

Granitos empleados en Ávila - España

Granites employed in Ávila - Spain

Fecha de recepción: 22-III-94

I.- Composición química de las distintas variedades

I.- Chemical composition of the different types

J. GARCIA-TALEGÓN, A.C. IÑIGO, M.A. VICENTE
IRNA-CSIC. Salamanca

M. VARGAS, J.L. PÉREZ-RODRÍGUEZ
ICM-CSIC. Sevilla

E. MOLINA
Dpto.de Geología, Universidad de Salamanca

RESUMEN

Se estudia la composición química de los distintos tipos de granito empleados en la Catedral y otros edificios de interés histórico-artístico de Ávila.

Las diferencias entre las distintas facies estudiadas (granito gris, ocre y piedra sangrante), se justifica por su diferente composición mineralógica, producto de las profundas paleoalteraciones ocurridas en el Zócalo Hercínico Ibérico.

Las diferencias químicas entre la piedra de cantera y las muestras tomadas de distintas partes del monumento son debidas a los procesos de alteración ocurridos en el mismo, entre los que destaca la precipitación de sales en zonas con humedad e influencia de los morteros alcalinos en las variedades ricas en ópalo.

ABSTRACT

The chemical composition of the different types of granite employed in the Cathedral and buildings of historic and artistic interest in Avila (Spain) is studied.

The differences among the various facies studied (grey, ochre and bloodstone granites) are explained in terms of their different mineralogical composition, a result of the profound paleoalterations that occurred in the Iberian Hercynian Basement.

The chemical differences between quarry stone and the samples taken from different parts of the buildings are due to weathering processes that occurred on the buildings. Among these, the precipitation of salts in humid zones and the effect of alkaline mortar on the varieties rich in opal are striking.

INTRODUCCIÓN

En la construcción y sucesivas restauraciones de la mayoría de los edificios de interés histórico-artístico de Ávila se han utilizado diversos tipos de granito, procedentes de canteras próximas a la ciudad.

INTRODUCTION

In the construction and successive restoration of most buildings of historic and artistic interest in Avila different types of granite have been used. These granites come from quarries close to the city.

Un estudio de los distintos edificios y sobre todo del grupo catedralicio, muestra la existencia de tres tipos de granito bien diferenciadas, aunque dentro de los mismos aparecen diversos subtipos: "granito gris", con distintas granulometrías, "granito ocre" y "granito rojo y blanco", conocido en la ciudad como "piedra sanguínea".

Cada una de estos tipos aparece en los distintos niveles de alteración del Zócalo Hercínico (1), y presentan propiedades petrofísicas diferenciadas (2, 3).

En el Grupo Catedralicio han sido utilizados unos u otros según las distintas épocas de construcción y restauraciones, resistencia y características decorativas de los mismos. En las restauraciones se ha empleado granito "Gris Ávila" (grano fino y grueso.), resistente al deterioro, de forma casi generalizada. Esto ha dado lugar a una mezcla de los distintos tipos en el edificio, poco afortunada desde el punto de vista estético. El grado de alteración que presentan, indicativo de la labilidad de cada uno frente a los agentes de deterioro, es notablemente distinto.

En el presente trabajo se realiza un estudio sistemático de las características químicas de cada tipo, relacionándolo con su origen y especies mineralógicas de que está compuesto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha realizado el muestreo de bloques en el yacimiento "La Colilla" (Reserva Natural del Estado) y de los sillares que forman las paredes, columnas y cruceros del Claustro de la Catedral de Ávila. En la cantera se estudian cinco tipos de roca que se sitúan en tres niveles:

- Nivel inferior: granito sano "Gris Ávila", de grano grueso (GG) y de grano fino (GF). Aparecen en bolos y en diques.
- Nivel medio: granito ocre (O). Presenta una potencia de 10m.
- Nivel superior: granito rojo (R), y granito blanco (B). Aparece en la cumbre de la cantera, con un espesor de 1m. Muestra variaciones de color. Para su estudio hemos separado las partes rojas y las blancas.

En el monumento se tomaron muestras de los cinco tipos, en zonas con alto grado de deterioro, en columnas, cruceros y paredes, fundamentalmente en la parte sur.

Los análisis químicos de los elementos mayores y traza se han realizado empleando la Fluorescencia de Rayos-

Study of the different buildings, in particular the Cathedral complex, reveals the existence of three well differentiated types of granite, although among them three different subtypes appear: "grey granite", with different grain sizes; "ochre granite" and "red and white granite", known in the city as "bloodstone".

Each type appears in the different weathering levels of the Hercynian Basement (1) and displays differentiated petrophysical properties (2, 3).

In the Cathedral complex, use has been made of one type or another depending on the different periods of construction and reconstruction, resistance and their decorative characteristics. In restorations, granite of the "Avila Grey" type has been used, owing to its almost generalized resistance to deterioration. This has given rise to a mixture of types throughout the complex which from the aesthetic point of view is not very attractive. The degree of weathering displayed by the buildings, indicative of the susceptibility of each to weathering agents, differs considerably.

The present work offers a systematic study of the chemical characteristics of each type of granite, relating these with its origin and the mineralogical species forming it.

MATERIALS AND METHODS

Block sampling was carried out at "La Colilla" deposit (State Nature Reserve) and on samples from the masonry forming the walls, columns and transepts of the Cloisters of the Cathedral of Avila. In the quarry, five types of rock situated at three levels were studied:

- Lower level: "Avila Grey" granite; coarse grain (GG) and fine grain (GF). These appear in corestones and in dykes.*
- Middle level: Ochre granite (O), with a thickness of 10 m.*
- Upper level: Red (R) and white (B) granite. These appear at the top of the quarry, with a thickness of 1 m. There are variations in colour. For their study, the red and white parts were separated.*

In the Cathedral, five types of sample were collected in zones with a high degree of deterioration, in columns, transepts and walls, mainly from the south face.

Chemical analyses for the major and trace elements were performed employing X-ray fluorescence

X (SIEMENS RS-200) y la Absorción Atómica (VARIAN AA-1475). La composición mineralógica fue tomada de trabajos anteriores de los autores (1, 2, 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla I aparecen los porcentajes medios de los elementos mayores que componen los materiales de cantera en la columna izquierda (C), y los procedentes de muestras de distintas zonas de la Catedral en la derecha (M). En la tabla II se presentan los elementos menores correspondientes a las mismas muestras.

(SIEMENS RS-200) and Atomic Absorption (VARIAN AA-1475). Mineralogical composition was taken of previous work carried out by the authors (1, 2, 3).

RESULTS AND DISCUSSION

Table I shows the mean percentages of major elements composing the materials: from the quarry in the left column (C) and those of samples from different parts of the cathedral at the right (M). Table II shows trace elements percentages.

Tabla 1.	GF		GG		O		B		R	
	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M
<i>SiO₂</i>	72.400	68.800	66.600	68.800	69.600	69.000	73.600	63.300	73.200	63.100
<i>Al₂O₃</i>	14.000	14.700	16.100	14.700	14.100	16.100	15.200	21.000	13.800	19.000
<i>Fe₂O₃</i>	1.800	4.000	3.700	4.000	5.700	3.300	0.900	3.700	3.100	4.000
<i>CaO</i>	0.600	2.600	3.400	2.600	0.100	0.500	0.100	0.100	0.040	0.300
<i>MgO</i>	0.400	1.100	1.200	1.100	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100	0.200
<i>Na₂O</i>	2.500	2.800	3.100	2.800	0.100	0.500	0.100	0.400	0.200	0.800
<i>K₂O</i>	5.600	3.700	3.700	3.700	0.100	0.200	0.200	0.200	0.200	0.300
<i>SO₃</i>	0.030	0.087	0.085	0.087	0.070	0.053	0.070	0.105	0.044	0.207
<i>TiO₂</i>	0.310	0.420	0.530	0.420	0.440	0.530	0.470	0.660	0.410	0.500
<i>MnO</i>	0.030	0.065	0.060	0.650	0.010	0.010	0.080	0.010	0.010	0.020
<i>P₂O₅</i>	0.350	0.133	0.260	0.133	0.205	0.147	0.095	0.195	0.150	0.047

Composición química (%) de los elementos mayores de las cinco variedades de rocas en cantera (C) y monumento (M): Granito gris fino (GF), Granito gris grueso (GG), Granito ocre (O), Granito blanco (B) y Granito rojo (R).

Chemical composition (%) of major elements of the five types of rocks in quarry (C) and monument (M): Fine grey granite (GF), Coarse grey granite (GG), Ochre Granite (O), White granite (B) and Red Granite (R).

Tabla 2.	GF		GG		O		B		R	
	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M
<i>Ba</i>	0.032	0.043	0.040	0.043	0.026	0.029	0.020	0.099	0.014	0.017
<i>Cl</i>	0.007	0.043	0.016	0.043	0.006	0.172	0.006	0.039	0.006	0.323
<i>Cr</i>	0.018	0.043	0.022	0.035	0.012	0.008	0.013	0.031	4.660	0.036
<i>Cu</i>	0.005	0.008	0.005	0.008	0.005	0.005	0.006	0.006	1.004	0.006
<i>Ga</i>	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
<i>La</i>	0.002	0.003	0.001	0.003	0.008	0.007	0.006	0.003	0.003	0.006
<i>Nb</i>	0.006	0.006	0.001	0.006	0.004	0.005	0.006	0.005	0.006	0.006
<i>Pb</i>	0.003	0.002	0.003	0.002	0.005	0.004	0.009	0.019	0.008	0.004
<i>Rb</i>	0.026	0.008	0.013	0.008	0.002	0.008	0.003	0.000	0.001	0.002
<i>Sn</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.003	0.014	0.004	0.006	0.004
<i>Sr</i>	0.001	0.009	0.013	0.009	0.034	0.032	0.033	0.071	0.017	0.022
<i>Zn</i>	0.006	0.013	0.005	0.013	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004
<i>V</i>	0.000	0.036	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000	0.031
<i>Zr</i>	0.013	0.010	0.015	0.010	0.018	0.021	0.019	0.028	0.016	0.020

Composición química (%) de elementos traza en las cinco variedades de rocas en cantera (C) y monumento (M): Granito gris fino (GF), Granito gris grueso (GG), Granito ocre (O), Granito blanco (B) y Granito rojo (R).

Chemical composition (%) of trace elements of the five types of rocks in quarry (C) and monument (M): Fine grey granite (GF), Coarse grey granite (GG), Ochre Granite (O), White granite (B) and Red Granite (R).

Trabajos anteriores de los autores (1, 3, 4) indican que las variedades, ocre, roja y blanca, son consecuencia de fuertes procesos de alteración (paleoalteraciones) que afectaron al Zócalo Hercínico (granitos, pizarras, calizas, esquistos, etc.); son pues, productos de alteración del granito “Gris Ávila”, que es la facies sana.

Los datos de la tabla I indican que en las muestras de cantera los contenidos en SiO_2 aumentan al pasar del granito grueso (G.G.), al ocre (O) y sobre todo en el rojo (R) y blanco (B). Los cambios mineralógicos que han tenido lugar en las paleoalteraciones que han dado lugar a la aparición de estos niveles (1), explican dicho aumento, así como las variaciones químicas que se han observado.

Los minerales principales de la facies de granito sano (GG y GF), son: cuarzo, feldespatos (alcalinos y plagioclasas), micas (moscovitas y biotitas) y cloritas. El paso a la facies “ocre” conlleva la alteración de las especies más lábiles con desaparición de cloritas, biotitas y plagioclasas y aparición de filosilicatos 2/1 (interestratificado illita/esmectita) y oxihidróxidos de hierro (goetita). La textura del granito sano se conserva. La formación del nivel superior, roja (R) y blanca (B), es debida a un proceso de caolinitización, formación de ópalo y, por procesos posteriores de hidromorfía, redistribución de óxidos de hierro, que se concentran en la facies roja.

En las muestras de monumento recogidas en zonas con alteración, la disminución del contenido en SiO_2 en la facies roja y blanca es debido a la disolución del ópalo especialmente en la zona de influencia de los morteros alcalinos. En el estudio por Microscopía Electrónica de Barrido de estas muestras puede apreciarse la destrucción de las lepisferas de ópalo en estas zonas (5).

El contenido en Al_2O_3 no varía de forma apreciable entre las variedades de granitos de cantera. En el monumento se produce una acumulación relativa en las zonas alteradas, al perderse en las mismas SiO_2 y, en el tipo blanco, óxidos de hierro.

Tampoco el $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ presenta cambios importantes, excepto una escasez en la facies blanca (B), que en cantera ha sufrido un lavado en condiciones hidromorfas y se ha concentrado en las partes rojas (R).

Alcalinos y alcalinotérreos presentan una drástica disminución al pasar del granito gris a las facies alteradas de cantera; los valores encontrados en el edificio son notablemente más altos que en cantera,

Previous work carried out by the authors (1, 3, 4) has shown that the ochre, red and white varieties are a result of strong weathering processes (paleoalterations) that affected the Hercynian Basement (granites, slates, limestones, schists, etc.). They are therefore products of fresh granite, “Avila Grey”, weathering.

The data in Table I indicate that in the quarry samples the contents in SiO_2 increase as the (GG) granite passes to the (O) type and above all in the (R and B) granites. The mineralogical changes that have occurred in the paleoalterations that have given rise to the appearance of these levels (1) account for this increase and the chemical variations observed.

The main minerals of the (GG and GF) granite facies are quartz, feldspars (alkaline and plagioclases), micas (muscovites and biotites) and chlorites. The passage to the “ocre” facies involves alteration of the most labile species, with the disappearance of chlorites, biotites and plagioclases and the appearance of 2/1 layer silicates (interstratified illite/smectite) and iron oxihydroxides (goethite). The texture of the fresh granite is conserved. The formation of the upper level or red (R) or white (B) granite facies is given to a process of kaolinization, the formation of opal and to later processes of hydromorphy, the redistribution of iron oxides, which are concentrated in the red (R) facies.

In de cathedral samples taken from weathered zones the decrease in the SiO_2 contents of the red and white facies is due to the dissolution of opal, especially in the zones affected by alkaline mortar. SEM study of these samples reveals the destruction of opal lepispheres in this zones (5).

The content in Al_2O_3 does not vary appreciably among the varieties of quarry granites. In the Cathedral, there is a relative accumulation of this in the weathered zones accompanied there by a loss of SiO_2 and of iron oxides in the white granite (B).

Similarly, there are few important changes in $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{total})}$ except for a scarcity of this in the white facies (B), which in the quarry has undergone a leaching under hydromorphic conditions and has been concentrated in the red (R) facies.

Alkalies and alkaline earths elements are dramatically decreased as the grey granite passes to the weathered facies of the quarry; the values found in the Cathedral are considerably higher than at the quarry. This can be

explicable por la aparición de sales precipitadas en las partes degradadas del monumento, sobre todo de Na^+ y Ca^{2+} . De forma similar, el SO_4^{2-} y Cl^- (tabla II) son más abundantes en la piedra roja-blanca del edificio que en el resto de las muestras. La similitud en los contenidos en elementos traza entre las muestras de cantera y edificio confirma que ambos tienen la misma procedencia.

CONCLUSIONES

La composición química y mineralógica de las rocas ornamentales, empleadas en la construcción y posteriores restauraciones de la Catedral de Ávila, y el estudio, comparando los resultados de los materiales de cantera y de monumento, indican:

- Entre las cinco variedades de granito estudiadas, granito sano "gris Ávila" (GG y GF), facies ocre (O), roja (R) y blanca (B) cuyo origen está ligado a paleoalteraciones del Zócalo Hercínico Ibérico, se aprecia un aumento del contenido en SiO_2 , en las facies alteradas, sobre todo en la roja y blanca, que han sufrido un proceso de cementación por ópalo.
- En las zonas degradadas del monumento, la piedra roja y blanca presentan una disminución de su contenido en SiO_2 , hecho explicable por disolución del ópalo, debido a la influencia de morteros alcalinos.
- Hay un aumento de los contenidos en Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} y Cl^- en las piedras degradadas de monumentos, afectadas por precipitaciones de sales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda de la CE (STEP CT-90-0101), Junta de Castilla y León (project 0314/90) y CICYT (PAT91-1507-C03-01-CE).

explained in terms of the appearance of salts precipitated in the degraded parts of the monument, above all Na^+ and Ca^{2+} . Likewise, SO_4^{2-} and Cl^- (Table II) are more abundant in the red-white rock of the building than in the rest of the samples. The similarity in trace elements between the samples from the quarry and from the Cathedral confirms that they have the same origin.

CONCLUSIONS

The chemical and mineralogical composition of the ornamental stone used in the construction and later restoration of the Cathedral complex of Avila and comparative study of the material from the monument and quarry indicate the following:

- Among the five varieties of granite from quarries studied fresh granite, "Avila Grey" (GG and GF), ochre (O), red (R) and white (B) facies, whose origin is linked to paleoweatherings of the Hercynian Basements, an increase in SiO_2 contents is seen in the weathered facies, above all in the red and white facies, which have undergone a process of cementation by opal.*
- In the degraded zones of the monument, the red and white stone are decreased in their SiO_2 contents due to the dissolution of opal, in turn due to the presence of alkaline mortar.*
- The contents in Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} and Cl^- are increased in the degraded parts of the monument, affected by the precipitation of salts.*

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from EC (contract STEP CT90-0101), from Junta de Castilla y León (project 0314/90), and from CICYT (PAT91-1507-C03-01-CE) is acknowledged.

REFERENCIAS

- (1) GARCIA-TALEGON, J., MOLINA, E. y VICENTE, M.A. "Weathering processes in granites". Proceedings of the 7 th Euroclay Conference, DRESDEN (ALEMANIA), 2, 1991. 405-409.
- (2) GARCIA-TALEGON, J., GARCIA-DEL AMO, D., IÑIGO, A.C., MENDUIÑA, J., MOLINA, E. y VICENTE, M.A. "Propiedades físico-mecánicas de los granitos empleados en la Catedral de Ávila procedentes del yacimiento de "La Colilla" (Ávila)". Actas del Workshop: Alteración de granitos y rocas afines, empleados como materiales de construcción. 1993. 129-132.

- (3) GARCIA-TALEGON, J. IÑIGO, A.C., MOLINA, E RIVES, V. y VICENTE, M.A. "Granitos empleados en la Catedral de Ávila: Características de los materiales de cantera". Actas del Workshop: Alteración de granitos y rocas afines, empleados como materiales de construcción. 1993. 125-127.
- (4) GARCIA-TALEGON, J., MOLINA, E. y VICENTE, M.A. "Paleoalteraciones y silicificaciones en el relieve del Macizo Hercínico Ibérico. Empleo de los distintos niveles de alteración como materiales de construcción". Guias de las excursiones geológicas del III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. 1992. 310-319.
- (5) VICENTE, M.A., GARCIA-TALEGON, J., IÑIGO, A.C., MOLINA, E. y RIVES, V "Weathering Mechanisms of silicated rocks in continental environment". Proceedings of Interantional Congress on the conservation of stone and other materials, Paris (FRANCIA).1,1993. 320-327.

* * *

II.- Caracteres petrofísicos

II.- Petrophysical characteristics

A.C. IÑIGO, J. GARCIA-TALEGÓN, M.A. VICENTE
IRNA-CSIC. Salamanca

M. VARGAS, J.L. PÉREZ-RODRÍGUEZ
ICM-CSIC. Sevilla

E. MOLINA
Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca

RESUMEN

Se estudian las propiedades fisico-mecánicas de los diferentes materiales graníticos empleados en la construcción y sucesivas restauraciones de la Catedral de Ávila.

Los estudios de porosidad se han realizado en agua y con el porosímetro de mercurio. Se determina la porosidad total, libre y atrapada de los distintos materiales, realizando dos inyecciones de mercurio sucesivas sobre cada tipo de material, y se hace un estudio comparado de los resultados obtenidos por las distintas técnicas.

Se determina también la resistencia a la compresión, de forma indirecta, deduciéndola de la velocidad de propagación de ultrasonidos. Los valores obtenidos son concordantes con los obtenidos por determinación directa, en las facies graníticas sanas (GF y GG), pero no en el caso de rocas graníticas alteradas (O, R y B).

ABSTRACT

The studies concern physical-mechanical properties of the different granitic materials used in the construction and the successive restorations of the Cathedral of Avila.

The calculation of porosity is made in water, and also by using Hg-porosimeter (two successive injections of mercury). A determination of the total, the free, and the trapped porosity is carried out, and with the results a comparison is done.

Also, the theoretical resistence to compression is measured with an indirect method, deduced from the velocity of ultrasound propagation. Upon comparing the values of resistance to compression obtained directly, with those obtained with the velocity of ultrasound propagation, a good correlation is seen in the GF and GG facies, but not in the case of the weathered granites (O, R and B).

INTRODUCCIÓN

Las distintas variedades de granito con que están construidos la mayoría de los edificios de interés histórico-artístico de Ávila, ciudad declarada Patrimonio de la Humanidad, presentan caracteres petrofísicos bien diferenciados, consecuencia de su génesis y causa de su comportamiento en cuanto a calidad arquitectónica y resistencia frente a los distintos agentes de alteración.

En el presente artículo se informa de una serie de propiedades, cuya incidencia en los materiales es bien conocida, y que es necesario conocer antes de un empleo en restauración.

La incidencia de los materiales “añadidos” en un conjunto arquitectónico en actuaciones de conservación o restauración es tal que es absolutamente necesario un conocimiento preciso de los caracteres de los mismos, su interacción con los distintos elementos (morteros, tratamientos superficiales, etc.) ya existentes o empleados en la actuación, y su posible evolución en el “ambiente” en que va a estar situado (zona de humedades, posible desarrollo de seres vivos, fenómenos termoclásticos acusados, contaminación atmosférica o de aguas subsuperficiales etc.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudian las cinco variedades de granito descritos en la primera parte de este trabajo.

Las propiedades físicas se han determinado siguiendo las normas y recomendaciones siguientes:

- Permeabilidad al vapor de agua. (R.I.L.E.M./II-2) [1].
- Absorción de agua con succión. (N.F.-B 10-503) [2].
- Absorción capilar. (Normal 11/85) [3].
- Absorción de agua por inmersión total. (Normal 7/81) [4].
- Coeficiente de absorción. (N.F.-B 10-504) [5].
- Densidad real y aparente en agua. (N.F.-B 10-503) [6].
- Peso específico real, superficie específica y distribución porosimétrica: porosimetría por inyección de mercurio [7].
- Resistencia a la tracción indirecta. (U.N.E. 83-306-85) [8].
- Resistencia a la compresión. (U.N.E. 22-175-85) [9].
- Velocidad de propagación de ultrasonidos. (N.F.-B 10-505) [10].
- Resistencia a la compresión teórica, deducida de la velocidad de propagación de ultrasonidos [11].

INTRODUCTION

Owing to their genesis, the different varieties of granite with which most of the buildings of historical and/or artistic interest are constructed in Avila - a city declared as belonging to the Heritage of Humanity - display well differentiated petrophysical characteristics. Such characteristics are also responsible for the behaviour of such materials as regards architectural quality and their resistance to different weathering agents.

The present work reports on a series of properties of known effects on the materials that should be taken into account before undertaking any kind of restoration activity.

The import of “added” materials in any architectural ensemble subject to conservation or restoration is so great that a precise knowledge of their features and their interaction with the different elements involved (mortar, surface treatments, etc) already existing or used in such activities is crucial. Stress should also be placed on the “environment” in which they are to be used (humid areas, possible habitats for living being, pronounced thermoclastic phenomena, atmospheric pollution or contamination of underground water, etc).

MATERIALS AND METHODS

The five varieties of granite described in the first part of this work were studied.

The physical properties were determined following the standard norms and recommendations:

- *Permeability to steam (R.I.L.E.M./II-2) (1)*
- *Absorption of water by suction (N.F.-B 10-503) (2)*
- *Capillary absorption (Normal 11/85) (3)*
- *Absorption of water by total immersion (Normal 7/81) (4)*
- *Absorption coefficient (N.F.-B 10-504) (5)*
- *Real and apparent density in water (N.F.-B 10-503) (6)*
- *Real specific weight, specific surface area and porosimetric density; porosimetry by mercury injection (U.N.E. 83-306-85) (7)*
- *Resistance to indirect traction (U.N.E. 83-306-85) (8)*
- *Resistance to compression (U.N.E. 22-175-85) (9)*
- *Velocity of ultrasound propagation (N.F.-B 10-505) (10)*
- *Theoretical resistance to compression, deduced from the velocity of ultrasound propagation (11).*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En La tabla I aparecen los datos de las características físicas medidas en agua: permeabilidad al vapor de agua (K_v), capacidad de imbibición por inmersión total (CI), absorción con succión (porosidad total, n_t), densidad real (DR) y aparente (DA), porcentaje de agua absorbida, que está como agua libre, n_o y coeficiente de absorción capilar (CA).

En la tabla II aparecen los valores de características físicas calculadas a través de los datos obtenidos por la técnica de porosimetría de mercurio: densidad calculada en la primera inyección (D), segunda inyección (D^*), densidad corregida en la primera inyección (D_1), segunda inyección (D_2), porosidad libre (n_f), porosidad atrapada (n_a), porosidad total (n_t), superficie específica en la primera (S_e) y superficie específica en la segunda inyección (S_e^*).

En la tabla III se muestran los valores de resistencia a la tracción indirecta (ensayo brasileño, F_i), resistencia a la compresión (T), velocidad de propagación de ultrasonidos (V_s) y resistencia a la compresión teórica, deducida de la velocidad de propagación de ultrasonidos ($T_{teórica}$).

RESULTS AND DISCUSSION

Table I shows the data on the physical characteristics measured in water: permeability to steam (K_v), imbibition capacity by total immersion (CI), absorption by suction (total porosity, n_t), real density (DR), apparent density (DA), percentage of water absorbed, in the form of free water, n_o , and the capillary absorption coefficient (CA).

Table II shows the values of the physical characteristics calculated with the data obtained with the mercury porosimetry technique: density calculated from the first injection (D) and second injection (D^), corrected density of the first injection (D_1) and second injection (D_2), free porosity (n_f), trapped porosity (n_a), total porosity (n_t), specific surface area in the first (S_e) and in the second (S_e^*) injection.*

Table III shows the values of resistance to indirect traction (Brasil test, F_i), resistance to compression (T), velocity of ultrasound propagation (V_s) and theoretical resistance to compression, deduced from the velocity of ultrasound propagation ($T_{theoretical}$).

TABLA I

Propiedades físicas (en agua), de cinco variedades de granito empleadas en la Catedral de Ávila
Physical properties (in water) of five varieties of granite used in Ávila Cathedral

	G.F.	G.G.	G.O.	G.R.	G.B.
K_v	0.023	0.024	0.476	0.256	0.356
CI	0.47	0.29	12.78	7.92	8.25
n_t	1.12	0.65	28.40	20.13	21.04
DR	2.63	2.68	2.47	2.48	2.37
DA	2.60	2.66	1.77	1.98	1.87
n_o	90.80	94.80	74.31	66.70	60.48
CA	0.07	0.05	1.40	0.80	0.70

Granito gris fino (GF), Granito gris grueso (GG), Granito ocre (O), Granito blanco (B) y Granito rojo (R)
Fine grey granite (GF), Coarse grey granite (GG), Ochre granite (O), White granite (B) and Red granite (R)

- K_v = Permeabilidad - Permeability $\times 10^{-7}$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
- CI = Coeficiente de imbibición por inmersión total - Coefficient of imbibition by total immersion (%)
- n_t = Porosidad total - Total porosity (%)
- DR = Densidad real - Real density (g/cm^3)
- DA = Densidad aparente - Apparent density (g/cm^3)
- n_o = Porcentaje de agua absorbida que está con agua libre - Percentage of water absorbed present in free form
- CA = Coeficiente absorción capilar - Capillary absorption coefficient $\times 10^{-3}$ ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}^{1/2}$)

TABLA II

Propiedades físicas (en mercurio), de cinco variedades de granito empleadas en la Catedral de Ávila
Physical properties (in mercury) of five varieties of granite employed in Ávila Cathedral

	G.F.	G.G.	G.O.	G.R.	G.B.
<i>D</i>	-	2.68	1.90	1.92	1.94
<i>D*</i>	-		2.12	2.13	2.12
<i>D_c</i>	-	2.70	2.36	2.33	2.23
<i>D_c*</i>	-	-	2.40	2.37	2.33
<i>n_t</i>		1.04	19.55	17.45	13.18
<i>n_o</i>	-	-	11.49	9.94	9.18
<i>n_a</i>	-	-	8.06	7.51	4.00
<i>Se</i>	-	0.17	18.09	8.04	7.51
<i>Se*</i>	-	-	10.95	4.41	4.43

Granito gris fino (GF), Granito gris grueso (GG), Granito ocre (O), Granito blanco (B) y Granito rojo (R)
Fine grey granite (GF), Coarse grey granite (GG), Ochre granite (O), White granite (B) and Red granite (R)

- D* = Densidad 1^a inyección - Density first injection (g/cm^3)
*D** = Densidad 2^a inyección - Density second injection (g/cm^3)
D_c = Densidad corregida 1^a inyección - Corrected density 1st injection (g/cm^3)
*D_c** = Densidad corregida 2^a inyección - Corrected density 2nd injection (g/cm^3)
n_t = Porosidad total - Total porosity (%)
n_o = Porosidad libre - Free porosity (%)
n_a = Porosidad atrapada - Trapped porosity
Se = Superficie específica 1^a inyección - Specific surface area 1st injection (m^2/g)
*Se** = Superficie específica 2^a inyección - Specific surface area 2nd injection (m^2/g)

TABLA III

Propiedades mecánicas de cinco variedades de granito empleadas en la Catedral de Ávila
Mechanical properties of five varieties of granite employed in Ávila Cathedral

	G.F.	G.G.	G.O.	G.R.	G.B.
<i>V_f (X)</i>	3399	2720	2585	3156	2985
<i>V_f (Y)</i>	3623	3344	2633	3180	3412
<i>V_f (Z)</i>	4056	3551	2497	3344	3350
<i>T</i>	1035	670	281	485	428
<i>f_u</i>	147	92	59	48	36
<i>T_{teórica}</i>	917	650	461	688	689

Granito gris fino (GF), Granito gris grueso (GG), Granito ocre (O), Granito blanco (B) y Granito rojo (R)
Fine grey granite (GF), Coarse grey granite (GG), Ochre granite (O), White granite (B) and Red granite (R)

- V_f* = Velocidad de propagación longitudinal de ultrasonidos - Velocity of longitudinal ultrasound propagation (m/s)
T = Resistencia a la compresión - Resistance to compression (kg/cm^2)
f_u = Resistencia a la tracción indirecta - Resistance to indirect traction (kg/cm^2)
T_{teórica} = Resistencia a la compresión teórica, deducida de la velocidad de propagación de ultrasonidos
Theoretical resistance to compression deduced from the velocity of ultrasound propagation (kg/cm^2)

Los datos que aparecen en la tabla I muestran que la permeabilidad al vapor de agua (K_v), la porosidad total en agua (n_w), y el coeficiente de imbibición por inmersión total (CI), son muy bajas en las dos variedades de granito gris (GF, GG), intermedias en las variedades “granito rojo y blanco” (R y B) y muy elevadas en el granito ocre (O). El granito rojo (R) tiene valores más bajos que el granito blanco (B), debido al relleno de poros por oxihidróxidos de hierro que contiene.

Las densidades reales y aparentes de los dos granitos sanos son muy parecidas debido a su baja porosidad, mientras que en las otras variedades de granito se observan marcadas diferencias, al tener una porosidad bastante alta.

El porcentaje del agua absorbida (n_0), es elevado en las dos variedades de granito sano (GG y GF), en cuya composición no hay arcillas ni otros componentes con microporosidad que pudieran retener “agua atrapada”. Sin embargo para éstos, el coeficiente de absorción capilar es muy bajo, debido a la baja porosidad total que poseen. En cuanto a los granitos ocre (O), rojo (R) y blanco (B) hay una correlación bastante buena entre estas dos propiedades, siendo los valores mayores para el ocre (O), intermedios para el rojo (R) y los más bajos para el blanco (B).

En la tabla II aparecen los valores de densidad, porosidad y superficie específica de las muestras calculadas con el porosímetro de mercurio. Los valores calculados con agua (tabla I) o porosimetría de mercurio (tabla II) dan una buena concordancia.

Los valores de densidad real determinados con agua y los de “densidad corregida” (D_c) determinados con el porosímetro de mercurio son equivalentes, y aun más parecidos si se tiene en cuenta los valores de la segunda intrusión de mercurio (D_c^*). Tampoco hay grandes diferencias de unas muestras a otras, aunque los granitos sanos presentan una densidad real ligeramente superior.

También existe una buena correlación entre los valores de densidad aparentes (D_A) y la determinada con el porosímetro en la primera inyección de mercurio (D). En ambas puede apreciarse que los granitos grises dan una densidad aparente superior a las facies alteradas. La más baja la presenta el granito ocre, más poroso, seguido del blanco y del rojo.

La porosidad en el granito ocre es la más elevada, seguida por la del rojo y el blanco. Este último es el menos poroso por haber sufrido una silicificación que

The data offered in Table I show that permeability to steam (K_v), total porosity in water (n_w) and the coefficient of imbibition by total immersion (CI) are very low in both varieties of grey granite (GF, GG), intermediate in the “red and white varieties” (R, B) and very high in the ochre granite (O). The red granite (R) has lower values than the white granites (B) owing to the infilling of pores, open to water in these conditions, by iron oxyhydrides.

The real and apparent densities of the two fresh granites are very similar owing to their low degree of porosity while marked differences are seen in the other varieties of granite since their porosity is quite high.

The percentage of free water observed (n_0) is high in both varieties of fresh granite (GG and GF), whose composition does not include clays or other microporous components that might retain “trapped water”. However, for these the capillary absorption coefficient is very low owing to their low overall porosity. With respect to the ochre (O), red (R) and white (B) granites, these two properties are fairly well correlated, the highest values being found for the ochre granite (O), with intermediate values for the red granite (R) and the lowest values for the white granite (B).

Table II shows the values on density, porosity and specific surface area of the samples calculated by mercury porosimetry. The values calculated with water (Table I) or mercury porosimetry (Table II) are fairly concordant.

The values of real density calculated with water and those of “corrected density” (D_c) determined by mercury porosimetry are equivalent, and even more similar if the values obtained from the second intrusion of mercury (D_c^) are taken into account. Neither are there large differences from sample to sample, although the fresh granites have a slightly higher real density.*

There is also good correlation between the values of apparent density (D_A) and that determined by porosimetry in the first injection of mercury (D). In both cases, the grey granites are seen to give a higher apparent density than that of the weathered facies. The lowest is shown by the ochre granite, which is more porous, followed by the white and red varieties.

The highest porosity is seen in the ochre granite, followed by the red and white varieties. The latter is the least porous because it has undergone a process of

ha llenado parte de los poros existentes en el rojo. En el granito ocre el 58,77% de su porosidad está como libre y el resto atrapada (8), mientras que en el granito rojo los porcentajes de libre y atrapado son similares y en el blanco predomina netamente la porosidad libre, 69,6%, por no haberse llenado los huecos con oxihidróxidos de hierro. La superficie específica es también mucho más elevada en el granito ocre. El granito gris presenta valores muy bajos de porosidad y superficie específica.

En la tabla III aparecen los valores de resistencia a la compresión, a la tracción indirecta, velocidad de propagación de ultrasonidos y resistencia a la compresión calculada a partir de dicha velocidad.

La resistencia a la compresión es notablemente más alta en el granito gris, sobre todo en el de grano fino, siendo el más frágil el ocre. La resistencia a la tracción indirecta es también más elevada en el gris, pero la variedad roja-blanca da valores más bajos que la ocre.

La velocidad de propagación de ultrasonidos en el granito fino (GF) es bastante constante en las tres direcciones; los valores obtenidos en doce probetas son coincidentes. En el (GG), la desviación estándar es mayor, lo que indica pequeñas fisuras, sobre todo en el eje Z. Mayor es la desviación en las facies ocre, roja y blanca, sobre todo en la última.

Comparando los valores de resistencia a la compresión obtenidos directamente, con los calculados a partir de la velocidad de propagación de ultrasonidos, encontramos una buena correlación en las facies GF y GG (sobre una población de 28 probetas el coeficiente de correlación estadístico es de 0,67); no ocurre lo mismo en las facies alteradas (O, R y B), donde los valores calculados son siempre notablemente más elevados; las paleoalteraciones sufridas por estos materiales han determinado la desaparición de parte de sus constituyentes (cloritas, micas y feldespatos principalmente), apareciendo nuevas especies (arcilla, óxidos de hierro y ópalos), que cubren en gran parte los vacíos dejados por la destrucción de los minerales primarios. Sin embargo, a pesar de que los "huecos" están en buena parte llenos y el contacto entre las partículas produce una elevada velocidad de propagación de ultrasonidos, la "rigidez" que poseía el granito sano formado por especies cristalinas íntimamente unidas entre sí hace que la resistencia real a la compresión sea más baja en las facies alteradas.

En las Figs. 1, 2, 3 y 4 aparecen las curvas de distribución de poros determinados con el porosímetro de mercurio.

silicification that has filled in some of the pores present in the red granite. In the ochre granite 58.77% of the porosity is free and the rest trapped (8), whereas in the red variety the percentages of free and trapped porosity are similar and in the white granite the free porosity is clearly predominant because the pores have not been infilled by iron oxyhydrides. Specific surface area is also much higher in the ochre granite. The grey granite has very low porosity and specific surface area values.

Table III shows the values concerning the resistance to compression, to indirect traction, the velocity of ultrasound propagation and the resistance to compression calculated from that velocity.

Resistance to compression is considerably higher in the grey granite, above all in the fine-grained variety, the ochre granite being more fragile. Resistance to indirect traction is also higher in the grey granite, although the red-white variety shows lower values than the ochre granite.

The velocity of ultrasound propagation in the fine-grained granite (GF) is fairly constant in all three directions: the values obtained in twelve samples coincide. In the (GG) variety the standard deviation is higher, indicating small fissures, above all on the Z axis. The deviation is even greater in the ochre, red and white facies, above all in the latter.

Upon comparing the values of resistance to compression obtained directly with those obtained with the velocity of ultrasound propagation, a good correlation is seen in the GF and GG facies (in a population of 28 samples the statistical coefficient of correlation is 0.67); this, however, is not true for the weathered facies (O, R and B), where the values calculated are always considerably higher. The paleoweathering undergone by these varieties of granite has led to the disappearance of some of their components (mainly chlorites, micas and feldspars) accompanied by the appearance of new species (clay, iron oxides and opal) that cover a large proportion of the spaces left by the destruction of the primary minerals. However, even though the "hollows" are to a large extent filled in and contact among the particles affords a high velocity of ultrasound propagation, the rigidity of the sound granite formed of intimately linked crystalline species means that real resistance to compression is lower in the weathered facies.

Figs. (1, 2, 3 y 4) show the pore distribution curves determined with the mercury porosimeter.

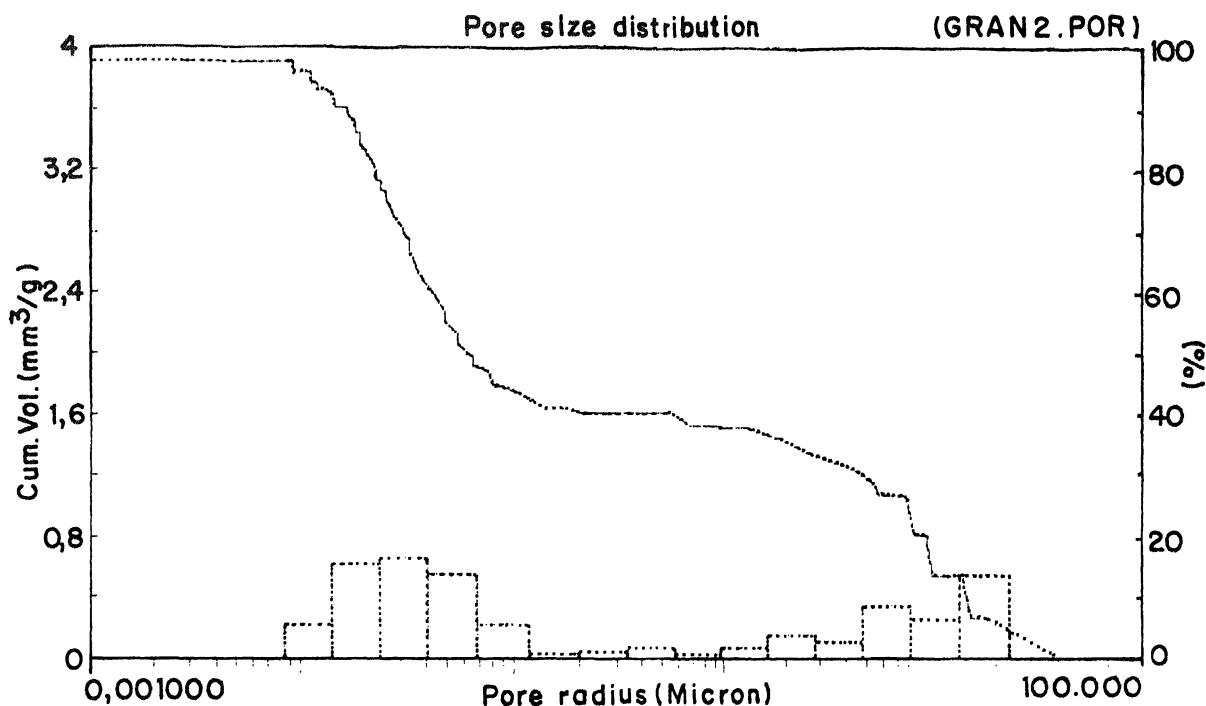


Fig. 1.- Distribución porosimétrica del granito gris (porosimetría de mercurio). Inyección única

Fig. 1.- Porosimetric distribution in grey granite (mercury porosimeter). Single injection

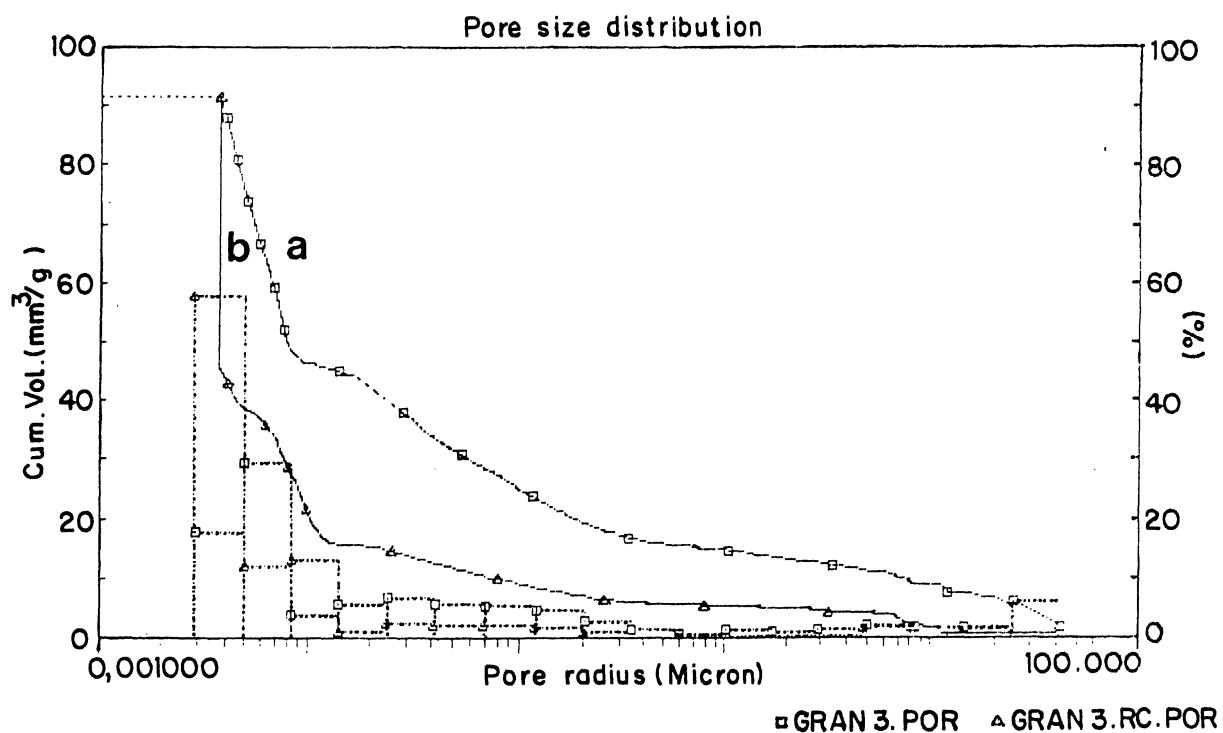


Fig. 2.- Distribución porosimétrica del granito ocre (porosimetría de mercurio):
a) Primera inyección. b) Segunda inyección

*Fig. 2.- Porosimetric distribution in ochre granite (mercury porosimeter):
a) First injection. b) Second injection*

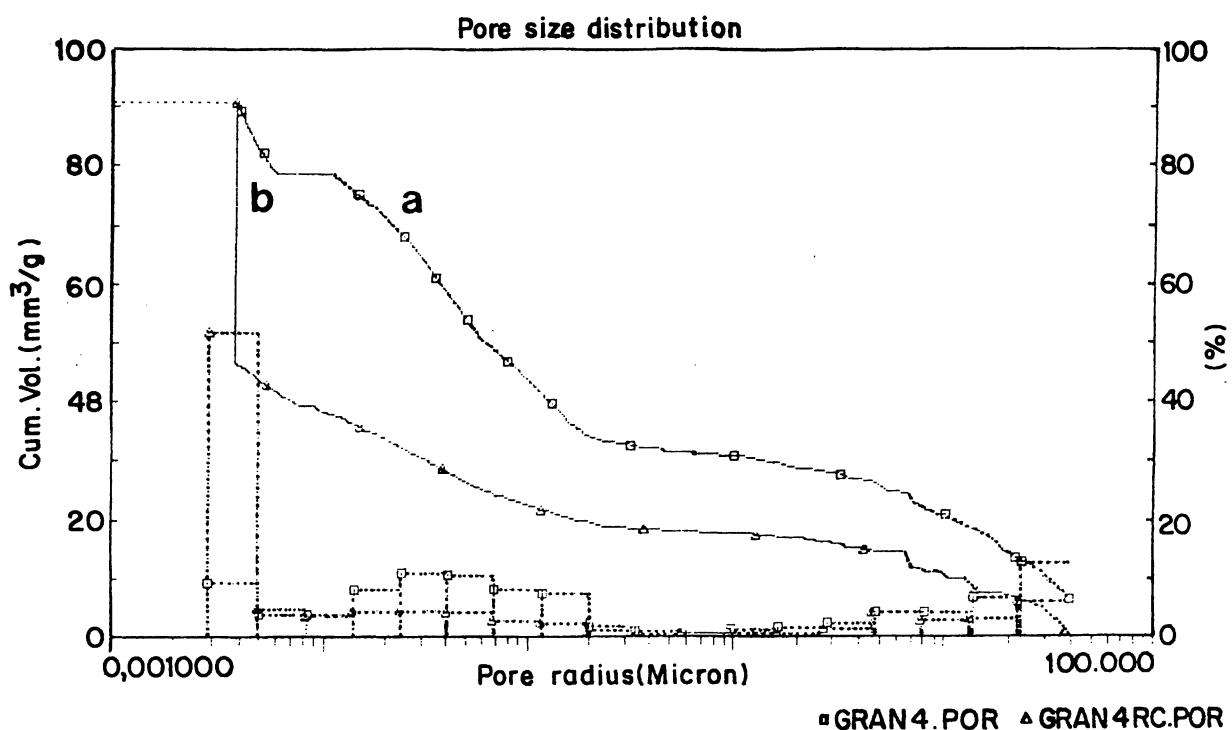


Fig. 3.- Distribución porosimétrica del granito rojo (porosimetría de mercurio):
a) Primera inyección. b) Segunda inyección

Fig. 3.- Porosimetric distribution in red granite (mercury porosimeter):
a) First injection. b) Second injection

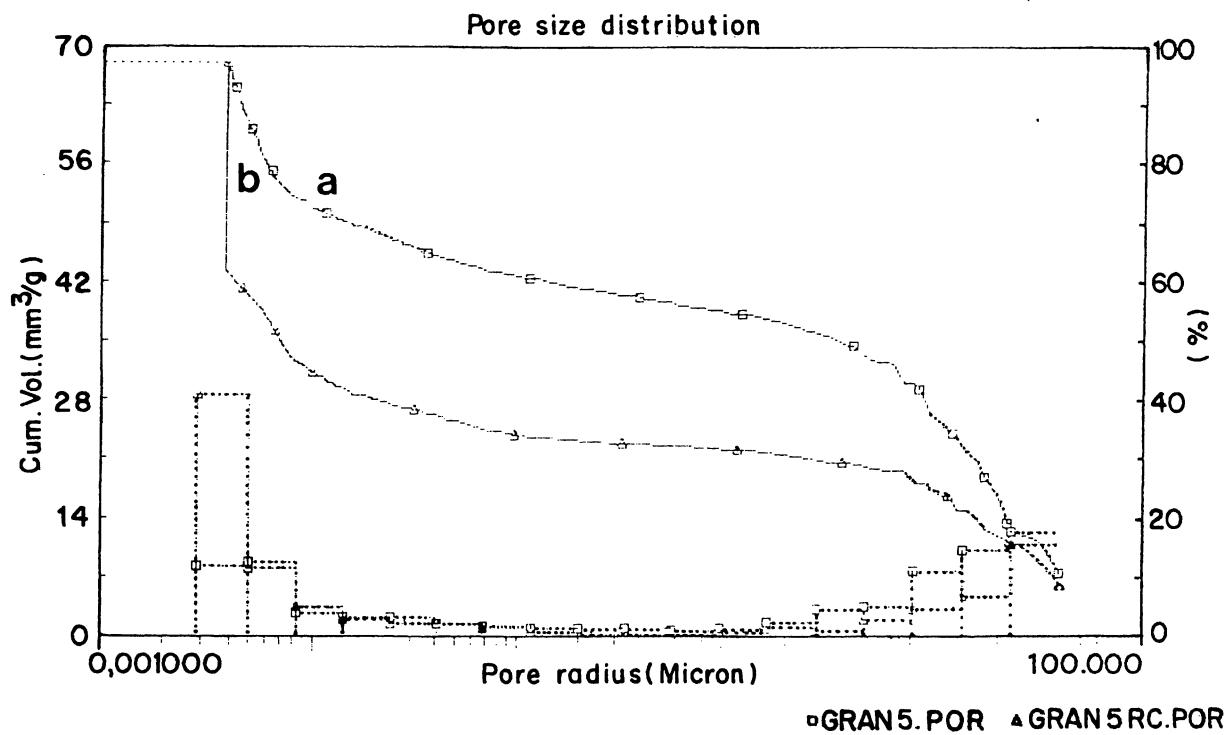


Fig. 4.- Distribución porosimétrica del granito blanco (porosimetría de mercurio):
a) Primera inyección. b) Segunda inyección

Fig. 4.- Porosimetric distribution in white granite (mercury porosimeter):
a) First injection. b) Second injection

La Fig. 1, correspondiente a la primera inyección, corresponde a la porosidad total y muestra que en el granito gris su valor es de 1,04 % (tabla II) y los poros más frecuentes tienen radios entre $10^2\mu$ - $10^1\mu$ y entre 4μ - 40μ .

En el granito ocre, con porosidad total de 19,55 % predominan los poros con radios entre $3 \times 10^3\mu$ - $9 \times 10^3\mu$. El alto porcentaje de porosidad atrapada y la práctica inexistencia de poros de radio superior a $5 \times 10^1\mu$ se explica por el elevado porcentaje de arcilla presente en este tipo de piedra.

En el granito blanco predomina netamente la porosidad libre y la mayor frecuencia de poros se da en dos zonas con radios entre $3 \times 10^3\mu$ - $8 \times 10^3\mu$ y 8μ - 40μ .

En el granito rojo la distribución de poros nos muestra predominancia de radios en tres zonas: entre 5μ - 40μ , $10^2\mu$ - $2 \times 10^1\mu$ y $3 \times 10^3\mu$ - $5 \times 10^3\mu$. Es de destacar la similitud entre las piedras blanca y roja en la zona de radios mayores a 5μ y la aparición en la roja de mayor porosidad atrapada en la zona de poros de radio medio ($10^2\mu$ y $2 \times 10^1\mu$) y sobre todo de pequeños poros ($< 5 \times 10^3\mu$). La génesis de este material con una fase de alteración en medio hidromorfo, en el que tiene lugar la precipitación de óxidos de hierro en los vacíos porales y la posterior silicificación con precipitación de ópalo, explican este hecho.

Fig. 1. corresponding to the first injection, refers to total porosity and reveals that in the grey granite its value is 1.04 % (Table II) and the most common pores have a radius of $10^2\mu$ - $10^1\mu$ and 4μ - 40μ .

In the ochre granite, with a total porosity of 19,55 %, pores with a radius between $3 \times 10^3\mu$ - $9 \times 10^3\mu$ predominate. The high percentage of trapped porosity and the practical absence of pores with a radius greater than $5 \times 10^1\mu$ can be accounted for in terms of the high percentage of clay present in this type of sample.

In the white granite the free porosity clearly predominates and the most frequent pores have a radius between $3 \times 10^3\mu$ - $8 \times 10^3\mu$ and 8μ - 40μ .

In the red granite, pore distribution reveals a predominance in three zones: between 5μ - 40μ , $10^2\mu$ - $2 \times 10^1\mu$ and $3 \times 10^3\mu$ - $5 \times 10^3\mu$. A striking observation is the similarity between the white and red varieties of the rock in the zone of radii greater than 5μ and the appearance in the red granite of a greater trapped porosity in the zone of pores of medium radius ($10^2\mu$ and $2 \times 10^1\mu$) and above all of small pores ($< 5 \times 10^3\mu$). The genesis of this material with a weathering phase in hydromorphic medium, in which iron oxides were precipitated into the pore hollows, later followed by silicification with the precipitation of opal, account for this.

CONCLUSIONES

- Los cinco tipos de granito estudiados correspondientes, dos a granito sano (GF y GG) y tres a facies que han sufrido los grandes procesos de alteración que aparecen en distintas partes del Zócalo Hercínico Ibérico (O, R y B), presentan propiedades mecánicas y de transporte bien diferenciadas.
- GF y GG son materiales de muy baja porosidad, elevada resistencia mecánica, presentan pequeñas variaciones entre densidad real y aparente, pequeños valores de absorción de agua y muy baja permeabilidad al vapor.
- Las facies alteradas son más permeables, porosas y de menor resistencia mecánica. El que presenta valores más elevados de absorción, permeabilidad y porosidad, y menor resistencia, es el O, con abundante smectita en su composición.

CONCLUSIONS

- *The five types of granite studied, two of them corresponding to conserved varieties and the other three to facies that have undergone strong processes of weathering and appearing in different parts of the Iberian Hercynian Basement (O, R and B) display well differentiated mechanical properties.*
- *GF and GG are materials with a very low level of porosity, a high mechanical resistance, small variations between the real and apparent densities, low values for the absorption of water and are very sparingly permeable to steam.*
- *The weathered facies are more permeable, porous and have less mechanical resistance. The variety with the highest values as regards absorption, permeability and porosity and the one with the least resistance is O, which contains large amounts of smectite.*

- La determinación de propiedades mecánicas empleando velocidad de transmisión de ultrasonidos es válida para rocas cristalinas no alteradas (GF y GG), pero no para las facies alteradas.

- *Determination of mechanical properties using the velocity of ultrasound propagation is a valid method for unweathered crystalline rocks (GF and GG) but not for weathered facies.*

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda de la CE (STEP CT90-0101), Junta de Castilla y León (project 0314/90) y CICYT (PAT91-1507-C03-01-CE).

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from EC (contract STEP CT90-0101), from Junta de Castilla y León (project 0314/90), and from CICYT (PAT91-1507-C03-01-CE) is acknowledged.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) - Normas RILEM, 1978 "Coefficient de conductivité de vapeur d'eau", II-2.
- (2) - Normas NF, 1973 "Mesures de la porosité, de la masse volumique réelle et de la masse volumique apparente", B10-503.
- (3) - Normas NORMAL, 1985. "Assorbimento d'acqua per capillarità, coefficiente di assorbimento capillare", 11.
- (4) - Normas NORMAL, 1.981. "Assorbimento d'acqua per immersione totale, capacità di imbibizione", 7.
- (5) - Normas NF, 1973., "Mesure du Coeficient de absorption d'eau", B10-503.
- (6) - Normas NF, 1973. "Mesures de la porosité, de la masse volumique réelle et de la masse volumique apparente", B10-503.
- (7) - PELLERIN, F. M., 1980. "La porosimétrie en mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches" Bull. Liaison Labo. P. et Ch. 106, ref. 2456, 105-116.
- (8) - Normas UNE, 1983. "Resistencia a la tracción indirecta, ensayo brasileño", 306-85.
- (9) - Normas UNE, 1985. "Resistencia a la compresión, para granitos ornamentales", 22-175.
- (10)- Normas NF, 1973. "Mesure de la vitesse de propagation du son (ondes longitudinales)", B10-505.
- (11) - VARGAS-MUÑOZ, M., "Relación entre resistencia a compresión y velocidad de ultrasonidos en probetas cilíndricas de hormigón de 150 x 300 y de piedras ornamentales de 100 x 100 x 200 mm. Pendiente de publicación.

* * *