# PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA PIEDRA DE COLMENAR

# TÉCNICAS DE LIMPIEZA Y CONSERVACIÓN

PIEDRA DE COLMENAR


CANTERAS DE PIEDRA DE COLMENAR, S. A.

Carretera M-315, Km. 16,600
Apartado Correos n.º 19
28380 COLMENAR DE OREJA (Madrid)
Tel. 91 894 33 91 (4 líneas) * Fax 91 894 40 00
www.piedracolmenar.com
PROPIETARIO DE LA PIEDRA DE COLMENAR

# ESTUDIO DE LAS ROCAS CALIZAS, UTILIZADAS DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS PALACIOS DE MADRID

JUAN ENRIQUE DAPENA GARCÍA (Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPU).
SALVADOR ORDOÑEZ DELGADO (Facultad de Geología, UCM)
Mª ANGELES GARCÍA DEL CURA (Instituto de Geología Económica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

**RESUMEN.** Las calizas terciarias de Colmenar de Oreja fueron utilizadas para la construcción de numerosos palacios y edificios singulares en Madrid, durante los siglos XVIII y XIX, prolongándose su uso hasta hoy. En este artículo se estudian las características de las calizas en los diferentes bancos que se explotan en cantera, y se comparan con las especificaciones exigidas a las rocas calizas a utilizar en los exteriores de los edificios.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las calizas en Colmenar de Oreja, en las proximidades de Madrid, han sido utilizadas desde el siglo XVIII en la construcción de palacios y monumentos de la capital de España, Palacio Real, Museo del Prado, Observatorio Astronómico, Puerta de Toledo, Puerta de Alcalá, Palacio de Aranjuez, etc., más recientemente se utilizó en la "Casa de Velázquez", año 1926 y ahora para la terminación de la Catedral de la Almudena.

Por todo ello, se puso en marcha un estudio que permitiera conocer las características de la piedra de Colmenar de Oreja y su calificación como material de construcción en el medio ambiente de Madrid. Este estudio se decidió hacerlo en dos partes. En una se analizarían las canteras y se determinarían las características de los distintos tipos de caliza utilizados en la construcción. Con estos datos, se calificarían las calizas como material a utilizar en edificios.

Una segunda parte estaría encaminada a conocer la evolución de sus características con el tiempo, es decir su meteorabilidad.

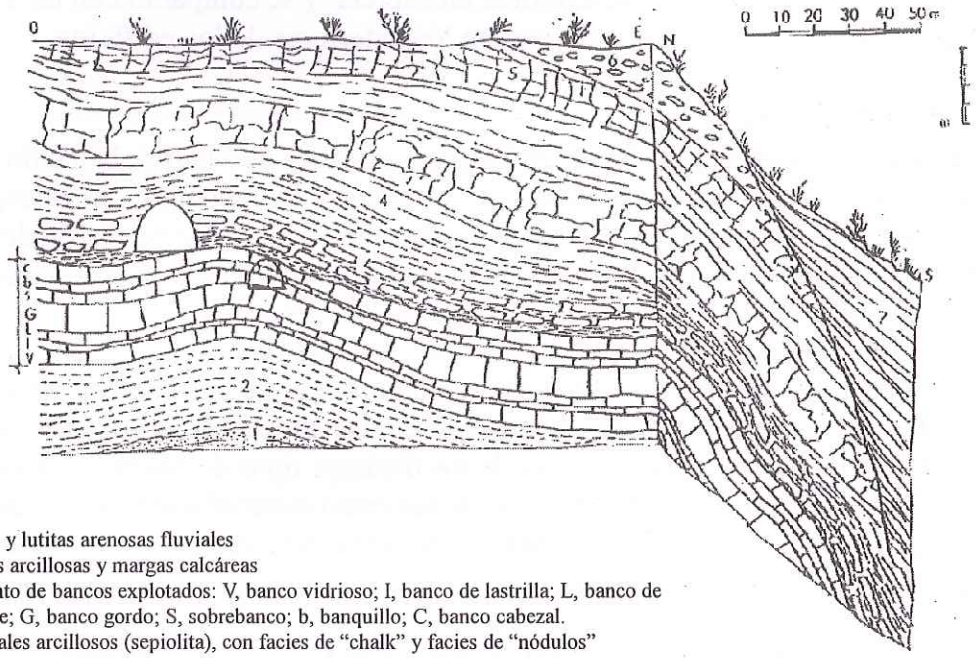
## 2. GEOLOGÍA DE LA ZONA DE CANTERA

Las canteras de Colmenar de Oreja se sitúan al NE de la villa, en el páramo del interfluvio de los ríos Tajo y Tajuña. Geológicamente se ubican en la Cuenca Neógena de Madrid y, más concretamente, en la Unidad Superior de la misma. En la Cuenca de Madrid se pueden distinguir tres unidades (Ordóñez, García del Cura): *Unidad Superior, o salina*, bien representada a lo largo de los ríos Tajo y Tajuña, caracterizada por la presencia de anhidrita con niveles continuos de sales sulfatadas sódicas; sobre esta Unidad se dispone la *Unidad Intermedia*, caracterizada en la zona objeto de estudio por la presencia de yesos detríticos y yesos crema, usados en la industria local de fabricación de aglomerantes de yeso. La *Unidad Superior* comienza con un sistema fluvial, con abundantes materiales terrígenos, que evoluciona hacia la parte superior a calizas, que son objeto de la explotación desde al menos el siglo XVIII.

La génesis de estas calizas, ha sido atribuida a un medio lacustre, sin embargo, los últimos estudios petrográficos y sedimentológicos realizados en la Facultad de Geológicas de la UCM (Ordóñez y García del Cura) y la comparación con medios actuales y paractuales del Centro de la Península, inclina a pensar en un medio fluvial de baja energía, con episodios de facies tobáceas, estromatolíticas y oncolíticas, que alternan con facies palustres de estancamiento (y desarrollo de lagos pluviales). Amplios procesos diagenéticos tempranos de microcarstificación y cementación relacionados con emersiones temporales producen una litificación del material y el desarrollo de algunas formas de porosidad características de la piedra de Colmenar.

Al igual que se ha podido comprobar en otros lugares de la cuenca sobre estos niveles de calizas de gran pureza existen episodios de arcillas de composición paligorsquítica, que se intercalan con niveles decimétricos de calizas.

El conjunto de la cantera aparece con buzamientos a veces superiores a los 15", sin direcciones dominantes y dando el aspecto de un material colapsado en relación con los depósitos salinos infrayacentes. Por otra parte un importante proceso de carstificación y rubefacción ha afectado al conjunto dando lugar en algunos puntos a zonas afectadas por carstificaciones superiores a la decena de metros. Una superficie erosiva afecta al conjunto dando lugar a acumulaciones de "terra rosa" alóctona que ocupan zonas deprimidas sobre la superficie erosiva (fig. 1).




(1) Arenas y lutitas arenosas fluviales
(2) Margas arcillosas y margas calcáreas
(3) Conjunto de bancos explotados: V, banco vidrioso; I, banco de lastrilla; L, banco de Levante; G, banco gordo; S, sobrebanco; b, banquillo; C, banco cabezal.
(4) Materiales arcillosos (sepiolita), con facies de "chalk" y facies de "nódulos" calcáreos, resultado de una intensa carstificación.
(5) Facies con rasgos edáficos (Costra laminar)
(6) Brechas rojizas con elementos calcáreos y materia arcillosa.
(7) "Terra rosa" alóctona con estratificación horizontal, fosilizando una superficie erosiva.

Los bancos de calizas explotados reciben los nombres de: Cabezal (0,5-0,8 m), Banquillo (0,2-0,4 m), Sobrebanco (0,80-1,0 m), Banco Gordo (1,20-1,80 m), Banco de Levante (0,40-0,70 m), Lastra (0,0-0,30 m) y Banco Vidrioso (0,10-0,80 m). No siempre están todos los bancos y la identificación de los mismos no resulta fácil, aunque algunos como el vidrioso pueden identificarse fácilmente por su aspecto que le da nombre, y el Banco Gordo por presentar un espesor bastante mayor que los demás. Cada banco está separado del anterior por un nivel arcilloso.

Actualmente la explotación se hace a cielo abierto, pero hasta hace pocos años se hacía mediante labores subterráneas, que pueden observarse actualmente. Básicamente el sistema de explotación consistía en explotar el Banco de Levante (de ahí su nombre) y dejar caer el Banco Gordo. Se procedía a continuación a profundizar el Banco de Levante y se extraían de nuevo los bloques del echo. Según parece el sistema es bastante peligroso, pero dada la escasez de técnicas de desmonte era la única posibilidad de extracción, ya que el recubrimiento estéril era superior

a 10 m en bastantes puntos de la explotación. La extracción se favorecía, como se puede ver actualmente, por la abundancia de diaclasas verticales rellenas de arcillas que permiten el arranque de los bloques sin usar procedimientos mecánicos complejos.

## 3. TOMA DE MUESTRAS EN LAS CAPAS DE CALIZA UTILIZADA EN LAS EDIFICACIONES

La toma de muestras se realizó en el frente de cantera que actualmente está en explotación. En el frente principal de cantera, que está a cielo abierto, están perfectamente definidos el banquillo, el sobrebanco, y el banco gordo. Por encima aparece el cabezal y las calizas descompuestas. En un lateral aparece el banco de levante y el banco vidrioso.

Los estratos aparecen formados por bloques con los planos de discontinuidad rellenos de material arcilloso y teñidos de óxidos de hierro. El interior de la roca en cambio aparece con fisuras limpias indicado que la circulación principal de agua se produce entre bloques, afectando escasamente a su interior, lo que es un indicio de la baja permeabilidad de estos estratos calizos.

Las muestras fueron tomadas de bloques extraídos de cada uno de los estratos, por los procedimientos manuales tradicionales utilizados en la explotación de la cantera, desprendiéndolo a partir de los planos de estratificación y juntas verticales. De ellos se obtuvo un fragmento menor, mediante un golpe de maza.

Las muestras así preparadas, aparecen con las caras de fractura limpias y con escasas tinciones de óxidos de hierro en su interior. En cada una de ellas de indicó la dirección perpendicular a los estratos para poder detectar la existencia de posibles anisotropías, en particular la existencia de huellas en sentido paralelo a los estratos, que pueden hacer a estas rocas menos resistentes a presiones en esta dirección, de ahí que su colocación se haya cuidado siempre que fuera para recibir las presiones en sentido perpendicular a los estratos.

La relación de muestras tomadas, junto con la denominación del estrato de procedencia y su peso, se recogen en la Tabla 1.

| REFERENCIA LABORATORIO | ESTRATO DE PROCEDENCIA | PESO MUESTRA SECA (g) |
|---|---|---|
| 3075 | Cabeza | 1.418,1 |
| 3076 | Banquillo | |
| 3077 | Sobrebanco | 379,6 |
| 3078 | Gordo | 636,4 |
| 3079 | Levante | 181,9 |
| 3080 | Vidrioso | 2.883,0 |

**TABLA 1.** Muestras tomadas en los diferentes estratos del frente de cantera de Colmenar de Oreja.

## 4. ENSAYOS REALIZADOS

La desintegración que se puede producir en una roca por la acción mecánica de los agentes atmosféricos depende en primer grado de su porosidad y de su resistencia, mientras que la descomposición de la roca por transformaciones químicas depende, también en primer grado, de la permeabilidad y de la composición mineralógica.

En la magnitud de las características mencionadas anteriormente se basa la especificación ASTM C-568 para clasificar una roca caliza como material de construcción a utilizar en los exteriores de los edificios, y que se utilizará en este trabajo como punto de referencia para calificar las calizas utilizadas en los Palacios de Madrid.

### 4.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Las muestras extraídas de la cantera se limpiaron con agua, cepillándose la superficie externa para que se desprendieran las partículas térreas. Una vez limpias, se determinó su peso específico aparente y la absorción, según la norma ASTM C-97-83.

Sobre cada uno de los bloques se tallaron probetas cilíndricas, con unas dimensiones aproximadas de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, intentando obtener de cada bloque al menos dos probetas, una con el eje perpendicular a los planos de estratificación y otra con el eje paralelo a ellos.

La relación de las probetas así obtenidas, así como sus dimensiones y peso se recogen en la Tabla 2. También se utilizaron los fragmentos obtenidos al cortar el cilindro a sus dimensiones definitivas, para determinar la composición y fisuración.

En todas las probetas falladas se advierten poros a simple vista, algunos de ellos con diámetro igual o superior a 1 mm, pero las que aparecen con mayor porosidad aparente son las dos probetas extraídas según la dirección del estrato en la muestra perteneciente al "sobre banco" (M-3077) y sobre todo, las tres probetas talladas del bloque tomado en el estrato "gordo" (M-3078), tanto la extraída en sentido perpendicular al estrato, como las dos obtenidas en sentido paralelo.

| REFERENCIA LABORATORIO | RELACIÓN ESTRATOS | PROCEDENCIA | DIÁMETRO cm | ALTURA cm | PESO SECO g |
|---|---|---|---|---|---|
| 3075-A | Perpendicular | Cabezal | 4,38 | 8,48 | 339,2 |
| 3075-B | Paralela | | 4,40 | 8,35 | 330,0 |
| 3076-A | Perpendicular | | 4,38 | 8,48 | 330,4 |
| 3076-B | Paralela | Banquillo | 4,38 | 8,50 | 320,9 |
| 3076-C | paralela | | 4,38 | 8,13 | 312,1 |
| 3077-A | Perpendicular | | 4,38 | 7,50 | 295,3 |
| 3077-B | Paralela | Sobrebanco | 4,38 | 8,50 | 318,8 |
| 3077-C | Paralela | | 4,38 | 8,50 | 321,6 |
| 3078-A | Perpendicular | | 4,38 | 8,62 | 309,8 |
| 3078-B | Paralela | Gordo | 4,38 | 8,44 | 284,4 |
| 3078-C | Paralela | | 4,38 | 8,45 | 304,4 |
| 3079-A | Perpendicular | Levante | 4,38 | 8,45 | 327,3 |
| 3079-B | Perpendicular | | 4,38 | 8,50 | 335,9 |

**TABLA 2.** Relación de las probetas talladas de los bloques tomados en el frente de la cantera de Colmenar de Oreja.

## 4.2. ENSAYOS

La composición y fracturación de cada una de las muestras se estudió por observación al microscopio de las láminas delgadas preparadas de los fragmentos separados de las probetas cilíndricas, mediante el análisis de los espectros de difracción de rayos X y por análisis químicos.

El resto de ensayos se realizaron sobre las probetas cilíndricas, según los procedimientos de la norma que se especifica a continuación de las características a determinar, que fueron las siguientes:

**A.** Ensayo para determinar la absorción, realizado según la norma ASTM C-97-83.

**B.** Ensayo para determinar el peso específico aparente, realizado según la norma ASTM C-97-83.

**C.** Ensayo para determinar la velocidad de propagación de ultrasonidos, realizado según la norma ASTM D-2845-69 (1976).

**D.** Ensayo para determinar la resistencia a comprensión simple realizado según la norma ASTM D-3148-80, con una velocidad de deformación inferior a 1,3 mm/minuto.

**E.** Ensayo para determinar el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, realizado según el procedimiento descrito en la norma D-3148-80.

# 5. RESULTADO DE LOS ENSAYOS

## 5.1. COMPOSICIÓN

Las calizas de los bancos utilizados en las edificaciones de Madrid son, en general, carbonato cálcico muy puro con un contenido en carbonatos, determinado por análisis químico, superior al 99 %. Si bien en el "Banco Gordo" existen zonas de poca importancia en las que están presentes cuarzo y feldespatos del tamaño de arena fina.

El origen de los carbonatos en cada uno de los bancos es el siguiente:

**A. BANCO VIDRIOSO.** Constituido por micrita fosilífera, algo glumelar en la base, con porosidad fenestral tapizada de pequeños cristales de calcita. Abundan las charáceas que hacia el techo dejan paso a gasterópodos cuyos moldes están cementados, apareciendo totalmente rellenos de calcita esparítica, más o menos gruesa, transparente a simple vista a la que los canteros llaman "lastra". Este banco presenta algunos indicios de estructura estromatolítica.

**B. BANCO LEVANTE.** Es una caliza fosilífera, formada por micrita fosilífera y biomicrita de charáceas, con un nivel a techo de biomicrita de ostrácodos, formada por pequeños fragmentos de ostrácodos orientados y conteniendo cuarzo y feldespato de tamaño aleurita (0,04-0,006 mm). Abundan en este banco las masas microesparíticas rellenando cavidades de tamaño variable. En posición intraparticular aparecen algunos puntos opacos.

**C. BANCO GORDO.** Es una caliza fosilífera fundamentalmente de charáceas, que conservan en diferente grado su porosidad intraparticular. Los ortoquímicos presentan una proporción variable dentro del banco. En la base predomina micrita, y hacia el techo aumenta el contenido de esparita. Esta tendencia se trunca en el techo del banco formado por biomicrita de ostrácodos, fragmentos orientados que constituyen una facies muy característica. Esta facies da paso, dentro del mismo banco, a caliza arenosa constituida por micrita con cuarzo, feldespato de tamaño de arena fina y masas dendríticas de óxidos.

**D. SOBREBANCO.** Es una caliza fosilífera formada por micrita con charáceas y gasterópodos, aumentando el porcentaje de estos últimos hacia el techo.

Presenta abundante porosidad intra e interparticular, apareciendo generalmente los poros tapizados de pequeños cristales de calcita del tipo geodas. Estos poros aparecen más rellenos de cemento hacia el techo, pero con un hueco central relleno de cristales grandes.

**E. BANQUILLO.** Es una caliza glumelar fosilífera en la que abundan las charáceas pero hay restos también gasterópodos (helícidos), muy bien conservados y homogéneamente orientados, así como grandes fragmentos de ostrácodos.

La porosidad intraparticular disminuye hacia la base del estrato, rellena con cemento calcítico de tamaños de cristal mayores hacia el centro del poro.

En el "Banquillo" son frecuentes las bioturbaciones, total o parcialmente rellenas de sedimento pelitizado.

## 5.2. FRACTURAS Y POROS

No se detectan fracturas a nivel de láminas delgada en estas rocas calizas.

La porosidad más importante en estas rocas es la porosidad primaria, debido a que los tallos de las charáceas e incluso los oogonios aparecen huecos, así como la mayor parte de los ostrácodos, que están enteros, mientras que los moldes de gasterópodos están parcialmente rellenos.

Los poros centrales de interior de los tallos de las charáceas varían de 0,1 a 0,5 mm de diámetro, alcanzando un tamaño máximo de 0,9 mm y su longitud puede alcanzar varios centímetros. Los poros periféricos alcanzan un diámetro máximo de 0,1 mm, los de diámetro menor suelen estar rellenos de carbonato cálcico.

Los diámetros de los huecos en los ostrácodos son de dos tipos, un grupo se sitúa en torno a los 0,2 mm y el otro en torno a 1,2 mm.

Los poros existentes en los moldes de los gasterópodos son muy variables, pero raramente superan las décimas de milímetros.

Además, es muy frecuente encontrar poros tapizados de cristales de calcita, especialmente vugs y poros fenestrales, abundantes en los bancos "cabezal" y "gordo", lo cual contribuye al aspecto característico de la "piedra de Colmenar". La dimensión media de los poros fenestrales es del orden de 0,5-1 mm de diámetro y 0,1 a 0,2 mm de altura.

## 5.3 PROPIEDADES FÍSICAS

La calcita tiene una densidad $\gamma = 2{,}72\ g/cm^3$, y como las rocas existentes en la carretera de Colmenar de Oreja son carbonatos cálcicos con un alto grado de pureza, las variaciones de densidad que se detecten en las muestras analizadas, serán debidas fundamentalmente a los huecos existentes dentro de la roca.

Dentro de estos huecos se han diferenciado los poros accesibles de los poros inaccesibles. Los primeros se pueden determinar a través del peso específico del material, y los segundos a partir de lo que en la norma ASTM C-97-83, se denomina peso específico real.

**5.3.1. Peso específico aparente.** Los resultados de los ensayos realizados sobre la piedra en bloque, y sobre cada una de las probetas talladas de ellas, se recogen en la Tablas 3 y 4 .

Los valores más bajos en el peso específico aparente, que se corresponde, por tanto, con la mayor porosidad, se obtienen en el estrato "gordo", cuyo peso específico aparente en la piedra en bloque es $\gamma_{ap}$ = 2,492 g/cm³, frente al resto de los resultados en piedra en bloque comprendidos entre $\gamma_{ap}$ = 2,556 y $\gamma_{ap}$ = 2,577 g/cm³.

Los resultados obtenidos en las determinaciones sobre probeta talladas del estrato "gordo" también son las más bajas, con densidades entre $\gamma_{ap}$ = 2,381 y $\gamma_{ap}$ = 2,461 g/cm³, tabla VI, mientras que en el resto de las muestras se situaban por encima de $\gamma_{ap}$ = 2,491 g/cm³.

El valor medio de la densidad en las cinco muestras de piedra en rama ensayadas es de $\gamma_{ap}$ = 2,55 g/cm³, que se toma como valor medio característico de las calizas de Colmenar.

**5.3.2. Absorción.** La absorción determinada según la norma ASTM C-97-83, permite conocer las huecos accesibles de una roca. Los resultados se recogen en las Tablas 3 y 4. El valor medio de la absorción, en las cinco muestras de piedra en rama ensayadas, es a = 1,1 %, que se toma como valor medio característico de las calizas de Colmenar.

| REFERENCIA LABORATORIO | $\gamma_r$ g/cm³ | $\gamma_{ap}$ g/cm³ | a % | $n_i$ % | n % |
|---|---|---|---|---|---|
| 3075 | 2,631 | 2,556 | 1,11 | 1,24 | 2,35 |
| 3077 | 2,612 | 2,563 | 0,738 | 1,52 | 2,258 |
| 3078 | 2,584 | 2,492 | 1,414 | 1,93 | 3,344 |
| 3079 | 2,625 | 2,558 | 0,989 | 1,33 | 2,319 |
| 3080 | 2,662 | 2,577 | 1,245 | 0,80 | 2,045 |
| | | | | | |

**TABLA 3.** Características de la roca caliza de Colmenar de Oreja determinadas sobre los bloques tomados en cantera.

$\gamma_r$ = Peso específico real.
$\gamma_{ap}$ = Peso específico aparente.
a = Absorción.
$n_i$ = Porosidad inaccesible = $1/\gamma_r - 1/2{,}72$
n = Porosidad total.

| REFERENCIA LABORATORIO | $\gamma_r$ g/cm$^3$ | $\gamma_{ap}$ g/cm$^3$ | a % | $n_i$ % | n % |
|---|---|---|---|---|---|
| 3075-A+ | 2,665 | 2,638 | 0,383 | 0,759 | 1,142 |
| 3075-B= | 2,659 | 2,609 | 0,727 | 0,843 | 1,570 |
| 3076-A+ | 2,681 | 2,642 | 0,561 | 0,535 | 1,096 |
| 3076-B= | 2,592 | 2,503 | 1,317 | 1,815 | 3,185 |
| 3076-C= | 2,631 | 2,558 | 1,089 | 1,244 | 2,333 |
| 3077-A+ | 2,658 | 2,611 | 0,177 | 0,857 | 1,534 |
| 3077-B= | 2,575 | 2,491 | 1,317 | 2,070 | 3,387 |
| 3077-C= | 2,587 | 2,507 | 1,244 | 1,890 | 3,134 |
| 3078-A+ | 2,519 | 2,381 | 1,292 | 2,933 | 5,225 |
| 3078-B= | 2,680 | 2,443 | 3,620 | 0,549 | 4,169 |
| 3078-C= | 2,543 | 2,641 | 1,314 | 2,559 | 3,872 |
| 3079-A+ | 2,623 | 2,553 | 1,039 | 1,359 | 2,398 |
| 3079-B+ | 2,664 | 2,616 | 0,685 | 0,773 | 1,458 |

**TABLA 4.** Peso específico real y aparente y absorción de las probetas de caliza.

+ Probeta tallada en sentido perpendicular a los estratos.

= Probeta tallada en sentido paralelo a los estratos.

**5.3.3. Porosidad.** La densidad aparente, $\gamma_{ap}$, y la porosidad, n, están ligadas a través de la densidad del material $\gamma_s$, mediante la expresión:

$$\frac{n}{100} = \frac{1}{\gamma_{ap}} - \frac{1}{\gamma_s}$$

La densidad del material es de difícil determinación de forma precisa cuando existen componentes, pero como la caliza de Colmenar es una caliza casi pura, esta densidad se aproximará a la de la calcita $\gamma_s = 2{,}72$ g/cm$^3$.

Por tanto, conocida la densidad de la muestra, se puede conocer su porosidad a través de la expresión mencionada.

Si se representa en un gráfico porosidad-densidad, la anterior expresión, para cada densidad aparente obtendremos un valor de la porosidad. Si en este mismo gráfico situamos los valores de la absorción de cada muestra, se observa que quedan por debajo de la curva anteriormente mencionada y es, precisamente, la diferencia en ordenada lo que nos permite conocer la porosidad no accesible.

Esta porosidad no accesible se puede conocer también directamente a través del valor del denominado peso específico real, obtenida en el ensayo ASTM C-97-83, según se recoge en las Tablas 3 y 4, en donde se calcula también el valor de la porosidad total.

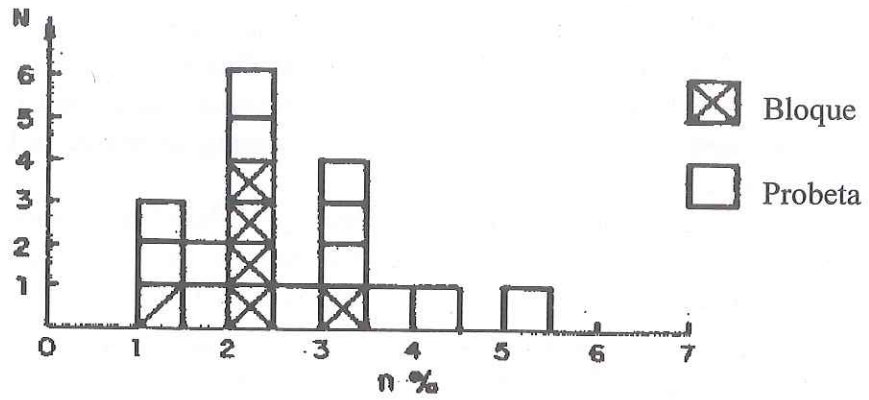



**FIGURA 5.** Distribución de la porosidad total "n" en las muestras de caliza de la cantera de Colmenar.

La distribución de los valores de la porosidad total se recoge en la figura 5. Los valores más altos en la piedra en bloque corresponden al "banco gordo" n = 3,344, y los más bajos al denominado "banco vidrioso", n = 2,045. Los resultados obtenidos sobre las probetas amplían el intervalo de variación a 1,096 < n < 5,225.

El valor medio de la porosidad, en las cinco muestras de piedra en bloque ensayadas, es de n = 2,45, que se toma como valor medio característico de las calizas de Colmenar.

La relación entre la porosidad y absorción, para cada probeta, se recoge en la figura 6, que indica que la absorción, es decir los huecos accesibles, son un 44 % de la porosidad total de la caliza de Colmenar.

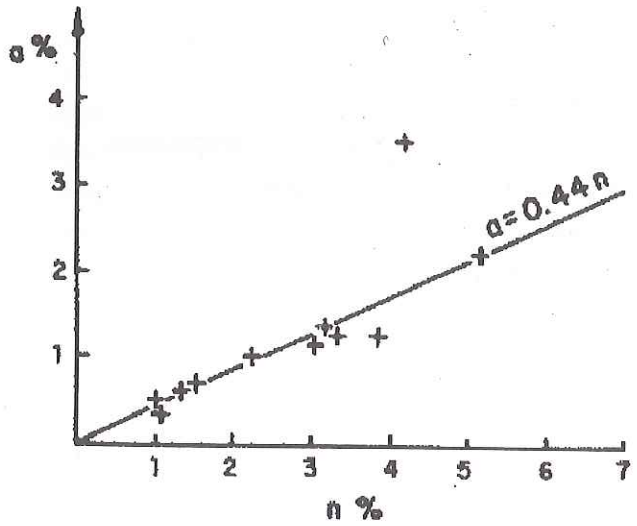



**FIGURA 6.** Relación entre porosidad total "n", absorción "a", en las muestras de caliza de Colmenar.

## 5.4. PROPIEDADES ESTÁTICAS MECÁNICAS

En la Tabla 5 se recogen los valores de la resistencia a compresión simple, módulo de Young y coeficiente de Poisson, obtenidos en las probetas de calizas de Colmenar ensayadas.

La relación entre la resistencia y la densidad aparente, se recoge en la figura 7, aumentando aquélla con ésta.

Utilizando la clasificación de rocas de Deere y Miller (1966), figura 8, basada en los valores de la resistencia a comprensión simple y el módulo de Young, los valores obtenidos califican a las calizas de Colmenar como de resistencia media y elevado módulo relativo.

| REFERENCIA LABORATORIO | $q_u$ Kg/cm$^2$ | E Kg/cm$^2$ | $\nu$ | $V_p$ m/seg. | $V_s$ m/seg. | $\nu_d$ | $E_d$ Kg/cm$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3075-A | | | | 5.579 | 2.924 | 0,31 | 602.000 |
| 3075-B | | | | 6.185 | 2.982 | 0,35 | 638.000 |
| 3076-A | | | | 5.471 | 2.924 | 0,30 | 599.000 |
| 3076-B | 644 | 600.000 | 0,28 | 5.312 | 2.833 | 0,30 | 532.000 |
| 3076-C | | | | 5.807 | 2.710 | 0,36 | 521.000 |
| 3077-A | | | | 5.357 | 2.884 | 0,30 | 434.000 |
| 3077-B | | | | 5.667 | 2.913 | 0,32 | 576.000 |
| 3077-C | 997 | 644.872 | 0,30 | 5.313 | 2.833 | 0,30 | 533.000 |
| 3078-A | 592 | | | 4.490 | 2.535 | 0,26 | 390.000 |
| 3078-B | | | | 4.689 | 2.722 | 0,25 | 461.000 |
| 3078-C | | | | -- | -- | -- | -- |
| 3079-A | 829 | | | 5.216 | 2.817 | 0,29 | 532.000 |
| 3079-B | 889 | 700.000 | 0,29 | 5.313 | 2.881 | 0,29 | 571.000 |

TABLA 5. Propiedades mecánicas estáticas y dinámicas de las calizas de Colmenar de Oreja.

$q_u$ = Resistencia a compresión simple.
E = Módulo de Young.
$\nu$ = Coeficiente de Poisson.
$V_p$ = Velocidad de propagación de las ondas de compresión.
$V_s$ = Velocidad de propagación de ondas de corte.
$\nu_d$ = Coeficiente de Poisson dinámico.
$E_d$ = Módulo de Young dinámico.

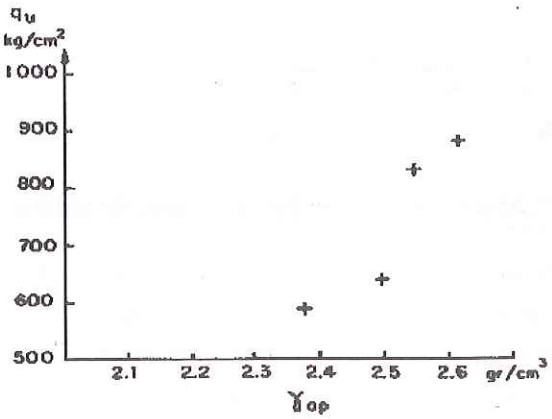



FIGURA 7. Relación entre la resistencia a compresión simple y la densidad aparente

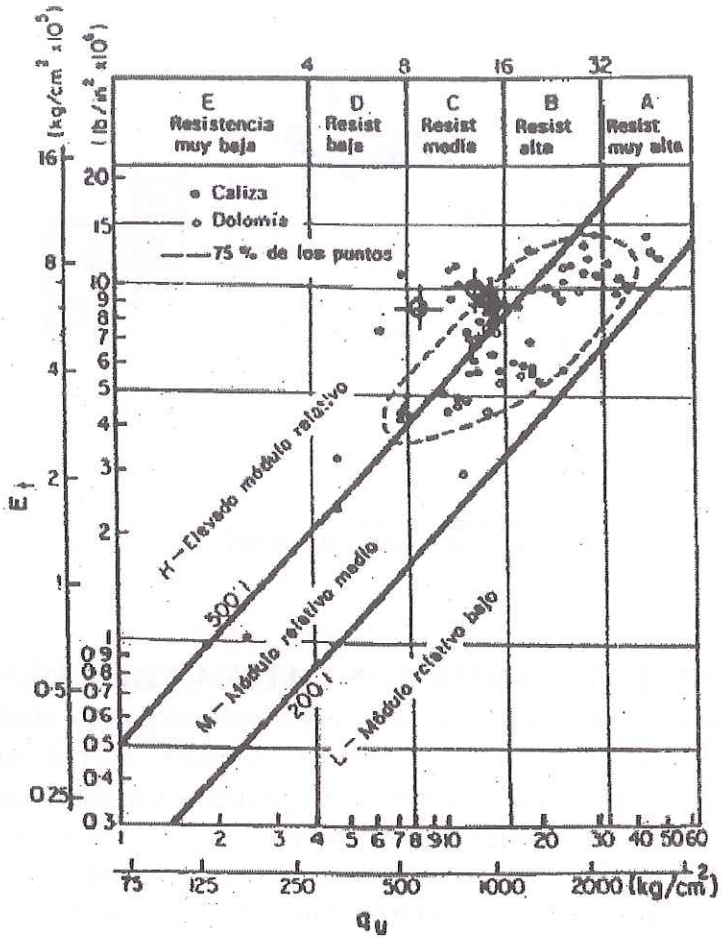



**FIGURA 8.** Situación de las rocas calizas de Colmenar en la clasificación de rocas intactas dada por Deere y Miller, 1996. qu=Resistencia a compresión simple; Et= módulo tangente para el 50% de la carga de rotura.

## 5.5. PROPIEDADES MECÁNICAS DINÁMICAS

Las características mecánicas dinámicas, velocidad de propagación de ondas longitudinales y transversales y los coeficientes de Poisson y módulos derivados de ellas, se recogen en la tabla V. La relación entre la velocidad de propagación de ondas y la densidad aparente, se recoge en la figura 9.

La velocidad de propagación de ondas longitudinales varía entre un máximo de $V_p$ = 6.185 m/seg, correspondiente al denominado "cabezal", y $V_p$ = 4.490 m/seg, correspondiente al "banco gordo". La mayoría de los resultados se sitúan entre $V_p$ = 5.216 m/seg, y $V_p$ = 5.667 m/seg, figura 9.

Los valores de la velocidad de propagación de ondas transversales son más uniformes, figura 9, varían entre $V_s$ = 2.535 m/seg en el banco gordo y $V_s$ = 2.924 m/seg en el banquillo y cabezal.

Los coeficientes de Poisson oscilan entre $\nu$ = 0,25 en el "banco gordo" y $\nu$ = 0,36 en el "banquillo".

El módulo de elasticidad dinámico también tiene sus valores menores en el "banco gordo", E = 390.000 y E = 461.000 Kg/cm², los mayores corresponden a probetas obtenidas en el cabezal E = 638.000 Kg/cm ². El resto de las probetas están entre 500.000 < E < 600.000 Kg/cm².

El mayor interés de estas características, en particular de la velocidad de propagación de ondas longitudinales, radica en el hecho de que, al ser un ensayo no destructivo, se puede aplicar para conocer el estado actual de las estructuras y bloques realizados con esta piedra.

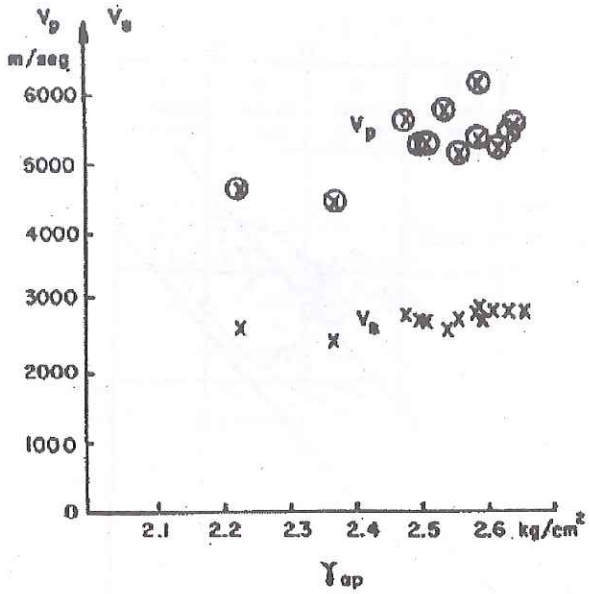



**FIGURA 9.** Relación entre la velocidad de propagación de ondas Vp y Vs y densidad aparente $\nu_{ap}$

## 6. CLASIFICACIÓN DE LAS CALIZAS DE COLMENAR

Las calizas de Colmenar, por su composición, se pueden considerar calizas casi puras.

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, ASTM, clasifica las calizas a utilizar en exteriores de edificios, que es el tema que aquí nos ocupa, en tres categorías que denomina de alta, media y baja calidad, Tabla 6, en función de cinco características, absorción, densidad, resistencia a compresión simple, módulo de ruptura y resistencia a la abrasión.

En este trabajo se han estudiado, entre otras, tres de las características usadas por la ASTM. Según los valores de la absorción, prácticamente todos ellos se mantienen por debajo del 3 %, por lo que podría considerarse como de alta densidad.

Los valores de la densidad, en cambio son más restrictivos, situando el límite de alta densidad en 2,560 g/cm$^3$, que es superado por el 60 % de los valores, estando el resto en la zona de densidad media.

En cambio, según los límites impuestos a los valores de la resistencia a compresión, se consideran de alta densidad cuando se supera el valor $q_u$ = 550 Kg/cm$^2$, que es superado por todos los resultados obtenidos, pudiendo considerarse de alta calidad.

| PROPIEDADES FÍSICAS | CLASIFICACIÓN | | | MÉTODO DE ENSAYO |
|---|---|---|---|---|
| | TIPO I | TIPO II | TIPO III | |
| Absorción máx. (%) | 12 | 7,5 | 3 | C97 |
| Densidad mínima Kg/cm$^3$ | 1.760 | 2.160 | 2.560 | C97 |
| Resistencia compresión mínima Mpa | 12 | 28 | 55 | C170 |
| Módulo de ruptura mínima Mpa | 2,9 | 3,4 | 6,9 | C99 |
| Resistencia abrasión, mínima | 10 | 10 | 10 | C241 |

**TABLA 6.** Clasificación de las rocas calizas a utilizar en exteriores de edificios ASTM C-568.

Tipo I = Se denomina como baja densidad.

Tipo II = Se denomina como de densidad media.

Tipo III = Se denomina como de alta densidad.

## 7. CONCLUSIONES

Las características de la piedra de Colmenar indican que es una caliza casi pura, poco fisurada, muy compacta, con una porosidad total inferior al 2,45 %, con menos de la mitad de los huecos accesibles, con una resistencia media y elevado módulo relativo, lo que permite calificarla dentro de las calizas como de buena calidad.

Además, según la especificación ASTM C568-79 que clasifica las rocas calizas según sus características para utilizarlas en exteriores de edificios, las piedras de Colmenar, se incluyen en el grupo de media alta densidad, es decir de las más adecuadas para este fin.

*"Ingeniería Civil/71"*
*(Pags: 67 a 77)*

**REFERENCIAS:**

ASTM (1981): Anual Book of ASTM Standards, part.19
Soil and Rock: Buildings Stones C568-79.

HERNÁNDEZ PACHECO, E. y HERNÁNDEZ PACHECO, F.
(1926):" Aranjuez y el territorio al sur de Madrid".
Excursión B 3 . XIV Congress Geological International.
Madrid, 84-93.

DEERE, D. V. y MILLER, R.P. (1966): "Engineerings Classification
Index Properties for Intact Rock". Ph. D. Thesis Univ. Illinois.

## TÉCNICAS DE LIMPIEZA

La elección de un determinado sistema de limpieza dependerá de las causas que hayan originado el ensuciamiento, el lugar en que se ha producido y el tipo de acabado superficial de la piedra.

En general, y dadas las excelentes propiedades de la piedra caliza de Colmenar y su inalterabilidad química ante agentes agresivos como la contaminación, suele se suficiente con las técnicas de LIMPIEZA NATURAL:

-Mediante agua limpia (proyectándola pulverizada en el caso de paramentos verticales ) acompañando con un cepillado suave que ayude a desplazar la suciedad. Se recomienda un secado rápido de la superficie para evitar el depósito de las partículas. Puede sustituirse el cepillado por la proyección de agua a presión , más efectivo en ocasiones para extraer la suciedad de los poros accesibles.

-No es recomendable el uso de detergentes o productos limpiadores convencionales, ya que suelen provocar la aparición de manchas.

Cuando existe una adhesión molecular de las partículas, o el acabado superficial hace difícil la salida de aquellas que se han introducido, hay que recurrir a algún tipo de disolvente diluido en agua. Existen empresas especializadas en la limpieza química de la piedra con una gama bastante amplia de productos para la solución concreta de cada tipo de problema (se incluye al final del documento información técnica facilitada por una de estas firmas):

-Limpiadores decapantes-pasivantes para la limpieza de piedra caliza en ex teriores.

-Limpiadores decapantes-pasivantes para la limpieza de piedra caliza en interiores (no corrosivos y exentos de emisión de gases tóxicos).

-Limpiadores pasivantes anti-graffiti con diferentes grados de acidez para los diferentes acabados de la piedra.

-Limpiadores disolventes de grasas animales y vegetales, decantación en paramentos de humos, efectos del tabaco, etc.

El sistema de limpieza es muy sencillo: se aplica el producto que corresponda en disolución con una brocha de pelo sintético, según las recomendaciones del fabricante, y se aclara con hidrolimpiadora. Este tipo de tratamientos tiene la ventaja de que facilita la limpieza de la piedra, ya que no es necesario un cepillado de la superficie y actúa superficialmente sin erosionar el material.

Los sistemas de limpieza mecánica no son los más adecuados, ya que lo que hacen es erosionar la superficie de la piedra. En casos en los que no exista otra solución ( por el grado de penetración de la suciedad) y se trate de elementos de espesor suficiente, se puede recurrir a técnicas muy variadas: desde un simple cepillo de púas metálicas, hasta la bujarda, como sistemas manuales, o cepilladoras o bujardas eléctricas, entre las automáticas, o incluso el chorreado con distintos materiales más o menos duros.

## TÉCNICAS DE PROTECCIÓN

Cualquiera de estas técnicas de limpieza química y en especial mecánica, afectan inevitablemente a la estructura superficial de la piedra y, por tanto, a su porosidad y características físicas consecuentes. Por ello, en la restauración de elementos arquitectónicos, se suele acompañar la limpieza con algún tipo de tratamiento posterior de estabilización superficial y de protección. Los tratamientos más comunes son la "consolidación" y la "hidrofugación".

La **consolidación** consiste en impregnar la piedra deteriorada, principalmente por procesos de pérdida de cohesión importante, con productos orgánicos o inorgánicos que penetren por el sistema poroso de la roca y cementen en su interior, adquiriendo o recuperando la dureza original y mejorando con ello su resistencia.

Las propiedades que debe reunir el tratamiento de consolidación son:
-Buena penetración hasta la zona no alterada de la roca.
-Disminuir la absorción de agua (de lluvia o vapor de agua)
-No reaccionar con el soporte dando lugar a subproductos que puedan dañar posteriormente la piedra.
-Aumentar la resistencia mecánica de la piedra.
-No modificar el color y el brillo del soporte

La acción del agua favorece la entrada de agentes agresivos al interior de la piedra, por tanto, la aplicación de productos **hidrófugos** o **hidrorrepelentes** evita la degradación de la piedra. Estos productos actúan de formas diferentes, por un lado, rellenando los poros de la roca, otros mediante la formación de una película que aisla la roca del medio ambiente y otros cuya película tiene un ángulo de contacto agua-producto superior a 90° y, en consecuencia, es repelida de su superficie y no puede penetrar a través del sisitema poroso de la piedra.

Los requisitos mínimos de estos productos para poder ser utilizados en la restauración de elementos arquitectónicos son:
-No modificar la permeabilidad del vapor de agua de la piedra por encima de un 10%.
-Disminuir la absorción de agua en valores superiores al 70%.
-No modificar o aumentar la velocidad de evaporación del agua que penetre en la piedra.
-Elevada capacidad de penetración.
-No producir subproductos dañinos.
-Resistencia a los álcalis y ácidos, así como a la radiación UV.
-Reversibilidad y posibilidad de aplicar nuevos tratamientos.
-Buena adhesión.
-Compatibilidad con consolidante.
-No producir variaciones por oscilaciones térmicas.
-No producir alteración cromática y de brillo de su superficie.

Las propiedades petrofísicas de las rocas varían con la aplicación de los productos conservantes. Se han analizado los efectos de varios consolidantes e hidrofugantes en la piedra caliza de Colmenar utilizada en la Catedral de Toledo y en la Puerta de Alcalá de Madrid. Los productos analizados han sido:

Consolidantes:
- -Éster orgánico de ácido silícico (EOS)
- -Polimetil metacrilato (PMC)

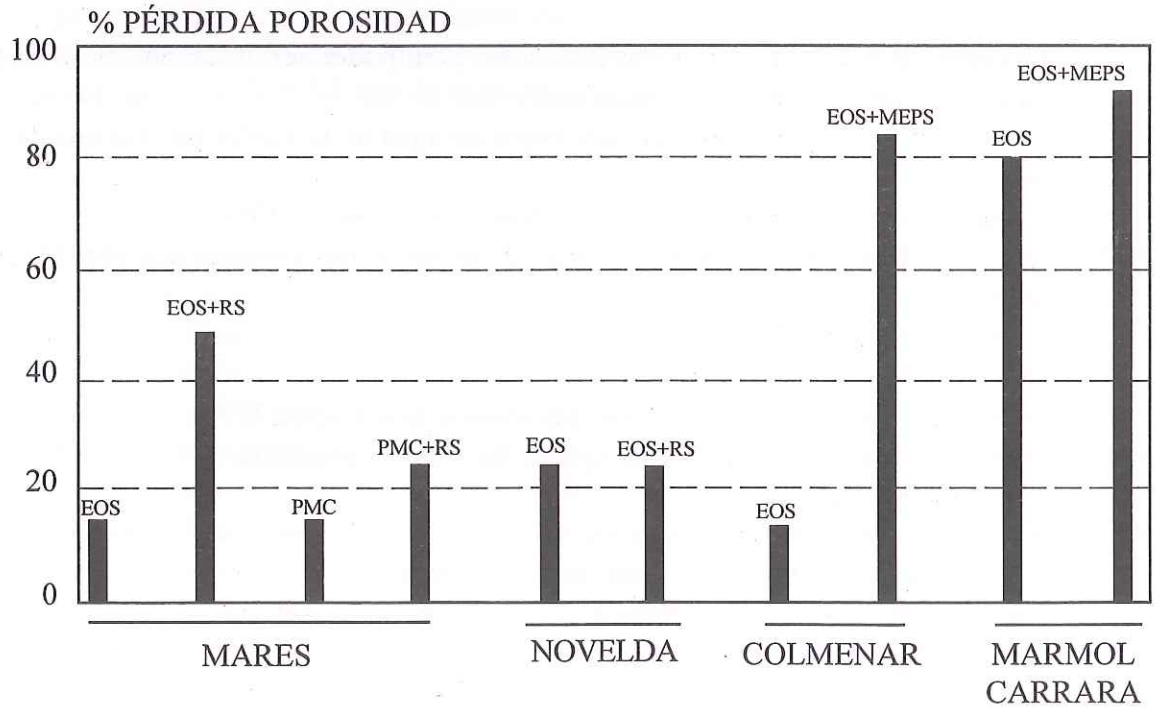
Hidrofugantes:
- -Oligosiloxanos (RS)
- -Metiletoxipolisiloxanos (MEPS)

Los resultados observados son los siguientes:

-*La densidad real y densidad aparente* de las rocas tienden a cambiar al ser tratadas con consolidantes e hidrofugantes, puesto que estos, sobre todo los consolidantes formados por ésteres orgánicos de ácidos silíceos (EOS), tienden a rellenar los poros de las rocas, sustituyendo los huecos llenos de aire por productos que tienen una mayor densidad. Por ello, la tendencia es que la densidad aparente tiene que aumentar al aplicar el producto, mientras que la densidad real disminuye, haciendo que ambos valores se aproximen, lo que nos indica una disminución de la porosidad efectiva de la roca producida por el tratamiento. En el caso de la piedra de Colmenar, (tanto en la utilizada en la Catedral de Toledo, como en la Puerta de Alcalá de Madrid) se ha observado que el hidrofugante MEPS es especialmente efectivo en el aumento de la densidad aparente.

-La disminución de la *porosidad* de la piedra de Colmenar llega a un 80% con la aplicación de hidrofugantes del tipo MEPS. También en el caso de los hidrofugantes del tipo RS los resultados son buenos, pudiendo llegar a una reducción de la porosidad en torno al 30%.

**MODIFICACION DE PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LAS ROCAS**



Pero la efectividad de este tipo de tratamientos no sólo se puede medir por la reducción de la porosidad que produzcan, sino que también es importante conocer los cambios que van a producir en el tamaño de poros. Es necesario que la actuación de los productos sobre la distribución de los poros sea selectiva, produciendo una disminución de la porosidad para los tamaños más pequeños, puesto que éstos son los que van a facilitar el acceso del agua a la roca por efectos de capilaridad, e incluso va a ser en estos poros donde los efectos de cristalización de sales y efectos hielo-deshielo van a ser más intensos. Pero sin olvidar que es necesario dejar transpirar la roca, por lo que la destrucción total de esta porosidad puede llegar a ser perjudicial. Por otro lado, interesa saber el porcentaje que existe de cada tipo de porosidad (cerrada, abierta, atrapada, libre, etc.) de la roca y conocer igualmente su distribución de tamaños. El tratamiento de EOS en la caliza de Colmenar y sobre todo de MEPS da lugar a una disminución importante de la porosidad de entre 0.005 y 0.3 μm. De diámetro, y un ligero aumento de los poros de diámetro mayor de 10 μm.

-La reducción de la *superficie específica* como consecuencia de la aplicación del hidrofugante MEPS es de un 85 a un 98%.

-*Comportamiento de la roca ante el agua.* La efectividad de los hidrofugantes únicamente será alta en aquellas rocas donde el tamaño de los poros sea pequeño, dado el buen comportamiento de la caliza de Colmenar y la baja capacidad de absorción, la disminución de ésta se da en un porcentaje muy pequeño. Lo mismo ocurre con el coeficiente de capilaridad, dado el tamaño de los poros de la piedra de Colmenar y su bajo coeficiente de capilaridad, la disminución de éste no es muy relevante.

-Propiedades mecánicas: La aplicación de consolidantes va a producir un aumento de la calidad mecánica de la roca. La velocidad de propagación del sonido va a aumentar principalmente en los materiales en los que se han utilizado ésteres de ácido silícico y en menor grado las resinas acrílicas del tipo polimetilmetacrilato (PMC). Exactamente igual ocurre con los módulos de rigidez de las piedras tratadas. La eficaia de estos productos va a depender de su capacidad de penetración en la roca. Los hidrofugantes mejoran ligeramente las propiedades mecánicas de la roca, pero en un grado mucho más bajo que los consolidantes, como es lógico.

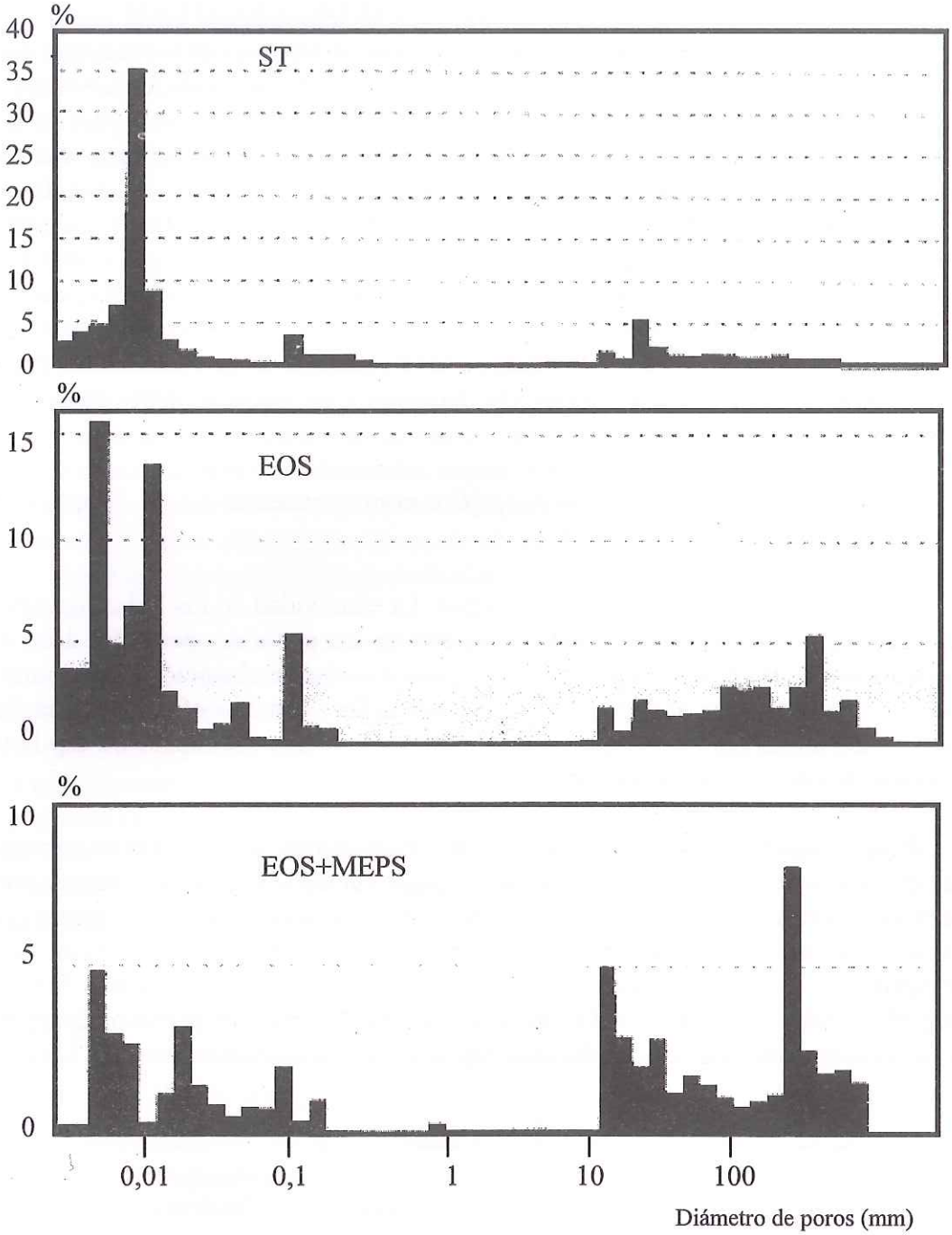



**Figura 4.** Distribución de tamaños de poros de la caliza de Colmenar de la Puerta de Alcalá, con diferentes tratamientos.

-Aspecto externo: A veces la aplicación de estos productos conservantes puede producir pequeñas variaciones en el color de la roca, nada más aplicarlas o incluso con el paso del tiempo, principalmente por la acción de la radiación ultravioleta del sol. Esto hace necesario siempre estudiar el comportamiento de la roca ante estos productos cuantificando las variaciones de su aspecto externo.

Por lo general, los tratamientos suelen producir una disminución de la luminosidad del color de la piedra, dando un aspecto de estar húmeda. Con el paso del tiempo, esta variación cromática tiende a desaparecer.

**REFERENCIAS:**

MONJO CARRIÓ, J (1997) *"Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos".*
Editorial Munilla-Lería

FORT GONZÁLEZ; R (1996): *" La consevación de la piedra monumental" y "Modificación de propiedades petrofísicas de las rocas con la utilización de consolidantes e hidrofugantes"* .
CURSOS DE VERANO DE EL ESCORIAL. "Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico"
(Dirigido por: Francisco Mingarro Martín).
Editorial Complutense.

# PIEDRA DE COLMENAR