

Localización de canteras de materiales no tradicionales en la arquitectura de Madrid: la Cripta de la Catedral de Santa María la Real de la Almudena

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

M. GÓMEZ-HERAS, R. FORT GONZÁLEZ

Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM)

Persona de contacto/Corresponding author: mgh@geo.ucm.es

Fecha de recepción: 18-III-03

Fecha de aceptación: 10-V-03

ESPAÑA

RESUMEN

Para establecer una metodología adecuada con el fin de localizar las canteras originales de los materiales pétreos de construcción utilizados en un determinado edificio histórico se necesita combinar datos petrológicos y fuentes de documentación histórica. La correlación de los datos petrográficos y petrofísicos combinada con el análisis estadístico multivariante, mediante índices de similitud entre el edificio y las probables formaciones geológicas fuente, permite la localización si las fuentes documentales se hubiesen perdido o fuesen incompletas o si las áreas de extracción han sido modificadas. La localización de los materiales originales es importante porque permite mejorar las labores de restauración del edificio al poder utilizar un material idéntico para sustitución y reintegración de elementos deteriorados. También ofrece la posibilidad de obtener muestras para evaluar los procesos y estado de deterioro del edificio y utilizar este material para los ensayos de efectividad y durabilidad de los tratamientos de consolidación y protección del monumento.

El objetivo de este trabajo ha sido caracterizar y localizar el origen de los materiales pétreos de la sillería de la Cripta de la Catedral de Santa María la Real de la Almudena (Madrid). Estos tipos de piedra proceden de canteras localizadas en Viana de Jadraque (Guadalajara) y en el área central de Portugal. Los materiales localizados no corresponden con los tradicionalmente usados en la ciudad de Madrid y su presencia es el resultado de la apertura de nuevas vías de transporte en la segunda mitad del siglo XIX.

SUMMARY

The combination between petrological data and historical documentation sources is necessary to establish an accurate methodology for the location of the original quarries of the stony materials used in a determinate historical building. The petrographical and petrophysical data correlation combined with a multivariate statistical analysis, by means of similarity indexes of both the materials in the building and the probable source geological formations, allows the location even when the documental sources would be incomplete or lost, or when the source areas would be modified. The works of location of original quarries used in architectural heritage are important since they allow improving the works of restoration on a building by means of the possibility of using identical materials for substitution or reintegration of decayed elements. The establishment of the original areas also offers the possibility of obtaining unaltered samples to evaluate the state and processes of decay of the building as well as to use this rough material to test the effectivity and durability of protective and consolidant treatments in the building and monuments. The aim of this work has been to characterize and to locate the origin of the stony material in the stonework of the Crypt of the Cathedral of Santa María la Real de la Almudena (Madrid). These stone types came from quarries located in Viana de Jadraque (Guadalajara, Spain) and in the central area of Portugal. These materials do not correspond with the traditional ones used in the city of Madrid and its presence is due to the opening of new ways of transport in the second half of the 19th century.

PALABRAS CLAVE: localización de canteras, piedra de construcción, petrofísica, petrografía, análisis estadístico.

KEYWORDS: quarries location, building stone, petrophysics, petrography, statistical analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La localización de las canteras originales de los materiales pétreos es un aspecto importante del estudio petrológico de un edificio por diversas razones. Primero, ofrece la posibilidad de obtener muestras de similares características a las del edificio para evaluar su estado de deterioro por comparación con las características del material de cantera (1-3). Segundo, estas muestras de cantera se pueden utilizar para llevar a cabo ensayos de envejecimiento o pruebas de aplicación de tratamientos de protección (4, 5) y, por último, permiten mejorar las labores de restauración del edificio al utilizar el mismo material para sustitución o reintegración de elementos perdidos (6-10). Al sustituir en la restauración un elemento por otro de iguales características, se elimina el riesgo de la interacción de materiales incompatibles. El uso de diferentes materiales pétreos puede generar daños por las diferencias en las propiedades dinámicas hídricas, térmicas, etc. Los estudios de localización de canteras usadas en construcción también ofrecen datos históricos, socio-económicos e industriales sobre la explotación de los recursos pétreos (11).

Se han utilizado diversas metodologías y técnicas para localizar el origen de materiales pétreos. Estas técnicas abarcan análisis microscópico (3, 9-12), porosimetría de mercurio (2, 13), determinaciones del color (14) o análisis geoquímicos de elementos mayores y menores (15, 16) así como determinaciones isotópicas (17-20). Esto es sólo un ejemplo del amplio espectro de técnicas que se pueden utilizar. Pero sobre todo es importante establecer una metodología basada tanto en las técnicas analíticas disponibles como en las fuentes documentales del edificio (6, 18, 21).

Para esta investigación se ha seleccionado la Cripta de la Catedral de la Almudena (Figura 1) puesto que es uno de los primeros edificios de la ciudad de Madrid en el cual todo el material se transportó desde fuera de la región sin que corresponda ninguno con los materiales considerados como tradicionales en la ciudad de Madrid.

Los materiales pétreos de construcción en la ciudad de Madrid han ido evolucionando a lo largo de la historia de la ciudad. Los primeros materiales pétreos usados en la ciudad desde la construcción de sus primeras murallas en el siglo IX fueron el sílex junto con las calizas y dolomías de los afloramientos cretácicos del norte de la región (22). Estos materiales fueron reemplazados desde el principio del siglo XVII y principalmente durante los siglos XVIII y XIX por la caliza de Colmenar de Oreja (23). El granito de la Sierra de Guadarrama se usó también desde los primeros momentos y ha sido el material más constantemente utilizado.

1. INTRODUCTION

The location of the original quarries of the stony materials is an important aspect of the petrologic study of a building because of several reasons. Firstly, it offers the possibility of obtaining samples of similar characteristics to those found in buildings, thus the decay state of the building can be assessed on the basis of the comparison with the rough material (1-3). Secondly, these rough samples can be used to develop tests of ageing and application of protective treatments (4, 5) and thirdly, some works of restoration can be improved by using the same materials for substitution or reintegration of lost elements (6-10). The risks caused by the interaction of incompatible materials are neglected when in restoration the elements are substituted by others of similar characteristics. The use of different stony materials may generate damage because of the differences in dynamic, hydric, thermal, etc, properties. The studies on the location of quarries used in the construction also provide historical, socio-economic and industrial information about the exploitation of stony resources (11).

Several methodologies and techniques have been used to locate the origin of the stony materials. These techniques comprise microscopic analysis (3, 9-12), mercury porosimetry (2, 13), colour determinations (14) or geochemical testing of both major and minor elements (15, 16) as well as isotopic contents (17-20). This is only a reference of the wider spectra of techniques than can be used. But over all is important to establish a methodology based both in the available analytical techniques and in the documental sources of the building (6, 18, 21).

The Crypt of the Cathedral of the Almudena (Figure 1) has been selected for this research since it is one of the first buildings in the city of Madrid in which all the material was supplied from outside the region without corresponding with those stony materials considered as traditional for the construction in the city of Madrid.

The traditional building stony materials in the city of Madrid have evolved along the history of the city. The first stony materials used in the city since the building of its first walls in the 9th century were the silex and also the limestone and dolostone of the Cretaceous outcrops in the north of the region (22). The limestone from Colmenar de Oreja replaced those materials from the beginning of 17th century and more importantly during the 18th and 19th centuries (23). The granite of Sierra de Guadarrama was also early used and is the most constant building material.

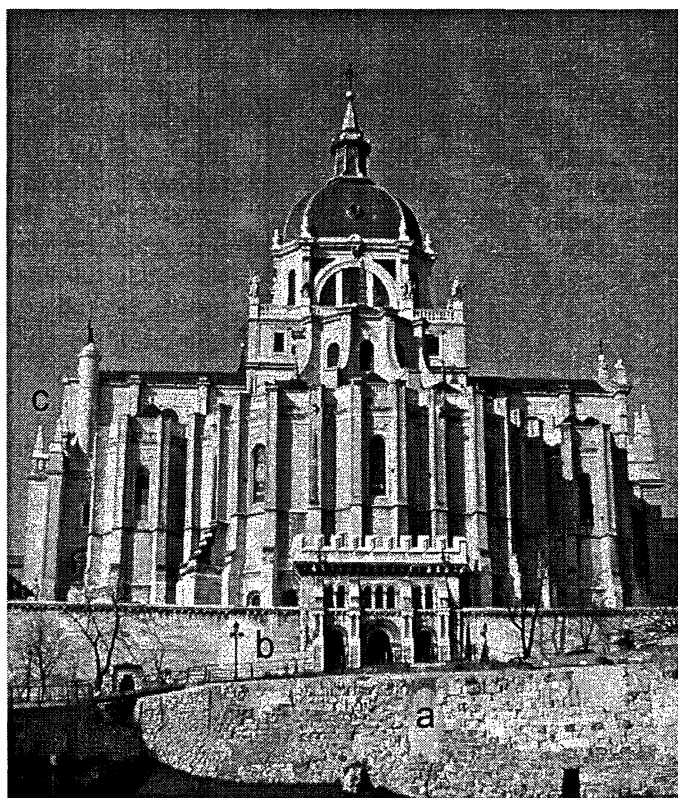


Figura 1.- Restos de la muralla árabe (a) (siglo IX) construida con sílex como ejemplo de material tradicional en la ciudad de Madrid y vista de la fachada de la Cripta (b) (1883-1911) y de la Catedral (c) (1910-1993) de Santa María la Real de la Almudena desde el ábside.

Figure 1.- Remaining of the Arab walls (a) (9th century) built with silex as an example of traditional material in the city of Madrid and view of the façade of the crypt (b)(1883-1911) and of the Cathedral (c) (1910-1993) of Santa Maria la Real of the Almudena from the apse.

El establecimiento de las líneas de ferrocarril en la segunda mitad del siglo XIX facilitó el abastecimiento de piedra desde fuera de la región y así se comenzaron a usar nuevos materiales. La llamada Piedra de Novelda fue una de las más frecuentemente usadas (24) aunque hubo otros materiales usados en determinados edificios. Este es el caso de la Cripta de la Catedral de la Almudena.

El Marques de Cubas realizó en 1878 el diseño original del templo de Santa María la Real de la Almudena como un gran santuario mariano y su construcción comenzó en 1883. Este templo en construcción se convirtió en la futura Catedral de la Diócesis de Madrid-Alcalá erigida por León XIII en 1884. Como resultado, el Marqués de Cubas transformó el proyecto anterior de iglesia parroquial. La Cripta fue terminada en 1911 pero la construcción del templo entero ha durado más de un siglo y éste fue consagrado en 1993.

El objetivo de este trabajo ha sido la caracterización petrológica de los materiales pétreos utilizados en la

The establishment of the railway lines in the second half of the 19th century facilitated the supplying of stone from outside the region, thus new materials began to be used. The stone called Piedra de Novelda (Alicante, Spain) was one of the most often used (24) although there were another materials used for determinate buildings. This is the case of the Crypt of the Cathedral of the Almudena.

Marques de Cubas designed in 1878 the temple of Santa Maria la Real de la Almudena as a largest sanctuary of the Virgin and this building was began in 1883. This temple under construction was to become the future Cathedral of the Diocese of Madrid-Alcalá erected by Leon XIII in 1884. As a result, the Marques de Cubas transformed the previous parish church project into a new one. The Crypt was finished in 1911 but the construction of the entire temple has lasted for more than a century and it was consecrated in 1993.

The aim of this work has been the petrological characterization of the stony materials belonging to the

sillería de la Cripta de la Catedral de Santa María de la Almudena y la localización de sus áreas de extracción, estableciendo una metodología que combina tanto las fuentes documentales del edificio y los ensayos petrográficos y petrofísicos necesarios.

2. METODOLOGÍA

Todas las metodologías aplicadas a la localización de canteras del patrimonio arquitectónico han de tener en cuenta tanto los datos extraídos de la documentación histórica como el estudio de las características petrológicas y petrofísicas de los materiales de la obra y de las posibles áreas de origen. La Figura 2 sintetiza los criterios metodológicos establecidos en este trabajo que están basados en criterios documentales y geológicos.

La búsqueda de fuentes documentales se desarrolló principalmente sobre los libros de actas de la junta de edificación en el Archivo Histórico-Diocesano de Madrid (25). Otras fuentes abarcaron información de las administraciones y servicios geológicos locales.

Para el muestreo del edificio no se consideró necesario hacer una cartografía detallada. El acabado de los sillares, abujardados en el área central de sus caras y la pátina de cal que homogeneiza esta parte del edificio

stonework of the Crypt of the Cathedral of the Almudena and the determination of their original sources, establishing a methodology combining both the documented sources of the building and the necessary petrographical and petrophysical tests.

2. METHODOLOGY

Every methodology applied to the location of quarries of the building heritage has to take into account both the data obtained in the documented sources of the building and the petrographical and petrophysical characterization of the materials in the building and in the possible quarries. Figure 2 summarizes the methodological criteria established for this work, which are based on documentary, and geological criteria.

The search of documented sources was developed mainly in the Historical Archive of the Diocese of Madrid over the books of minutes of the building board (25). Other sources comprised information from the local governments and geological surveys.

There was not considered necessary a detailed cartography of the building for the purpose of sampling. The hammered finishing on the central part of the mason stones and the lime patina that homogenize the outside of

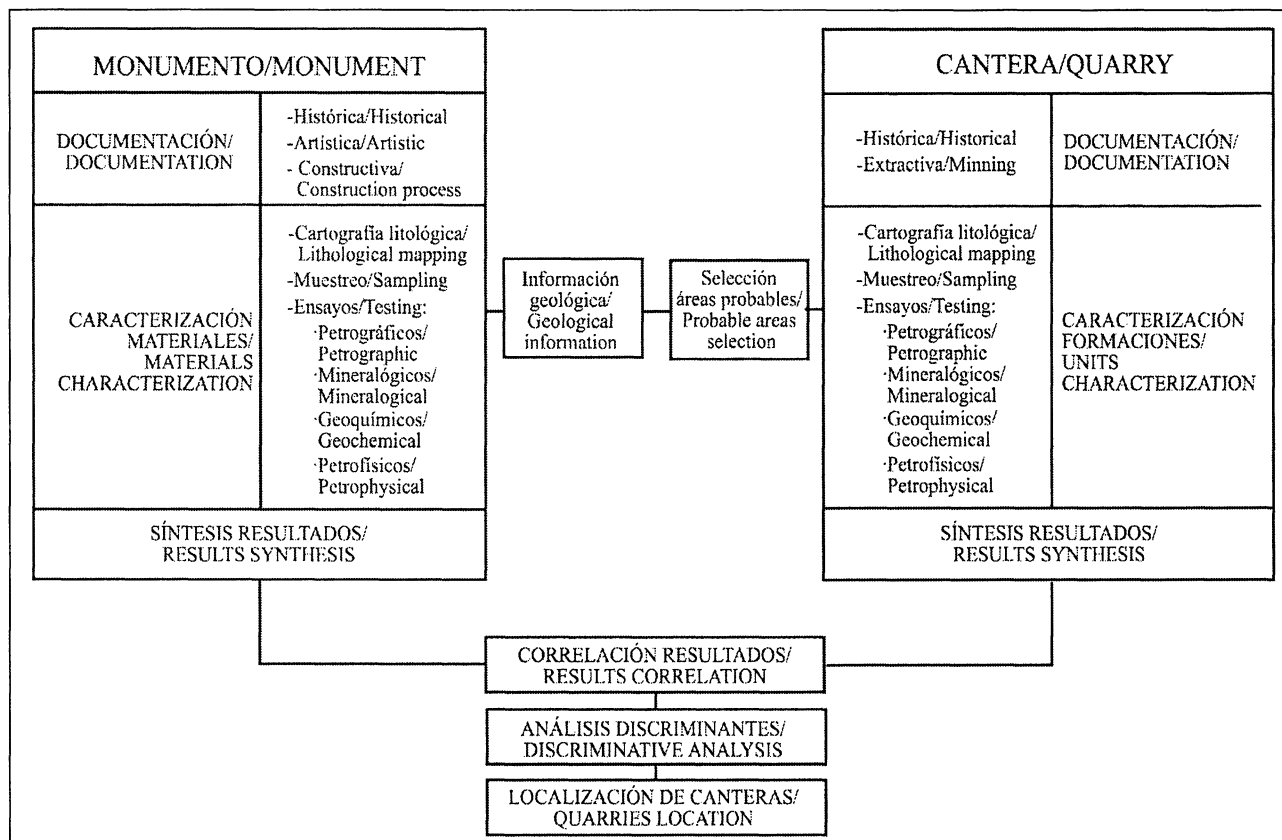


Figura 2.- Síntesis metodológica para la localización de canteras de piedra utilizada en el patrimonio arquitectónico (19).

Figure 2.- Methodological synthesis for the location of quarries of stone used in architectural heritage (19).

en el exterior sólo permitió una ubicación aproximada de las áreas donde se situaban los diferentes materiales encontrados en el edificio. El muestreo del edificio se realizó cuidadosamente, recogiendo pequeños fragmentos de cada uno de los distintos materiales observados en la Cripta.

El muestreo de las canteras se realizó en antiguos bloques de cantera situados en antiguas zonas de explotación. Cuando no existió disponibilidad de material en campo, también se realizaron ensayos sobre variedades comerciales en actual explotación.

Sobre cada variedad muestreada se determinó la composición mineralógica mediante difracción de rayos X obtenida con un difractómetro Philips PW-1752. La caracterización petrográfica se realizó mediante un microscopio de luz polarizada Zeiss, Axioskop sobre láminas delgadas con tinción de alizarina. Para la clasificación se siguieron los criterios de Folk (26). Sobre algunas estructuras concretas se utilizó microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM 6400) con analizador (SEM-EDX).

Se llevaron a cabo los ensayos de densidades real y aparente, así como referentes al comportamiento hídrico: saturación y porosidad accesible al agua. Estos ensayos se realizaron siguiendo las recomendaciones ICR-CNR NORMAL (27) y RILEM (28). Estas determinaciones se realizaron sobre un mínimo de 3 muestras de cada uno de los materiales estudiados.

Como las muestras del edificio tenían que ser necesariamente pequeñas, sólo fue posible una aproximación a las propiedades mecánicas. Así la caracterización mecánica se llevó a cabo mediante la medida de la velocidad de propagación de ondas P de ultrasonidos (V_p) con un medidor de la velocidad de pulsos ultrasónicos PUNDIT, C.N.S. Electronics y mediante el ensayo de resistencia al rebote con martillo de Schmidt.

Las medidas cromáticas se realizaron en las zonas más representativas (esto es, sin estructuras coloreadas como venas o estilolitos) mediante un espectrocolorímetro MINOLTA CM-2002 con iluminante D65 y ángulo de medida 10° . El software utilizado para la adquisición de datos fue Color Data Software CM-1. Los parámetros cromáticos utilizados fueron L^* , a^* y b^* según la escala CIELAB (29) así como los índices de amarillo (YI) y de blanco (WI) según la norma ASTM E313 (30).

La determinación final del origen de los materiales se realizó mediante la comparación de las facies petrográficas y las propiedades petrofísicas. La similitud entre las propiedades petrofísicas se estableció

this part of the building only made possible a rough identification of the areas where placed the different materials found in the building. The sampling on the building was made carefully collecting small fragments of each one of the different types of stone observed in the Crypt.

The sampling in the quarries was made in remaining of old quarry blocks placed in the exploitation area. Commercial varieties of those materials in exploitation at the present day were also tested when there was not availability of field material.

The mineralogical composition of each type of stone was determined by means of X-ray Diffraction with a diffractometer Philips PW-1752. Petrographical characterization was made with polarizing microscope (Zeiss, Axioskop) over thin sections with alizarine tincture. Folk criteria (26) were followed for classification. Scanning Electron Microscopy (JEOL JSM 6400) with Electron Dispersive X-ray analysis (SEM-EDX) was used over concrete features in some samples.

Bulk and real density tests were carried out as well as hydric behaviour tests: saturation, porosity accessible to water. Recommendations ICR-CNR NORMAL (27) and RILEM (28) were followed for the development of all these tests. All these tests were carried out in a minimum of 3 samples of each one of the studied materials.

Only an approximation to the mechanic properties was possible, as the building samples had to be necessarily small. Thus, this mechanic characterization was carried out by measuring ultrasonic P waves propagation velocity (V_p) with an ultrasonic pulse velocity tester PUNDIT, C.N.S. Electronics and by making the impact rebound test with Schmidt's hammer.

Colour measurements were made in the most representative areas of each sample (i.e. without taking into account structures as veins or stilolites) by means of spectrophotometer (MINOLTA CM-2002) with D65 illuminant and measurement angle of 10° . Colour Data Software was used for data acquiring. L^ , a^* and b^* , according to CIELAB scale (29), were the parameter measured as well as the white index (WI) and the yellow index (YI) according to ASTM E313 norm (30).*

Final determination of the origin of samples was made by the comparison of the petrographic facies and the petrophysical properties. The similarity between the petrophysical properties was established on the basis of

basándose en varios coeficientes estadísticos de similitud: coeficiente de la distancia euclídea, coeficiente de la distancia Manhattan y coeficiente de correlación de Pearson.

La distancia euclídea se define como la medida de la distancia en línea recta entre dos variables y se expresa cuando se comparan dos objetos A y B con diversas variables x_{iA} y x_{iB} como:

$$d_{AB} = \sqrt{1/m \sum (x_{iA} - x_{iB})^2} \quad [1]$$

La distancia Manhattan es la suma de las diferencias absolutas entre dos variables y se expresa, para el caso de dos objetos A y B, con diferentes variables x_{iA} y x_{iB} como:

$$D_{AB} = 1/m \sum |x_{iA} - x_{iB}| \quad [2]$$

El coeficiente de similitud por correlación es una modificación del coeficiente de correlación momento-producto de Pearson. El coeficiente momento-producto mide el grado de correlación positiva o negativa existente entre dos variables del mismo objeto. Sin embargo, también se puede utilizar como medida de la similitud existente entre dos objetos definidos por muchas variables denominándose coeficiente de similitud por correlación (31) y se define para dos objetos A y B como:

$$r_{AB} = \frac{\sum (x_{iA} - \bar{x}_A)(x_{iB} - \bar{x}_B)}{s_A s_B (n-1)} \quad [3]$$

Donde \bar{x}_A , \bar{x}_B y s_A , s_B son las medias y las desviaciones estándar de todas las n variables de los objetos A y B. Los valores de la distancia Manhattan y euclídea se incluyen en un intervalo $[0, \infty)$ donde el valor de identidad total es 0. Los valores del coeficiente de Pearson pertenecen al intervalo $(0, 1]$ siendo el valor 1 la identidad total.

Para el análisis estadístico algunas unidades de medida se han modificado dado que la existencia de valores extremadamente diferentes en las variables estudiadas da lugar a un sesgo y a coeficientes de similitud o distancias anormalmente altos. Así, por ejemplo, las velocidades de ondas P de ultrasonidos y la densidad expresadas en Sistema Internacional en m/s y kg/m³ se convirtieron, para este propósito, en km/s y g/cm³ con el fin de obtener un orden de magnitud más homogéneo para todas las variables.

3. RESULTADOS

3.1. Documentación

La documentación del edificio recoge el proceso la selección de materiales para la construcción de la

several statistical similarity coefficients: Euclidean distance coefficient, Manhattan distance coefficient and correlation similarity coefficient.

The Euclidean distance is defined as the measure of the direct straight-line distance between two variables and it is expressed when comparing two objects A and B with many variables x_{iA} and x_{iB} as:

The Manhattan distance is the sum of the absolute differences between two variables and it is expressed for the case of two objects A and B with different variables x_{iA} and x_{iB} as:

The correlation similarity coefficient is a modification of moment-product correlation coefficient of Pearson. The moment-product coefficient measures the positive or negative correlation between two variables of the same object. However, it can be used as a measure of the similarity existing between two objects defined by several variables. In this last case this coefficient is called correlation similarity coefficient of Pearson (31) and it is expressed for two objects A and B as:

Where \bar{x}_A , \bar{x}_B and s_A , s_B are the means and standard deviations of every of the n variables of the objects A and B. Values of Manhattan and Euclidean distance are included in the interval $[0, \infty)$ where the value of total identity is 0. Values of Pearson coefficient belong to the interval $(0, 1]$ where the value 1 corresponds to the total identity.

For the purpose of statistical analysis some units of measure has been modified since the extreme differences in the value between the variables studied may introduce bias and conduct to abnormally high similarity or distance coefficients. Thus, for example, ultrasonic P waves velocities V_p and density usually expressed in m/s and kg/m³ according to International System have been converted to km/s and g/cm³ for the purpose of obtaining a more order of magnitude for all the variables.

3. RESULTS

3.1. Documented

The documented sources of the building collect the selection process of the stony building materials for the

cripta. La primera selección de materiales comenzó en 1885 e incluyó 23 tipos de piedra. Esto pone de manifiesto la consideración de la importancia de la obra y preocupación que se tenía en seleccionar los materiales más adecuados. Como varios de estos materiales no se habían utilizado antes, el proceso de selección incluyó, aparte de ensayos de caracterización, el examen de alguna de las canteras y del estado de conservación de edificios realizados con estos materiales (25).

El primer proceso de selección terminó con la elección de la llamada *piedra de Baides* para comenzar la obra.

Tras un nuevo proceso de selección se eligió para continuar la obra un nuevo material de Portugal, cuya procedencia concreta no aparece especificada en la documentación.

Para algunos elementos tallados se propusieron tres materiales denominados *Petrel* y *Campanil* más un tercer material que provendría de *Portugal* y que se refiere en la documentación como el mismo con el que fue realizado el Monasterio de Batalha (Portugal, siglos XIV-XV). Pero no se recoge cuál fue el material que finalmente se seleccionó.

3.2. Caracterización petrográfica y petrofísica de los materiales del edificio

La inspección del edificio reconoció tres materiales pétreos diferentes que se denominaron preliminarmente: Dolomía, Caliza con estilolitos y Caliza oolítica. El resultado de los ensayos petrofísicos realizados se resume en la Tabla 1. Su caracterización petrográfica y localización en el edificio se representa en la Figura 3.

- Dolomía

Este material es una pelsparita dolomitizada (Figura 3A) y se sitúa en el edificio en la zona inferior del edificio, fundamentalmente en el zócalo.

- Caliza con estilolitos

Esta litología es la predominante en la cripta, ya que la mayoría de la sillería externa y toda la interna esta realizada con ella. Es una micrita fosilífera con una dolomitización incipiente de pequeños rombos oscuros. Son frecuentes los estilolitos de color rojo brillante y venas de calcita (Figura 3B). Se observaron y analizaron los estilolitos con SEM-EDX, determinándose que su composición era principalmente carbonosa (Figura 4).

construction of the crypt. The first selection began in 1885 and comprised 23 types of materials. This underlines the consideration of the importance of the building and the preoccupation in selecting the most suitable materials. The process of selection included the characterization of the materials, as well as visit of quarries and assessment of the state of conservation of some buildings made with those types of stone since several of those materials had not been used before (25).

The first process of selection ended with the choice of the material denominated stone of Baides to begin the works.

After a new process of selection a different material coming from Portugal was selected to continue the building, but its concrete provenance was not referred in the documentation.

For some of the carved elements were proposed three types of stone denominated Petrel and Campanil and one more material that would come from Portugal and that is referred in the documentation as the same stone that was used in the Monastery of Batalha (14th-15th century, Portugal). The documentation did not notice in this case the final selection of the material.

3.2. Petrographical and petrophysical characterization of the materials in the building

The visual inspection of the masonry of the building recognised three different stony materials that were preliminarily denominated: Dolostone, Limestone with Stilolites and Oolitic Limestone. Results of the petrophysical characterization are summarized in the Table 1. The petrographic characterization and location in the building are represented in the Figure 3.

- Dolostone

This material is a dolomitized pelsparite (Figure 3A) and it is located in the bottom part of the building mainly in the bases.

- Limestone with stilolites

It is the main stone type in the Crypt since most of the external and all the internal stonework are made with it. It is a fossiliferous micrite with incipient dolomitization of dark rhombi. It presents deep red stilolites and calcite veins as main features (Figure 3B). Stilolites were observed and analysed by means of SEM-EDX and its composition was determined as mainly carbonaceous (Figure 4).

- Caliza oolítica

Este material se sitúa en las columnas, arcos y ornamentaciones de la portada de la Cripta. El estudio se circunscribió a una muestra procedente de un fragmento suelto de una de las columnas ya que se considero inadecuado un muestreo mayor que pudiera provocar pérdidas de partes ornamentales del edificio. Se clasifica como oomicrita con briozoos, equinodermos y gasterópodos (Figura 3C).

3.3 Caracterización petrográfica y petrofísica de los materiales de cantera

El número de piedras diferentes en el edificio está de acuerdo con el número de procedencias referidas en la

- Oolithic limestone

This material is placed in the columns, arches and ornamental carvings in the doorway of the Crypt. The study of this stone was restricted to a loose fragment of one of the columns because an extensive sampling of this material was considered to be inadequate in view of the fact that strong loss of ornamental parts of the building may be caused. This stone is an oomicrite with bryozoa, echinoderms and gastropods (Figure 3C).

3.3. Petrographical and petrophysical characterization of the materials in the quarries

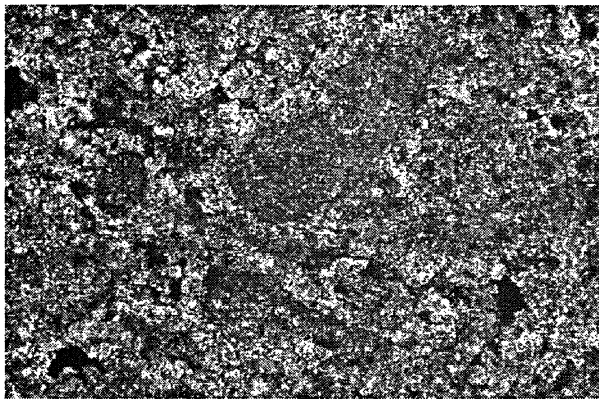
The number of different stones in the building agrees with the number of provenances referred in the

TABLA I / TABLE I

Propiedades petrofísicas de los materiales pétreos de construcción del monumento y de las áreas de extracción posibles
Petrophysical properties of the stony building material of the monument and the possible extraction areas

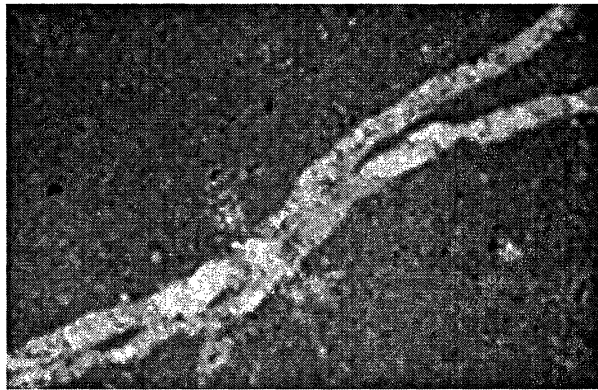
	Dolomía (Edificio) <i>Dolostone (Building)</i>	C. Estilolitos (Edificio) <i>L. Stylolites (Building)</i>	Dolomía (Cantera) <i>Dolostone (Quarry)</i>	Caliza tipo Alpinina <i>Alpinina type limestone</i>	Caliza tipo Vidraço <i>Vidraço type limestone</i>
Saturación (% peso) <i>Saturation (weight %)</i>	6.40 ± 0.60	0.30 ± 0.07	13.30 ± 0.40	0.29 ± 0.07	0.74 ± 0.04
Porosidad accesible al agua (%) <i>Porosity accessible to water (%)</i>	15.0 ± 1.0	0.8 ± 0.2	27.3 ± 0.4	0.8 ± 0.2	1.9 ± 0.1
Densidad real (kg/m ³) <i>Real density (kg/m³)</i>	2 857 ± 1	2 693 ± 6	2 830 ± 10	2 712 ± 2	2 704 ± 3
Densidad aparente (kg/m ³) <i>Bulk density (kg/m³)</i>	2 410 ± 40	2 672 ± 6	2 050 ± 20	2 691 ± 4	2 651 ± 5
Compacidad (%) <i>Compacity (%)</i>	84 ± 1	99 ± 0	73 ± 1	99 ± 0	98 ± 0
Velocidad ultrasonidos, Vp (m/s) <i>Ultrasound velocity, Vp (m/s)</i>	4 500 ± 300	6 500 ± 100	3 000 ± 400	6 600 ± 300	7 400 ± 400
Coefficiente Schmidt <i>Schmidt coefficient</i>	12 ± 1	27 ± 1	12 ± 1	26 ± 1	< 10
L*	81.7 ± 0.6	71.0 ± 0.2	82.3 ± 0.4	75.8 ± 0.5	67.0 ± 2.0
a*	3.1 ± 0.3	3.6 ± 0.1	2.1 ± 0.1	3.5 ± 0.1	3.8 ± 0.5
b*	11.8 ± 0.5	13.8 ± 0.3	10.7 ± 0.3	15.3 ± 0.1	14.8 ± 0.8
Índice de blanco <i>White index</i>	12 ± 2	-1 ± 1	17 ± 1	-4 ± 1	-5 ± 2
Índice de amarillo <i>Yellow index</i>	20.1 ± 0.9	25.1 ± 0.5	18.2 ± 0.3	27.0 ± 0.7	28.6 ± 1.9

Monumento / Monument



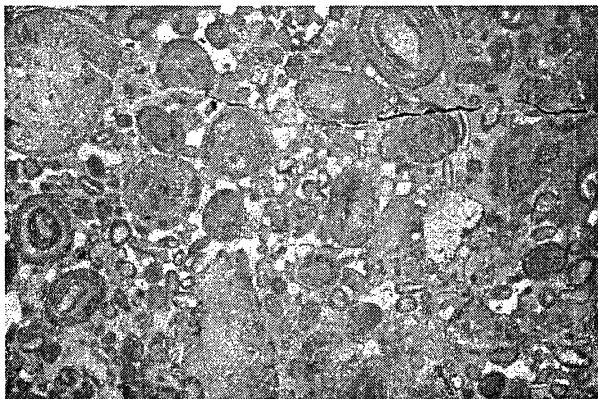
A

0.5 mm



B

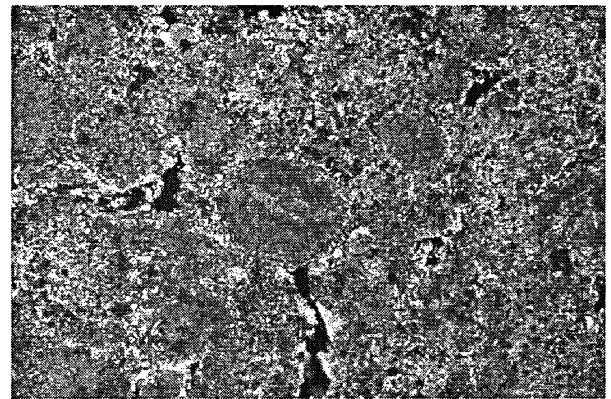
0.5 mm



C

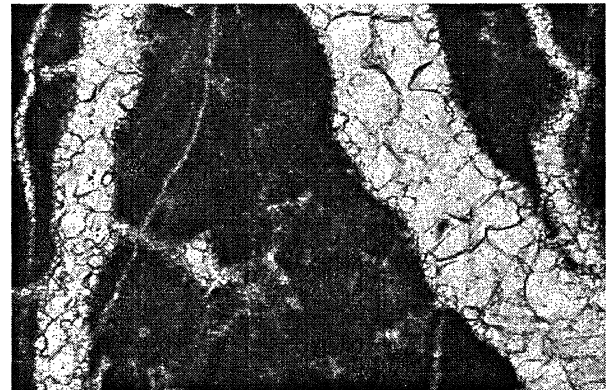
2 mm

Canteras / Quarries



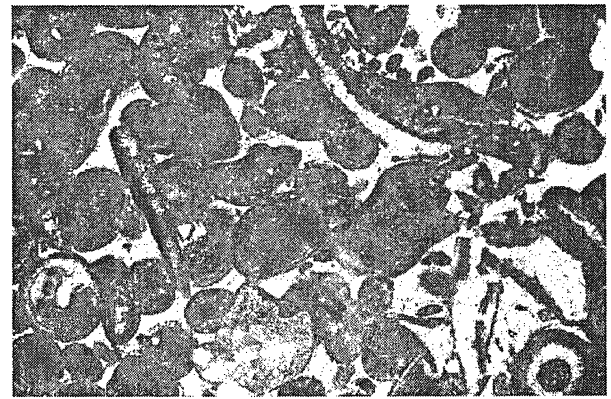
D

0.5 mm



E

0.5 mm



F

2 mm

Figura 3.- Fotomicrografías de los materiales pétreos en la Cripta (A, B y C) y de los seleccionados como procedentes de las áreas de extracción originales (D, E y F). Polaroides cruzados.

Figure 3.- Photomicrographies of the stony materials used in the Crypt (A, B, C) and the materials selected as arrived from the original extraction areas (D, E, F). Crossed-polars.

Monumento / Monument

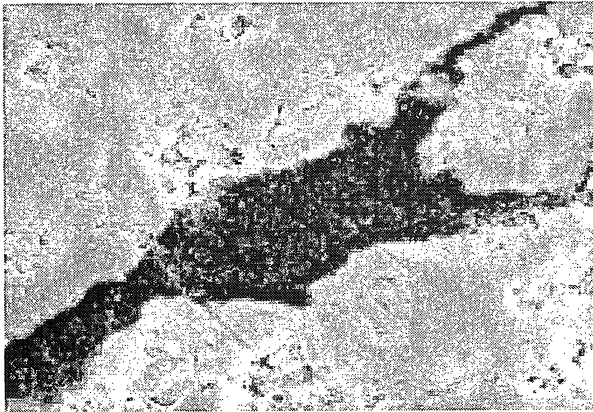
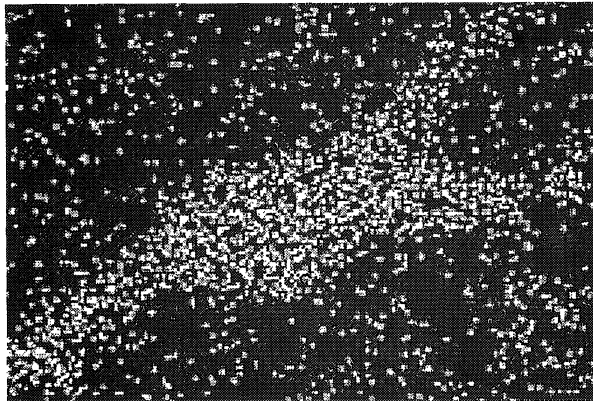


Imagen de electrones
Electron image

40 μ



Mapa contenido C
C content mapping

40 μ



Mapa contenido Fe
Fe content mapping

40 μ

Canteras / Quarries

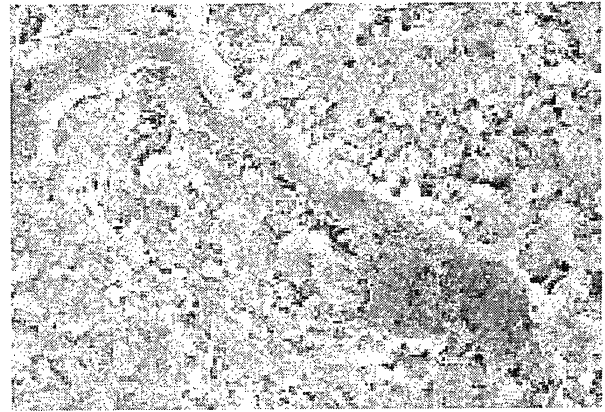
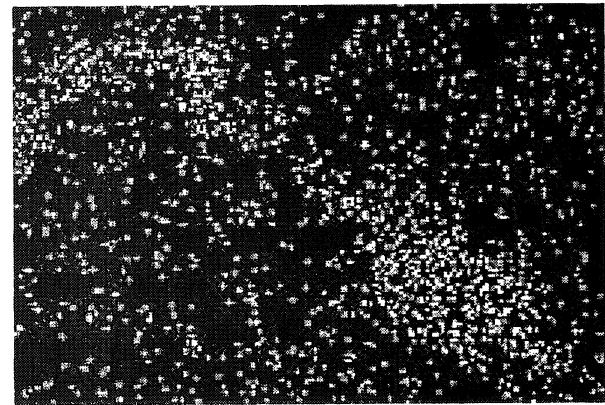


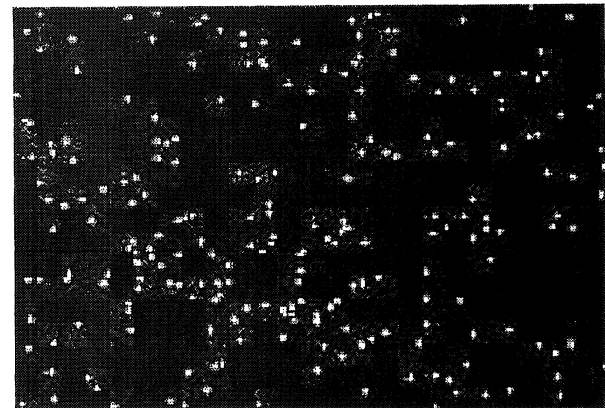
Imagen de electrones
Electron image

40 μ



Mapa contenido C
C content mapping

40 μ



Mapa contenido Fe
Fe content mapping

40 μ

Figura 4.- Imágenes de microscopía electrónica de barrido en modo de electrones retrodispersados y mapas de distribución de carbono y hierro en los estilolitos de la caliza de la Cripta de la Almodena y de la caliza de tipo Alpinina.

Figure 4.- Scanning electron microscopy images in backscattered electrons mode and maps of distribution of carbon and iron in the estilolites of the limestone from the Crypt of the Almodena and the Alpinina type limestone.

documentación. Así, se realizó una primera aproximación para relacionar cuál de las litologías del edificio correspondía con cada procedencia referida en la documentación: Baidés, Portugal y la Indefinida.

- Dolomía

Este material correspondería por su posición en el edificio con el que está citado como *Piedra de Baidés*. La población de Baidés está situada al norte de la provincia de Guadalajara a unos 13 km al oeste de Sigüenza. Siguiendo la documentación local y las posibles formaciones geológicas de origen se encontraron restos de trabajos de cantería, en el área de Barranco de la Hoz, en el término municipal de la cercana población de Viana de Jadraque. Estos restos están constituidos por una serie de bloques dispersos de sección rectangular y hexagonal con marcas de herramientas de talla (Figura 5). El estudio petrográfico de las muestras de cantera la define como pelsparita dolomitizada (Figura 3D). La Tabla 1 resume las propiedades petrofísicas de este material.

- Caliza con estilolitos

Este material es el más abundante en el edificio. Según la documentación histórica la obra de sillería se realizó mayoritariamente con un material portugués de origen indeterminado. Para localizar las posibles localidades de origen de este material, se realizó una comparación visual entre muestras pulidas del edificio con muestras pulidas de materiales portugueses utilizados como piedra de construcción. Tras esta primera preselección, se escogieron para realizar los ensayos dos variedades comerciales actualmente en explotación denominadas Vidraço y Alpinina.

documentation. Thus a first approach was made to relate what stone in the building would correspond with each provenance referred in documentation: Baidés, Portugal and Undefined.

- Dolostone

This stone would correspond because of its position in the building with the material referred as Stone of Baidés. Baidés is a village in the north of the region of Guadalajara 13 km W of the town of Sigüenza. Remaining of old quarry works were found by taking the possible source geological formations as well as industrial documentation in the city council. This remaining is located in the area of Barranco de la Hoz belonging to the near village of Viana de Jadraque and consists in several dispersed cut blocks with hexagonal and rectangular sections and tool marks (Figure 5). The petrographic study of the samples defines this material as a dolomitized pelsparite (Figure 3D): Petrophysical properties are summarized in the Table 1

- Limestone with stilolites

This material is the most abundant in the building. According to the documentation, the stonework was mainly built with an indeterminate Portuguese material. The selection of the possible provenances was made by visual comparison of polished samples from the building and polished samples of Portuguese stones used as building materials. After this first pre-selection two stone types were chosen for further studies on the basis of their visual similarity with the stones in the building. The samples obtained for the study corresponded with commercial varieties exploited nowadays with the names of Vidraço and Alpinina.



Figura 5.- Bloques de piedra con marcas de herramientas, abandonados en la zona de Viana de Jadraque.

Figure 5.- Stone blocks with tool-marks, abandoned in the area of Viana de Jadraque.

Las muestras de Vidraço son oomicritas con espículas de equinodermos, briozoos, moluscos, gasterópodos y ostrácodos con escasos estilolitos. Las muestras de Alpinina (Figura 3E) son pelmicritas con foraminíferos y ostrácodos. Las muestras presentan abundantes estilolitos rojo oscuro y venas de calcita esparítica.

En los estilolitos se llevaron a cabo observaciones y análisis con SEM-EDX ya que éste era un rasgo importante observado en la piedra del edificio. Los resultados de estas observaciones indicaron que la composición de los estilolitos en la Alpinina era principalmente carbonosa con bajo contenido en hierro (Figura 4).

La caracterización petrofísica de los dos tipos de muestras de cantera estudiadas se recoge en la Tabla 1.

- Caliza oolítica

Aunque no existe referencia del origen concreto de esta caliza en la documentación, hay un registro de las áreas posibles en las propuestas para este tipo de piedra. Las localidades posibles corresponderían con: Piedra de Petrel (Alicante, España), Piedra de Campanil (Navarra, España) y Piedra de Portugal (La documentación histórica indicó que sería el mismo material del monasterio de Batalha). Las características petrológicas del material en el edificio no corresponden con las variedades extraídas en Petrel (24). La piedra Campanil de Navarra se localiza de la zona de las Bardenas Reales. Dado que corresponde a unidades terciarias continentales (32, 33), el contenido fosilífero de la piedra del edificio elimina este origen como posible. También se consideró como hipótesis de partida que podría haber una relación entre el abastecimiento de la primera piedra portuguesa y esta segunda ya que ambas fueron servidas a la obra al mismo tiempo, especialmente si se tiene en cuenta que esta piedra portuguesa ya se había usado en otro edificio importante. Siguiendo estas premisas, dado que la cantidad de muestra recogida en el edificio no permitía un estudio exhaustivo, se realizó el estudio petrográfico de calizas oolíticas procedentes de la región central portuguesa (Figura 3E). La Tabla 2 compara los datos de porosidad obtenidos en la muestra del edificio con estas calizas oolíticas y con valores referenciados para las canteras explotadas en el siglo XIX para la restauración del monasterio de Batalha (6).

3.4. Análisis estadísticos

La aplicación de los índices estadísticos antes mencionados usados en las comparaciones entre edificio y materiales de cantera para los dos primeros tipos de piedra se muestran en la Tabla 3.

Vidraço samples are oomicrites with echinoderm spicules, bryozoa, gastropods, molluscs and ostracods with some scarce stilolites. Alpinina samples (Figure 3E) are pelmicrites with foraminifera and ostracods. The samples present abundant dark red stilolites and sparitic calcite veins.

SEM-EDX observation and analysis were carried out in the stilolites since this is an important feature observed in the building stone. The results of these observations indicated that the composition of the stilolites in the Alpinina samples is mainly carbonaceous with low iron contents (Figure 4).

Petrophysical characterization of the two types of samples studied is summarized in Table 1

- Oolitic limestone

Although the concrete origin of this limestone was not referred in the documentation, there is a registration of the possible areas noted in the proposals for this type of stone. The possible localities would correspond to: Petrel Stone (Alicante, Spain), Campanil Stone (Navarra, Spain) and Portugal Stone (The historical documentation indicated that would be the same material of the monastery of Batalha). The petrological characteristics of the material in the building do not correspond with the varieties quarried in Petrel (24). The stone called Campanil of Navarra is located in the area of Bardenas Reales. The fossiliferous content of the building stone eliminates this origin as possible since it corresponds with continental Tertiary units (32, 33). Also it was considered as hypothesis that could be a relation between the supplying of the first Portuguese stone and this second one since both were served to the building works at the same time, specially taking into account the fact that this Portuguese stone was already used in another important building. A petrographical study of some oolitic limestone coming from the Portuguese central area (Figure 3E) was made following these premises and due to the small amount of sample that avoided making exhaustive studies. Table 2 compares porosity data obtained in the building sample with this oolitic limestone and with values referred for quarries exploited in the 19th century for the restoration of monastery of Batalha (6).

3.4. Statistical analysis

The application of the above-mentioned statistical indexes applied in the comparisons between building and quarry materials for the first two types of stone is shown in the Table 3.

TABLA 2 / TABLE 2

Descripción petrográfica y porosidad de la caliza oolítica del monumento y de calizas oolíticas del área central portuguesa

Petrographic description and porosity of oolitic limestone from the monument and oolitic limestones from the portuguese central area

Denominación <i>Denomination</i>	Descripción <i>Description</i>	Porosidad <i>Porosity (%)</i>
Caliza oolítica Almudena <i>Almudena oolitic limestone</i>	Oomicrita bioclástica <i>Bioclastic oomicrite</i>	6.7
Caliza tipo Rosal <i>Rosal type limestone</i>	Oomicrita con bioclastos <i>Omicrite some bioclastic</i>	15.0
Caliza tipo Rosal semi-rijo <i>Rosal semi-rijo type limestone</i>	Oomicrita con bioclastos <i>Omicrite some bioclastic</i>	11.7
Caliza tipo Mocca Creme <i>Mocca Creme type limestone</i>	Oomicrita con bioclastos <i>Omicrite some bioclastic</i>	15.0
Cantera Cabeço do Roxo <i>Cabeço do Roxo quarry *</i>	Caliza oolítica blanda <i>Soft oolitic limestone</i>	14.9
Cantera Carvalhos <i>Carvalhos quarry *</i>	Caliza oolítica blanca <i>White oolitic limestone</i>	11.3
Cantera Lagedo <i>Lagedo quarry *</i>	Caliza oolítica blanca <i>White oolitic limestone</i>	11.1
Cantera Reguengo do Fetal <i>Reguengo do Fetal quarry *</i>	Caliza oolítica blanca <i>White oolitic limestone</i>	14.6

* Datos obtenidos de canteras explotadas en el siglo XIX en el área de Batalha (6).

TABLA 3 / TABLE 3

Índices estadísticos (Distancia euclídea d_{AB} , distancia Manhattan D_{AB} y Pearson r_{AB}) aplicados en el análisis de la procedencia.

Statistical indexes (Euclidean distance d_{AB} , Manhattan distance D_{AB} and Pearson r_{AB}) applied for the analysis of provenance.

	Dolomía (Edificio) <i>Dolostone (Building)</i>			C. Estilolitos (Edificio) <i>L. Stylolites (Building)</i>		
	d_{AB}	D_{AB}	r_{AB}	d_{AB}	D_{AB}	r_{AB}
Dolomía (Cantera) <i>Dolostone (Quarry)</i>	1.23	2.49	0.98	3.34	8.31	0.86
Caliza tipo Alpinina <i>Alpinina type limestone</i>	2.36	5.84	0.93	0.51	1.02	0.99
Caliza tipo Vidraço <i>Vidraço type limestone</i>	2.40	5.77	0.93	1.53	2.72	0.96

4. DISCUSIÓN

La comparación de los resultados entre las muestras del edificio y de las canteras se tiene que tomar desde un punto de vista global. Si se toma cada una de las propiedades individualmente, se observa que puede existir una diferencia importante en esa propiedad. Así por ejemplo, se observa que en la dolomía los valores del índice de saturación y de la porosidad accesible al agua presentan diferencias notables aunque los índices de similitud para todas las variables son altos. Estas diferencias tienen una importancia relativa y sólo se han de tener en cuenta después del análisis conjunto de todas las variables. La variación individual de una de las propiedades tiene su causa en la reducida población de muestras que ha de tomarse del edificio. Como resultado, pequeñas heterogeneidades en la población pueden producir una aparente falta de similitud en determinadas propiedades con la población de la cantera, más amplia y representativa. Este aspecto confirma la importancia de utilizar la estadística multivariante. Sin embargo, estos índices matemáticos siempre deben ser conjugados con el análisis petrográfico comparativo.

Los tres materiales encontrados en el edificio representan tres grados diferentes de incertidumbre en la valoración de la procedencia del material. Primero, la dolomita representa un tipo de piedra bien documentado en el cual sus canteras fueron abandonadas completamente. En este caso la localización de la procedencia es muy precisa puesto que la fuente original del material se puede concretar con el máximo grado de certeza: hay una coincidencia petrográfica entre las muestras del edificio y la cantera, el índice de similitud es alto y se han encontrado restos de la cantera.

En segundo lugar, la caliza con estilolitos que muestra una fuerte correlación en el análisis petrográfico, observaciones de SEM y análisis estadístico de las propiedades petrofísicas con las muestras de canteras actuales aun cuando no se han encontrado restos de las canteras originales. El grado de certeza en la valoración del origen es menor puesto que las canteras originales no se han encontrado. Esto representa un caso frecuente en el cual se puede asegurar el tipo de material pero el área de extracción sólo puede valorarse aproximadamente pues ésta ha seguido en explotación.

El tercer material representa un caso en el cual la valoración de la procedencia se basa, principalmente, en información documental aun cuando existe una coincidencia petrográfica con la procedencia establecida. Este caso sólo permite determinar el área más probable de extracción con un cierto grado de incertidumbre.

4. DISCUSSION

The comparison of the results between the samples of building and the samples of quarries has to be taken from a global point of view. Important differences may occur if each one of the properties is compared individually. Thus, for example, the dolostone present noticeable differences in saturation index or values of porosity accessible to water although the similarity index for all the variables is high. These differences have a relative importance and only have to be taken into account after the combined analysis of all the variables. The individual variation of one of the properties may be caused due to the small population of samples that has to be taken from the building. As a result, small heterogeneities within the population of the building may produce an apparent lack of similarity caused by the comparison with the population of the quarries that is usually wider and more representative. This fact underlines the importance of using techniques of multivariate statistics although this kind of analysis always does have to be supported by a careful petrographic comparative analysis.

The three materials found in the building represent three different degrees of certainty in the assessment of the provenance of the material. Firstly, the dolostone represent a well-documented type of stone in which its quarries were abandoned and no longer used. In this case the location of the provenance is very accurate since the original source of the material can be confined with the highest degree of certainty: There is a strong petrographical coincidence between building and quarry samples, similarity index is high and remaining of quarry was found.

Secondly the limestone with stilolites that shows strong relations in the petrographic analysis, SEM observations and statistical analysis of petrophysical properties with the present day quarry samples obtained even when remaining of original quarries was not found. The degree of certainty in the assessment of the origin is smaller since the original quarries were not found. It represents a frequent case in which the type of material can be assured but the area of extraction only can be roughly assessed as it has been maintained in exploitation.

The third stone represents a case in which the assessment of the provenance is mainly based in documental information even when exists a petrographic agreement with the established provenance. This case just allows determining the most probable area of extraction with some degree of uncertainty.

Los resultados obtenidos demuestran que la piedra utilizada en la parte inferior de la cripta es una dolomía extraída de una formación de dolomías en bancos del Cretácico Superior (Coniaciense a Santoniense) (34) en el área del Barranco de la Hoz en Viana de Jadraque (Guadalajara, España). La litología predominante del edificio se corresponde con el tipo actualmente comercializado como Alpinina. Bajo la denominación de Alpinina se incluyen unas calizas micríticas tectonizadas del Batoniense del Maciço Calcário Estremenho (Portugal) (35). Existen dos afloramientos principales de este tipo rocoso. Uno en el área de Alvados que se explota con la denominación de Alpinina y otro, más al sureste, en el área entre Monsanto y Abrã, de idénticas características, que se explota bajo la denominación Topazio (35). Aunque la descripción obtenida para el tercer material corresponde con las referidas para las canteras del área del Monasterio de Batalha, los escasos datos que se pudieron obtener, debido a la pequeña cantidad de muestra que se consideraba adecuado recolectar, sólo permite asegurar que esta es tan sólo el área fuente más probable.

5. CONCLUSIONES

El análisis conjunto del proceso de construcción y las características petrográficas y petrofísicas permite establecer que los materiales pétreos utilizados en la construcción de la Cripta de la Catedral de Santa María de la Almudena son: en la parte inferior del edificio una proveniente de Baides - Viana de Jadraque (Guadalajara), una caliza micrítica tectonizada del Maciço Calcário Estremenho (Portugal) como parte principal de la sillería y una caliza oolítica portuguesa, probablemente de canteras del área del Monasterio de Batalha, en los elementos ornamentales.

La utilización de índices estadísticos, especialmente los índices tipo coeficiente de similitud por correlación, permite cuantificar numéricamente el grado de similitud y se pueden usar tanto para la determinación geográfica del origen como para asegurar que un material de sustitución es compatible con el resto de la obra.

En algunos casos puede ser necesario hacer uso de costosas técnicas analíticas para la determinación de las áreas fuente de ciertos materiales. Sin embargo, en otras situaciones, partiendo de los índices estadísticos de similitud, podemos observar que no es necesario, pues aporta datos estadísticamente redundantes. De tal manera que los ensayos de determinación de canteras de origen siempre han de realizarse de manera secuencial hasta obtener el grado de determinación aceptable, observando la evolución de los índices de similitud con la adición de un nuevo resultado.

The results obtained show that the stone used in the bottom areas of the Crypt is a dolostone extracted from outcrops of bedded dolostones in the Barranco de la Hoz area in Viana de Jadraque (Guadalajara, Spain). This dolostone belongs to Upper Cretaceous (Coniacian to Santonian) formations (34) and to date there are not references of this stone type as widely used building stone. The main lithology found in the building corresponds with the type of stone presently commercialised under the trade denomination Alpinina. Alpinina stones include tectonized micritic limestones of the Jurassic (Batonian) of the Maciço Calcário Estremenho (Portugal) (35). There are mainly two outcrops of this type of stone. One in the area of Alvados exploited with the name of Alpinina and other at southeast in the area of Monsanto and Abra exploited with the name Topazio (35). Although the description obtained for the third building stone correspond with those referred for the quarries in the area of the Batalha Monastery, the scarce data that were obtained from the building stone due to the small amount of sample that was suitable to collect only allows to assure that the Batalha area is just the most probable source area.

5. CONCLUSIONS

The analysis of the constructive process as well as the petrographical and petrophysical data, allows to establish that the stony materials used in the building of the Crypt of the Cathedral of Santa María la Real de la Almudena are: a dolomitized pelsparite from Baides - Viana de Jadraque (Guadalajara) for the basement areas of the building, a tectonized micritic limestone from Maciço Calcário Estremenho (Portugal) as main constituent of the stone masonry, and a Portuguese oolitic limestone, probably from quarries of the Monastery of Batalha area, in the ornamental elements.

The use of statistical indexes, especially those like the correlation similarity coefficient, allows quantifying numerically the similarity and can be used both for the geographic determination of the origin and to assess the compatibility of a substitution material with the rest of the building.

In some case might be necessary to use expensive analytical techniques for the determination of source areas for certain materials. Otherwise, in other cases when using similarity statistical indexes this is not necessary as it offers data statistically redundant. Thus is important to make all the necessary tests for the assessment of provenance in a sequential way until to obtain the suitable determination degree, observing the evolution in the similarity index with the addition of a new result.

Los materiales encontrados en esta investigación no corresponden con los considerados tradicionales en la ciudad de Madrid y su presencia se explica por la inauguración de las líneas de ferrocarril en la segunda mitad del siglo XIX. Con el ferrocarril las ciudades comenzaron a abastecerse con materiales de fuera de sus alrededores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no se podría haber llevado a cabo sin la ayuda de D. Antonio Astillero, Deán de la Catedral de la Almudena y los archiveros del Archivo Histórico-Diocesano de Madrid. Queremos agradecer también a los Drs. Delgado Rodrigues y Alonso Zarza, así como al Alcalde y personal del Ayuntamiento de Baidés, al personal del Instituto Geológico e Mineiro de Portugal, CEVALOR, ASSIMAGRA, MOCAPOR y Mármores de Alcobaça, y a R. Frigo y E. Meehan por su ayuda, apoyo y atención en el desarrollo y preparación de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Fort, R., Mingarro, F., López de Azcona, M.C.: *Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid*. Geogaceta, Vol. 20 (1996), pp. 1236-1239.
- (2) Rodríguez, J., Alcalde, M.: *La alteración de la piedra en la Catedral de Jerez (Cádiz, España)* In: IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. pp. 197-199, CICOP, Tenerife, 1998.
- (3) Alvarez, A., Estrada, R., Gueddari, F., Figueiredo, M.O., Veiga, J.P., Vilaseca, L.: *Characterisation of materials used in the aqueduct of Zaghwan – Carthage (Tunisia) along construction and restoration periods*. In: Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities, (eds. Galán, E., Zezza, F.), pp. 101-106, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2002.
- (4) Villegas, R., Vale, J. F., Alcalde, M.: *Study of water-repellent treatments applied on limestone from andalusian cathedrals*. Mater Construcc, Vol. 41, n° 223 (1991), pp. 19-27.
- (5) Esbert, R. M., Alonso, J.: *Waterproofing of porous carbonate rocks: efficiency-controlling its properties*. Mater. Construcc., Vol. 45, n° 237 (1995), pp. 15-30.
- (6) Aires-Barros L., Neto M.J., Soares C.: *The monastery of Batalha (Portugal): Restoration works and Historic quarries, a preliminary study*. In: IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. pp. 384-386, CICOP, Tenerife, 1998.
- (7) Fort, R., López de Azcona, M.C., Mingarro, F.: *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. pp. 177-179, CICOP, Tenerife, 1998.
- (8) Cultrone, G., Barone, G., Gangemi, G. Ioppolo, S.: *Lapideus materials from the columns of the cathedral of S. Maria di Randazzo (Catania) and from their origin quarries*. Journal of Cultural Heritage, Vol 2 (2001), pp. 199-207.
- (9) M. C. López de Azcona, R. Fort, F. Mingarro: *Lan conservación de los materiales pétreos de la fuente de Cibeles*. Madrid (España). Mater Construcc (2002), n° 265, pp. 65-75.
- (10) M. J. Varas, E. Molina, M. A. Vicente: *Areniscas ornamentales empleadas en Ciudad Rodrigo, Salamanca. Caracterización petrográfica y química de los materiales de cantera*. Mater Construcc (2002), n° 266, pp. 33-42.
- (11) Gomez-Heras, M., Fort González, R.: *Supplying of masonry materials in the construction of the Crypt of Santa Maria la Real de la Almudena, Madrid, Spain, 1883-1911*. In: Proceedings of the First International Congress on Construction History (ed. Huerta, S.), Vol. 2, pp. 1051-1061, Inst. Juan de Herrera-ETSAM, Madrid, 2003.
- (12) Dingelstadt, C., Dreesen, R., Thorez, J., Lorenzi, G., Bossiroy D., Antenucci D., Banier, J.: *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.), Vol. 2, pp. 33-41, Elsevier, Amsterdam, 2000.
- (13) Zezza, U., Sebastián Pardo, E.: *El mármol de Macael (Almería) en los monumentos históricos de Granada (España)*. In: I Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, Vol. 1, pp. 153-160, Gobierno de Canarias, Tenerife, 1992.
- (14) Zezza U.: *Non-destructive colour parameters applied to provenance studies of archaeological Mediterranean white marble*. In: Archéomatériaux – Marbres et Autres Roches. Actes de la IV^{ème} Conférence Internationale de l'Association pour l'Étude des Marbres et Autres Roches Utilisées dans le Passé. (ed. Schvoerer, M.), pp. 185-190, NRPAA-PUB, Bordeaux, 1995.

The materials found in this research do not correspond with those considered traditional in the city of Madrid and their presence is explained by the establishment of the railway lines in the second half of the 19th century that allowed to introduce materials further than the surroundings.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work could not have been carried out without the support of Antonio Astillero, Dean of the Cathedral of the Almudena and the archivists of the Historic Archive of the Diocese of Madrid. We would like also to acknowledge Dr Delgado Rodrigues and Alonso Zarza as well as the Mayor and the staff of the Town Council of Baidés, the staffs of Instituto Geológico e Mineiro de Portugal, CEVALOR, ASSIMAGRA, MOCAPOR and Mármores de Alcobaça, and to R. Frigo and E. Meehan for their help, support and attention during the execution and preparation of this work.

- (16) Bello, M. A., Martín, L., Martín, A.: *Identificación microquímica de mármol blanco de Macael en varios monumentos españoles*. Mater Construcc, Vol. 42 (1992), pp. 23-30.
- (17) Craig, H. and Craig, V.: *Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis*. Science, Vol. 176 (1972), pp. 401-403.
- (18) Galan, E., Carretero, M. I., Mayoral, E.: *A methodology for locating the original quarries used for constructing historical buildings: Application to Malaga Cathedral, Spain*. Engineering Geology, Vol. 54 (1999), pp. 287-298.
- (19) Lazzarini, L., Moschini, G., Stievano, B.M.: *A contribution to the identification of Italian, Greek and Anatolian marbles through a petrological study and the evaluation of Ca/Sr ratio*. Archaeometry, Vol. 22 (1980), pp. 173-183.
- (20) Lapuente, M. P., Turi, B., Blanc, P.: *Marbles from Roman Hispania: stable isotope and cathodoluminescence characterization*. Applied Geochemistry, Vol. 15-10 (2000), pp. 1469-1493.
- (21) Fort González, R.: *Localización de antiguas canteras utilizadas en el patrimonio monumental*. In: Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico. (ed. Mingarro Martín, F), pp. 311-316, Editorial Complutense, Madrid, 1996.
- (22) Menduiña, J., García del Cura, M. A., Fort, R., Fernández-Revuelta, B.: *Las canteras cretácicas de caliza y dolomía de la Comunidad de Madrid. Un Patrimonio Minero de interés cultural*. En: Patrimonio Geológico y Minero y Desarrollo Regional (ed. Rábano, I., Manteca, I., García, C.). Cuadernos del Museo Geominero, 2, pp. 235-241. IGME, Madrid, 2003.
- (23) Dapena, J.E.; Ordóñez, S.; García del Cura, M. A.: *Study of the limestone rock used in the construction of palaces in Madrid during the 18th and 19th centuries*. In: Proceedings of the International Symposium «The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. Preservation and Protection» (eds. Marinos, P.G., Koukis, G. C.). Vol. 2, pp. 683-690, Balkema, Lisse, 1988.
- (24) Fort, R.; Bernabeu, A.; Garcia del Cura, M. A., López de Azcona, M. C., Ordóñez, S., Mingarro, F.: *Novelda Stone: widely used within the Spanish architectural heritage*. Mater Construcc, Vol. 52, nº 266 (2002), pp. 19-32.
- (25) Junta de Edificación del Templo de Santa María de la Almudena.: *Primer libro de actas. Ejemplar manuscrito*, Archivo Histórico-Diocesano de Madrid (Madrid, 1879-1934)
- (26) Folk, R. L.: *Practical petrographic classification of limestone*. AAPG Bulletin, Vol. 43 (1959), pp. 1-38.
- (27) NORMAL 7. *Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità di imbibizione*. CNR-ICR, Roma, 1981.
- (28) RILEM: *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Commission 25-PEM (Protection et érosion des monuments)*, Materials and Structures, Vol. 75 (1980), pp. 175-253.
- (29) CIELAB, in Publication CIE nº 15.2, Colorimetry, 2nd Edition, Central Bureau of the CIE, Vienna, 1986.
- (30) ASTM E 313: *Método Ensayo Estándar para índices de blancura y amarillo de materiales casi blancos y opacos*. ASTM, 1973; re-approved 1979.
- (31) Swan, A. R. H., Sandilands, M.: *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell, Oxford, 1995.
- (32) Instituto Geológico y Minero de España: *Alfaro, Hoja 244 del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) Mapa y memoria*. Ministerio de Industria y Energía, Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 1975.
- (33) Instituto Geológico y Minero de España: *Sádaba, Hoja 245 del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) Mapa y memoria*. Ministerio de Industria y Energía, Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 1976.
- (34) Instituto Geológico y Minero de España: *Sigüenza, Hoja 461 del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) Mapa y memoria*. Ministerio de Industria y Energía, Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 1978.
- (35) Jorge Carvalho: *O Alpinina: Variedade de Calcário Ornamental da Região de Alvados (Maciço Calcário Estremenho - Portugal)*. Estudos, Notas e Trabalhos do Instituto Geológico e Mineiro, Vol. 40 (1998).
- (On line in http://www.igm.pt/edicoes_online/estudos/tomo40/artigo3.htm)

* * *

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Monográfico dedicado a

LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN

La revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, editada en el Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA, dedica un número doble (N^o 247/248) a: *Los Materiales Compuestos en la Construcción*.

Los Materiales Compuestos en la Construcción es una temática muy actual ya que incide en el desarrollo y aplicación de Nuevos Materiales ("Composites"), que son el futuro en el campo de la Construcción. Uno de los sectores productivos que más influyen en el PIB es el de la construcción, con lo cual resulta necesario involucrar al sistema de I+D en el desarrollo de nuevos materiales compuestos basados en el cemento. En estos términos se presentaba en la última convocatoria de proyectos de investigación de la CICYT y dentro del Programa Nacional de Materiales, lo referente a las investigaciones en el Área de Materiales Compuestos (B.O.E. 7 de noviembre de 1997). *Los Materiales Compuestos en la Construcción* constituyen un tema estratégico, tanto para los ingenieros de caminos, canales y puertos como para los ingenieros de materiales.

Este número monográfico se compone de dos partes. La parte I se dedica a los materiales compuestos de matriz de hormigón. Son tratados temas claves como la dosificación, la interfase en sistema acero-hormigón y la implantación de nuevas fibras como son las acrílicas. La parte II se concentra en los denominados materiales compuestos de matriz orgánica, analizándose en profundidad las nuevas tecnologías tipo sandwich, textiles o de parrilla.

En este número especial se recogen trabajos de investigación originales e inéditos, en los que también se presentan las amplias posibilidades de aplicación de estos materiales. Los autores de estos trabajos, tanto los nacionales como los internacionales, son especialistas reconocidos en su respectivos campos científicos.

Los artículos que componen este número especial son:

- **Materiales Compuestos en la Construcción: Introducción** (*Composite Materials in Building: Introduction*)
A. Miravete
- **Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero** (*Mix design of steel fiber reinforced concrete*)
E. Moreno y M. Fernández Cánovas
- **Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras** (*Interface study of fiber reinforced concrete*)
A. Pacios y M. Fernández Cánovas
- **Hormigones reforzados con fibras acrílicas** (*Concretes reinforced with acrylic fibres*)
T. Amat
- **Fabricación y diseño de estructuras parrilla** (*Manufacture and design of composite grids*)
Stephen W. Tsai, Kevin K.S. Liu y Philippe M. Manne
- **Características de los elementos resistentes tipo sandwich contruidos en materiales compuestos avanzados a partir de tejidos tridimensionales** (*Characteristics of sandwich-type structural elements built of advanced composite materials from three dimensional fabrics*)
L. Castejón, M.A. Jiménez y A. Miravete
- **Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles** (*Composite materials from new textile technologies*)
M.A. Jiménez, L. Castejón y A. Miravete
- **Los composites y la construcción: su ayer, hoy y mañana** (*Composites and construction: yesterday, today and tomorrow*)
J. Manso
- **Conclusiones finales** (*Final conclusions*)
A. Miravete