

# Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid

*Petrology of the building materials of the Royal Palace, Madrid*

R. Fort González(\*), F. Mingarro Martín (\*\*) y M.C. López de Azcona(\*)

(\*) Instituto de Geología Económica, C.S.I.C. 28040 Madrid.

(\*\*) Dpto. Petrología y Geoquímica, Fac. C.C. Geológicas, U.C.M. 28040 Madrid

## ABSTRACT

The granite blocks with which the Royal Palace was built show local degradation reflected by an increase of porosity, water absorption capacity, and the kinetics of water sorption and permeability. The rocks are especially sensitive to variations of wetting and dryness. The blocks that were substituted during the last restoration of the building do not display significant variation of their petrophysical characteristics, neither the outer nor the inner parts of the blocks. These granites were sourced by granite quarries in Zarzalejos.

The limestones used in that restoration were made of limestone blocks extracted from the "Sobrebanco" level of the Colmenar de Oreja quarries, as concluded from the study of their petrographic and petrophysical features.

**Key Words:** *Petrophysics, granites, limestones, alteration, provenance.*

*Geogaceta*, 20 (1996), 1236-1239

ISSN:0213685X

## Introducción

El Palacio Real de Madrid está construido en el extremo occidental de la Villa, en un alto del valle del Manzanares. Su emplazamiento es el mismo que ocupó el Alcázar de los Reyes de la Casa de Austria, destruido por un incendio el 24 de diciembre de 1734. Felipe V quiso que el nuevo Palacio Real se construyera en el mismo lugar que el Alcázar y encarga el proyecto a Felipe Juvara, arquitecto de la Corte de los Saboyas de gran prestigio por sus diseños de los Palacios de Stupinigi, Lisboa y el de Madama de Turin. Debido al fallecimiento de Felipe de Juvara es sustituido por su discípulo Juan Bautista Sachetti en 1736, el cual remodela todo el proyecto primitivo, adaptándolo al espacio disponible, por lo que pasó de tres plantas a seis con la intercalación de entresijos. La obra se inicia el 7 de abril de 1738 y el 1 de diciembre de 1764 se finaliza, en el reinado de Carlos III.

Toda la obra es de piedra. En las fachadas se combinan dos tipos de materiales para dar contrastes cromáticos. El material más abundante son granitos que se localizan en los basamentos y en muros lisos. La piedra blanca de Colmenar es utilizada para zócalos, columnas, pilastras, cornisas, antepechos, balaustradas, etc. Estos materiales y su disposición son los característicos de las construcciones de la época, son ele-

mentos básicos en la ordenación clásica de los monumentos de Madrid.

Este Palacio desde su finalización ha sufrido varias ampliaciones y rehabilitaciones, realizadas por diferentes arquitectos (López Serrano *et al.*, 1975), pero siempre utilizando materiales graníticos de la Sierra de Madrid y la caliza de Colmenar. Entre todas las obras de restauración realizadas en el Palacio Real, destaca la reconstrucción de la fachada Oeste, con vistas al Campo del Moro, que fue muy dañada durante la Guerra Civil, iniciándose su restauración en 1944 y finalizando en 1964 (Andrada, 1965).

Las rocas graníticas utilizadas en la construcción original del Palacio Real proceden de diferentes canteras, casi todas ellas situadas en el plutón de Alpedrete, siendo las más importantes las situadas en las localidades de Galapagar, Becerril, Collado-Villalba, Alpedrete, etc. (De la Plaza, 1975). Las piezas de sustitución utilizadas en la fachada oeste fueron extraídas principalmente de las canteras de Zarzalejo (López Serrano *et al.*, 1975).

## Metodología

Para el estudio de las características petrológicas de los materiales utilizados en la construcción del Palacio Real se procedió a muestrear diferentes sillares. La toma de

muestras fué con testigos de 58 mm y 20 mm de diámetro, y longitud entre 12 y 15 centímetros. El número de testigos en granitos originales fué de 14, en granitos de sustitución de 5 y de calizas de Colmenar 11, cada uno de ellos extraídos de tres sillares diferentes. Cada testigo fué subdividido en dos probetas de 50 mm de longitud, para comprobar las diferencias petrológicas entre las zona externa, alterada, y la zona interna con menor alteración. La selección de los sillares se realizó, en función de su estado de conservación, y teniendo en cuenta las actuaciones realizadas en ellos en la última restauración (Patrimonio Nacional, 1975).

Los ensayos se han efectuado siguiendo las normas de CNR-ICR (1981) y las recomendaciones de la RILEM P25 (1980).

## Características petrográficas

Las rocas graníticas utilizadas en la construcción original del Palacio Real de Madrid pueden ser clasificadas como monzograníticos biotíticos de grano medio. La textura suele ser hipidiomórfica y equigranular. Mineralógicamente están constituidas por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita. El grado de alteración de algunos componentes mineralógicos de la roca es alto, destacando la presencia de cloritas como producto neoforado de bioti-

tas, el feldespatos está seritizado en el núcleo. Existe agregados de tipo pennítico, probablemente procedentes de la transformación de la cordierita. La presencia de moscovita es escasa y existe algún apatito con hábito típico hexagonal. En los sillares del monumento es frecuente la presencia de enclaves microgranulares de tonos oscuros y forma elíptica, con un tamaño promedio de 10 cm.

Las características petrográficas de los granitos muestreados se asimilan a las que presentan los monzogranitos del plutón de Alpedrete (ITGE, 1991 y Villaseca *et al.*, 1993).

Las rocas utilizadas en la restauración de mitad de este siglo en la fachada Oeste son clasificadas también como monzogranitos biotíticos, pero en éstos la textura difiere de los anteriores al presentar un tamaño de los cristales más grueso. Las biotitas están cloritizadas. Las plagioclasas están zonadas y los feldespatos potásicos son ortosa y microclina. Existe algo de moscovita, algo de apatito y de circón, no observándose la presencia de cordierita.

Las calizas de Colmenar son fosilíferas con abundantes tallos y oogonios de characeas, así como de gasterópodos y algún ostrácodo. La porosidad es interpartícula y móldica, en los que existe una cementación calcítica que tapizan la superficie de los poros. Estas rocas pueden clasificarse como biomicritas de characeas.

### Características petrofísicas

A pesar de la agresividad del medio en que se encuentra, la degradación de los materiales utilizados en las fachadas del Palacio Real no es generalizada sino de tipo puntual, controlada por los diferentes microclimas y también por fugas accidentales de agua procedentes de las conducciones, principalmente de aguas de lluvias, o por errores de diseño.

Es de destacar el importante proceso de enmugrecimiento que existe en toda la fachada Este, que dá a la calle de Bailen, con un importante densidad de tráfico. En esta fachada, así como en la Norte, se han detectado procesos de sulfatación con la formación de costras de yeso. Estos encostramientos se localizan sobre los sillares de granitos más antiguos y es debido a la transformación de la plagioclasa cálcica que contiene, favorecido por la contaminación ambiental.

De todos los materiales utilizados los que presentan una mayor degradación son los granitos con procesos de arenización, desplazados, escamación, fisuración, etc. El proceso de arenización es más importante en las zonas más húmedas, principalmente en la parte Norte, que dan al Campo del

		MONZOGRANITO		CALIZA DE COLMENAR
		ORIGINAL	SUSTITUCION	
Densidad real (Kg/m <sup>3</sup> )		2.696	2.671	2.685
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )		2.556	2.640	2.595
Porosidad Accesible (%)		5,18	1,18	3,36
% Saturación		2,03	0,45	1,29
% Absorción en 48 horas		1,58	0,39	0,79
% Porosidad total		6,30	1,12	3,61
% Grado saturación en sorción agua	1 hora	65,7	71,2	22,0
	24 h	77,5	81,2	61,2
	48 h	77,9	87,7	61,4
% Pérdida de agua en desorción	1 hora	14,7	52,2	18,5
	24 h	69,9	80	50
	48 h	79,2	89,5	60,5
Coef. permeabilidad vapor agua (g/m <sup>2</sup> .24h mmHg)		4,4	0,9	0,68
Velocidad Ultrasonido (m/s)		1.430	3.352	5.660

Tabla 1- Propiedades petrofísicas de las materiales del Palacio Real de Madrid

Table 1- Petrophysical features of the building materials of the Royal Palace of Madrid.

Moro. Los desplazados se localizan, por lo general, en las zonas bajas del zócalo de granito. Tanto en el granito original como en las calizas se pueden ver abundantes impactos de proyectiles de la Guerra Civil. Estos impactos se observan en todas las fachadas y a diferentes alturas, pero donde su abundancia es mayor es en la fachada Oeste.

Por lo tanto, en los granitos utilizados en la última restauración, su degradación es baja, al igual que ocurre con las calizas de Colmenar.

Las características petrofísicas de los distintos materiales utilizados en la construcción del Palacio Real de Madrid se muestran en la Tabla 1. Estos parámetros representan el valor medio de las distintas probetas ensayadas, indicando que pueden variar entre márgenes significativos según su grado de alteración, sobre todo para los granitos puestos en obra durante un mayor período de tiempo.

### Rocas graníticas

La densidad real de los monzogranitos de textura media es de 2.696 ± 5 Kg/m<sup>3</sup> y la de los granitos de textura media-gruesa es de 2.671 ± 9 Kg/m<sup>3</sup>. La densidad aparente es 2.556 ± 25 Kg/m<sup>3</sup> y 2.640 ± 9 Kg/m<sup>3</sup>,

respectivamente. La relación entre ambas densidades nos indican que el índice de compacidad es mayor en los granitos de sustitución (0,99) que en los sillares originales del monumento (0,95).

El comportamiento de estos materiales ante la presencia de agua esta relacionado con el sistema poroso de la roca. La porosidad total media, determinada por intrusión de mercurio, en los monzogranitos más antiguos del edificio es de 6,30 ± 1,38 %, con un valor máximo de 8% y un mínimo de 4,4 %, en función de su grado de alteración. La porosidad en los monzogranitos de sustitución es de 1,1 % ± 0,3 %, con un máximo de 1,5 % y un mínimo de 0,7 %.

La distribución de tamaño de poros de estos granitos es polimodal, característica de las rocas graníticas. Ambos tipos petrológicos tienen diferencias en cuanto a su tamaño de poros. Los granitos de textura media tienen una moda principal en el intervalo 10-20 µm, mientras que los monzogranitos de sustitución presentan dos modas principales, una situada en el intervalo 9-20 µm y otra en 0,01- 0,02 µm. La alteración de estas rocas no produce grandes modificaciones en su sistema poroso a excepción de una ligera disminución de la microporosidad y un aumento de la macroporosidad, principalmente con aumento del porcentaje

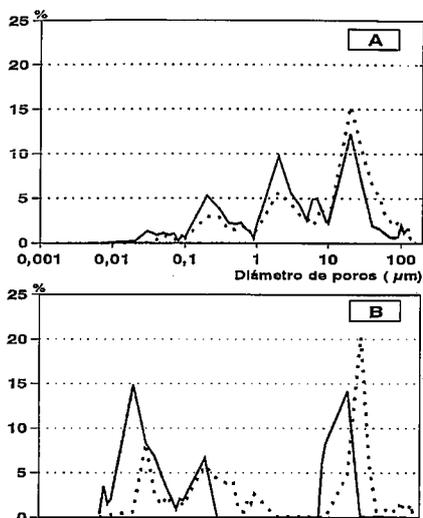


Fig. 1- Distribución de tamaños de poros. A- Monzogranito original B- Monzogranito de sustitución. LINEA CONTINUA: Sin alterar. LINEA PUNTOS: Alterado

Fig. 1- Pore-size distribution of the granites. A- Original monzogranite. B- Monzogranite used in the restoration. SOLIDE LINE: non-altered granite. STIPPLED LINE: altered granite

de los poros en los intervalos modales indicados (Fig. 1a). El tamaño medio de los poros tiende a aumentar pasando 0,37 µm en las menos alteradas a 0,75 µm, al igual que la mediana de 5 µm a 10,7 µm. En los granitos de sustitución, procedentes de Zarzalejo, sí se produce un desplazamiento de los intervalos modales hacia tamaños de poros de mayor diámetro, siendo sus modas 20-30 µm y 0,02-0,03 µm (Fig. 1b). A pesar de estas modificaciones no se aprecian diferencias significativas entre el tamaño medio de los poros y de la mediana de la distribución de tamaños de poros. En definitiva se observa un proceso de necrosis de los tamaños de poros más pequeños en las muestras más alteradas. (La Iglesia *et al.*, 1994)

La relación macroporos/microporos tiende a aumentar y con ello la durabilidad de los materiales ante los procesos de alteración por heladicidad y cristalización de sales (Ordoñez *et al.*, 1996). Por el contrario, puede producir una mayor alteración por humedad-sequedad, al aumentar la velocidad de absorción de agua y de desorción.

La cantidad máxima de agua que pueden contener estas rocas graníticas es de 2,03 % de media en los materiales originales del Monumento, alcanzándose los valores más altos en las rocas alteradas (2,70 %) y menores en las menos alteradas (1,49 %). En los granitos puestos en obra a mitad de este siglo, la cantidad máxima de agua que pueden contener en su interior es de 0,70 %

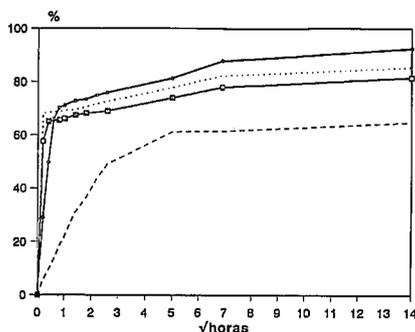


Fig. 2- Grado de absorción en agua con el tiempo. CUADRADO: Monzogranito Original. LINEA DE PUNTOS: Monzogranito original alterado. PUNTOS: Monzogranito de sustitución. RAYAS: Caliza de Colmenar.

Fig. 2- Variation of water absorption with time. SQUARES: Original monzogranite. STIPPLED LINE: Original monzogranite after alteration. DOTS: Monzogranite used in the restoration. DASHED LINE: Colmenar limestones.

y mínima de 0,37 %, con un valor medio de 0,45 %. La porosidad accesible al agua oscila entre 6,8 % a 3,8 % en los monzogranitos de grano medio y de 1,9 a 1,0 en los granitos de grano medio-grosso.

La cinemática de absorción de ambos granitos es muy rápida para los primeros tiempos de absorción, siendo los granitos originales los que absorben una mayor cantidad de agua en los primeros minutos, de tal forma que a los 3-10 minutos de contacto absorbe un 65 % de todo el agua que puede contener en su interior, mientras que los granitos de sustitución es para este mismo tiempo un 29 %. Esto implica que la cantidad de agua en los sillares más antiguos es mucho más alto que para los jóvenes lo que facilita su deterioro progresivo. Dicha absorción aumenta según el grado de deterioro (Fig.2), únicamente detectable en los monzogranitos más antiguos, y que presentan un mayor grado de deterioro. Para tiempos de absorción más largos, las rocas de textura gruesa, tienen un grado de saturación mayor, aunque la cantidad de agua contenida es menor como lo indica su coeficiente de absorción.

El proceso de desorción es muy rápido en los monzogranitos de sustitución, en donde en una hora de secado pierde el 52,2 % del agua retenida en su interior, contra el 14,7 % de los monzogranitos de textura media. Aproximadamente el 90 % del agua de la piedra es evaporada en la superficie del sillar, en 4 horas, mientras que el resto lo realiza desde el interior en forma de vapor de agua. En los granitos antiguos, el agua evaporada en la superficie de la piedra es menor, siendo de un 80 % en un tiempo de 9 horas, aproximadamente. La permeabi-

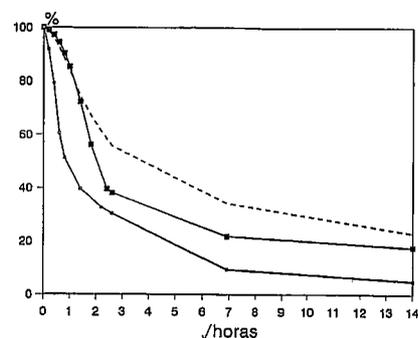


Fig. 3- Cinemática de desorción. CUADRADO: Monzogranito original PUNTOS: Monzogranito de sustitución. LINEA DE RAYAS: Caliza de Colmenar.

Fig. 3- Kinetics of desorption. SQUARE: Original Monzogranite. DOTS: Monzogranite used in restoration. DASHED LINE: Colmenar limestone.

lidad para los granitos de sustitución es más baja que las que presentan los granitos originales, por lo que el proceso de evaporación en dichas rocas aumenta más significativamente que en las piedras sustituidas, aunque siempre la evaporación es mayor en estos materiales (Fig. 3).

La permeabilidad al vapor del agua es diferente según el grado de alteración de los materiales. En los granitos originales, la permeabilidad va desde 3,5 g/m<sup>2</sup> 24 h en las menos alteradas a 8.3 g/m<sup>2</sup> 24h. en las más alteradas. En estas rocas, en donde se absorbe más cantidad de agua y además tienen una mayor facilidad de evaporarla, los deterioros pueden progresar debido a la acción de la humedad-sequedad de la piedra, e incluso al medio ambiente que le rodea.

Los datos de velocidad de propagación de ultrasonidos reflejan el grado de deterioro de los materiales y su diferente calidad mecánica. Los granitos originales tienen una velocidad de propagación de ultrasonidos es de 1430 ± 157 m/s, mientras que los granitos de sustitución es de 3352 ± 168 m/s. El modulo de Young dinámico es de 5.100 Mpa en los primeros y 29.100 Mpa en los segundos.

En definitiva, los granitos originales presentan en algunos sillares una degradación importante en donde se aprecia un aumento de su porosidad, de la cantidad de agua que puede contener en su interior, un aumento en la velocidad de absorción de agua, un aumento de su permeabilidad al vapor de agua, al igual que sufren una disminución de sus calidades mecánicas. A pesar de estas variaciones el estado general de estas piedras es bastante bueno, presentando deterioros puntuales. En los granitos de sustitución su deterioro es menor, debido a que sus características petrológicas son mejores en el que la piedra original y debido

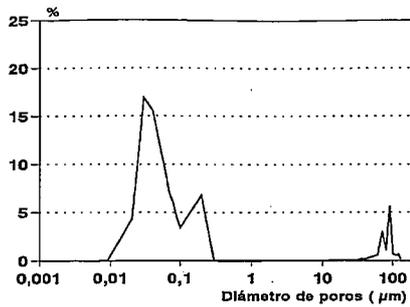


Fig. 4- Distribución de tamaños de poros de la caliza de Colmenar.

Fig. 4- Pore-size distribution in Colmenar limestones.

a que el tiempo que lleva puesto en obra es pequeño, en comparación con los anteriores.

### Caliza de Colmenar

Las calizas de Colmenar muestreadas, corresponden a sillares sustituidos en la restauración de 1944-64. No se aprecia en estas calizas modificaciones petrofísica importantes entre la zona externa e interna de los sillares analizados. La densidad real de estas calizas es de  $2685 \pm 15 \text{ Kg/m}^3$  y la densidad aparente es  $2595 \pm 20$ . La porosidad total, por intrusión de mercurio, es de  $3,6 \pm 0,2 \%$ . La distribución del tamaño de los poros presenta una moda importante en el intervalo  $0,03-0,05 \mu\text{m}$ , y otras de menor importancia en  $0,1-0,2 \mu\text{m}$  y  $60-90 \mu\text{m}$  (Fig. 4).

La cantidad máxima de agua que puede contener esta piedra es de  $1,29 \%$ , siendo su absorción a las 48 horas de  $0,79 \%$ , lo que representa un grado de saturación de  $61,4 \%$ . El grado de desorción en estas calizas varía entre  $50$  y  $65 \%$  a las 24 horas de secado, alcanzando en algunas muestras un  $82 \%$  a las 48 horas.

La permeabilidad al vapor de agua de estas muestras es de  $0,68 \text{ g/m}^2 \text{ 24 h}$ , aunque puede alcanzar valores mucho más altos en función de la existencia en la piedra de poros de gran diámetro, entre  $0,1$  y  $1 \text{ mm}$ .

El comportamiento mecánico, definido por la velocidad de ultrasonidos, nos presenta una muy buena calidad con un valor que oscila entre  $5.948$  y  $5.403 \text{ m/s}$ , con un valor medio de  $5.660 \text{ m/s}$ . Su módulo de Young dinámico es de  $83.400 \text{ Mpa}$ . La resistencia a la compresión simple es de  $953 \text{ Kg/m}^2$ .

Las propiedades petrofísicas de estas piedras de Colmenar de Oreja difieren con

las que se encuentran en otros monumentos realizados con estas piedras, (García de Miguel *et al.*, 1992; Mingarro *et al.*, 1993; Mingarro *et al.*, 1994; Fort *et al.*, 1995) Las diferencias son debidas posiblemente a que los sillares muestreados corresponden a materiales extraídos de bancos diferentes de la cantera. Da Pena *et al.*, 1989, establecen las distintas propiedades petrofísicas de los materiales de los cinco bancos principales explotados en estas canteras de Colmenar. En función de dichas propiedades Fort *et al.*, 1995, indican que los materiales puestos en la Catedral de Toledo, en su etapa de restauración de 1775, habían sido extraídos, principalmente, del Banco Gordo. De este banco se debió de extraer la mayoría de los sillares utilizados en la construcción original del Palacio Real, al ser coetáneo con otras construcciones de la región en las que se utilizó este nivel. En la restauración de la fachada Oeste, los sillares sustituidos pueden proceder del Banco Gordo, al ser el más importante de la cantera, aunque los resultados petrofísicos y petrográficos obtenidos, en los sillares muestreados, concuerdan más con los bancos de Sobrebancos.

### Conclusiones

El estado de conservación de los sillares graníticos del Palacio Real de Madrid, es bastante bueno. Los monzogranitos utilizados en la restauración de 1944-64, procedentes de Zarzalejo, no presentan variaciones importantes entre la zona externa e interna de los sillares, por lo que su estado de conservación es bueno.

Los sillares originales, por el contrario, presentan una degradación más importante, con aumento de su porosidad y de su capacidad de absorción de agua, lo que aumenta su alterabilidad potencial.

Las patologías que tienen estos granitos son principalmente procesos de arenización y descamación. Localmente existen encostamientos y fisuraciones.

Los sillares de calizas no presentan procesos de degradación importantes. Los sillares muestreados, pertenecientes a la restauración de 1944-64, corresponden, atendiendo a sus propiedades petrográficas y petrofísicas, al nivel sobrebanco de las canteras de Colmenar de Oreja.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de la DGICYT nº SEC 94/0795. Agradecemos a Patrimonio Nacional

las facilidades dadas para la realización de este trabajo.

### Referencias

- Andrada, R. (1965): *Reales Sitios*, 3,70-75.
- C.N.R.-I.C.R. (1981): *Normal 7/81*, Roma, 5 pp.
- De la Plaza, F.J. (1975): *El Palacio Real Nuevo de Madrid*. Ed. Sever-Cuesta, Valladolid. 466 pp.
- Dapena, E.; Ordoñez, S. y García del Cura, M.A. (1989): *Ingeniería Civil*, 71, 67-77.
- Fort R.; Lopez de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (1995): *I Inter. Congr. of Natural Stone*, Lisboa (316-323).
- García de Miguel J.M.; Sanchez, L.; Puche, O.; González, M.T. (1992): *7th Inter. Congr.deterioration and conservation of stone*, 47-56.
- ITGE (1991): *Memoria explicativa de la Hoja San Lorenzo del Escorial (533) del Mapa geológico Nacional 1:50.000*.
- La Iglesia, A.; García del Cura, M.A. y Ordoñez, S.(1994): *Sci Total Environ.*,152, 179-188
- López Serrano, M.; Marqués de Lozoya; Andrada, R.; Sanchez, R.; Junquera, P.; Ruiz, M.T.; Moreno, J.; Morales, C.; García, P.; Iglesias, C.; Bernal, C.; Alonso, M.; Olalla, C.; Morterero, C. y Turmo, I. (1975): *El Palacio Real de Madrid. Monografías de Sitios Reales. Colección: Bellas Artes*. Ed. Patrimonio Nacional. 472 pp.
- Mingarro, F.; Fort, R.; López de Azcona, M.C. y Alonso, A. (1993) En: *La Puerta de Alcalá: Su historia y su restauración*. (P. García-Escudero). Ayuntamiento de Madrid y El Corte Inglés. 62-88.
- Mingarro, F.; López de Azcona, M.C. y Fort, R. (1994): *Restauración & Rehabilitación*, 1, 83-86.
- Ordoñez, S.; Fort R.; García del Cura, M.A.(1996): *Quarterly Jour. of Engin. Geol.* (en prensa).
- Patrimonio Nacional (1975): *Proyecto de Restauración de la Fachada Oeste del Palacio Real de Madrid. Dirección General de Arquitectura. Patrimonio Nacional (inédito)*.
- R.I.L.E.M. (1980): *Matériaux et Constructions*, 13,75: 175-253.