

Otra limitación muy importante, del uso de la piedra en la restauración de monumentos, es la pérdida de las técnicas tradicionales de cantería, que hace que estas labores no puedan



FIGURA 6. *Sustitución de una pieza de la jamba de una ventana y restitución de sillares de la fachada con Piedra Natural.*



FIGURA 7. *Chapado de Piedra Natural de sillares deteriorados.*

realizarse en obra, como antiguamente se hacía. El desarrollo industrial y mecanizado de los talleres de piedra natural hace que sea más dificultosa la realización de piezas a medida como las obras de restauración solicita, aunque hay que indicar, que existen empresas de elaboración de piedra natural que tienen departamentos de cantería especializada, pero por lo general de unas dimensiones pequeñas. Son pocas las industrias de elaboración de piedra que consideran este tipo de actuación rentables, aunque algunas están incorporando y desarrollando técnicas informatizadas del corte y trabajo de labra que pueden ayudar a aumentar el interés de estas técnicas en el campo de la restauración, aunque con unos costes económicos elevados por el momento.

La ausencia de artesanos de la cantería, junto con que no toda la industria de elaboración de la piedra está acondicionada para estos trabajos más selectivos, hace que exista un riesgo en el suministro de las piezas, aspecto que la dirección técnica intenta eludir con proyectos que elimina este tipo de material sustituyéndolo por otros más fáciles de obtener y que garanticen su abastecimiento en tiempo y cantidad suficiente, asegurando la entrega de la obra en los plazos acordados (Figura 8).

Los costes artesanales y la introducción de técnicas de cortes informatizadas hacen que el reemplazamiento de piezas de piedra deteriorada por otras de piedra tengan unos costes elevados y por lo tanto, en la sociedad competitiva que existe actualmente, hace que sean utilizados otros materiales para los trabajos de cantería, de menor coste, que no son los propios de la piedra natural, introduciéndose la piedra artificial y morteros de restauración, que imitan a la piedra natural, o la utilización de revestimiento con morteros de restauración. El uso de polímeros y de aleaciones metálicas para la confección de esculturas, en sustitución de la piedra natural utilizada en su origen, se viene realizando desde hace años, aunque con ello se pierda el criterio de autenticidad (Figura 9).



FIGURA 8. Tallado de piezas de cantería.

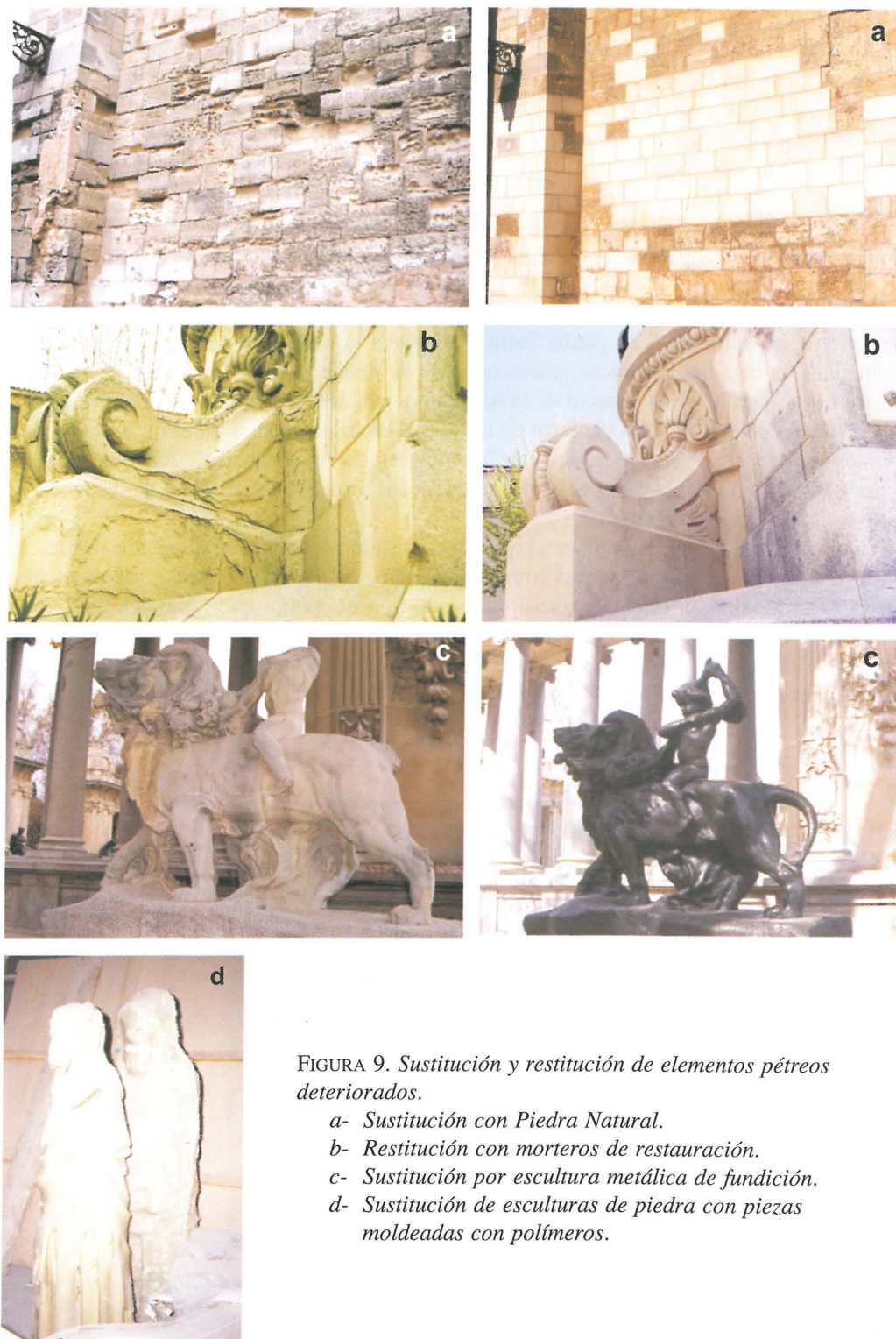


FIGURA 9. *Sustitución y restitución de elementos pétreos deteriorados.*

- a- Sustitución con Piedra Natural.*
- b- Restitución con morteros de restauración.*
- c- Sustitución por escultura metálica de fundición.*
- d- Sustitución de esculturas de piedra con piezas moldeadas con polímeros.*

Otro aspecto que hace disminuir el uso de la piedra natural en el patrimonio arquitectónico es la pérdida del valor de durabilidad. En la sociedad de consumo que nos encontramos se promueve la renovación de los materiales, cada vez con plazos de vida más cortos. El valor propio de la piedra natural como un material de alta durabilidad y con periodos de vida muy altos, superiores a los 100 años, hacen que estos materiales no sean tenidos en cuenta. Actualmente se prefiere la utilización de morteros y moldes realizados con polímeros para la sustitución de la piedra natural, aunque se sabe su menor grado de durabilidad y pérdida de la autenticidad, beneficiándose el proyecto en un menor coste de ejecución a corto plazo y justificando que con estas técnicas se diferencia el elemento sustituido de los originales.

La implantación de modas y estilos en colores, y texturas, hacen que se tienda a valorar actualmente la homogeneidad tanto del color, como de la estructura y textura de los materiales, aspecto donde la piedra natural no puede competir con materiales artificiales (cementos, cerámicos, metálicos, plásticos, etc.) en donde pueden controlarse estos parámetros, pero perdiendo el aspecto de lo natural que era muy valorado en tiempos pasados. La selección del material y el control de la calidad de las diferentes piezas, en cuanto a su homogeneidad cromática y textural pueden mejorar los resultados estéticos finales de la obra y evitar con ello, la decepción que se causa cuando el resultado final de las fachadas no son homogéneos (Figura 10).

Otra dificultad que puede hacer, en alguna ocasión, desistir a la dirección técnica de la utilización de la piedra natural como materia prima para la sustitución de elementos dañados en piedra, es tomar la decisión de que tipo de piedra es la más adecuada para establecer aquella a utilizar. Esto, que podría ser un cierto problema en épocas pasadas en donde los trabajos de restauración y la definición de los proyectos estaban realizados casi exclusivamente por arquitectos, actualmente no tiene que ser ninguna dificultad, ya que la



FIGURA 10. *La falta de homogeneidad en las piezas de Piedra Natural utilizadas, disminuyen el valor estético de la obra.*

redacción del proyecto de restauración lo realiza un arquitecto especializado, que se apoya en un equipo multidisciplinar en donde suelen encontrarse geólogos experimentados en la localización de estos recursos naturales y la definición de áreas fuentes de la materia prima original.

La localización de las canteras históricas tiene además del componente del conocimiento histórico, socio-económicos e industriales sobre la tecnología aplicada para la explotación, el de permitir definir el estado original del material. Esto es importante, ya que nos permite obtener muestras de características similares a las del edificio y con ello podremos evaluar su estado de deterioro, establecer índices de alteración y podremos estimar la evolución en la vida útil de este material, sobre la base de los resultados obtenidos, en los ensayos de envejecimiento acelerado. También las muestras de canteras envejecidas pueden ser de utilidad para realizar con ellas los ensayos necesarios para seleccionar los tratamientos de consolidación e hidrofugación más adecuados (Villegas et al., 1991; Esbert et al., 1997). Esto únicamente puede ser útil si los procesos de deterioro y los daños causados son similares y con la formación de los mismos productos de alteración, ya que si no es así, irremediablemente tendremos que utilizar piedra procedente del mismo edificio (Fort et al., 2005). Pero la utilidad principal de la localización de la formación geológica y de las canteras históricas de las que se abasteció el monumento, es la de poder utilizar estos mismos recursos geológicos para obtener la materia prima de la piedra de sustitución a utilizar en las labores de restauración (Fort, 1996; Aires-Barros et al., 1998, Cultrone et al., 2001).

SELECCIÓN DE MATERIALES

Cada material tiene unas propiedades petrofísicas que hacen que su resistencia a la degradación sean específicas. Esto obliga a que a la hora de seleccionar los materiales con los que se va a realizar la obra se elijan aquellos más idóneos para el ambiente en que se va a desenvolver y sobretodo, también, en función del uso que va a tener. A modo de ejemplo, las construcciones de Igloos, realizadas con bloques de hielo, podrían considerarse como un material pétreo formado por agua cristalizada, únicamente son posibles en ciertas regiones de la tierra y este tipo de construcción va a marcar su cultura y su actividad social.

Estos conceptos, los artistas que nos han transmitido sus obras, los conocían e intentaban levantar sus obras con los materiales más resistentes que se encontraban en su entorno. Así es frecuente la utilización de rocas graníticas en los zócalos, cornisas, vierteaguas de ventanas, etc., debido a sus buenas propiedades hídricas, sobre todo a su resistencia a los procesos de capilaridad, o su colocación en columnas, dinteles y jambas de puertas por su resistencia mecánica, etc. La utilización de pizarras en las techumbres debido a su impermeabilidad, etc.

Pero la selección del material, en la antigüedad, estaba limitada por la proximidad de las canteras, y por lo tanto, en muchos monumentos el tipo y calidad del material utilizado estaba en función de la proximidad de los recursos. Por lo tanto el factor económico influía en la selección, como en muchas ocasiones puede ocurrir actualmente, ya que a mayor distancia del material, mayor es su costo; y únicamente se traían materiales procedentes de otras zonas en casos muy especiales, cuando iban a ser utilizados como ornamento interior del edificio y de obras escultóricas, o para obras muy emblemáticas, pudiendo traer mármoles y otros tipos de piedra de diferentes áreas geográficas.

La utilización de técnicas petrológicas y geoquímicas permite definir el tipo de materiales y sus características, que sobre la base de la geología regional del entorno facilitan la localización de la formación geológica de la que se extrajeron los sillares de un monumento, e incluso de las canteras históricas. Existen muchos casos en los que estos estudios han permitido la localización de estas canteras históricas, utilizando para ellos técnicas geológicas muy variadas (Craig y Graig, 1972; Lazzarini et al., 1980; Bello et al., 1992; Fort et al., 1993; Galán et al., 1999; Álvarez et al., 2002; Dingelstadt, et al., 2000; Zezza, 1995; Lapuente et al., 2000).

Pero su localización no garantiza que pueda utilizarse estos materiales como sustitución de la piedra original del monumento que se encuentra dañada. La localización de las canteras históricas es una labor compleja, en donde se tiene que partir del análisis de los documentos históricos (libro de fábrica, facturas, etc.), para posteriormente proceder a una caracterización petrológica (petrografía, petrofísica y petroquímica) de los materiales. En base a los resultados obtenidos se puede llevar a cabo una búsqueda de la formación geológica e incluso de frentes de explotación en base a documentos cartográficos y un posterior muestreo de estas canteras para atestiguar su correlación de datos (Gómez-Heras y Fort, 2004).

La localización de las canteras históricas muchas veces es imposible dado que es frecuente que las canteras estuviesen a los mismos pies de la construcción, otras veces han desaparecido por el crecimiento urbano, o por ser canteras que han seguido siendo utilizadas hasta nuestros días, por lo que el frente original ya no existe. También dado el tipo de explotaciones antiguas que se beneficiaban de bolos graníticos o de frentes superficiales su localización es imposible. Lo que sí se puede definir es la formación geológica de la que procedieron los materiales originales y de aquí es de donde se puede extraer la piedra a utilizar.

La ventaja de colocar la piedra original como piedra de sustitución es que se garantiza la autenticidad del monumento sin producir incorporaciones de materiales nuevos. Se garantiza la idoneidad con los materiales originales, ya que son de la misma naturaleza y propiedades muy similares.

Pero aunque se localice la procedencia de sus canteras, muchas veces no se pueden utilizar, ya que suelen localizarse en parques naturales protegidos o en zonas urbanas que hacen inviable su explotación. Otras veces, estas canteras no tienen actividad, por lo que abrirlas para una actuación puntual no es rentable y además es necesario cumplir una serie de requisitos medioambientales, por lo que es complejo obtener los permisos de explotación necesarios.

Por ello la tendencia es la localización de formaciones geológicas con características petrológicas similares a la piedra original y en las que existan explotaciones abiertas que garanticen el suministro.

Otra fuente de abastecimiento de piedra para la restauración, que fue muy utilizada en el pasado, es la utilización de materiales de derribo. La reutilización de estos materiales es de gran interés ya que no sólo permite aprovechar recursos limitados realizando una labor ecológica, sino que también permiten utilizar materiales de características similares a los existentes en el monumento a unos costos más bajos, aunque no elude los trabajos de cantería ya que es necesario retallar cada pieza para ajustarla a las necesidades de la obra.

Indudablemente, la piedra a reutilizar tiene que proceder de construcciones de la zona y confirmar sus características para determinar su validez.

Por ello la selección de la piedra tiene que cumplir una serie de características, que son: Idoneidad, Compatibilidad y Durabilidad.

Idoneidad

Una piedra es idónea cuando cumple los requisitos de calidad necesarios para ser colocada en obra. Tiene que ser un material que presente las mejores características petrológicas y mineralógicas para la función arquitectónica encomendada. La piedra que tiene un fin estructural en el edificio tiene que presentar unas propiedades de resistencia a la compresión y a la flexión determinadas, mientras que aquellas que tengan un fin ornamental tendrán que ser valoradas por sus características de color, textura etc., así como por su capacidad de ser pulidas. La idoneidad de la piedra a elegir estará también en función del ambiente en que se va a colocar, ya que la resistencia a los agentes de deterioro tendrá que ser mayor en las fachadas exteriores, al estar sometidas a la acción de la lluvia, variaciones térmicas, etc. Igual ocurre con la ubicación del elemento arquitectónico, ya que la piedra del zócalo tiene que ser más compacta, con comportamiento hídrico que evite el ascenso de agua capilar procedente del subsuelo y de las salpicaduras por acción de la lluvia. Algo similar se puede indicar de la piedra de los alféizares, cornisas, impostas, que aunque tienen también un aspecto decorativo su función principal es de protección al deterioro del edificio por acción del agua. En el diseño de muchos monumentos se puede apreciar como la piedra utilizada en estas zonas, que son más propensas al deterioro, están sustituidas por otro tipo de piedra más resistente a los agentes de alteración.

La idoneidad del material seleccionado tiene que perdurar durante el mayor periodo de tiempo posible, cumpliéndose que el período de vida sea económicamente razonable (Llopis Trillo, 1995).

Por lo general, la sustitución de piedra en las obras de restauración mantiene estos criterios de idoneidad, en cuanto a la calidad de la piedra de construcción.

De esta forma existen numerosas normas y manuales que regulan las características que tienen que tener la piedra de construcción atendiendo a su tipología y en función de su uso (García del Cura, 1996; Dapena, 1996). Están normalizados la mayoría de los ensayos que se realizan para establecer la calidad y la idoneidad de los materiales, atendiendo a la aplicación que se le dará al material en la obra (Comités Europeos de Normalización, CEN). En la Tabla 3 se muestra la relación de ensayos que suelen realizarse. Puede apreciarse que los ensayos pueden agruparse en **ensayos de caracterización** del material, como pueden ser el análisis petrográfico, peso específico, absorción de agua, etc.; ensayos de **resistencia mecánica** (compresión, flexión, anclajes, etc.) y **ensayos de durabilidad** o resistencia a procesos de deterioro (desgaste, por abrasión, resistencia al choque térmico, resistencia a las heladas, cristalización de sales, etc.).

Diferente es la idoneidad en las técnicas constructivas. El chapado con placas de piedra natural de los sillares deteriorados es una práctica que se utiliza desde antiguo. Actualmente la tendencia es reducir cada vez más el grosor de dichos placas (Figura 7), para reducir costes y el aumento de problemas de alabeamiento y combamiento de las placas utilizadas (Figura 11). Por ello, es muy importante conocer la anisotropía del material y su disposición

TABLA 3
IMPORTANCIA DE LOS ENSAYOS TECNOLÓGICOS DE LA
PIEDRA NATURAL SEGÚN SU USO
(MODIFICADO DE GARCÍA DEL CURA, 1996; BUSTILLO Y CALVO, 2005)

CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS	Revestimientos		Pavimentos		Peldaños escaleras	Cubiertas de pizarra
	Interior	Exterior	Interior	Exterior		
Descripción petrográfica	**	**	**	**	**	**
Análisis químicos	*	*	*	*	*	*
Peso específico aparente	**	**	**	**	**	**
Contenido en carbonatos						***
Absorción de agua	*	**	*	**	*	***
Porosidad aparente	*	**	*	**	*	***
Módulos de elasticidad		**		**		*
Coefficientes de dilatación		***		**	**	**
Microdureza Knoop		*	***	***	***	*
Resistencia a la compresión	*	**	*	**	**	
Resistencia a la flexión	*	**	**	**	***	***
Resistencia al choque			***	***	***	**
Resistencia a las Heladas		***		***		
Resistencia al desgaste	*	*	***	***	***	**
Resistencia al Choque térmicos	*	***	*	***	**	***
Resistencia al SO ₂		**		**		***
Resistencia al anclaje	**	***				

Grado Interés: * Poco importante ** Importante *** Muy importante

en las piezas para el revestimiento de las fachadas, así como la resistencia a los anclajes, procesos de dilataciones, tanto térmica como hídrica de los materiales, etc.

Aunque se está avanzando mucho en estos aspectos, existen ensayos que aportan mucha información sobre el comportamiento de los mismos, que no suelen realizarse y cuyos resultados pueden ser relevantes sobre la idoneidad de los materiales utilizados en la obra. Entre estos ensayos se pueden indicar, entre otros, la determinación de la porosidad y su distribución de tamaños de poros, así como la determinación de los grados de anisotropía por medio de técnicas de velocidad de propagación de ultrasonidos.

Compatibilidad

La compatibilidad es un concepto que no siempre se consigue en los trabajos de sustitución de piedra. Este concepto hace referencia a que la colocación de la nueva piedra en el edificio no tiene que producir una aceleración en los procesos de deterioro de la piedra original. Existe el error de creer que en las obras de restauración es mejor colocar piedras

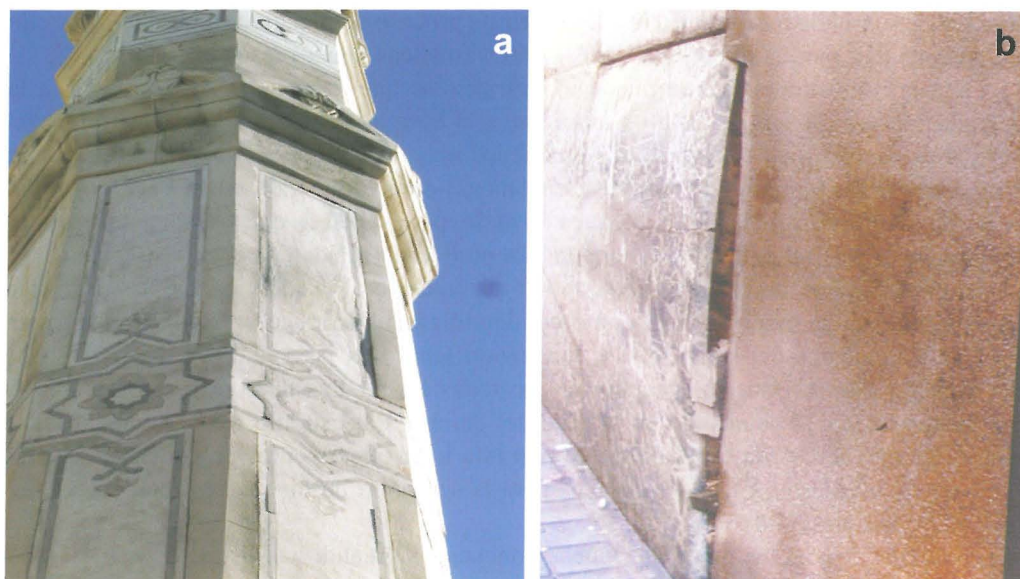


FIGURA 11. *Alabeamiento (a) y combamiento (b) de placas de Piedra Natural.*

de muy alta calidad, ya que la obra monumental, al tener un valor histórico irremplazable lo más adecuado es poner la mejor piedra que exista en el mercado, indistintamente de su coste. Esto genera muchas veces un mayor deterioro, ya que al colocar una piedra con propiedades petrofísicas muy diferentes a la original, generalmente con una menor porosidad, menor permeabilidad al vapor de agua, menor absorción de agua, una mayor resistencia a la compresión, piedra de mayores densidades, puede generar deterioros en las piedras adyacentes. Por ello es necesario que la piedra de sustitución cumpla una serie de requisitos de compatibilidad con la existente.

De esta forma, lo ideal es que la piedra que se coloque tenga las mismas características petrofísicas que la piedra original, en cuanto a su comportamiento hídrico, resistencia mecánica y aspecto exterior. Tienen que ser piedras con dilataciones hídricas y térmicas similares. Al sustituir en la restauración un elemento por otro de iguales características, se elimina el riesgo de la interacción de materiales incompatibles. Para poder establecer esta compatibilidad es necesario conocer las propiedades físicas de la piedra original, en sus diferentes grados de alteración, y de las posibles piedras de sustitución, para seleccionar la más adecuada.

Durabilidad

La durabilidad es la capacidad de un material para mantener sus propiedades físicas y químicas para el que fue seleccionado para ponerlo en obra, sin que produzca una disminución de su valor.

Como se ha indicado, no todos los materiales utilizados en el patrimonio tienen la misma resistencia a los procesos agresivos a los que van a estar expuestos, e incluso un mismo material puede perdurar en un ambiente determinado; pero ese mismo material puesto en

condiciones climáticas diferentes pueden sufrir un proceso degradativo importante. Por ello es fundamental, para la durabilidad de las obras artísticas, tener presente su diseño.

Cada material tiene unas propiedades petrofísicas que hacen que su resistencia a la degradación sea específica. Esto obliga a que a la hora de seleccionar los materiales con los que se va a realizar la obra se elijan aquellos más idóneos para el ambiente en que se va a desenvolver y sobretodo, también, en función de uso que va a tener. Como ejemplo se pueden realizar esculturas con bloques de hielo, pero sabemos que su mantenimiento es difícil, puesto que un aumento de temperatura produciría rápidamente su destrucción.

La preocupación de la durabilidad de los materiales en los edificios que se construían en el pasado era en muchos casos el motivo de utilizar la piedra como elemento principal. Pero ya a mediados del siglo XIX se empieza a tener una preocupación del proceso de degradación que sufrían, observando que no todas las piedras de construcción tenían la misma resistencia al deterioro con el paso del tiempo. Por este motivo, y también por la mejora de los medios de transporte, que permitía traer otras piedras procedentes de otras regiones, se empiezan a realizar ensayos para la selección de los nuevos materiales (Gómez-Heras y Fort, 2004).

La durabilidad de los materiales puede conocerse siguiendo varios métodos:

Métodos comparativos: Es el método utilizado habitualmente en la antigüedad en donde la capacidad de observación y la experiencia del constructor era el determinante para elegir la piedra más adecuada, al comparar como se había comportado en otros edificios del entorno.

Métodos indirectos: Se basa en utilizar parámetros petrológicos (petrográficos o petrofísicos) para establecer la durabilidad de los materiales.

Las piedras muy laminadas, con mayor residuo insoluble con contenido en fracción arcillosa y minerales de hierro, son más rápidamente deterioradas que las que tienen una composición más homogénea.

Las rocas con procesos de cementación de tipo sintaxial y mosaico y con procesos de recristalización de su matriz suelen ser más resistentes a los procesos de deterioro que las calizas micríticas. La presencia de discontinuidades (estilolitos, fisuras, etc.), favorecen los procesos de deterioro.

En general, las piedras con menor porosidad, con ausencia de poros capilares, ausencia de fracción arcillosa y con procesos de cementación son las que mejor resisten los procesos de deterioro. Las de textura más fina son más resistentes que las de textura más gruesa.

La presencia de fracción arcillosa, principalmente de tipo montmorillonita con capacidad de hinchamiento, puede acelerar el proceso de deterioro de la piedra si esta sometida a importantes variaciones de humedad-sequedad (Delgado Rodríguez, 2001). Otros minerales de la arcilla como la paligorskita y sepiolita son también causantes de una menor durabilidad de la piedra de construcción (Veniale et al., 2001).

Las propiedades petrofísicas han sido también muy utilizadas para establecer la durabilidad de los materiales de una forma indirecta (Tabla 4). Uno de los parámetros más utilizado es la porosidad de la roca y su distribución de tamaños de poros, ya que son estos los que favorecen la entrada de agentes de deterioro (agua, soluciones salinas, contaminación atmosférica, etc.). Además, en función de su distribución de tamaños de poros se establece la

TABLA 4
PARÁMETROS PETROFÍSICOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA DURABILIDAD DE LA PIEDRA NATURAL

Parámetro	Autor	Ecuación
Coefficiente saturación (Cs)	Hirschvald, 1908	$Cs = \frac{\text{Absorción agua}}{Pt}$
Coefficiente saturación Capilar (CsC)	Ross y Butlin, 1989	$CsC = \frac{Pc}{Pt}$
Factor Durabilidad (D)	Richardson 1991	$D = \frac{Pc^2}{Pt}$
Estimador de Microporosidad	Mohd et al., 1996	$[(Pt \cdot P_{micro}) Cs]^{0.5}$
Estimador Dimensional de Durabilidad (DDE)	Ordóñez et al., 1997	$DDE = \sum \frac{Dv(ri)}{ri} Pcon$
Índice de Daños por Hielo (DH)	López González-Mesones, 2001	$DH = \sum_0^{365} T_s$
Estimador de Durabilidad Petrofísica (PDE)	Benavente et al., 2004	$PDEF = 10 \frac{DDE}{\sigma f}$

Pc= Porosidad capilar

Pt= Porosidad Total

Dv= Distribución de tamaños de poros

Ri= Tamaño de poro

Pcon= Porosidad conectada

 σf = Resistencia a la flexiónPmicro= Microporosidad (tamaño de poros inferiores a 5 μm)T_s= Temperatura mínima diaria

capacidad de movilidad de estos agentes por el interior de la piedra. Uno de los parámetros más antiguos que se han utilizado es el coeficiente de saturación (Cs), que relaciona la absorción de agua con la porosidad del material (Hirschvald, 1908).

Ros y Butlin (1989) y Richardson, (1991) introducen el concepto que no todo el agua influye de igual manera en el deterioro de la piedra, afectando más directamente la porosidad capilar, por lo que relacionan esta porosidad con el total de la roca. El tipo de poro y la distribución de tamaño de los poros en los materiales pétreos influyen en su deterioro,

tanto por acción de la heladicidad (Kaneuji et al., 1980), como por la acción de cristalización de sales, ya que las presiones de cristalización son diferentes según el tamaño del poro en que cristalizan (Fitzner y Sneath, 1982). Por esta razón, Rossi-Maneresi y Tucci (1989) y Punuru et al., (1990), introducen la importancia del tamaño de los poros en el deterioro. Mohd et al., 1996, indica la importancia de la microporosidad en el deterioro de los materiales, definiendo varios índices. Posteriormente, Ordóñez et al. (1997), definen el término de Estimador Dimensional de Durabilidad (DDE) para valorar el deterioro de las rocas sobre la base de la distribución de tamaños de poros, incluyendo también aspectos como la porosidad total y el grado de conexión de los poros.

Benavente et al., (2004) introducen en estos estimadores de durabilidad el factor de resistencia mecánica determinado por los ensayos de compresión, flexión y módulos de Young's, definiendo el Estimador de Durabilidad Petrofísica (PDE). Los resultados obtenidos marcan, como un buen criterio de durabilidad, la utilización de la relación entre el estimador de durabilidad DDE y la resistencia a la flexión, definiendo el índice específico (PDE_F).

Pero la durabilidad real es necesario establecerla teniendo presente no sólo la porosidad y distribución de tamaños de poros de la roca, sino también las condiciones climatológicas a las que va a estar sometida la piedra. De esta forma, López González-Mesones (2001), establece un índice de daños por hielo (DH), en donde tiene presente el número de heladas reales que se producen en la zona obtenidos a partir del estudio climatológico de los últimos 30 años. Esto permite establecer la vida media del material ensayado teniendo en cuenta la posición de la piedra en la obra.

Métodos directos: Están basados en la realización de ensayos de envejecimiento. Estos ensayos pueden ser a tiempo real siendo nominados como ensayos de envejecimiento natural y consisten en la colocación de probetas a la intemperie durante varios meses e incluso años, y evaluar periódicamente los cambios que experimentan con el paso del tiempo. Los ensayos de envejecimiento acelerado consisten en la utilización de cámaras climáticas (hielo-deshielo, humedad-sequedad, choque térmico, cristalización salina, contaminación atmosférica, niebla salina, radiación ultravioleta, etc.). Los ensayos de envejecimiento natural son más reales, ya que se ajustan a las condiciones reales existentes en la zona o región en donde se va a utilizar la piedra, teniendo en cuenta los efectos de todos los parámetros a la vez, pero tiene el inconveniente de que es necesario el seguimiento del ensayo durante varios años. Los ensayos de envejecimiento acelerado tienen como mayor inconveniente que se suele considerar un único factor de alteración, cuando realmente en la naturaleza interactúan varios a la vez. Pero tiene como ventaja que es mucho más rápido, pudiendo obtener resultados en unas semanas. A pesar que utilizan condiciones de ensayos que modelizan a los existentes en el monumento, en donde se va a utilizar la piedra, suelen trabajarse con condiciones más extremas, con una mayor fatiga que en la realidad, por lo que se da un factor de seguridad de los resultados obtenidos.

En estos ensayos es necesario el control de una serie de parámetros para estimar el grado de durabilidad de los materiales. El más utilizado es el de la pérdida de peso, y de la inspección visual de los daños en la superficie de las probetas. Se define como el umbral de alteración cuando se alcanza las pérdidas del 1% de pérdida de peso y el umbral de destrucción para un porcentaje del 5%.

Junto con la pérdida de peso se controla la evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos, la variación de la porosidad accesible al agua, las modificaciones de color por medio de parámetros cromáticos, cambios en la resistencia a la flexión y compresión, al desgaste, etc. Los inconvenientes de estos ensayos, con respecto a los de envejecimiento natural, es que no reproducen todas las variables que afectan a la piedra, los mecanismos de alteración son complejos generados por diferentes factores que no se tienen en cuenta y que el tamaño de las probetas es pequeño comparado con el de los sillares del edificio. Por otro lado, aunque los ensayos combinados con varios factores de degradación son posibles, las dificultades parten de su diseño para que se ajuste a la realidad.

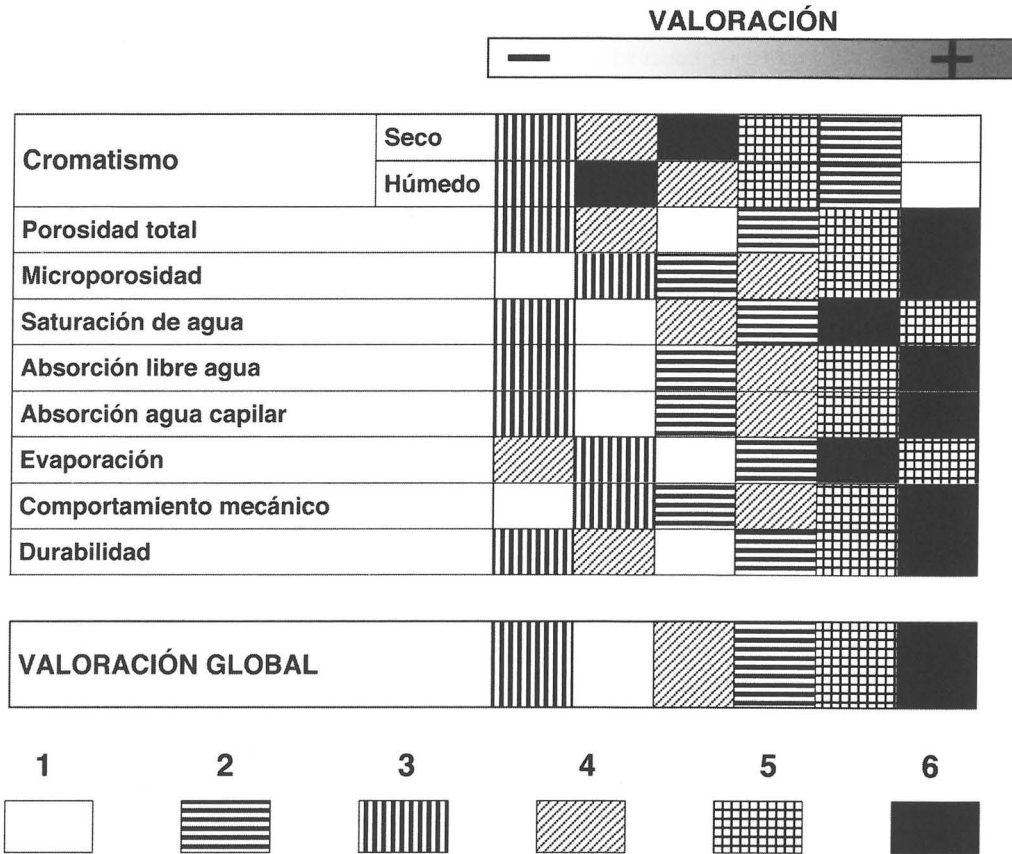
VALORACIÓN DE LA PIEDRA DE SUSTITUCIÓN

La valoración final de la piedra a utilizar en la sustitución de elementos deteriorados en el patrimonio arquitectónico tiene que partir de la determinación de la idoneidad, compatibilidad y durabilidad de la piedra con los agentes de deterioro. Los de idoneidad y compatibilidad son los más importantes ya que la duración de una pieza de sustitución sea baja, mientras que no afecte al resto del edificio, su incidencia en la decisión será menor, ya que si se deteriora se puede volver a sustituir. En la Figura 11, se muestra la tabla de valoración que es necesario establecer para definir la piedra de sustitución a utilizar. El ejemplo corresponde a la sustitución de las piezas muy deterioradas en el entablamento del claustro de la Catedral de Cuenca (Fort et al., 1998). Puede apreciarse, como en este caso, las piedras que dan mejor resultados corresponden a las procedentes de canteras de Uclés (Cuenca) y del Gris Pulpís (Castellón), seguidas de la Piedra de Torrubia (Cuenca) y de las canteras originales del monumento. La piedra seleccionada presenta una menor valoración en su compatibilidad con la piedra del monumento en su cromatismo. Existe otro criterio de valoración en la selección de la piedra que es la de su discernibilidad, es decir la piedra tiene que ser diferenciada de la piedra original, por lo que un cromatismo diferente puede ser de interés. Esto es necesario valorarlo de una forma específica, ya que aunque es importante su diferenciación, si el contraste cromático es muy fuerte, lo que se provoca es un deterioro estético del conjunto, tendiendo a darle más relevancia al elemento sustituido, por su contraste dentro del conjunto, que al elemento auténtico. Por ello es necesario que dentro de esa discernibilidad, tenga que entrar el mimetismo de la intervención, procurando que el



FIGURA 12. Daños en placas de Piedra Natural por el tipo de anclaje utilizados.

TABLA 5
ENSAYOS PARA LA SELECCIÓN DE LA PIEDRA DE SUSTITUCIÓN EN UNA
OBRA DE RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO



Leyenda - Valoración de la piedra de sustitución.

- 1- Piedra del monumento
- 2- Piedra canteras originales del monumento
- 3- Piedra Bateig
- 4- Piedra de Torrubia
- 5- Piedra Pulpis
- 6- Piedra de Uclés

cambio cromático no sea muy llamativo y utilizando otras técnicas de diferenciación, como puede ser en el acabado superficial, marcas de diferenciación, etc., siempre acompañado con la documentación y registro de la intervención realizada.

Otro aspecto a valorar en la selección de la piedra de sustitución es la disposición de estos elementos en obra. La tendencia en muchas ocasiones, como ya hemos indicado, es la utilización de chapados de piedra, para ocultar la piedra deteriorada. Esta técnica se ha utilizado desde antiguo, aunque en tiempos pasados el grosor de los aplacados era mucho mayor. Se puede decir que, para disminuir costos, existe una reducción del grosor de las placas utilizadas, siendo actualmente las más utilizadas las que se aproximan a 2 centímetros. Esto hace que la técnica de sujeción de las placas sea un aspecto a considerar, ya que a veces lo que se provoca es un mayor daño en la piedra original, sobre todo cuando se utilizan elementos metálicos incompatibles, con importantes dilataciones térmicas, con riesgos de oxidación, que afectan no solo a las nuevas placas colocadas sino que también a la piedra original.

Por otro lado, la utilización incorrecta de pastas adhesivas o de anclajes de sujeción de las placas provoca una menor duración de lo restaurado, ya que suelen generar daños, como son la presencia de manchas en la superficie de la piedra, o la rotura de las placas (Figura 12). Por ello es necesario realizar un diseño correcto en la colocación de las piezas, en donde se conozcan las dilatación hídrica y dilatación térmica, resistencia al anclaje, etc., de la piedra natural, calcular el grosor adecuado en función del material a colocar, y controlar la ejecución correcta de la disposición de las piezas en obra. Todo ello es necesario valorarlo para poder garantizar una buena selección del material

CONCLUSIONES

A pesar de la situación actual, en donde otros materiales de menor costo compiten con la piedra natural, su uso sigue siendo un elemento fundamental en la conservación del patrimonio arquitectónico. Siempre es más adecuada la utilización de piedra natural para la restauración de edificios y monumentos emblemáticos construidos originalmente en piedra.

La selección de la piedra a utilizar en la restauración tiene que fundamentarse principalmente por su idoneidad y compatibilidad con los materiales existentes en el monumento. Lo ideal es utilizar una piedra de características composicionales y petrofísicas similares a la piedra original del monumento. Para ello puede utilizarse piedra de las mismas canteras que abastecieron la obra, o en el caso que no existan, se puede buscar piedra procedente de la misma formación geológica que tenga las características adecuadas. Pero también es válido poner piedras de otra procedencia, siempre y cuando mantenga además de la idoneidad de la calidad de la piedra la compatibilidad con la piedra ya existente en el monumento. La determinación de esta compatibilidad tiene que realizarse conociendo los diferentes estados de alteración que presenta la piedra original del monumento.

Para determinar la idoneidad de los materiales a colocar pueden ser suficiente los ensayos de caracterización que suelen realizarse para determinar la calidad de la piedra natural, definida por las diferentes normas de ensayos, pero para los ensayos de compatibilidad no existen normas específicas, ya que es necesario realizar ensayos no recogidos en esas normas, como son el conocimiento de la distribución de tamaños de poros, el grado de mojabilidad

de la superficie de la piedra, la determinación de la cinética de sorción y evaporación de agua, la permeabilidad al vapor de agua, etc. La realización de estos ensayos se pueden ejecutar en laboratorios experimentados, pero para la interpretación de los resultados, y poder definir el material más adecuado, es necesario conocer la problemática del conjunto del edificio, con conocimiento de las causas del deterioro de la piedra original a sustituir, la situación de las piezas a sustituir, etc.

Los criterios de durabilidad de la piedra seleccionada, aunque son también muy importantes, no son determinantes, ya que el periodo de vida de la mayoría de las piedras que se comercializan supera los requerimientos mínimos en las obras de restauración, pero si que es deseable que su resistencia a los agentes de deterioro sean los más altos posibles, sobre todo en bases a su disposición en la obra. Por ello, al igual que hemos indicado anteriormente, es necesario establecer las causas del deterioro del material original, para buscar aquel que sea lo más resistente posible a los agentes de deterioro. De esta forma es necesario comprobar la durabilidad a agentes específicos de deterioro utilizando para ello métodos indirectos, sobre la base de las propiedades petrofísicas que presentan o por medio de los ensayos de envejecimiento acelerado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del **Programa Maternas** de la Comunidad de Madrid (S-0505/MAT/94), sobre “Durabilidad y conservación de materiales tradicionales naturales del patrimonio arquitectónico”.

BIBLIOGRAFÍA

- Aires-Barros, L., Neto, M.J., Soares, C. (1998). The monastery of Batalha (Portugal): Restoration works and Historic quarries, a preliminary study. In: *IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*: 384-386, CICOP, Tenerife.
- Alonso, J., Martín Fernández, J. (2004). *Preservación del patrimonio histórico de España. Análisis desde una perspectiva económica*. Fundación Caja Madrid, 155 pp.
- Álvarez de Buergo, M.; Fort, R.; López de Azcona, M.C.; Mingarro, F. (2002). Analysis of the ochre patina on the limestone of Palacio de Nuevo Baztán, Madrid, Spain. In: *Protection and conservation of the cultural heritage of Mediterranean cities*. (ed. E. Galán & F. Zezza), Ed. Balkema Publishers: 391-396.
- Bello, M. A., Martín, L., Martín, A. (1992). Identificación microquímica de mármol blanco de Macael en varios monumentos españoles. *Materiales de Construcción* 42: 23-30.
- Benavente, D.; García del Cura, M. A.; Fort, R.; Ordóñez, S. (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength *Engineering Geology*, 74: 113-127.
- Bustillo, M., Calvo, J. P. (2005). *Materiales de construcción*. Fuego Editores. Madrid. 458 pp.
- Craig, H. and Craig, V. (1972). Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis. *Science* 176: 401-403.

- Cultrone, G., Barone, G., Gangemi, G. Ioppolo, S. (2001). Lapidous materials from the columns of the cathedral of S. Maria di Randazzo (Catania) and from their origin quarries. *Journal of Cultural Heritage* 2: 199-207.
- Dapena, E. (1996). Piedra en bloque para edificación y obras de fábrica. En: *Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico*. (ed. Mingarro Martín, F.), Editorial Complutense, Madrid. 271-288.
- Delgado Rodríguez, J. (2001). Evaluación del comportamiento expansivo de las rocas y su interés en conservación. *Mater. Construc.* 51, 263-262: 183-195.
- Dingelstadt, C., Dreesen, R., Thorez, J., Lorenzi, G, Bossiroy D., Antenucci D., Banier, J. (2000). A petrographic atlas as a decision-tool in replacement and substitution of ornamental stones in historical buildings and monuments. In: *Proceedings of the 9th International congress on deterioration and conservation of stone*, Venice (ed. Fassina, V.), Elsevier, Amsterdam 2: 33-41.
- Federación Española de la Piedra Natural. *Informe del Sector 2001*.
- Fitzner, B., Snethlage, R. (1982). Ueber Zusammenhänge zwischen salzkristallisationsdruck und Porenradienverteilung. *G.P. Newsletter* 3: 13-24.
- Fort, R. (1996). Localización de antiguas canteras utilizadas en el patrimonio monumental. En: *Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico*. (ed. Mingarro Martín, F.), Editorial Complutense, Madrid: 311-316.
- Fort, R., Bustillo, M., Mingarro, F. y López de Azcona, C. (1993). Weathering of granite rocks in the Cathedral of Toledo (Spain): Geochemical evolution. In: *Alteración de granitos rocas afines, empleados como materiales de construcción*. (eds. M. A. Vicente, E. Molina y V. Rives) Ed. C.S.I.C.: 155-158.
- Fort, R., Mingarro, F., López de Azcona, M.C. (1996). Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid. *Geogaceta* 20: 1236-1239.
- Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Varas, M.J., Vázquez, M.C. (2005) Valoración de tratamientos con polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos del patrimonio. *Revista de Plásticos Modernos*, 89 (583): 83-89.
- Fort, R., López de Azcona, M.C., Mingarro, F. (1998). Sustitución de elementos arquitectónicos en el Claustro de la Catedral de Cuenca (España): Selección de materiales pétreos. In: *IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. CICOP, Tenerife: 177-179.
- Galán, E., Carretero, M. I., Mayoral, E. (1999). A methodology for locating the original quarries used for constructing historical buildings: Application to Malaga Cathedral, Spain. *Engineering Geology* 54: 287-298.
- García del Cura, M.A., Ordóñez, S. (1995). Potencial geológico de mármoles en España. En: *Manual de Rocas Ornamentales*. (Ed. C. López Jimeno). Entorno Gráfico SL. 81-101.
- García del Cura, M.A. (1996)- Normativa de rocas ornamentales. En: *Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico*. (ed. Mingarro Martín, F.), Editorial Complutense, Madrid: 83-92.
- Gómez-Heras, M., Fort, R. (2004). Location of quarries of non-traditional stony materials in the architecture of Madrid: The Crypt of the Cathedral of Santa María la Real de la Almudena. *Materiales de Construcción* 54: 33-49.
- Hirschawald, J. (1908) *Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit*. Ernst & Sohn, Berlin.

- Kaneuji, M., Winslow, D.N., Dolch, W.C. (1980). The relationship between an aggregate's pore size and its freeze thaw durability in concrete. *Cement and Concrete Research*, 10: 433-441.
- Kouzeli K., Lazari C. Dimou, E. (2004). Fossiliferous limestones used in ancient greek monuments: The influence of their specific features on their durability. In: *10 th International congress on deterioration and conservation of stone*. (ed. D.Kwiatkowski & R. Löfvendahl). ICOMOS Sweden. I, 123-130.
- Lapiente, M. P., Turi, B., Blanc, P. (2000). Marbles from Roman Hispania: stable isotope and cathodoluminescence characterization. *Applied Geochemistry* 15-10: 1469-1493.
- Lazzarini, L., Moschini, G., Stievano, B.M. (1980). A contribution to the identification of Italian, Greek and Anatolian marbles through a petrological study and the evaluation of Ca/Sr ratio. *Archaeometry* 22: 173-183.
- López González-Mesones, F. (2001). Ensayos de caracterización. En: *La piedra en Castilla y León*. (García de los Ríos, J.I. y Báez, J.M.). 346 p.
- Llopis Trillo, G. (1995). Características y propiedades de las rocas ornamentales. Caracterización y Normalización. En: *Manual de Rocas Ornamentales*. (Ed. C. López Jimeno). Entorno Gráfico SL. 175-196
- Martínez Justicia, M.J., (1996). *Antología de textos sobre restauración*. Universidad de Jaén. Servicio de Publicaciones. 240 p.
- Mohd, BK, Howarth, RJ., Bland, CH. (1996). Rapid prediction of building research establishment limestone durability class from porosity and saturation. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 29: 285-297.
- Nicholson, D.T. (2001). Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 819-838.
- Ordóñez, S., Fort, R., García del Cura, M.A. (1997) Pore size distribution and the durability of a porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 30: 221-230.
- Punuru, A.R., Chowdhury, A.N., Kulsheshta, N.P., Gaury, K.L. (1990). Control of porosity on durability of limestones at the Great Sphinx, Egypt. *Envir. Geol. Water Science* 15: 225-232.
- Richardson, B.A. (1991). The durability of porous stones. *Stone Industries* 26 10: 22-25.
- Roc-Maquina (2003). *La Piedra Natural de España*. Directorio.
- Ros, K.D., Butlin, R.N. (1989). *Durability Test for Building Stone*. Report BR 141, Building Research Establishment, Watford, UK.
- Rossi-Maneresi, R., Tucci, A. (1989). Pore structure and SALT crystallization: 'salt decay' of Agrigento biocalcarene and 'case bardenin' in sandstone. *Proceedings Ist International Symposium, Bari, 'The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin'*: 97-100.
- Veniale, F., SEIT, M., Rodríguez-Navarro, C. Lodola S. (2001). Procesos de alteración asociados al contenido de minerales arcillosos en materiales pétreos. *Materiales de Construcción* 51, 263-262: 163-182.