

ESCULTURAS DEL CERRILLO BLANCO DE PORCUNA (JAÉN): CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y EVALUACIÓN DE PRODUCTOS DE TRATAMIENTO

Jesús Espinosa Gaitán⁽¹⁾, Marta Sameño Puerto⁽¹⁾ y Francisco Gutiérrez Montero⁽¹⁾

Resumen

Se recogen en este trabajo los aspectos más significativos de los estudios previos a la intervención realizados sobre nueve esculturas ibéricas procedentes del Cerrillo Blanco de Porcuna (Jaén).

El trabajo se planteó con un doble objetivo, en primer lugar la caracterización composicional y textural de los materiales constitutivos de las esculturas, de los productos de alteración, y de materiales de reposición de intervenciones anteriores; y por otro lado, considerando el estado de conservación de algunas zonas de las esculturas, se planteó la necesidad de aplicar un tratamiento de conservación, lo que requiere realizar una evaluación mediante procedimientos experimentales, de las modificaciones que ocasionan dichos tratamientos sobre ciertos parámetros físicos de la piedra que controlan su durabilidad.

Palabras clave: escultura, piedra, Petrografía, porosidad, porometría, tratamientos de conservación, dureza superficial, desorción de agua.

1. INTRODUCCIÓN

El conjunto de esculturas del Cerrillo Blanco de Porcuna fue hallado en la década de los setenta a lo largo de una serie de excavaciones, estando en la actualidad el número de piezas catalogadas en torno a 1500, que se encuentran en el Museo Provincial de Jaén. Estas esculturas se han atribuido al Período Ibérico (10 mitad del s. IV a.C.) [1].

Por el tipo de esculturas, el contexto originario en el que estuvieron expuestas debió corresponder a algún tipo de edificio monumental, el cual no está claro al no haberse encontrado ningún resto de estructuras o cimentaciones en el yacimiento.

⁽¹⁾ Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Isla de la Cartuja. 41092 Sevilla.

La piedra en la que están talladas las esculturas es una calcarenita de grano fino, conocida en la zona como "piedra de Santiago", por proceder de los alrededores del pueblo de Santiago de Calatrava, cercano a Porcuna.

El estado de conservación es variable, dependiendo de las piezas [2], pero es común que aparezcan muy fracturadas, presentándose, sin embargo, las superficies pétreas en relativo buen estado de conservación, lo que ha hecho pensar que en algún momento de su historia hubo una mutilación de las piezas y un posterior enterramiento intencionado.

En algunos casos las piezas fueron unidas, en intervenciones anteriores, con resinas, utilizándose además espigas metálicas en varias esculturas, que han dado lugar en algunas de ellas a pátinas anaranjadas. Las superficies pétreas presentan como formas de alteración más importantes: decohesión superficial en algunas zonas, concreciones, adherencias terrosas, pulverulencias, picaduras, pérdidas de material por erosión física (sobre todo en bordes de fractura) y alteraciones cromáticas debidas a ataques biológicos por líquenes.

Antes de realizar la intervención, el equipo responsable de la conservación-restauración de las esculturas creyó oportuno la realización de un estudio analítico sobre la caracterización de los materiales en los que están talladas las esculturas, productos de alteración, líquenes, así como materiales aplicados en intervenciones anteriores. Se tomaron pequeñas muestras de piedra de cada una de las esculturas (nueve en total), de zonas poco visibles, tres muestras de concreciones y pátinas, tres muestras de líquenes, y cinco de materiales de intervenciones anteriores.

Por otro lado, el estado de algunas zonas superficiales de las esculturas hizo plantearse la necesidad de aplicar un producto protector en la superficie, por lo que se consideró la realización previa de una serie de determinaciones de carácter petrofísico, con probetas de ensayo. Teniendo en cuenta que las esculturas estarán integradas en un ambiente museístico, sólo se han realizado valoraciones de propiedades que pueden influir sobre la durabilidad del material en un ambiente controlado, y la variación de la dureza superficial y del color antes y después de los tratamientos.

Para la realización de éstas determinaciones, dado el gran volumen de material que se requiere para la elaboración de probetas de ensayo, el museo de Jaén suministró fragmentos de piedra encontrados en el mismo lugar de enterramiento, lo cual es ideal, ya que habrán estado expuestas a las mismas condiciones, y por tanto habrán sufrido los mismos cambios texturales y composicionales que las esculturas.

2. INSTRUMENTACIÓN Y MÉTODOS DE ESTUDIO

Se han utilizado los siguientes equipos instrumentales y métodos de ensayo:

- Difractómetro de rayos X Phillips PW 1710 equipado con rendija automática, para la caracterización mineralógica de los materiales. Conocidos los poderes reflectantes de cada mineral se ha realizado un análisis semicuantitativo con un error estimado del $\pm 5\%$.

- Microscopio Petrográfico Leica DMLP para el estudio petrográfico de las muestras de piedra. Microscopio Leitz Laborlux 12 ME S.T. para estudio biológico.
- Espectrometría de Infrarrojos por Transformadas de Fourier para el análisis de resinas.
- Ensayo de Saturación de Agua al Vacío, este ensayo se ha realizado siguiendo la normativa de la RILEM [3], para conocer la porosidad eficaz (n_v) o accesible al agua de los materiales antes y después de aplicar los tratamientos.
- Porosímetro de Hg Micromeritics 9320, se ha utilizado para realizar la curva porométrica de los materiales, es decir la distribución en porcentajes según tamaños de radio de poros, obteniéndose información sobre la microporosidad (radio poro $< 5\mu\text{m}$) no detectable con otras técnicas. Los límites de los poros cuantificables con ésta técnica están entre $100\mu\text{m}$ y $0,001\mu\text{m}$ de radio de poro. También permite obtener otros parámetros del sistema poroso, como porosidad accesible al Hg.
- Carta Munsell. La aplicación de los tratamientos puede inferir un cambio de color a la piedra que difiera del original de la misma. Este cambio se ha cuantificado mediante la "Munsell Soil Colour Chart".
- Durómetro tipo Brinell. La dureza superficial mide la resistencia que opone un material a ser penetrado por un cuerpo más duro. Esta se ha determinado con un durómetro tipo Brinell, empleando una bola de 5 mm, aplicando una precarga de 10 kg y una carga total de 30 kg. La dureza se determina como función inversa de la diferencia entre la penetración de la bola con la carga de 30 kg y con la carga de 10 kg. Este ensayo no tiene relevancia cuantitativa pero sí cualitativa ya que se obtiene una idea de la dureza que confiere los tratamientos a la piedra, mediante comparación con las probetas sin tratar.
- Ensayo de Desorción de Agua (RILEM). El ensayo básicamente consiste en saturar las probetas de agua y posteriormente dejarlas secar a temperatura y humedad relativa constantes, ya que es muy sensible ante estas variables. Para ello se ha utilizado una cámara climática Dycometal estableciendo condiciones termohigrométricas constantes (T20C y HR50). Los resultados se llevan a un gráfico en el que se representa la cantidad de agua (%) que contienen las probetas en cada instante del ensayo, respecto al peso seco de las probetas obtenido previamente tras 48 h de permanencia en una estufa a $60\text{ }^\circ\text{C}$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.1.1. Piedra

La piedra en la que están talladas todas las esculturas presenta similar apariencia; tiene un color beis claro, casi blanco, estructura homogénea, y una textura bioclástica con un tamaño medio de grano fino ($< 1\text{ mm}$), bastante equigranular.

Se han realizado análisis de DRX sobre muestras de todas las esculturas obteniéndose resultados muy similares en todos los casos. De forma mayoritaria aparece calcita (90-95%), cuarzo (5%) y filosilicatos en cantidades minoritarias (< 5%).

Se han estudiado ocho láminas delgadas, concluyéndose tras su estudio que todas ellas corresponden al mismo tipo de piedra, una calcarenita de grano fino. Ésta se compone, al menos en un 80%, de componentes *aloquímicos* [4], en su mayoría microfósiles, que constituyen prácticamente todo el agregado de la roca. Casi en su totalidad los microfósiles se componen de globigerinas (foraminíferos de morfología globular), y que suelen conservar sólo los moldes externos (camarillas), que son muy finos y se fracturan o disuelven fácilmente, formando un entramado con una notable porosidad.

Las globigerinas son las que definen la textura de la roca, presentando un rango de tamaños entre 0,1-0,5 mm (arenita media-fina). Se han observado de forma minoritaria otros fósiles como miliólidos, nummulites, radiolarios, fragmentos de lamelibranquios y algas verdes.

Los componentes ortoquímicos de la roca suponen entre el 10-15%, constituidos por una escasa matriz micrítica, y un cemento esparítico granular precipitado en los huecos originarios. En algunos poros se han observado recristalizaciones secundarias de calcita esparítica de tipo drusa.

Los *terrígenos* (material detrítico) son muy escasos y se componen de cuarzo y óxidos de Fe salteados homogéneamente por la roca; en algunos casos se han observado feldespatos.

La *porosidad* que se observa al microscopio (macroporosidad) es muy elevada (> 20%), favorecida por el hecho de que las globigerinas, en su mayor parte, sólo conservan parcialmente sus partes esqueléticas o únicamente sus moldes. Morfológicamente [5] los poros más abundantes son de tipo móldico, interclásticos e intraclásticos. El tamaño más abundante de poros, coincide con el tamaño de las globigerinas, estando en torno a 0,2-0,5 mm. Se ha observado en determinados sectores, al ser las paredes de los moldes tan finas, que éstas se han disuelto parcial o totalmente, aumentando de forma considerable la porosidad intercomunicada.

Esta textura favorece que la roca sea fácilmente alterable en presencia de humedad, con un aumento progresivo de la porosidad. Estos fenómenos se han observado de forma acentuada hacia las zonas externas de la piedra. En algunos casos, en la superficie externa, se ha formado una costra endurecida del carbonato cálcico exhalado, quedando en el interior una zona totalmente decohesionada. La susceptibilidad a la alteración se incrementa si se considera que en algunos poros se han observado cristales de yeso, inherente a la piedra, que puede disolverse y recristalizar.

Mediante el ensayo de *Saturación de agua al vacío* se ha calculado la *porosidad eficaz o abierta* de la roca, realizado sobre 32 probetas. Los valores de porosidad han sido bastante homogéneos, comprendidos entre el 33-38%, estando el valor medio de porosidad abierta en un 36%. El valor medio de la *densidad aparente* es 1,72 g/cm³.

Con el ensayo de *Porosimetría de Hg* se ha obtenido la curva de la distribución de tamaño de acceso de poro. La porosidad al Hg está en torno al 24%, menor que la obtenida en el ensayo de saturación de agua al vacío, ya que existe un considerable volumen de macroporos no cuantificables con ésta técnica.

A partir de las curvas porométricas se ha realizado el *histograma de distribución de tamaño de acceso de poro* que aparece en la figura 1. Como se observa la mayor concentración de poros está comprendida en el rango de microporosidad (< 5 µm)

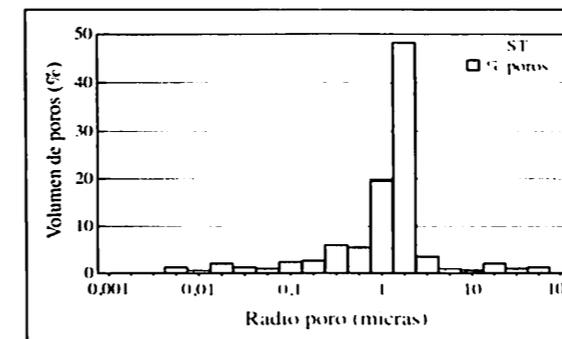


Figura 1. Porometría ST.

existiendo un máximo de poros (48%) en el rango de 1-2,5 µm, siendo importante también el porcentaje de poros (19%) entre 0,75-1 µm; es decir casi el 70% de los poros están comprendidos entre 0,75-2,5 µm, dimensiones muy peligrosas frente a fenómenos de alteración.

Hay que indicar que una de las limitaciones más importantes de la porosimetría de Hg son los denominados poros de "cuello de botella" [6], de probable abundancia en esta roca si se considera el elevado porcentaje de poros móldicos intercomunicados observados; por lo que la presión requerida para que el Hg penetre en las camarillas (macroporos) será del orden de la necesaria para penetrar en los poros que acceden a ellas (que pueden ser microporos), pudiendo existir por ello un importante error de cuantificación.

3.1.2. Concreciones y pátinas

Las dos muestras de concreciones estudiadas se componen de 90% de calcita, 5% de filosilicatos e indicios de cuarzo. Se trata de concreciones carbonatadas formadas por disolución de la calcita interior y posterior reprecipitación en superficie. Los filosilicatos (minerales arcillosos) probablemente provengan del propio substrato de enterramiento.

La pátina anaranjada estudiada posee un alto contenido en óxidos de Fe (25%), y el resto calcita y un poco de cuarzo. Esta probablemente se ha formado por la oxidación y lixiviado de las espigas metálicas introducidas en intervenciones anteriores.

3.1.3. Materiales de intervenciones anteriores

Estos se han estudiado con DRX y Espectrometría FT-IR. Los inorgánicos corresponden a escayolas ya que se componen en su totalidad de yeso; y las tres muestras de resinas orgánicas encontradas en algunas fisuras o separaciones de varias esculturas se tratan de una resina poliéster.

3.1.4. Identificación de líquenes

Los líquenes causan daños químicos y mecánicos sobre el sustrato: incrementan su masa conforme crecen, cambian de volumen según el período sea húmedo o seco y excretan ácidos orgánicos.

Los líquenes encontrados sobre algunas esculturas, pertenecen a una especie de la familia *Verrucariaceae* y, en concreto al género *Verrucaria* [7]. Se denomina así por el aspecto verrugoso que dan al talo los peritecios (cuerpos fructíferos del líquen) más o menos salientes. Sólo se detectó su presencia en las únicas zonas de las esculturas que estuvieron descubiertas. No obstante no se observaron algas verdes en la sección observada al microscopio óptico, por lo que se supone la ausencia de luz durante un período prolongado de tiempo.

3.2. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS

Aplicación y Control del Secado de los Productos de Tratamiento [8]. Dado que el problema principal que hacía requerir la aplicación de un producto a las esculturas era la decohesión superficial en algunas áreas, el equipo de restauración decidió ensayar con un producto consolidante y a su vez hidrofugante: *Paraloid B72* (Copolímero de etilmetacrito y metilacrilato), el cual se estudió con dos disolventes en dos concentraciones del producto activo. Por tanto, en total se estudiaron 4 combinaciones diferentes: Paraloid+Xileno al 10% (PX10), Paraloid+Xileno al 5% (PX5), Paraloid+Diacetona Alcohol al 10% (PA10) y Paraloid+Diacetona Alcohol al 5% (PA5).

Tras la impregnación se controló la evolución de peso de las probetas hasta total evaporación del disolvente y completo secado de los tratamientos. Los incrementos de peso experimentados al final son proporcionales a los contenidos de materia activa de los tratamientos. En la figura 2 aparecen las curvas de la evolución de peso, obtenidas de los valores medios de las nueve probetas de cada tratamiento y el incremento final de peso por tratamiento (288 horas). Todo ello expresado en % respecto a los pesos secos iniciales.

Como se observa, la evolución del peso es muy parecida en todos los casos. La ganancia de peso al final del secado es también muy similar en todos los tratamientos existiendo un leve incremento en los tratados con Xileno.

3.2.1. Determinación colorimétrica

Los resultados vienen recogidos en la tabla 1. Ninguno de los tratamientos produce cambios significativos de color en la piedra, por lo que cualquiera de ellos sería admisible; no obstante el tratamiento que menos modificación produce respecto al de la piedra sin tratar en corte fresco es el Paraloid con Diacetona Alcohol al 5% (PA5).

3.2.2. Dureza superficial

El ensayo se ha realizado sobre tres probetas de cada tratamiento y sobre tres sin tratar. En total se han realizado 27 medidas sobre cada probeta. Los valores obtenidos

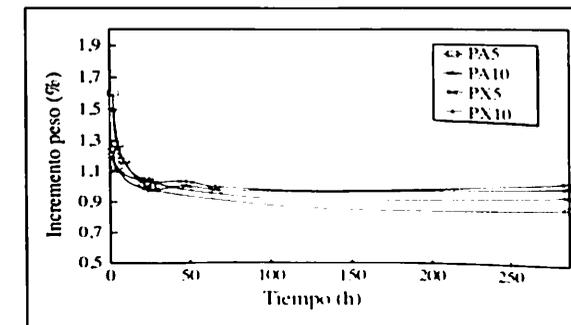


Figura 2. Secado Tratamientos.

presentan bastante homogeneidad dentro de cada grupo. En la tabla 2 se recogen los valores medios para cada grupo de probetas y el incremento del valor de la dureza en %, respecto a las probetas sin tratar (ST). Como se aprecia la combinación que mayor incremento de dureza superficial produce es la de Paraloid con Diacetona Alcohol al 10%.

3.2.3. Ensayo de saturación de agua al vacío

Para evaluar si existe una notable disminución de la *porosidad eficaz* con la impregnación de los tratamientos en la piedra, se ha realizado el ensayo de saturación al vacío después de aplicar los tratamientos. Los valores medios de disminución de porosidad (%), respecto a la porosidad original, se recogen en la tabla 3. Más importante que la disminución de la porosidad absoluta, por impregnación de producto en las zonas superficiales, es conocer la modificación de su porometría.

3.2.4. Porosimetría de Hg

Se ha realizado este ensayo sobre muestras de cada tipo de tratamiento, extraídas de las zonas más superficiales de las probetas. La porosidad al Hg disminuye en todos los casos respecto a la piedra sin tratar, estando en torno al 22%.

La principal aplicación de la Porosimetría de Hg en este estudio es el conocimiento de la modificación porométrica de la piedra antes y después de los tratamientos [9]. Su conocimiento es de especial interés ya que los tratamientos pueden producir un ta-

Tabla 1. Medida de color.

| | Parámetros | Color |
|------|--------------|-------------|
| ST | HUE 2,5Y/8/2 | White |
| PX10 | HUE 5Y/7/3 | Pale Yellow |
| PX5 | HUE 5Y/8/3 | Pale Yellow |
| PA10 | HUE 5Y/7/3 | Pale Yellow |
| PA5 | HUE 5Y/8/2 | White |

Tabla 2. Dureza superficial.

| | Valor medio | Incremento (%) |
|------|-------------|----------------|
| ST | 54 | |
| PX10 | 60 | 10 |
| PX5 | 56 | 4 |
| PA10 | 67 | 20 |
| PA5 | 60 | 10 |

Tabla 3. Disminución porosidad.

| Tratamiento | % disminución |
|-------------|---------------|
| PX10 | 2,02 |
| PX5 | 1,78 |
| PA10 | 1,97 |
| PA5 | 1,76 |

ponamiento o una disminución del radio de poro, que hagan al material más alterable. Se ha demostrado experimentalmente que los materiales con poros de radio $> 5\mu\text{m}$ son los más durables, mientras que los menos durables son los que presentan poros menores de ese radio y más concretamente por debajo de $0.5\mu\text{m}$ [10].

Como se observa en los histogramas de distribución de tamaño de acceso de poro que aparecen en las figuras 3, 4, 5 y 6 se han producido algunas modificaciones porométricas, respecto a la piedra sin tratar. La mayor concentración de poros (aproximadamente el 60%) sigue apareciendo en el rango de $0.75\text{-}2.5\mu\text{m}$, pero se produce en todos los casos un incremento muy importante entre $0.75\text{-}1\mu\text{m}$, pasando del 19% al 30-35%. También es importante el incremento producido en poros inferiores a $0.75\mu\text{m}$ (en torno al 30%), todo ello en detrimento de los poros en torno a $2.5\mu\text{m}$, que son los más abundantes en la piedra sin tratar. Esto indica que la roca, que ya de por sí presenta una peligrosa microporosidad, con cualquiera de los tratamientos incrementaría los porcentajes de poros en los rangos de mayor susceptibilidad a la alteración.

Hay que aclarar que la posible existencia de poros en "cuello de botella" (mencionados en la roca sin tratar), seguirán presentes en estas muestras, lo cual no exige que la aplicación de cualquier tratamiento pueda hacer al material menos durable.

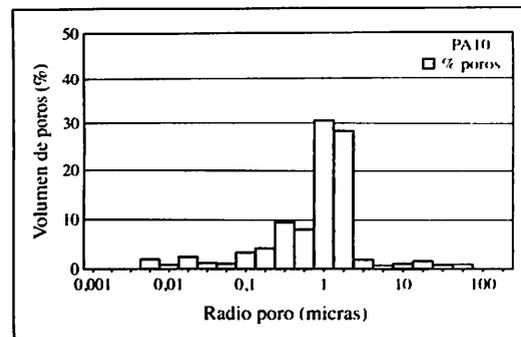


Figura 3. Porometría PX10.

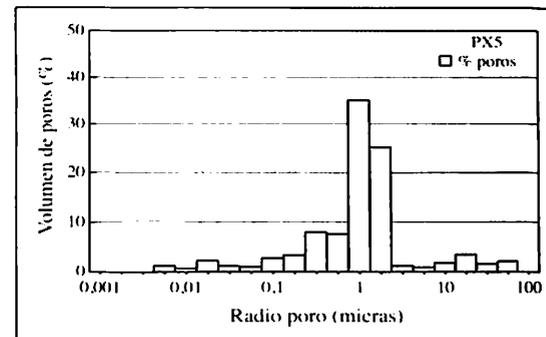


Figura 4. Porometría PX5.

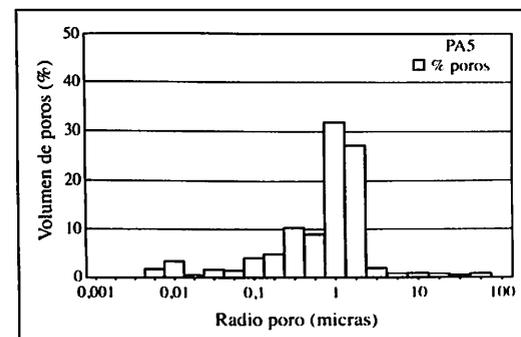


Figura 5. Porometría PA5.

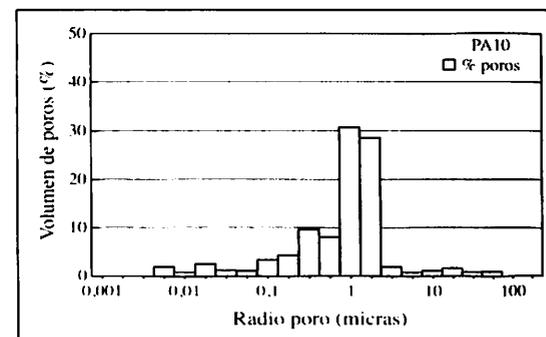


Figura 6. Porometría PA10.

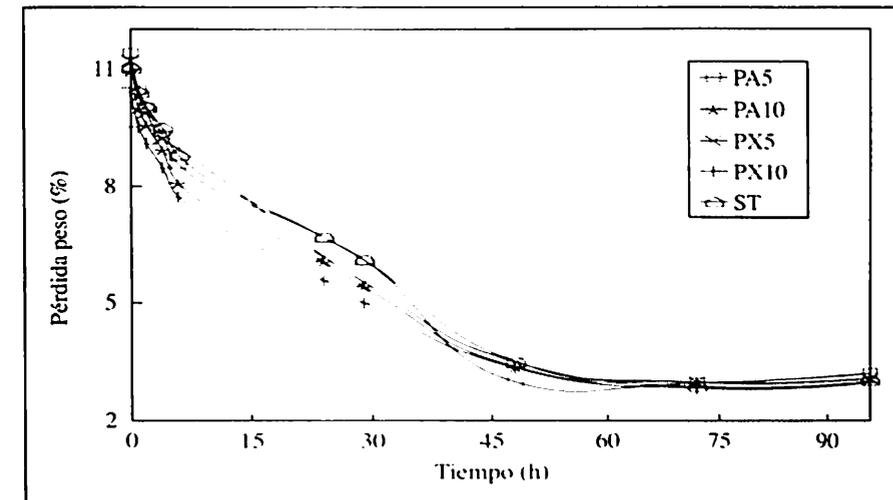


Figura 7. Curva de Desorción.

3.2.5. Ensayo de desorción de agua

Los resultados obtenidos en éste ensayo se han representado en el gráfico que aparece en la figura 7. Como se observa todos los tratamientos presentan aproximadamente la misma evolución en la pérdida de agua que las probetas sin tratar.

4. CONCLUSIONES

La piedra en la que están esculpidas las esculturas es una calcarenita de grano fino muy rica en globigerinas, y una elevada porosidad móldica e intercomunicada. Los datos de porometría señalan que la roca posee una importante microporosidad, que se acentúa, haciendo al material más alterable, con cualquiera de los tratamientos estudiados. Por ello, se recomienda no aplicar ningún tratamiento. En caso de que fuera estrictamente necesario, y teniendo en cuenta que se encontrarán en un ambiente controlado, deberían aplicarse únicamente en las zonas más debilitadas, recomendándose una combinación intermedia entre PA10 (mayor incremento de dureza superficial) y PA5 (menor modificación del color).

Por otro lado también es recomendable la eliminación de escayolas de intervenciones anteriores por el posible aporte de sulfatos a la piedra.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Negueruela Martínez, I., 1990, *Los Monumentos Escultóricos Ibéricos del Cerrillo Blanco de Porcuna (Jaén)*, Ministerio de Cultura.
- [2] Taller de Restauración del Patrimonio, S.L. 1997, *Restauración de las esculturas del Conjunto "Cerrillo Blanco de Porcuna"*. Inédito.
- [3] Vos, B.H., 1978, *Hygryc Methods for the Determination of the Behaviour of Stones* UNESCO/RILEM Int. Symp., Paris, 3.8 19p.
- [4] Folk, R.L., 1974, *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphills, Austin, Texas.

- [5] Choquette, P.W. y Pray, L.C., 1970, Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates, *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.* **54**, 207-50.
- [6] Wardlaw y McKellar, 1981, Mercury Porosimetry and the Interpretation of Poro Geometry in the Sedimentary Rocks and Artificial Models, *Powder Technology* **29**, 127-143.
- [7] Ozenda, P. y Claudaze, G., 1970, *Les Lichens. Étude Biologique et Flore Illustrée*, Masson et Cie, Paris.
- [8] Villegas, R., 1989, *Estudio de la alterabilidad y Respuesta a Tratamientos de Conservación de los Principales tipos de Piedra utilizados en Catedrales Andaluzas*. Tesis Doctoral
- [9] Veniale, F. y Zezza, U., 1988, Nuove Indagini sull'arenaria della Basilica di San Michelle in Pavia, *Atti Ticinensi de Scienze della Terra* **31**, 252-268.
- [10] Punuru, Chowdhury, Kulsehtha y Gauri. 1990, Control of Porosity on durability of limestones at the Great Sphinx, Egypt. *Envir. Geol Water Science* **15**, 225-232.