

ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO MEDIANTE ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y QUÍMICO DE DOS ESCULTURAS ROMANAS DEL MUSEO DE RIOTINTO (HUELVA)

J. Espinosa⁽¹⁾

R. Villegas⁽¹⁾

F. Ager⁽²⁾

B. Gómez Tubío⁽²⁾

(1) Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico

(2) Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla

RESUMEN

Se recogen los resultados de los análisis de mármoles de dos esculturas romanas talladas en mármol blanco y de afloramientos naturales del sur de la península ibérica con la intención de poder designar las canteras de abastecimiento. Se han realizado análisis mineralógicos mediante DRX y estudio petrográfico de láminas delgadas de muestras de afloramientos marmóreos y de las esculturas. Mediante PIXE se han determinado las concentraciones de Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Ba y Pb. Los resultados obtenidos han sido muy variados, lo cual dificulta una fácil designación.

I. INTRODUCCIÓN

Tras el hallazgo, en el transcurso de unas excavaciones en las inmediaciones de Riotinto, de dos esculturas de gran porte, talladas en mármol blanco, surgió la incertidumbre de si la producción de las mismas sería regional o por el contrario habrían llegado a través de rutas comerciales. La averiguación de si los mármoles de las esculturas proceden de afloramientos marmóreos relativamente cercanos al lugar de su hallazgo ha sido el objetivo con el que se planteó este trabajo.

El estudio se ha centrado en la comparación petrográfica y química de los mármoles

de las esculturas con mármoles de las sierras de Huelva y de Sevilla. Adicionalmente también se han estudiado muestras de mármol de canteras más distantes (Macael), utilizadas históricamente, para ver la posibilidad de que pudieran proceder de ellas.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

El total de muestras estudiadas han sido 45 que se distribuyen de la forma que aparece en la tabla 1.

En el estudio se han empleado las siguientes técnicas de estudio:

• *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 mineralógico, textural y microestructural de los mármoles mediante láminas delgadas.

Tabla 1.
Distribución de muestras estudiadas.

<i>Esculturas</i>
3 Escultura masculina
3 Escultura femenina (una de ellas de la placa base)
<i>Almadén de la Plata (Sevilla)</i>
11 Canteras dispersas en el cerro de los Covachos
3 Cantera del cerro de las Pedreras
3 Pequeña cantera en Loma de la Cabrera
<i>Aroche (Huelva)</i>
10 Obtenidas de puntos dispersos de las canteras
<i>Fuenteheridos (Huelva)</i>
2 Obtenidas de un afloramiento de mármol
<i>Macacl (Almería)</i>
10 Obtenidas de puntos dispersos de estas canteras

• *PIXE (Emisión de Rayos X Inducida por Protones)*. Los análisis se han llevado a cabo usando un haz de protones de 2.5 MeV de energía obtenido mediante el acelerador tipo Tandem de 3 MV. Las muestras fueron colocadas en la cámara universal de la línea de 0°, perpendicularmente al haz incidente, colimado hasta 1 mm. La corriente del haz fue de 40 a 60 nA y la carga acumulada de unos 20 μC . Para la detección de los rayos X se empleó un detector Si(Li) fabricado por Canberra, colocado a 45°, con un área activa de 30 mm², ventana de 8 μm de berilio, con una resolución de 150 eV a 5.9 keV, y un filtro de 750 μm de mylar para atenuar especial-

mente los rayos X del Ca y así mejorar la sensibilidad a los elementos minoritarios y trazas. Esta técnica se ha empleado para determinar y cuantificar la presencia de determinados elementos minoritarios y trazas. Se expresa su contenido en ppm (partes por millón).

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos con Difracción de Rayos X reflejan que la composición mineralógica de todas las muestras de las *Esculturas* es de Calcita en su totalidad, si acaso aparecen cantidades poco importantes de cuarzo en algunas de ellas, por lo que se consideran mármoles calcíticos bastante puros. Lo mismo ocurre con las muestras de *Fuenteheridos* y de *Macacl* compuestas de Calcita prácticamente en su totalidad.

Esta misma composición es la que predomina en la mayoría de las muestras de las canteras de *Aroche* y de *Almadén de la Plata*, aunque existen algunas muestras de mármoles parcialmente dolomíticos y alguno dolomítico en su totalidad.

III.1. Estudio Geológico-Petrográfico

Se han estudiado un total de 20 muestras mediante láminas delgadas y, a pesar de la similitud mineralógica entre ellas, existe una gran heterogeneidad petrográfica, incluso en muestras de una misma procedencia, si bien, la tendencia general es la de agruparse en un mismo tipo petrográfico las muestras de un mismo origen.

En base a las *Características Microestructurales*, derivadas de los esfuerzos mecánicos sufridos durante el metamorfismo, se han diferenciado dentro de las muestras estudiadas los siguientes tipos petrográficos, (existen muestras que presentan características mixtas):

1. *Mármoles con estructura Brechificada* (fig.1). En general suelen aparecer también con bandeado por deformación de los blastos. Corresponde a materiales que manifiestan gran influencia dinámica durante el metamorfismo, presentando elevada deformación plástica.

2. *Mármoles con estructura Bandeada* (fig.2). El bandeado se observa en la morfología de los blastos, que aparecen elongados y orientados en una misma dirección. Constituiría el siguiente grado en cuanto a deformación plástica.

3. *Mármoles con Deformación de las Líneas de Exfoliación* de la calcita (fig.3). Esta deformación se genera durante la recristalización de los blastos sometidos a deformación plástica. Pueden presentar texturas granoblásticas equidimensionales o bandeados incipientes.

Dentro de las muestras del tipo 2 suele aparecer también este tipo de deformación.

4. *Mármoles con estructura Masiva o Isótropa* (fig.4). Aquellos que se formaron con escasa deformación plástica, produciéndose texturas granoblásticas con blastos de crecimiento más o menos equidimensional.

En la tabla 2 vienen recogidos de forma sintetizada los principales rasgos petrográficos de cada una de las muestras estudiadas.

A) Las muestras de las *Esculturas* presentan características similares, con estructuras básicamente *masivas (isótropas)* y texturas *granoblásticas equidimensionales*, constituidas por un mosaico de cristales idiomorfos de tamaño bastante homogéneo. No aparecen apenas minerales secundarios, salvo en la muestra de la Placa de la escultura femenina, que presenta cuarzo en mayor proporción que en el resto. Además, sólo en esta muestra se ha observado cierta deformación de la exfoliación en algunos granos de calcita. Esto se puede deber a mayor afección de acciones mecánicas en el metamorfismo en la zona de extracción, y por tanto, mayor deformación plástica de la calcita, a la que es bastante susceptible.

Las características petrográficas de ambas esculturas son muy similares por lo que se podría admitir similar origen de los mármoles; sin embargo, el hecho de que no aparezca cuarzo en la muestra de la escultura femenina y sí en la placa de apoyo, junto a que en la segunda aparezca deformación en la exfoliación de la calcita, hacen pensar que el mármol de la escultura y de la placa puedan proceder de puntos de extracción distintos.

B) El estudio de los materiales de las canteras de *Almadén de la Plata* refleja que puede

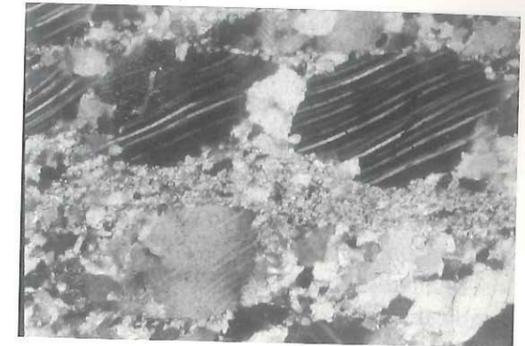


Fig. 1. Aspecto de la muestra MRT-6 (Almadén de la Plata). Estructura Brechificada 2,5 x



Fig. 2. Aspecto de una muestra de estructura Bandeada. 2,5x



Fig. 3. Aspecto de la placa base de la escultura femenina. Exfoliación deformada. 5x



Fig. 4. Aspecto del mármol de la escultura Masculina. Estructura Isótropa. 2,5x

existir una gran heterogeneidad textural y estructural entre mármoles de una zona geográfica bastante restringida, incluso dentro de una misma cantera, lo que deja entrever que el empleo exclusivo de criterios petrográficos para designar procedencias de mármoles puede ser insuficiente, siendo de mayor fiabilidad encontrar intervalos de coincidencia en los resultados químicos, y posteriormente establecer coincidencias petrográficas de las muestras para localizar puntos concretos.

La heterogeneidad petrográfica existente en los mármoles de Almadén de la Plata se debe a que pertenecen a un paquete de materiales del Cámbrico Medio, integrados en una zona de complicada historia geológica, con sucesivos episodios metamórficos (Metamorfismo Regional, Metamorfismo Térmico y Metamorfismo Cataclástico de Presión, con tendencia a la brechificación).

Estos fenómenos metamórficos se verán reflejados en las rocas dependiendo de los bancos considerados y del grado y el tipo de

afección metamórfica predominante en los mismos.

De las nueve láminas delgadas estudiadas de estas canteras existen algunas muestras que presentan estructura *isótropa*, la mayoría con *deformación en las líneas de exfoliación* de la calcita. La única muestra de estas canteras que se podría considerar de estructura *isótropa* y *textura granoblástica* sin síntomas de deformaciones es la AC2-1 (Cerro de las Pedreras), que sería la que petrográficamente se asemeja más a la de las esculturas, aunque el tamaño de grano es algo mayor.

C) En las muestras de *Aroche* también se han establecido notables diferencias en cuanto a textura y estructura entre las cuatro láminas delgadas estudiadas.

De estas muestras se desconoce el punto exacto de extracción ya que se tomaron de las graveras de una fábrica de mármol que explota en la actualidad las canteras existentes cercanas al pueblo.

Tabla 2. Características petrográficas de las muestras de mármol.

Muestra	Miner	Text. Global	Tñ (mm)	Microestr.	Minerales Secundar.	
ESCULTURA	Femenina MRT-1	Calcita	Granoblástica	1-2,5	Isótropa	-
	MRT-2	Calcita	Granoblástica	1-2,5	Isót-Def.Exfl.	-
	Masculina MRT-3	Calcita	Granoblástica	1-2,5	Isót- Band	Cuarzo (Q)
	MRT-8	Calcita	Granoblástica	1-2,5	Isót- Banda	-
ALMADÉN DE LA PLATA	Covachos MRT-6	Calcita	Porfidoblástica	0,5-1,5	Brechif	Ox.Fe-Q
	AC1-1	Calcita	Granoblástica	1-4	Isót-Def.Exfl	-
	AC1-2	Calcita	Granoblástica	0,3-1	Bandeado	Q,Px,Ep
	AC1-7	Calcita	Granoblástica	1-3	Bandeado	Ox.Fe
	AC1-9	Calcita	Porfidoblástica	Esparíti	Isótropa	-
	AC1-11	Calcita	Granoblástica	1-3	Bandeado	Dta-Ind
	Pedreras AC2-1	Calcita	Granoblástica	2-4	Isótropa	Q
	Cabrera AC3-1	Calcita	Granoblástica	1-2,2	Isót-Def.Exfl	Q-Dta
AROCHE	MRT-7	Calcita	Granoblástica	2-4	Isótropa	Diop-Epi
	MRT-9	Cta-Dta	Porfidoblástica	0,5-1	Brechif-Band	Talco-Trem
	MRT-10	Calcita	Granoblástica	1,5-3	Isótropa	Talco-Q
	MRT-11	Cta-Dta	Porfidoblástica	0,5-1,5	Brechif-Band	Tre-Diop-Ep
FUENTE-HERIDOS	MRT-4	Calcita	Granoblástica	0,1-0,25	Isótropa	Q
	MRT-5	Calcita	Granoblástica	0,1-0,25	Isótropa	Q
MACAEL	MAC	calcita	Granoblástica	1-3	Isótropa	Q

La muestra que más parecido petrográfico tiene con las esculturas es la MRT-7, que presenta estructura *isótropa* y *textura granoblástica*, sin síntomas de deformación en la estructura ni en las exfoliaciones. Esta se compone fundamentalmente de calcita con tamaño de grano algo mayor que el que presentan las esculturas, y las exfoliaciones aparecen más limpias. Además se han observado minerales secundarios en abundancia, no observados en las muestras de las esculturas.

D) Los mármoles de *Fuenteheridos* son similares entre sí, y a pesar de que presentan estructura *isótropa* y *textura granoblástica*, la calcita presenta un tamaño de grano muy fino (0,1- 0,25 mm) y muy bajo grado de metamorfismo, en realidad estaría en el límite entre una caliza esparítica y un mármol. No se observan minerales secundarios. Este tipo de mármol se descartó que pudiese estar relacionado con el de las esculturas.

E) Se han observado algunas muestras de mármoles de *Macael* de las que se desconocen los puntos exactos de extracción. Todas presentan *textura granoblástica inequigranular* con tamaños que oscilan entre 3-1 mm y estructuras por lo general *isótropas*. En cierto modo las características petrográficas podrían coincidir con las de las esculturas, pero son muy numerosos los mármoles que pueden presentar estas características.

III.2 PIXE

Se han analizado un total de 42 muestras: Macael (10), Aroche (10) y Almadén de la Plata (16), y Esculturas (6). Los elementos que han sido detectados son: Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Ba y Pb.

Se han establecido los rangos de variación de las concentraciones (en ppm) de todas las muestras siguiendo los siguientes criterios:

-Se ha aceptado la existencia de un elemento si al menos en una de las muestras de esa cantera aparecía con un error de ajuste inferior al 50%.

-Para cada elemento aceptado se tiene en cuenta todas las muestras de dicha cantera donde el error sea inferior al 80%, tomándose el rango desde el valor más bajo -error hasta el valor máximo +error.

Se han agrupado las tres canteras de Almadén de la Plata, así como todas las muestras procedentes de Aroche y Macael para estimar el rango de estas canteras. Los valores máximos y mínimos detectados en conjunto de cada cantera se han considerado como los "rangos de permisibilidad" para admitir coincidencia con las muestras de las esculturas. En los gráficos 1, 2, y 3 se repre-

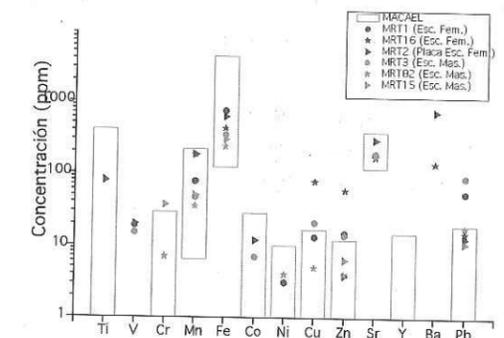


Gráfico 1. Rango de variación de las muestras de Macael vs Esculturas.

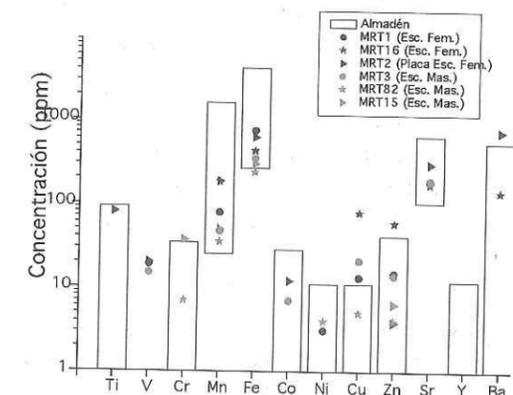


Gráfico 2. Rango de variación de las muestras de Almadén de la Plata vs Esculturas.

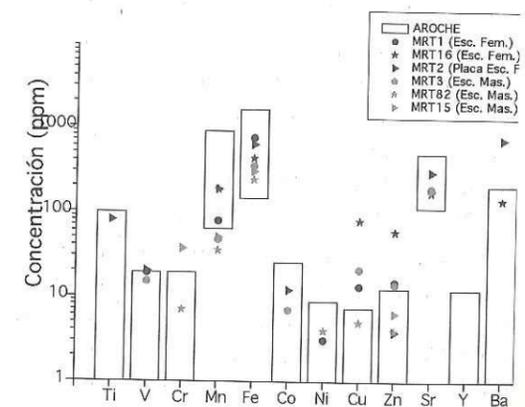


Gráfico 3. Rango de variación de las muestras de Aroche vs Esculturas.

sentan los rangos de variación de cada cantera, comparándolas con las concentraciones de cada muestra de las esculturas.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A la hora de establecer las conclusiones se han contrastado los resultados del estudio petrográfico con los análisis de elementos minoritarios y trazas.

Al igual que en el estudio petrográfico existe en los análisis químicos cierta heterogeneidad en las concentraciones de los elementos para muestras de una misma procedencia.

El caso más significativo ocurre entre las muestras de la escultura femenina y la de la placa base de la misma, en las que no hay coincidencia, lo cual, junto a que se han establecido ciertas diferencias petrográficas entre ellas, hace que sea muy probable que ambas procedan de puntos de extracción distintos.

La posibilidad de que procedan de puntos de extracción distintos no significa que necesariamente procedan de afloramientos rocosos distintos, ya que como se observa en los análisis, tanto químicos como petrográficos, en muestras de una misma cantera pueden existir notables variaciones.

Estudiando la globalidad de las muestras y aceptando los rangos de variabilidad de cada elemento en las distintas muestras de una misma procedencia, se observa que no existe una coincidencia íntegra de ninguna de las canteras con las muestras de las esculturas.

Existen muchos elementos en los que las concentraciones químicas de las esculturas coinciden con los márgenes de las canteras, pero en todos los casos existen otros elementos que están presentes en las canteras y no en las esculturas o viceversa.

Esta disparidad de resultados impide establecer ningún tipo de correlación clara. Para puntualizar se ha realizado un análisis comparativo de las muestras de las esculturas con las de las canteras, descartando las muestras con síntomas de brechificación y bandeado que, además de que por sus propiedades no

se prestan al esculpido, no coinciden con las de las esculturas.

El análisis comparativo de las muestras de mayor parecido (MRT-7: Aroche, AC2-1, AC1-1: Almadén y Macael) tampoco refleja una clara correspondencia.

La muestra que parece tener mayor similitud química-petrográfica es la MRT-7, de las canteras de Aroche. Sin embargo, todas las muestras estudiadas de esta cantera presentan minerales secundarios que no se han observado en las muestras de las esculturas. El hecho de que aparezcan en todas las muestras de Aroche la misma asociación de silicatos, es indicativo de lo que parece ser un fenómeno bastante extensivo en estas canteras, al menos en la zona de donde proceden las muestras.

Petrográficamente la muestra de mayor similitud, especialmente con la de la Placa es la AC2-1 de Almadén, pero no existe una correspondencia química, aunque como se ha visto en la globalidad de los resultados pueden existir sensibles variaciones en el quimismo de muestras de una misma zona, incluso en una misma pieza escultórica.

Como conclusión global se puede decir que después de contrastar todos los resultados es difícil manifestarse sobre la procedencia del mármol de las esculturas, aunque la heterogeneidad que presentan los resultados hacen posible admitir que existan zonas de cantera en las que coincidan los parámetros con los de las esculturas.

BIBLIOGRAFIA

- ATTANASIO, G.; ARMIENTO, M.; BRILLI, M. et al (2000): *Multi-Method Marble provenance Determinations: The Carrara Marbles as a case study for the combined use of isotopic, electron spin resonance and petrographic data*. *Archaeometry* 42, 2, 257-272.
- BELLO, M.A.; MARTIN, L.; MARTIN, A. (1992): *Identificación Microquímica de mármol blanco de Macael en varios monumentos españoles*. *Materiales de Construcción*, Vol.42, nº 225. Pp 23-30.
- GRIBBLE, C.D.; HALL, A. J. (1992): *Optical Mineralogy*. UCL Ed.Press. London.
- IGME: *Mapa Geológico de España 1:50.000 Hoja 919. Almadén de la Plata*.
- MELLO, E.; MONNA, D.; ODDONE, M.: *A Discriminating sources of Mediterranean Marbles. A pat-*

tern recognition approach. *Archaeometry*, 30,1, 1988.102-108.

MOENS, L.; ROOS, P.; DE RUDDER, et al (1988): *A White marble from Italy and Turkey: an archaeometric study based on minor and trace-element analysis*

and petrography. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*, Vol.123, 1998, 333-348.

SHELLEY, D. (1993): *Igneous and Metamorphic Rocks under the Microscope*. Chapman & Hall, London.