

CARACTERIZACION PETROGRAFICA Y GEOQUIMICA DE LAS CALIZAS DE LA SIERRA DE ESTEPA (SEVILLA) Y EVALUACION DE LA CALIDAD TECNICA COMO MATERIALES DE CONSTRUCCION

P. Ortiz, E. Mayoral *, M. A. Guerrero ** y E. Galán **

RESUMEN

Las calizas de la Sierra de Estepa se han caracterizado para evaluar la calidad técnica e incrementar el banco de datos necesario para la determinación y verificación del origen de estos materiales cuando se encuentran en obras arquitectónicas o escultóricas del Patrimonio de Andalucía Occidental. Se trata de calizas marinas de facies someras, homogéneas, de alta pureza, compactas, de escasa absorción de agua y resistencia mecánica media-alta. Las variedades oncomicroesparita de grano grueso y oncointraesparita son las más apropiadas para su uso en construcción, mientras que la utilización de las calizas biomicríticas o las calizas intraesparíticas puede llegar a ser prohibitiva.

Palabras clave: *Calizas, Material de Construcción, Propiedades Petrofísicas, Calidad Técnica, Sierra de Estepa (Sevilla).*

SUMMARY

In order to increase the information for establishing the quarries used in the main historical buildings of Western Andalusian Heritage, limestones from «Sierra de Estepa» have been characterized.

Limestones were formed in a shallow marine environment and they are homogeneous, very pure, compact, with low water-absorption and medium-high strength. These properties show the high quality of the rock as a building material. Oncomicrosparite with coarse grain and oncointrasparite varieties are the most suitable as building materials while the use of micritic and intrasparite limestones could be forbidden.

Key Words: *Limestones, Building Material, Petrophysical Properties, Technical Quality, Sierra de Estepa (Seville).*

Introducción

Las calizas de Estepa han sido empleadas como material de construcción desde el siglo XVI hasta nuestros días, tanto para piedra estructural como para piedra ornamental. Este material se encuentra representado en numerosos edificios civiles y religiosos del Patrimonio Arquitectónico Andaluz, entre otros en las bóvedas de la Catedral de Cádiz y en el Angel de la Victoria y remates de la Fachada Principal de la Universidad de Sevilla. En general las explotaciones de caliza en el área de Estepa constituyen la actividad industrial más importante de la zona, empleándose fundamentalmente para la producción de cal, cargas de pinturas, áridos, etc., si bien actualmente la producción anual dedicada a

aplacados, sillares o elementos decorativos también es importante dentro del sector.

En este trabajo se aborda el estudio de las características petrográficas y geoquímicas y de las propiedades petrofísicas más significativas de la caliza de Estepa con el fin de evaluar su calidad técnica como material de construcción. Los resultados servirán además como base para el diagnóstico del estado de alteración de edificios de interés histórico-artístico realizados con la caliza de Estepa y para prever la patología del material en edificios de nueva planta. Por otra parte el banco de datos proporcionado por este trabajo podrá ser utilizado como fuente científica para verificar en su caso la procedencia en edificaciones de materiales calcáreos de este área.

* Dpto. de Geología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva. 21819 Palos de la Frontera (Huelva)

** Dpto. de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. Apartado 553. 41071 Sevilla

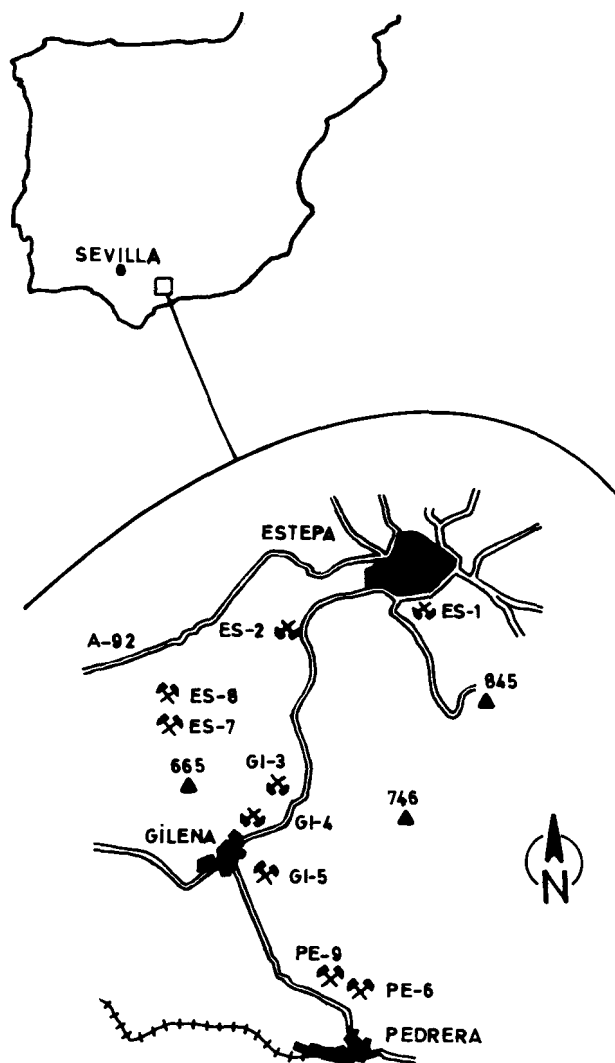


Fig. 1—Localización geográfica de las canteras de caliza estudiadas.

Localización geográfica y situación geológica de las canteras

Las canteras, objeto de estudio, están situadas en los alrededores de los municipios de Estepa, Pedrera y Gilena de la provincia de Sevilla (fig. 1). De las nueve canteras estudiadas, seis se encuentran actualmente en explotación y cuatro de éstas dedican su extracción a la producción de bloques ornamentales, susceptibles de ser usados en reposiciones o en estructuras de nueva planta. Las empresas realizan sus explotaciones a cielo abierto y en la mayoría de los casos se utilizan técnicas avanzadas de explotación.

Desde el punto de vista geológico, la sierra de Estepa (fig. 2), se engloba dentro del dominio

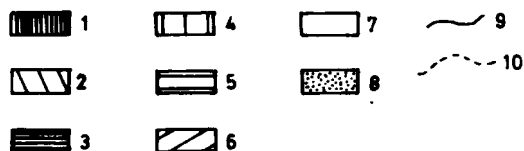


Fig. 2.—Esquema geológico de la Sierra de Estepa, de acuerdo con el Mapa Geológico de España (hoja n.º 1.005, escala 1:50.000). 1: Triásico. 2: Jurásico Medio e Inferior. 3: Jurásico Superior. 4: Cretácico Inferior. 5: Cretácico Superior. 6: Terciario Inferior. 7: Terciario Superior. 8: Cuaternario. 9: Falla. 10: Contacto.

Subbético externo y está formada por la *Unidad de la Sierra de Estepa* (Cruz San Julián, 1974). Constituye un gran antiforame de dirección N-S, cuyo núcleo está formado por una potente serie (400-700 m) de calizas micríticas, oncolíticas y oolíticas del Jurásico inferior y medio, sobre las que se dispone una delgada orla de materiales calizo-margosos del Jurásico superior (25 m), junto con un paquete más potente (650 m) de margas, margo-calizas y calizas margosas con sílex del Cretácico inferior y superior.

Materiales y métodos experimentales

El muestreo se ha efectuado en las 9 canteras señaladas, seleccionando las distintas variedades de acuerdo con sus características macroscópicas. En total se han tomado 22 muestras cuya situación estratigráfica queda reflejada en el perfil de la figura 3.

El color de la piedra es blanco en la mayoría de los casos, apareciendo algunas variedades con tonos rosados, amarillos o cremas, que también se han incluido en este trabajo aunque normalmente no se usen por su escasa aparición y en muchos casos difícil explotación. El tamaño de grano de estas calizas es muy variable, pudiéndose diferenciar desde variedades de grano muy fino, hasta otras con pisolitos que pueden llegar a tener de 1 a 1,5 cm de diámetro y cuyo efecto estético incrementa la demanda como aplacados en construcción.

La composición química se determinó mediante diferentes técnicas instrumentales como la espectrofotometría de absorción atómica (Equipo Perkin Elmer, modelo 460), la espectroscopía ultravioleta-visible (Equipo Pye Unicam, SPG-400), la fluorescencia de rayos X (Equipo Philips, modelo 1404) y la espectrofotometría de plasma por acoplamiento inductivo (Equipo JOBIN YVON 3Y32 multicanal). El análisis de isótopos estables de carbono y oxígeno, se ha llevado a cabo mediante espectrometría de masa (Equipo ISOCARB™ conectado a un espectrómetro de masas SIRA-II™ VG Isotech).

En la investigación de las características mineralógico-petrográficas se han empleado un microscopio óptico NIKON Optiphot Pol con equipo de microfotografía Microflex UFX-IIA, un difractor de rayos X Philips PW 1130/90 dotado de rendija automática y un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-5400 dotado de un analizador EDX.

El entramado de poros, fisuras y canales, producto de la disposición y características de los elementos texturales, constituye la vía de contacto entre los agentes alterantes y la roca, condicionando por tanto la durabilidad del material (ESBERT Y MONTOTO, 1990). Por ello se ha dedicado un especial interés al estudio del sistema poroso de la roca.

El protocolo seguido para describir el sistema poroso es amplio, debido a la complejidad de éste, y se ha basado en: a) cuantificación de la porosidad y determinación de la distribución de tamaño de poros mediante porosimetría de mercurio, utilizando un porosímetro Carlo Erba, modelo 2000 con unidad de macroporo y paquete de software MILESTONE, y b) observación al microscopio óptico y electrónico de los tipos de poros. De acuerdo con Alonso *et al.*, (1987), se ha dividido el entramado poroso en microporos y macroporos, siendo el límite entre ambos 10 µm.

La evaluación del comportamiento de los espacios vacíos frente al agua líquida se ha realizado siguiendo el ensayo de absorción de agua por inmersión total a presión atmosférica descrito por la norma CNR-ICR (1981).

Por último, se han realizado ensayos destructivos y no destructivos para establecer la cohesión mecánica de los diferentes materiales y clasificarlos según su tenacidad y estimar su durabilidad. En función de estas propiedades se puede establecer la calidad técnica como material de construcción (Guerrero *et al.*, 1989). En este caso se han determinado: 1) La resistencia a la carga puntual (point-load test) siguiendo las normas ISRM (1973 y 1985), este ensayo se ha llevado a cabo mediante un equipo POINT-LOAD ELE 77-0110, 2) La resistencia a la compresión uniaxial de acuerdo con las normas UNE (1985) en una prensa SUZPECAR, modelo CAE-150/75 con control electrónico y velocidad de 40 Kg cm⁻², 3) La velocidad de propagación de ondas ultrasónicas (método directo) determinada mediante un equipo PUNDIT con transductores cónicos de 24 KHz según la norma UNE (1986).

Caracterización petrográfica y geoquímica

Las calizas de Estepa, cuyo componente mayoritario es la calcita, constituyen un grupo de alta pure-

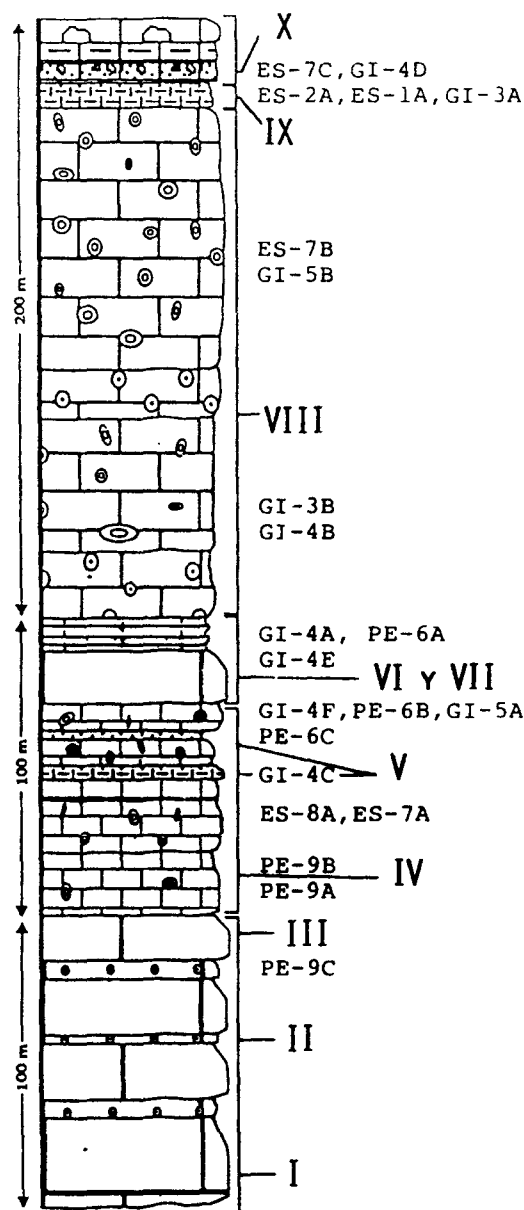


Fig. 3.—Perfil litoestratigráfico parcial de la Sierra de Estepa y situación de las muestras en la serie. I: Calizas grises/blancas masivas. II: Calizas micríticas/oolíticas. III: Calizas grises/blancas masivas. IV: Calizas blancas/grises con oncolitos. V: Intercalaciones micríticas grises. VI: Calizas blancas masivas. VII: Calizas grises tableadas. VIII: Calizas oolíticas/oncolíticas de gran tamaño. IX: Calizas micríticas y oncolíticas finas. X: Calizas nodulosas, margosas y brechoideas.

za con menos del 1% de SiO₂ y gran homogeneidad (tabla 1), no siendo significativas las diferencias a nivel de elementos minoritarios o trazas (fig. 4) entre unas variedades y otras. Sin embargo, el estudio petrográfico permite diferenciar cinco grupos (tabla 2) en función de la textura y microfauna presente: 1) Calizas micríticas que a veces pueden ser

Tabla 1.—Composición química de elementos mayoritarios y minoritarios (%)

| Muestra | Pérdida por calcinación | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Fe ₂ O ₂ | P ₂ O ₅ | SO ₃ | TOTAL |
|---------|-------------------------|------------------|-------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|--------|
| ES-1A | 43,68 | 0,72 | 55,22 | 0,05 | 0,15 | 0,13 | <0,01 | <0,01 | 0,04 | 0,35 | 100,37 |
| ES-2A | 43,58 | 0,80 | 54,65 | <0,05 | 0,29 | 0,10 | 0,02 | 0,02 | 0,19 | 0,28 | 99,99 |
| GI-3A | 43,64 | 0,83 | 55,27 | <0,05 | 0,12 | 0,07 | <0,01 | <0,01 | 0,04 | 0,25 | 100,30 |
| GI-3B | 43,78 | 0,30 | 55,34 | <0,05 | 0,14 | 0,05 | <0,01 | <0,01 | 0,02 | 0,16 | 99,87 |
| GI-4A | 43,80 | 0,13 | 55,70 | <0,05 | 0,20 | 0,09 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,27 | 100,28 |
| GI-4B | 43,80 | <0,05 | 55,71 | <0,05 | 0,16 | 0,09 | <0,01 | <0,01 | 0,03 | 0,22 | 100,14 |
| GI-4C | 43,82 | 0,22 | 55,53 | <0,05 | 0,15 | 0,10 | <0,01 | <0,01 | 0,02 | 0,24 | 100,16 |
| GI-4D | 43,80 | 0,51 | 55,00 | 0,06 | 0,21 | 0,10 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,25 | 100,02 |
| GI-4E | 43,78 | 0,28 | 55,50 | <0,05 | 0,21 | 0,07 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,24 | 100,17 |
| GI-4F | 43,85 | 0,13 | 55,65 | <0,05 | 0,14 | 0,10 | <0,01 | <0,01 | 0,02 | 0,21 | 100,12 |
| GI-5A | 43,90 | 0,05 | 55,54 | <0,05 | 0,19 | 0,13 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,23 | 100,13 |
| GI-5B | 43,88 | 0,19 | 55,34 | <0,05 | 0,29 | 0,09 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,23 | 100,11 |
| PE-6A | 43,86 | <0,05 | 55,48 | <0,05 | 0,20 | 0,11 | <0,01 | <0,01 | 0,02 | 0,30 | 100,30 |
| PE-6B | 43,80 | <0,05 | 55,62 | <0,05 | 0,18 | 0,12 | <0,01 | <0,01 | 0,08 | 0,25 | 100,18 |
| PE-6C | 43,80 | 0,16 | 55,36 | <0,05 | 0,16 | 0,10 | <0,01 | 0,15 | 0,10 | 0,26 | 100,16 |
| ES-7A | 43,90 | 0,08 | 55,47 | <0,05 | 0,17 | 0,08 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,29 | 100,09 |
| ES-7B | 43,88 | <0,05 | 55,68 | <0,05 | 0,19 | 0,09 | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,30 | 100,28 |
| ES-7C | 43,90 | 0,20 | 55,35 | <0,05 | 0,30 | 0,08 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,36 | 100,33 |
| ES-8A | 43,90 | <0,05 | 55,56 | <0,05 | 0,13 | 0,11 | <0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,35 | 100,22 |
| PE-9A | 43,90 | <0,05 | 55,71 | <0,05 | 0,20 | 0,11 | <0,01 | <0,01 | 0,03 | 0,20 | 100,28 |
| PE-9B | 43,88 | <0,05 | 55,72 | <0,05 | 0,17 | 0,10 | <0,01 | <0,01 | 0,05 | 0,24 | 100,27 |
| PE-9C | 43,86 | <0,05 | 55,76 | <0,05 | 0,24 | 0,08 | <0,01 | <0,01 | 0,02 | 0,29 | 100,38 |

biomicríticas o peletoidales. 2) Calizas oncolíticas de grano fino (oncoides < 500 µm). En función de la naturaleza del cemento se subdividen en oncoesparitas y oncomicritas. 3) Calizas oncolíticas de grano grueso (oncoides > 1-2 mm). Se clasifican según el cemento en oncoesparitas y oncomicroesparitas. También se diferencian las calizas oncoesparíticas con intraclastos cuando las rocas presentan elementos texturales (oncoides, granos agregados, cortoides, pisoides, etc.) muy heterométricos y de aspecto brechoide. 4) Calizas ooesparíticas: constituidas básicamente por ooides simples y/o compuestos, homométricos y de pequeño tamaño (≈ 750 µm).

Tabla 2.—Clasificación de las muestras de calizas de la Sierra de Estepa

| Grupo | Variedad |
|---|--|
| Calizas Micríticas | Calizas Micríticas s.s. Calizas Biomicríticas Calizas Peletoidales |
| Calizas Oncolíticas de grano fino | Oncoesparitas Oncomicroesparitas |
| Calizas Oncolíticas de grano grueso | Oncoesparitas Oncomicroesparitas Oncoesparitas con intraclastos |
| Calizas Ooesparíticas Calizas Intraesparíticas | |

5) Calizas intraesparíticas, que presentan un marcado carácter detrítico con numerosos intraclastos de rocas calcáreas oncolíticas, oolíticas, micríticas y microesparíticas.

El análisis de isótopos estables ¹³C y ¹⁸O (fig. 5) muestra un rango de variación de los índices δ¹⁸O_{SMOW}, de 27,2 a 30,3, que apunta hacia el origen marino de estos carbonatos de acuerdo con Magaritz y Gat (1981). Así mismo, los valores de la relación δ¹³C_{PDB} están entre -0.634 y 2.323, que según Veizer y Hoefs (1976), Hudson (1977) y Land (1980) corroboran la citada procedencia marina de las calizas. Estos resultados se complementan con el estudio de las microfacies, las algas codiáceas, los restos de bivalvos y de foraminíferos encontrados, muestran también la procedencia marina y de aguas someras de estos materiales.

Caracterización de los espacios vacíos y comportamiento frente al agua

Como resultado de los análisis porosimétricos destaca la alta compacidad de las calizas de Estepa, siendo el volumen ocupado por espacios vacíos accesibles a mercurio inferior al 15 % (tabla 3). No obstante, en función del rango de variación de esta propiedad se pueden distinguir tres grupos (G-1, G-2 y G-3).

G-1. Representado por las muestras de muy baja porosidad (Porosidad Total, PT < 5 %), está forma-

ELEMENTOS TRAZA

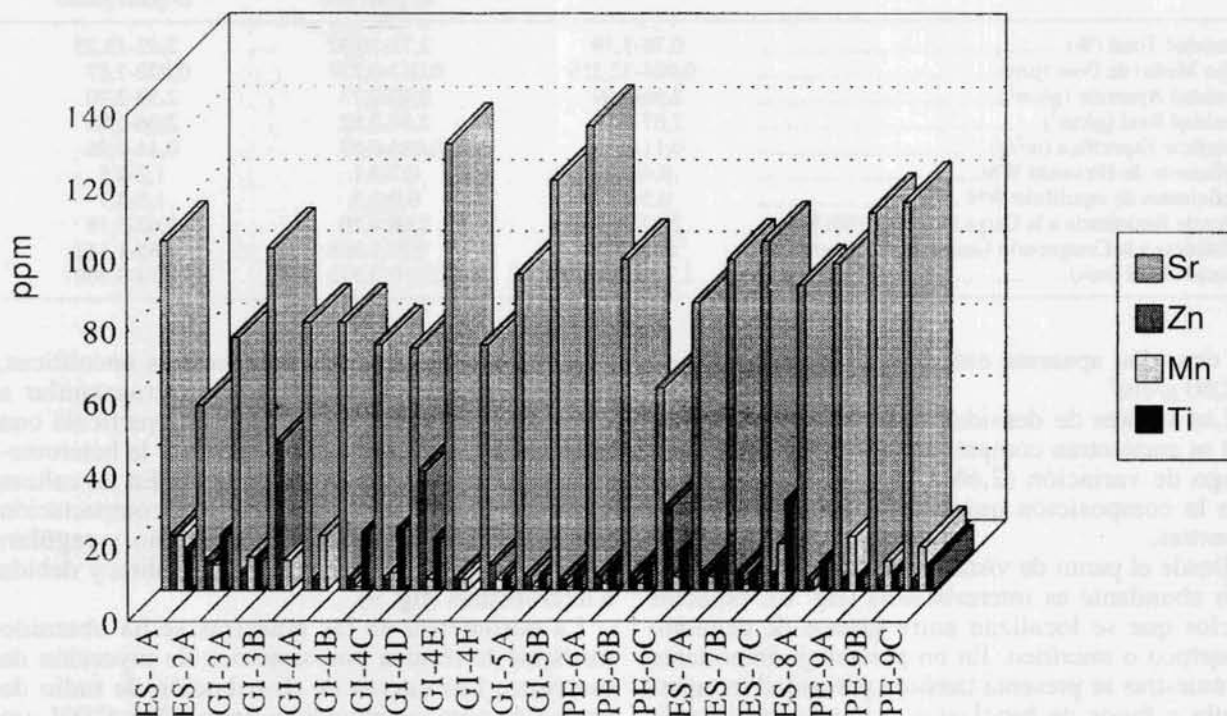


Fig. 4.—Distribución de elementos traza.

RELACIONES ISOTOPICAS

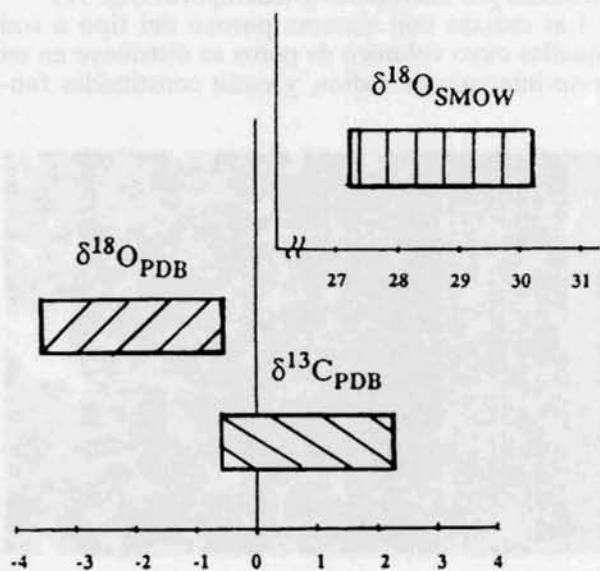


Fig. 5.—Relaciones de isótopos estables.

do por las calizas de grano muy fino y uniforme y por otras de tamaño de grano variable de fino-medio a fino-grueso muy bien compactadas. A este grupo pertenecen casi todas las variedades micríticas analizadas (micrita, biomicrita y pelmicrita) y las calizas oncolíticas e intraclásticas fuertemente cementadas por esparita. Estas muestras son además las que poseen una densidad aparente más elevada (2,63-2,73 g/cm³).

G-2. Está constituido por las muestras que tienen valores de porosidad más altos (PT > 10 %) que corresponden a las rocas con mayor tamaño de grano, variable de fino-medio a fino-grueso, peor cementadas y menos densas ($\rho_{ap} = 2,39-2,53$ g/cm³). En esta agrupación se incluyen las calizas ooesparíticas y oncoesparíticas con cemento de diferente tamaño.

G-3. Las restantes muestras analizadas pertenecen a un grupo de porosidad intermedia, con valores superiores al 5 % e inferiores al 10 %. Con estos valores de porosidad total se agrupa un conjunto de litotipos de tamaño de grano muy variable; desde muy fino (pelmicrita) al muy fino-medio de las oncomicritas y oncoesparitas o al fino-grueso de las oncoesparitas con intraclastos.

Tabla 3.—Porosidad y propiedades físicas de las calizas de la Sierra de Estepa

| | Calizas Micríticas | Calizas Oncolíticas de grano fino | Calizas Oncolíticas de grano grueso |
|--|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Porosidad Total (%)..... | 0,78-5,19 | 2,71-10,32 | 2,42-13,25 |
| Radio Medio de Poro (μm)..... | 0,004-32,256 | 0,017-0,737 | 0,022-7,87 |
| Densidad Aparente (g/cm^3)..... | 2,58-2,69 | 2,40-2,73 | 2,39-2,70 |
| Densidad Real (g/cm^3)..... | 2,67-2,79 | 2,67-2,82 | 2,66-2,85 |
| Superficie Específica (m^2/g)..... | 0,11-0,98 | 0,036-0,87 | 0,44-0,96 |
| Coefficiente de Hirswald W%..... | 0,4-2,2 | 0,7-3,1 | 1,2-4,5 |
| Coefficientes de equilibrio W%..... | 0,5-2,5 | 0,9-3,3 | 1,5-4,7 |
| Índice de Resistencia a la Carga Puntual I ₁ (50) Mpa... | 2,62-4,10 | 2,68-4,20 | 2,62-5,18 |
| Resistencia a la Compresión Uniaxial UCS (Kg/cm^2).. | 850-1.150 | 529-1.368 | 465-1.142 |
| Velocidad US (m/s)..... | 2.775-3.195 | 2.410-3.572 | 2.474-3.300 |

La densidad aparente oscila entre los valores 2,48 y $2,60 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Los valores de densidad real (densidad esquelética) se encuentran comprendidos dentro de un corto rango de variación ($2,66-2,86 \text{ g}/\text{cm}^3$) de acuerdo con la composición químico-mineralógica de las muestras.

Desde el punto de vista morfológico la porosidad más abundante es intercrystalina (fig. 6), espacios vacíos que se localizan entre granos de cemento esparítico o micrítico. En un porcentaje importante de muestras se presenta también porosidad intrapartícula a favor de bioclastos o por la pérdida de núcleos de oncolitos (fig. 6). Excepcionalmente se observan grandes conductos y canales de tamaño milimétrico (fig. 7), es la porosidad debida a fracturas en su mayoría abiertas y parcialmente recristalizadas con cristales de calcita de diferente tamaño. La fracturación es de tipo estilolítico, orientada y asociada a microfisuras cerradas en procesos de disolución y cristalización.

En la observación del sistema poroso mediante microscopía electrónica de barrido sobre superficies

pulimentadas destaca, en las muestras oncolíticas, la existencia de microporosidad intragranular a favor de estructuras existentes e interpartícula con radio de poro más grande causada por la heterometría entre cemento y oncolitos (fig. 8). En las calizas micríticas se observa un alto grado de compactación por su tamaño de grano más pequeño y regular, apreciándose una porosidad intercrystalina y debida a microfisuras (fig. 9).

La porometría de las muestras se ha obtenido mediante la técnica porosimétrica de inyección de mercurio. Las curvas de distribución de radio de acceso de poro comprendidas entre 100 y $0,001 \mu\text{m}$ y los correspondientes histogramas de frecuencia permiten clasificar en dos grandes grupos a las calizas de Estepa: a) calizas constituidas fundamentalmente por microporos ($<10 \mu\text{m}$) (fig. 10) y b) calizas con un amplio rango de distribución de poros, en el que en ciertos casos se destacan dos poblaciones formadas por microporos y macroporos (fig. 11).

Las calizas con sistema poroso del tipo a) son aquellas cuyo volumen de poros se distribuye en un corto intervalo de radios, y están constituidas fun-

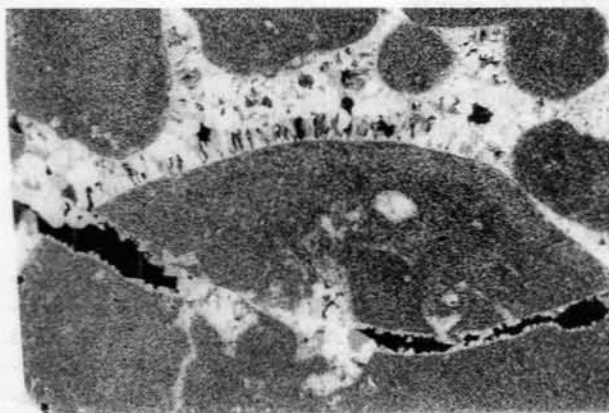


Fig. 6.—Oncolitos ($250 \mu\text{m}$). Porosidad intrapartícula e intercrystalina. ($40\times$, N.L.P.). Muestra GI-5A.

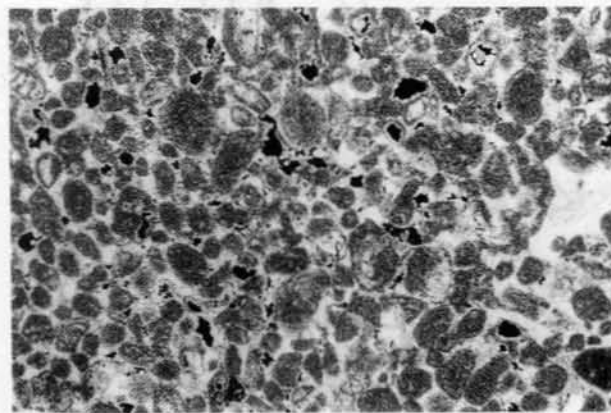


Fig. 7.—Caliza oncolítica. Porosidad debida a fracturas. Esparita recristalizada en empalizada. ($40\times$, N.L.P.). Muestra ES-8A.

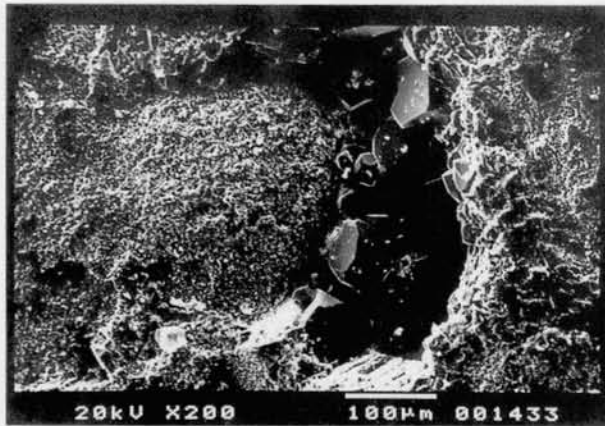


Fig. 8.—Caliza oncolítica. Macroporos rodeando al oncolito y crecimiento de cristales romboédricos de calcita en su interior. Muestra ES-7A.

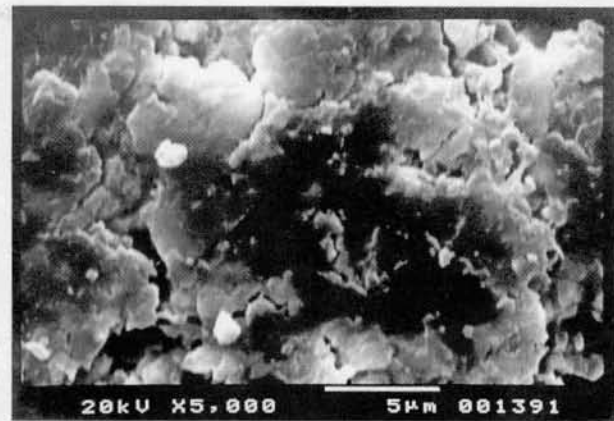


Fig. 9.—Caliza pelmicrítica. Microporosidad debida a microfibrillas. Muestra G1-4A.

damentalmente por microporos cuyos radios son inferiores a 2 µm. En la mayoría el rango oscila entre 0,01 ó 0,02 µm y 1 µm y en algunos casos entre 0,05 µm y 2 µm. El máximo de la distribución se alcanza en torno a 0,1 µm ó 0,02 µm para las primeras y en un radio de 0,5 µm para las segundas.

El sistema poroso tipo b está representado por una distribución uniforme de poros con tamaño muy variable que prácticamente cubre todo el rango de radios analizado, si bien algunas muestras pueden presentar distribuciones bimodales, cuyos máximos pueden corresponder al ámbito de los microporos o a microporos y macroporos.

En resumen se trata en general de una roca de baja porosidad, caracterizada por una alta compacidad, si bien el grado de comunicación entre los poros es importante.

En la tabla 3 se relacionan los parámetros hídricos más significativos de la absorción libre de agua con la porosidad total. Los valores obtenidos para el coeficiente de equilibrio se relacionan directamente con los de porosidad total. Los grupos G1, G2 y G3 que fueron establecidos con respecto a la porosidad total poseen también valores diferentes para el coeficiente de equilibrio. Las calizas de los grupos G-2 y G-3 tienen una fase inicial de absorción rápida y una etapa de absorción lenta, de larga duración, hasta alcanzar la fase de equilibrio (fig. 12). En las

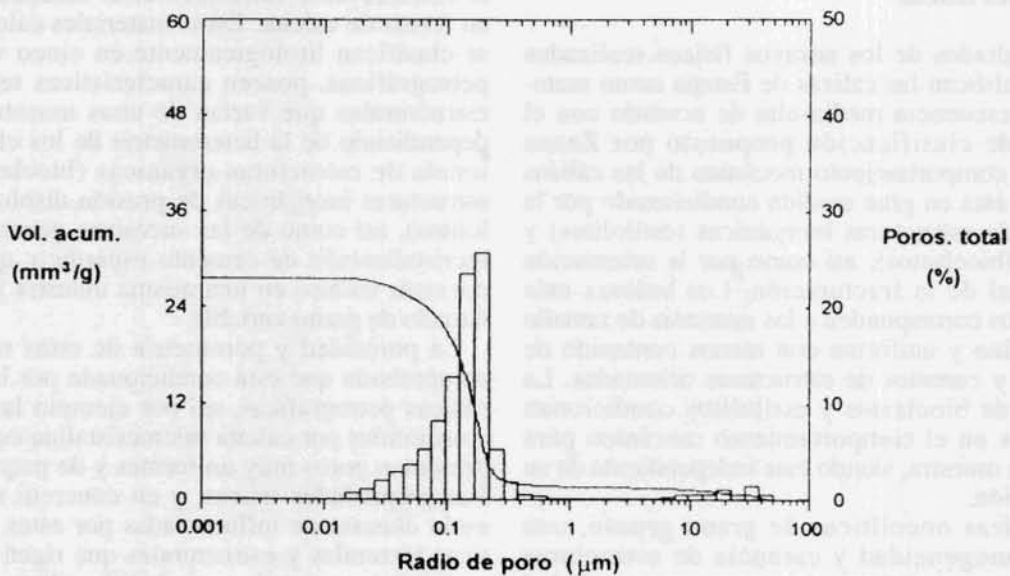


Fig. 10.—Caliza oncoesparítica. Modelo de distribución de radio de poros para las calizas tipo a.

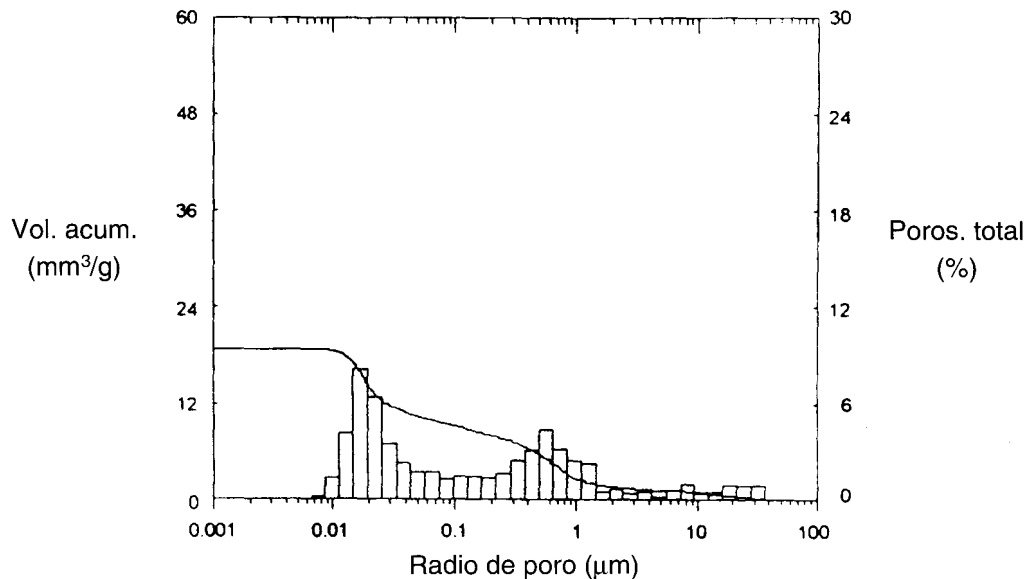


Fig. 11.—Caliza micrítica. Modelo de distribución de radio de poros para las calizas tipo b.

calizas del grupo G-1 el proceso sorcitivo es gradual y lento.

Finalmente, destacar la concordancia existente entre la porosidad total obtenida mediante la técnica de inyección de mercurio y por absorción de agua. Este hecho pone de manifiesto un sistema poroso constituido por microporos y microcanales comunicados por accesos de diámetro similar a los del conducto.

Propiedades físicas

Los resultados de los ensayos físicos realizados (tabla 3) califican las calizas de Estepa como materiales de resistencia media-alta de acuerdo con el esquema de clasificación propuesto por Zezza (1985). El comportamiento mecánico de las calizas estudiadas está en gran medida condicionado por la presencia de estructuras inorgánicas (estilolitos) y orgánicas (bioclastos), así como por la orientación preferencial de la fracturación. Los valores más homogéneos corresponden a las muestras de tamaño de grano fino y uniforme con menos contenido de bioclastos y carentes de estructuras orientadas. La presencia de bioclastos y estilolitos condicionan variaciones en el comportamiento mecánico para una misma muestra, siendo éste independiente de su compactación.

Las calizas oncolíticas de grano grueso, con mayor homogeneidad y carencia de estructuras inorgánicas y orgánicas, destacan como variedad más idónea para su utilización como piedra estruc-

tural y de labrado. El alto grado de empaquetamiento entre sus granos y una cementación copiosa y densa confieren a estos materiales una elevada cohesión intrínseca, propiedad idónea para sus usos en construcción.

Discusión y conclusiones

Las muestras estudiadas presentan una composición química-mineralógica muy homogénea siendo el constituyente fundamental el carbonato cálcico en forma de calcita. Estos materiales calcáreos, que se clasifican litológicamente en cinco variedades petrográficas, poseen características texturales y estructurales que varían de unas muestras a otras dependiendo de la heterometría de los clastos, presencia de estructuras orgánicas (bioclastos) o de estructuras inorgánicas de presión-disolución (estilolitos), así como de las sucesivas generaciones de recristalización de cemento esparítico, que pueden coexistir incluso en una misma muestra y presentar tamaño de grano variable.

La porosidad y porometría de estas rocas se ha comprobado que está condicionada por las características petrográficas, así por ejemplo las muestras constituidas por calcita microcristalina equigranular presentan poros muy uniformes y de pequeño radio. Las propiedades físicas, y en concreto mecánicas, están claramente influenciadas por estas características texturales y estructurales que rigen el sistema porométrico en cada variedad. La alteración de las rocas es un proceso que se lleva a cabo en la inter-

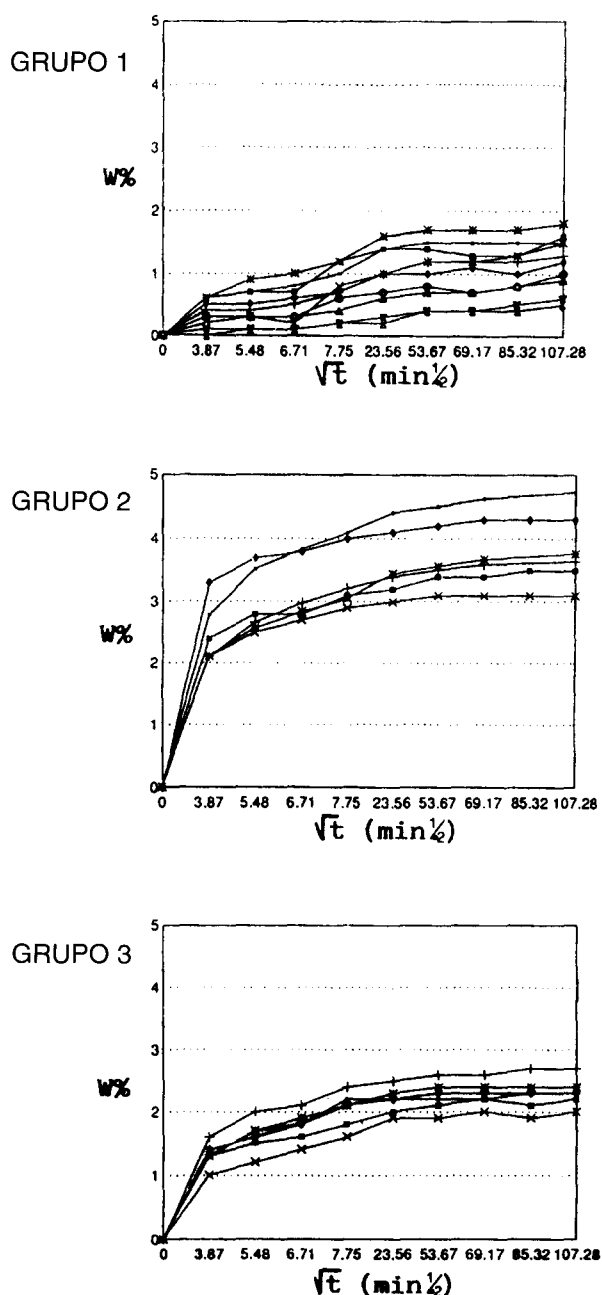


Fig. 12.—Curvas de absorción de agua por inmersión total para los tres tipos de calizas.

fase entre la superficie reactiva (sistema poroso y áreas cortadas y pulidas) de la misma y los agentes exógenos, entre los que destaca el agua en sus distintas fases: sólida, líquida o vapor y como transporte de contaminantes y sales (Valdeón y Esert, 1985). Las muestras poco porosas G-1 (PT<5 %) tienen una capacidad de absorción de agua muy limitada (<2 %) y además al estar fuertemente

cementadas tienen una compactidad alta y un buen comportamiento mecánico derivado de la elevada tenacidad (índice de resistencia a la compresión uniaxial en torno a 959 Kg/cm²). En estos materiales la capacidad de absorción de agua líquida estará fundamentalmente condicionada por la presencia de fracturas, mientras que la capacidad de absorción de agua en fase vapor será prácticamente nula de acuerdo con los valores de superficie específica (0,11-0,98 m²/g) obtenidos mediante porosimetría de mercurio.

Por el contrario las muestras con clastos heterométricos cementados por esparita de diversa granulometría y frecuentes recristalizaciones diagenéticas o postdiagenéticas presentan una porosidad total más elevada (PT<10 %). Los contenidos de agua absorbidos por estas muestras en torno al 5 %, representan los contenidos de saturación más altos (S_i>85 %). Estas variedades, en comparación con las anteriores, son menos compactas y consiguientemente poseen valores de velocidad de transmisión de ultrasonidos inferiores a los obtenidos en las variedades micríticas y se pueden calificar de tenacidad media.

El grado de cohesión de los minerales que constituyen la roca determina la durabilidad y el tipo de formas de alteración. Este conocimiento en obras actuales de ingeniería y arquitectura permite la selección de litotipos en función de la posición a ocupar en la obra.

En conclusión: las calizas de la Sierra de Estepa son materiales homogéneos, compactos, de escasa absorción de agua, resistencia mecánica media-alta, y por consiguiente de gran calidad técnica, lo que aconseja su empleo como material de construcción. Entre las distintas variedades reconocidas y de posible explotación, las calizas oncolíticas de grano grueso (oncomicroesparitas y oncointraesparitas) son las más aconsejables como materiales de construcción porque se trata de calizas de baja porosidad y un elevado grado de compactación que se refleja en valores medios-altos de resistencia a la carga puntual y a la compresión uniaxial, así como en la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas. Otro factor importante es la baja absorción de agua, por lo que salvo en ambientes o climas muy adversos cabe esperar un bajo grado de deterioro.

AGRADECIMIENTOS

Al Plan Nacional de Formación de Personal Investigador, ya que uno de nosotros (P. Ortiz) ha disfrutado para este trabajo de una Beca del MEC, Parcialmente este trabajo se ha realizado gracias a los medios del Grupo de Trabajo de Mineralogía Aplicada de la Junta de Andalucía, a los laboratorios Vorsevi

en los que se han realizado los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, y a la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A. de Madrid por los análisis de FRX.

Referencias

- Alonso, F. J., Esbert, R. M. y Ordaz, J. (1987). Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Bol. Geol. Min.* 98, 84-85.
- CNR-ICR (1981). Assorbimento d'acqua per immersione totale. Capacità de imbibizione. Doc. Normal 7/81. Roma, 5 págs.
- Cruz San Julián, J. (1974). *Estudio Geológico del Sector Cañete la Real - Teba - Osuna*. Tesis Univ. Granada n.º 72, 374 págs.
- Esbert, R. M., y Montoto, M. (1990). La petrografía y su aplicación a los estudios patológicos de la piedra. *Curso de Patología, Conservación y Restauración de Edificios*. Tomo I, Serv. Publ. Colegio de Arquitectos. Madrid. 211-229.
- Guerrero, M. A., Vázquez, M. A., Galán, E. y Zezza, F. (1989). The Physical-mechanical properties and ultrasonic data as criteria for evaluation of calcareous stone decay. *1.ª Int. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. Ed. F. Zezza, Edit. Grafo. Edizioni. Brescia (Italia). 309-313.
- Hudson, J. D. (1977). Stable isotopes and limestone lithification. *J. Geol. Soc. Lond.*, 133, 637-660.
- ISRM (1973). *Suggested methods of determining the point-load strength index*. ISRM Committee on Laboratory Test. Doc, 1, 8-12.
- ISRM (1985). *Suggested method of determining the point-load strength index*. ISRM Working group on revision of the point-load test method. Commission on Testing Methods.
- Land, L. S. (1980). The isotopic and trace elements geochemistry of dolomite: the state of the art. In concepts and models dolomitization. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Pub.* 28, 87-110.
- Magariz, M. y Gatt, J. R. (1981). Review of the natural abundances of hydrogen and oxygen isotopes. Chap. 5 in *Stable Isotopes Hydrology*. IAEA, Viena, 84-102.
- UNE (1985). *Resistencia a la compresión de mármoles y calizas ornamentales*. Norma Española 22-185-85, 2.
- UNE (1986). *Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos*. Norma Española 83-308-86, 11 págs.
- Valdeón, L. y Esbert, R. M. (1985). La alveolización y otras formas de alteración desarrolladas sobre las areniscas del Palacio de Revillagigedo de Gijn. *Materiales de Construcción*, 200, 14-26.
- Veizer, J. y Hoefs, J. (1976). The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonates rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, 1387-1395.
- Zeza, F., Baldassarre, R. Pagliarulo, R. y Racaniello, F. (1985). Applicazioni del point load test per la classificazione della resistenza e la correlazione con le prove a compressione monoassiale delle pietre da costruzione dei bacini di Trani e di Apricena. *Quarry and Construction*. Atti III Convegno Nazionale sull'attività estrattiva dei minerali di 2ª categoria, Bari, 179-181.

Recibido el 2 de octubre de 1995
Aceptado el 27 de diciembre de 1995