ESTUDIO DE LAS ROCAS CALIZAS, UTILIZADAS DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX EN LA CONSTRUCCION DE LOS PALACIOS DE MADRID (1)

JUAN ENRIQUE DAPENA GARCIA (*)
SALVADOR ORDOÑEZ DELGADO (**)
M.ª ANGELES GARCIA DEL CURA (***)

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 actuales exigidas a las rocas calizas a utilizar en los exteriores de edificios.

ABSTRACT. *The tertiary limestone near Colmenar de Oreja (Madrid) was used in the construction of various palaces and other outstanding buildings in Madrid in the 18th and 19th centuries, and the practice has continued up to the present day. This article studies the characteristics of the limestone in the different deposits that are quarried and these are compared with the specifications that are now required for limestone that is to be used for building* surfaces.

1. INTRODUCCION

Las calizas de 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.

(1) Artículo presentado en el Congreso sobre «La Geología del Ingeniero aplicada a los monumentos y lugares históricos», Atenas, 1988.

(*) Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (MOPU).
(**) Facultad de Geología, UCM.
(***) Instituto de Geología Económica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

2. GEOLOGIA 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 valles 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 Cen-

tro 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 carstificación 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).

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 hacia 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 techo. 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 daclasas verticales rellenas de arcillas que permiten el arranque de los bloques sin usar procedimientos mecánicos complejos.

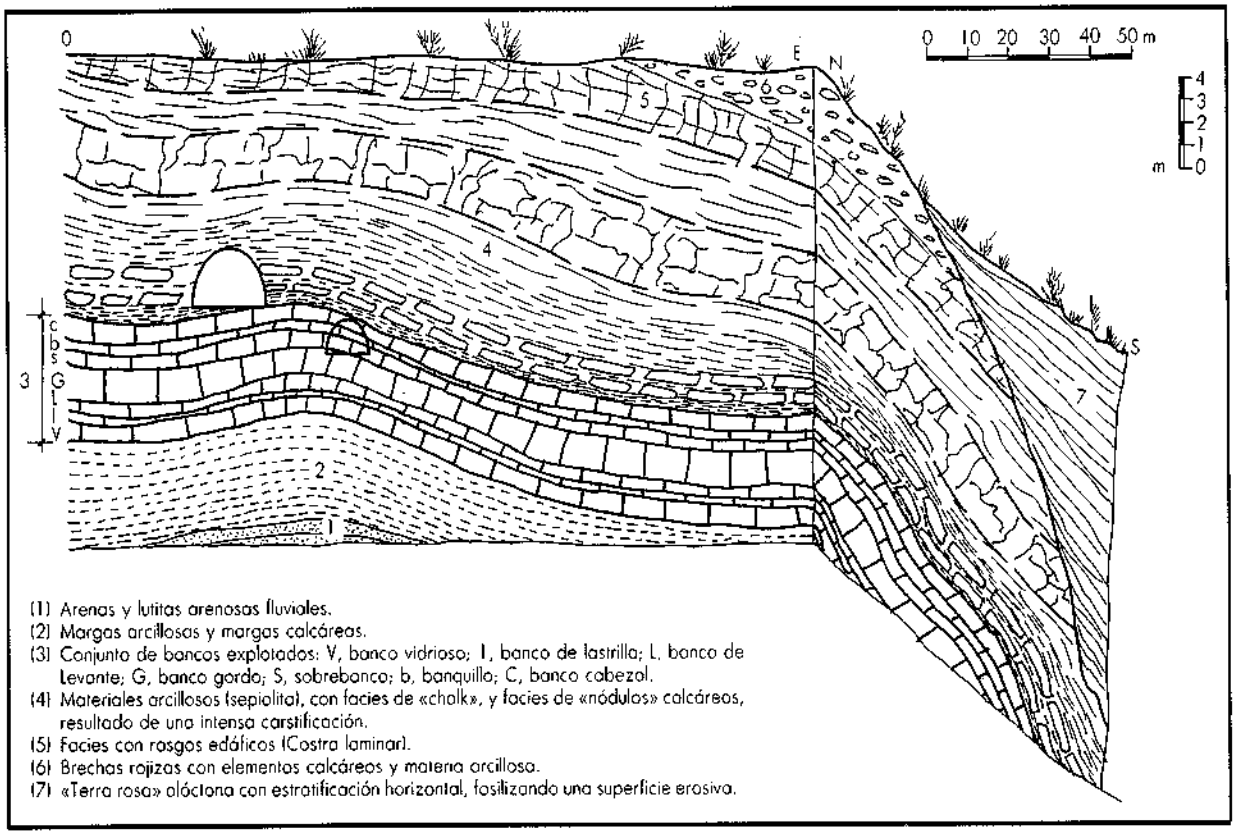


FIGURA 1. Corte esquemático del ángulo NE de la cantera de Colmenar de Oreja.

3. TOMA DE MUESTRAS EN LAS CAPAS DE CALIZA UTILIZADAS 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 indicando 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, desprendiéndolos 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 se indicó la dirección perpendicular a los estratos para poder detectar la existencia de posibles anisotropías, en particular se sabe 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.

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.

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.

4.1. PREPARACION 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 recoge 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 talladas 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 «sobrebanco» (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	RELACION ESTRATOS	PROCEDENCIA	DIAMETRO 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	Banquillo	4,38	8,48	330,4
3076-B	Paralela		4,38	8,50	320,9
3076-C	Paralela		4,38	8,13	312,1
3077-A	Perpendicular	Sobrebanco	4,38	7,50	295,3
3077-B	Paralela		4,38	8,50	318,8
3077-C	Paralela		4,38	8,50	321,6
3078-A	Perpendicular	Gordo	4,38	8,62	309,8
3078-B	Paralela		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 compresión 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. COMPOSICION

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 (0,004-0,06 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 de 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 de 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 lámina 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 del 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 FISICAS

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 en la 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 las Tablas 3 y 4 y su distribución en la figura 2.

Los valores más bajos en el peso específico aparente,

REFERENCIA LABORATORIO	γ_r g/cm^3	γ_{ap} g/cm^3	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.

γ_r = Peso específico real
γ_{ap} = Peso específico aparente
a = Absorción
n_i = Porosidad inacesible = $1/\gamma_r - 1/2{,}72$
n = Porosidad total

REFERENCIA LABORATORIO	γ_r g/cm^3	γ_{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	3,873
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 las estratos.
→ Probeta tallada en sentido paralelo a los estratos.

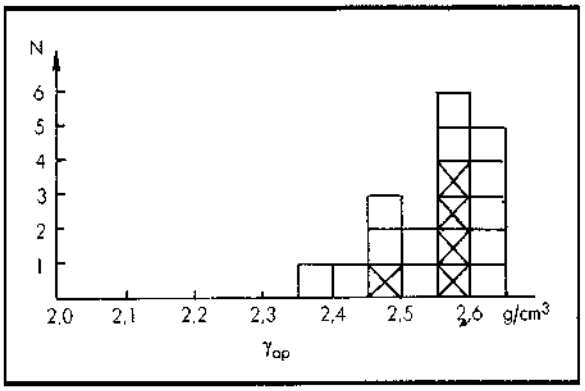


FIGURA 2. Distribución de la densidad aparente γ_{ap} de muestras de caliza de la cantera de Colmenar. ⊠ Bloque, □ Probeta.

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/cm^3, frente al resto de los resultados en piedra en bloque comprendidos entre $\gamma_{ap} = 2{,}556$ y $\gamma_{ap} = 2{,}577$ g/cm^3.

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/cm^3, tabla IV, mientras que en el resto de las muestras se situaban por encima de $\gamma_{ap} = 2{,}491$ g/cm^3.

El valor medio de la densidad en las cinco muestras de piedra en rama ensayadas es de $\gamma_{ap} = 2{,}55$ g/cm^3, 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 los huecos accesibles de una roca. Los resultados se recogen en las Tablas 3 y 4, y su distribución en la figura 3. 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.

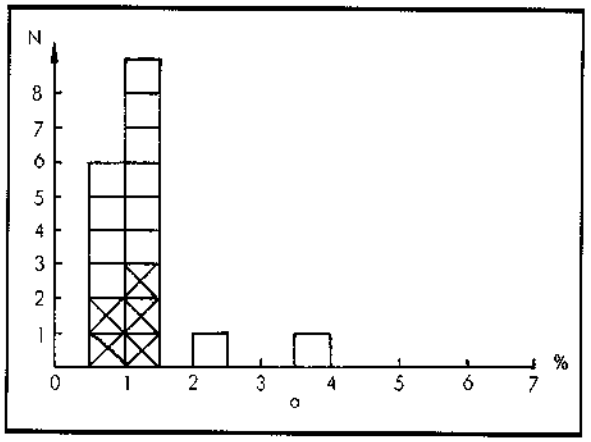


FIGURA 3. Distribución de la absorción «a» en las muestras de la caliza de la cantera de Colmenar.

5.3.3. Porosidad. La densidad aparente, γ_{ap}, y la porosidad, n, están ligadas a través de la densidad del material γ_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 varios 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, figura 4, para cada densidad aparente obtendremos un valor de la porosidad. Si en este mismo gráfico situamos los valores de la absorción de cada muestra, figura 4, 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.

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 caraterístico de las calizas de Colmenar.

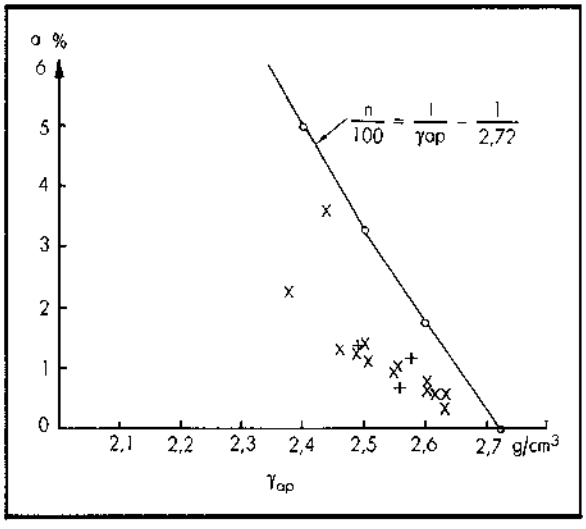


FIGURA 4. Relación entre el peso específico aparente γ_{ap} y la absorción «a», en piedra en bloque (+) y en probeta (x).

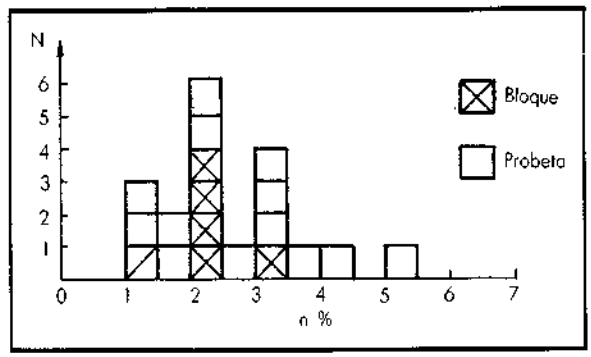


FIGURA 5. Distribución de la porosidad total «n» en las muestras de caliza de la cantera de Colmenar.

La relación entre 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.

5.4. PROPIEDADES ESTATICAS MECANICAS

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 compresión simple y el módulo de Young, los valores obtenidos califican a las calizas de Colmenar como de resistencia media y elevado módulo relativo.

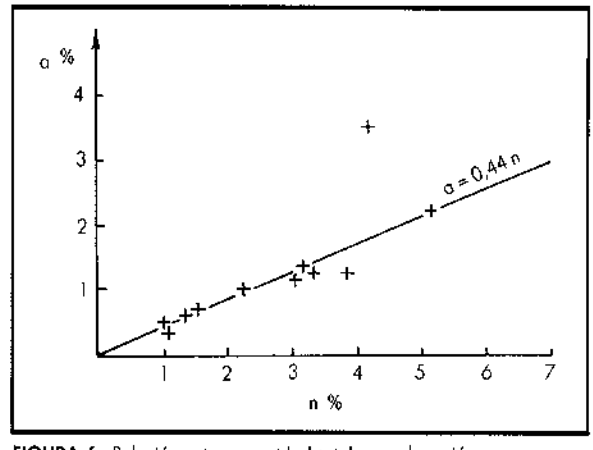


FIGURA 6. Relación entre porosidad total «n», absorción «a», en las muestras de la caliza de Colmenar.

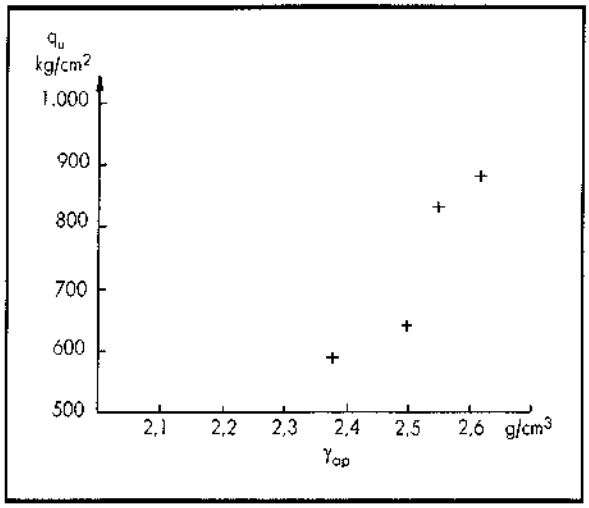


FIGURA 7. Relación entre la resistencia a compresión simple, q_u, y la densidad aparente, γ_{ap}.

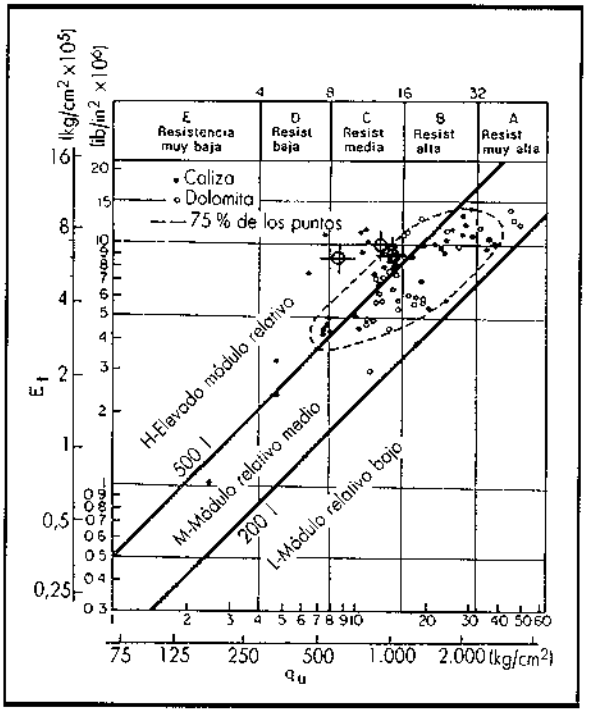


FIGURA 8. Situación de las rocas calizas de Colmenar en la clasificación de rocas intactas dada por Deere y Miller, 1966. q_u = Resistencia a compresión simple. E_t = módulo tangente para el 50 % de la carga de rotura.

5.5. PROPIEDADES MECANICAS DINAMICAS

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.

REFERENCIA LABORATORIO	q_u kg/cm²	E kg/cm²	ν	V_p m/seg.	V_s m/seg.	ν_d	E_d kg/cm²
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.
ν = Coeficiente de Poisson.
V_p = Velocidad de propagación de ondas de compresión.
V_s = Velocidad de propagación de ondas de corte.
ν_d = Coeficiente de Poisson dinámico.
E_d = Módulo de Young dinámico.

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.

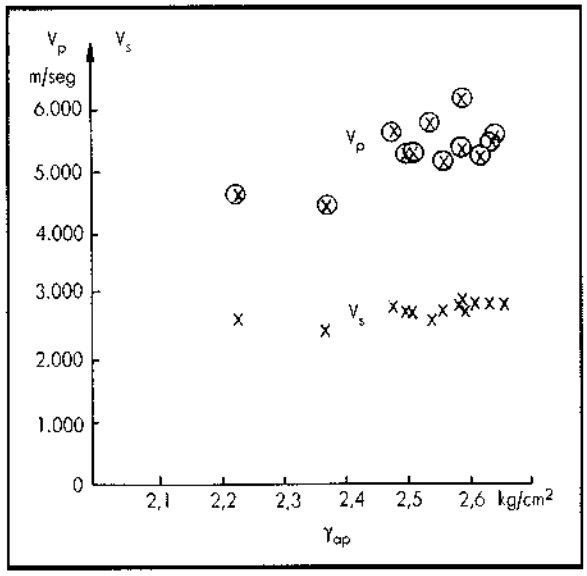


FIGURA 9. Relación entre la velocidad de propagación de ondas V_p y V_s y densidad aparente γ_{ap}.

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/cm². 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 esculturas y bloques realizados con esta piedra.

6. CLASIFICACION 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 %, figura 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/cm³, que es superado por el 60 % de los valores, figura 2, 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 $qu = 550$ kg/cm², que es superado en todos los resultados obtenidos, pudiendo considerarse de alta densidad.

En la figura 10 se recogen los resultados de los ensayos obtenidos al estudiar la caliza de Colmenar de Oreja, situados gráficamente sobre los tres tipos de calizas de la clasificación de la ASTM C-568.

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 accesible, con una resistencia media y elevado módulo relativo, lo que permite calificarla dentro de las calizas como de buena calidad.

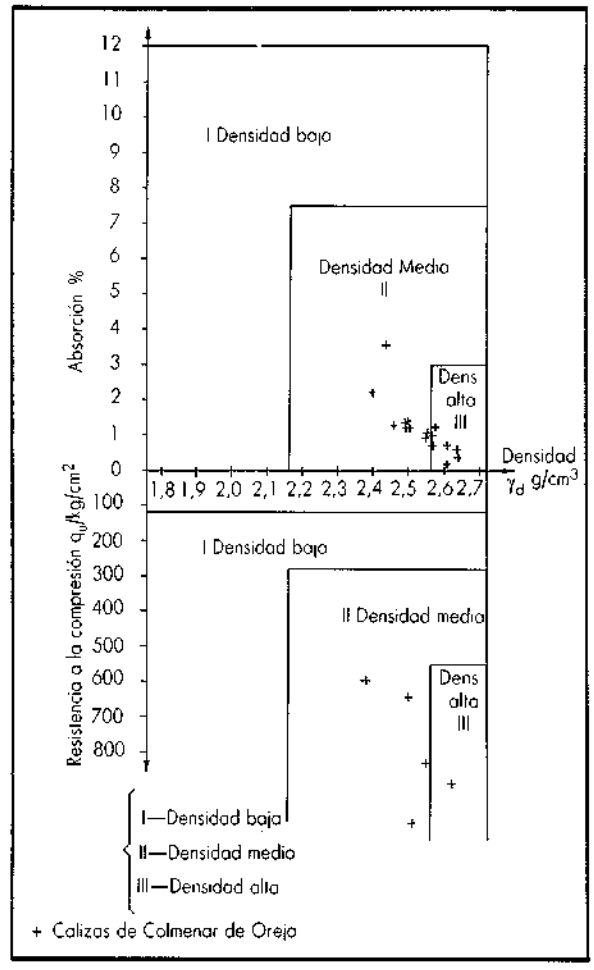


FIGURA 10. Clasificación de las rocas calizas a utilizar en exteriores de edificios en función de la absorción, densidad y resistencia según la ASTM

LOS 4 TIPOS MAS DUROS DE LA CIUDAD

GRACIAS A EL SE ACABARON LAS CASUALIDADES

Stadip Antiagresión: Dirigido a los escaparates de cualquier tipo de comercio. Porque nadie está libre de una pedrada o un balonazo. Por eso, en caso de rotura, el vidrio permanece en el bastidor, sin acceso al interior.

IMPERTURBABLE INCLUSO ANTE LAS BALAS

Stadip Antibala: Obligatorio para los establecimientos en los que se manejan fondos, drogas u objetos de gran valor. No sólo impide el paso de las balas, sino que evita la proyección de esquirlas de vidrio al interior del local. Imprescindible en instalaciones policiales y militares.

EL DURO MAS TIERNO CON LAS PERSONAS

Stadip Seguridad Física: Dos lunas de alta seguridad que, en caso de rotura, no permiten que los trozos de vidrio se desprendan, evitando el riesgo de accidente.
Especialmente indicado para el hogar, escuelas, guarderías, centros deportivos, centros sanitarios...

EL AZOTE DE LOS AMIGOS DE LO AJENO

Stadip Antirrobo: El que exige la ley para joyerías o locales continuamente expuestos a robos. Tres lunas de alta resistencia, capaces de hacer frente a ataques reiterativos.
El primer vidrio diseñado para decir adiós de una vez por todas al riesgo de robo.

PARA VIVIR TRANQUILO

ACRISTALAMIENTO DE SEGURIDAD
STADIP

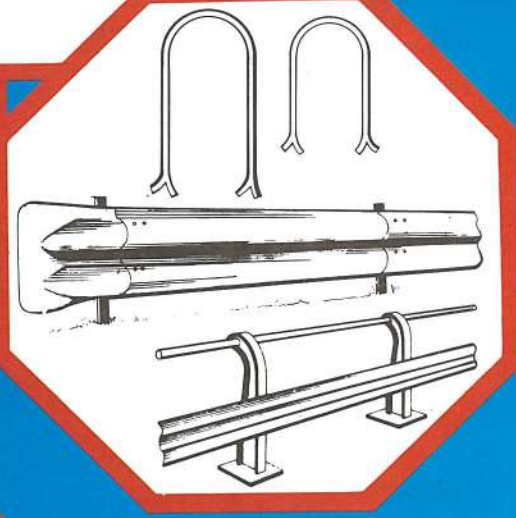
CRISTALERIA ESPAÑOLA, S.A.
SOLUCIONES DE VIDRIO

TODO EN SEÑALIZACION Y SEGURIDAD VIAL

• Equipos reflectantes para Policía Municipal.

• Señales de Tráfico pintadas y reflexivas.

• Nueva señalización urbana.



• Barreras de Seguridad.

• Señalización para obras.

señalizaciones **VILLAR**

Avda. Valladolid, 58 apdo. 61 42004 SORIA

Telf. (975) 22 05 04 Fax (975) 22 06 45

PROPIEDADES FISICAS	CLASIFICACION			METODO 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.

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.

REFERENCIAS

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

HERNANDEZ PACHECO, E., y HERNANDEZ-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 and Index Properties for Intact Rock». Ph. D. Thesis Univ. Illinois.

Detrás de esta medalla.

Hay una gran marca.

Una gran marca que impulsa, que da energía al deporte español.
Una marca como **Empresas Eléctricas Unesa** que, con su apoyo económico, hace posible que nuestro equipo de remo, a toda potencia, establezca nuevas marcas y navegue seguro hacia Barcelona '92 para estar a la altura de los mejores.

Desde aquí nuestro reconocimiento a

Empresas UNESA Eléctricas

PATROCINADOR DEL EQUIPO OLIMPICO DE REMO

Asociación Deportes Olímpicos 1992