

Las canteras de calizas de los interfluvios de los ríos Jarama-Tajuña-Tajo en la Comunidad de Madrid: Valoración de recursos.

Por M. A. GARCIA DEL CURA(*), S. ORDOÑEZ (**), E. DAPENA (***)
y J. A. GONZALEZ MARTIN (****)

RESUMEN

Un conjunto de calizas situadas en los interfluvios de los ríos Jarama-Tajuña-Tajo en la Comunidad de Madrid, explotadas más intensamente en las últimas décadas, son estudiadas como recurso geológico. Estas calizas pertenecen básicamente a la Unidad Superior del relleno neógeno de la Cuenca de Madrid y en menor proporción a la Unidad Terminal. Se analizan sus características para diferentes usos estableciéndose unas posibles reservas de mil millones de toneladas, que podríamos considerar prácticamente ilimitadas a efectos de la producción de cemento.

Las propiedades químicas y mecánicas de estas calizas, así como la presencia de algunas fábricas tobáceas de notable belleza sugieren una explotación racional escalonada de las calizas como: rocas ornamentales, áridos de machaqueo, cales, cargas, etc. Se aconseja una centralización de todas las explotaciones existentes en dos o tres cortas diseñadas correctamente en cuanto a la minimización del impacto ambiental.

Palabras clave: Rocas industriales, Calizas, Neógeno, Cuenca de Madrid.

ABSTRACT

Lacustrine-fluvial limestones (Jarama-Tajuña-Tajo interstreams), Upper and Terminal Units of Neogenous Madrid basin has been mined recently for crushed stones, cement and lime raw materials.

Inferred reserves from more than trusty stratigraphical sections rise up to 1 billion tonnes of highest chemical purity that may envisaged as ilimited for the present day demand of cement raw materials.

The chemical and mechanical properties and some times the nice tufaceous fabric suggest a rational and staged recovery of limestone as dimension stone, crushed stones, lime, raw materials, fullers and cement raw materials.

Geological and environmental considerations let us point out the opportunity of concentrate the numerous and scattered present open pits in a few biggest mines, with a staged recovery of limestone resources.

Key words: Industrial rocks, limestone, Neogene, Madrid basin.

(*) Instituto de Geología Económica (C.S.I.C.). Laboratorio de Petrología Aplicada. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Apdo. 99. 03080 Alicante.

(**) Laboratorio de Petrología Aplicada. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Apdo. 99. 03080 Alicante.

(***) C.E.D.EX C/. Alfonso XII, 3. 28014 Madrid.

(****) Departamento de Geografía. U.A.M. Cantoblanco. 28049 Madrid.

I. INTRODUCCION

Este estudio tiene por objeto la valoración como recurso minero de un tipo de roca industrial *las calizas* en una zona concreta, desde el punto de vista geográfico y litoestratigráfico, de la Cuenca de Madrid, en la que existen en los últimos años varias canteras activas (ITGE, 1988), cuyo número se ha visto incrementado recientemente. En esta zona se sitúan las canteras de la denomi-

ada *Caliza o Piedra de Colmenar*, que tuvieron gran importancia en el pasado (HERNANDEZ PACHECO, E., y HERNANDEZ PACHECO, F., 1926; HERNANDEZ PACHECO, F., 1945; DAPENA y otros, 1989, y GARCIA DE MIGUEL y otros, 1992) / cuyo valor como elemento de reparación de muchos monumentos de Madrid es enorme. Para la realización de este trabajo se ha precisado de un estudio inicial de la base física cuyos resultados van a constituir la primera parte del presente artículo.

I. ESTUDIO DE LA BASE FISICA

1) Geología

Los materiales explotados (fig. 1) pertenecen básicamente a la *Unidad Superior* del relleno neógeno de la Cuenca de Madrid (MEGIAS y otros, 1983; CALVO y otros, 1989), si bien algunos de ellos se sitúan por encima de dicha Unidad (ORDOÑEZ y otros, 1986, y GARCIA DEL CURA y otros, 1991). La Unidad Superior está separada de la Unidad Intermedia infrayacente por una captura sedimentaria debida, según se deduce del carácter fluvial y la distribución de los sedimentos de la Unidad Superior, a una destrucción de las condiciones generales de endorreísmo, consecuencia de procesos tectónicos-erosivos.

En la zona, la litología de la Unidad Superior, está constituida por materiales detríticos finos de colores ocres, que intercalan depósitos canalizados de arenas y conglomerados sueltos: *Serie detrítica de la Unidad Superior*. Estos materiales pasan de modo insensible hacia la parte superior a calizas masivas, más o menos biogénicas (traertínicas), dispuestas en bancos métricos con estratificación ondulada y desarrollo de suaves liegues decamétricos, con predominio de carbonatos de facies fluviales con facies similares a las descritas por ORDOÑEZ y GARCIA DEL CURA, 1983, incluso las micritas y calizas de charáceas presentes pueden pertenecer al medio fluvial, recordemos al respecto los sedimentos de este tipo actuales y paraactuales existentes en las Tablas de Daimiel. Estas calizas han sido adicionalmente denominadas *Calizas de los Páramos*, terminología poco rigurosa, según veremos cuando analicemos el significado del *Páramo* en el apartado de geomorfología, de ahí que utilizemos, por considerarla más precisa, la deno-

minación de *Serie carbonática de la Unidad Superior*.

Uno de los lugares donde mejor puede observarse esta *Unidad Superior* es en los alrededores de Campo Real (ORDOÑEZ y GARCIA DEL CURA, 1986). En dicho término, al sur del pueblo y desde la cota de éste a cotas superiores, pueden observarse depósitos tipo barra arenosa de espesor decimétrico, desarrollados sobre depósitos de llanura de inundación en los que se observan rasgos de edafización, la fracción arcillosa de estos sedimentos detríticos es fundamentalmente ilítica, con proporciones variables, que pueden llegar a ser altas, de caolinita; por su composición mineralógica los materiales arenosos pueden definirse como subarcosos. Sobre estos depósitos detríticos aparecen calizas tobáceas, algunas de las cuales muestran facies de tallos verticales, siendo más frecuentes las tobas de tallos cruzados (fundamentalmente tobas de charáceas), ambas presentan texturas estromatolíticas. Dichas tobas alternan en secuencias con tobas detríticas (calcarenitas tobáceas), localmente aparecen secuencias decimétricas de materiales carbonáticos ricos en materia orgánica-limos calcáreos, que pasan hacia la parte superior a calizas oscuras. También localmente se observan niveles estromatolíticos. Los términos superiores de esta serie presentan abundancia de calizas algáceas con facies oncólíticas y estromatolíticas muy cementadas de gran valor ornamental.

A techo de las calizas de la Unidad Superior y penetrando en ellas de modo irregular, aparece un sistema cárstico de tipo poligénico, con desarrollo de formas de reconstrucción y relleno predominantes de materiales de tipo *terra rossa* y diferentes tipos de perfiles según su situación geomorfológica (SANZ y otros, 1994). La distribución y espesor de estos materiales karstificados condiciona el volumen de material no canterable.

Hacia el sur de la zona estudiada en este trabajo se observan perfiles maduros de calcretas sobreimpuestos sobre las calizas de la Unidad Superior (CALVO y otros, 1986; SANZ y otros, 1989 y 1991). Idéntico carácter edáfico tiene la *Costra Laminar Multiacintada* descrita por PEREZ GONZALEZ (1982) en la Mesa de Ocaña y por VAUDOUR (1979) al S de Alcalá de Henares (croûte feuilletée et rubanée del Cerro Garabilla, páramo

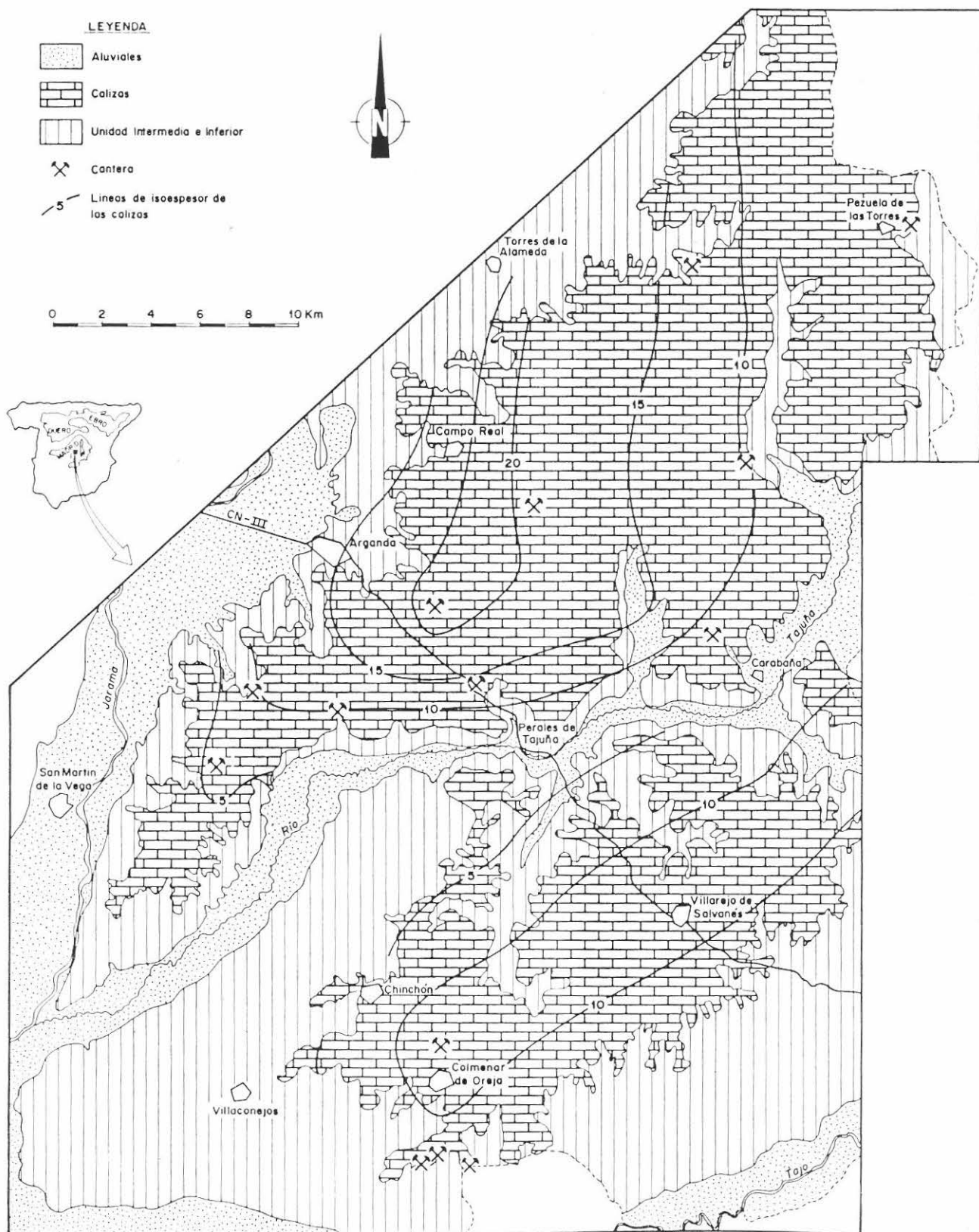


Figura 1.—Mapa de situación y encuadre geológico de las canteras estudiadas.

Las muestras estudiadas se sitúan en las siguientes coordenadas: Morata: $40^{\circ} 15' N - 3^{\circ} 29' O$. Hoyón: $40^{\circ} 15' N - 3^{\circ} 22' O$. Campo Real: $40^{\circ} 21' N - 3^{\circ} 20' O$.

central o *Alcarria madrileña*). Esta costra corresponde a una etapa posterior del relleno de la Cuenca o *Unidad Terminal* (¿Plioceno?).

El hecho de que la *Costra Laminar Multiacintada* esté asociada en algunos puntos a unas facies detríticas de lutitas y arenas con canales, donde localmente aparece otro conjunto de calizas biogénicas fluviales de facies variadas (tobas de musgos, tobas de tallos, calizas oncolíticas...) ha dado lugar, a veces, a cierta confusión sobre la litoestratigrafía de esta zona en particular, ya que los carbonatos fluviales pliocenos están restringidos a la parte SO de la Cuenca. La distribución irregular, asociada a antiguas redes de drenaje, cuya posición experimenta variaciones con el tiempo, de los sedimentos fluviales (detríticos y carbonáticos), contribuye a aumentar dicha confusión, ya que son muy contados los puntos en que, como en Villarrubia de Santiago, puede encontrarse toda la serie. Esta complejidad puede explicarse por el desarrollo de uno o más episodios edáficos sobre diferentes materiales cuya presencia es función de las condiciones geomorfológicas existentes en el momento de su génesis (paleogeomorfología).

b) Geomorfología

En el área resalta claramente una superficie erosiva poligénica, que afecta a las calizas y a los productos de su carstificación, así como, donde éstas no se hayan expuestas, a los depósitos terrígenos de su base. El ciclo erosivo actual se encaja sobre esta superficie dando lugar a terrazamientos y hombreras, desarrollados sobre las unidades infrayacentes a la Unidad Superior, y que destacan por su continuidad en el paisaje de los valles actuales de los ríos de la red del Tajo.

El estado actual de los conocimientos hasta 1990 puede resumirse en:

- La topografía culminante del páramo corresponde a una superficie de erosión que arrasa calizas neógenas de distintas edades (Unidad Intermedia, en la provincia de Guadalajara: Brihuega, Ledanca, etc., y Unidad Superior, en los páramos de Madrid).
- Esta superficie de erosión se asocia a una *superficie de degradación* dirigida por la co-

rosión química en el Plioceno Medio o Superior y que originó numerosas formas kársticas e importantes relictos de *terra-rossa*.

- En el Villafranquiense Medio, el páramo de Madrid, hasta entonces cubierto uniformemente por *terra rossa* es basculado hacia el sur. Ello origina el descenso generalizado que se advierte en las capas calizas desde los Santos de la Humosa (900 m) hasta Chinchón y Colmenar de Oreja (760 m); entre estos dos dominios se insinuó el denominado *Sinclinal de Morata*, donde las calizas se sitúan en torno a los 720 m - 700 m. Este basculamiento reactivó la erosión que eliminó la *terra rossa* de los sectores altos y los acumuló en las zonas más deprimidas de aquél (sur de Perales de Tajuña, Colmenar de Oreja, etc.). Coetáneamente, un clima de cierto talante seco originó un encostramiento brechoide.
- Finalmente, el encajamiento de la red fluvial incide progresivamente en los terrenos neógenos originando los valles actuales.

III. LAS CALIZAS DE LOS INTERFLUVIOS DE LOS RIOS JARAMA-TAJUÑA-TAJO COMO RECURSO MINERO

a) Volumen del recurso geológico considerado

- El espesor explotable, varía en toda la superficie erosiva del Páramo desde 0 m hasta 20 m, por lo que se puede estimar que las reservas de este tipo de materiales son superiores a 1.000 millones de m³.
- La distribución de los espesores es muy irregular, pudiendo asegurarse que los mayores espesores se desarrollan en la parte central de los interfluvios.
- Los recubrimientos de terras rosas y otros materiales no utilizables varían desde prácticamente 0 m, hasta alcanzar potencias de algunos m.

b) Propiedades tecnológicas

1. Análisis químico

De los análisis químicos medios realizados por

GARCIA CALLEJA (1991) y GARCIA CALLEJA y otros (1991) de las calizas de la Unidad Superior, se deduce que el contenido en sílice es inferior al 7 por 100, presentando valores medios del orden de 1,5 por 100. El contenido en óxido de calcio es generalmente superior al 49 por 100, alcanzando a veces valores de hasta el 55 por 100. Los bajos coeficientes de variación de este componente, reflejan una gran homogeneidad química de las calizas, lo que le convierte en una materia prima ideal, tanto para la fabricación de clinker, como para otros usos; cales, cargas, etc.

Hay que indicar que los límites anteriormente señalados se refieren al producto ya explotado (todo uno) disponible en los acopios, si bien, como habíamos indicado, estos parámetros pueden fluctuar en el yacimiento entre límites mucho más amplios.

Igualmente, el óxido de hierro III y la alúmina, presentan unos parámetros químicos con valores inferiores respectivamente al 0,75 por 100 y al 2,75 por 100.

El contenido en trióxido de azufre, cloruros y alcalinos, se encuentra muy por debajo de los valores máximos normalmente utilizados (0,7 por 100 SO_3 ; 0,1 por 100 Cl^- y 1 por 100 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), circunstancia muy favorable para la fabricación del clinker, habida cuenta del peligro que puede entrañar para el cemento portland y otros usos un excesivo contenido en estos componentes.

2. Análisis petrográfico

Las calizas de la Unidad Superior del relleno neógeno de la Cuenca de Madrid, en las que básicamente se sitúan la mayoría de las canteras objeto del presente estudio, presentan una gran variedad de facies, como corresponde a medios fluviolacustres, encontrándonos gran diversidad de carbonatos biogénicos (gran variedad de calizas oncolíticas, estromatolíticas y tobáceas) y calizas micríticas más o menos fosilíferas (con gasterópodos, ostrácodos y charáceas), con frecuentes improntas edáficas y kársticas (tal y como se vio anteriormente) (lámina I). Lógicamente en las explotaciones muestreadas están menos representadas las calizas arenosas que en el conjunto de calizas de la zona.

A continuación vamos a incluir un breve resu-

men de la litología de las principales canteras estudiadas:

Cantera habilitada para vertedero de residuos inertes de la CAM, Arganda (antes cantera de Dragados)

Se trata de una antigua explotación de calizas de tonos blanco grisáceos, de gran pureza, en la que los componentes detríticos son escasos o nulos, según los diferentes niveles, básicamente presenta una serie de secuencias tobáceas donde episodios tobáceos de facies de tallos cruzados y subparalelos alternan con episodios tobáceos con textura micrítica, estando también presentes episodios oncolíticos. Presentan por tanto un claro predominio de calizas biogénicas: micritas y micritas fosilíferas con diferentes tipos de morfología algáceas, cabiendo destacar la presencia de algunos niveles de charáceas. También se observan algunos niveles intraclásticos, tanto con intraclastos angulosos como redondeados (gravels) (lámina I,2). Como fósiles presentes hay que citar ostrácodos y en mucho menor porcentaje gasterópodos. Son frecuentes las bioturbaciones y en algunos puntos, especialmente a la microescala, se observan procesos diagenéticos que han dado lugar a morfologías cristalinas de tipo kárstico, poco importantes cuantitativamente, pero muy variadas texturalmente. Algunos de los niveles de esta antigua explotación son potencialmente rocas ornamentales.

En consecuencia, las muestras estudiadas, y debido a la práctica ausencia de terrígenos siliciclásticos, no van a presentar, en principio, ningún tipo de problema para su trituración y machaqueo en las plantas habitualmente utilizadas en la preparación de materias primas para cementos.

No obstante, y debido al carácter a veces micrítico de las muestras, podrían producirse ocasionalmente, problemas de embozamiento en algunas unidades de la planta de machaqueo.

La explotación de El Hoyón

Situada a la altura del Km 32 de la antigua carretera Madrid-Valencia.

Esta explotación se realiza básicamente sobre

calizas biogénicas blanquecinas, con escasos indicios de componentes detríticos, que presentan una notable variedad de facies, en su mayoría relacionadas con algas: facies oncolíticas, facies tobáceas estromatolíticas desarrolladas sobre charáceas, abundancia de velos algáceos y gasterópodos, así como algunos ostrácodos enteros (lámina I, 1 y 3). Todos estos componentes están generalmente asociados a micrita, pudiendo denominarse las rocas explotadas micritas fosilíferas e incluso biomicritas. En algunos niveles se observan rasgos de edafización (tipo gley). Son relativamente frecuentes los cementos polietexturales con distribución geopetal y los *bird eyes*, en general la porosidad intrapartícula e interpartícula está cementada total o parcialmente, disminuyendo notablemente la porosidad eficaz de la roca.

La cantera de Valderribas el Alto

En esta cantera se han explotado unas calizas, de tonos rosáceos, con gran variabilidad, tanto en cuanto a texturas, como a mineralogía, ya que el porcentaje de minerales detríticos (cuarzo, feldespatos, micas y minerales de arcilla), así como óxidos de hierro, varía mucho dentro del conjunto de calizas que han sido objeto de explotación. Así pueden observarse desde calizas biogénicas: calizas oncolíticas y estromatolíticas, hasta calizas arenosas con diferentes grados de edafización, e incluso, puntualmente de karsificación.

Las Calizas Colmenar de Oreja

En la zona de Colmenar de Oreja existen explotaciones conocidas de calizas como materiales de construcción ya en el siglo XVIII, no descartándose explotaciones anteriores. En este punto las calizas de la Unidad Superior presentan, junto a un contenido medio en carbonato cálcico superior al 99 por 100, espesores máximos respecto al resto de la Cuenca de Madrid, lo cual ha contribuido a que su explotación fuera especialmente rentable. Esta rentabilidad se ha visto aumentada por las características petrográficas de las facies aquí presentes; baja porosidad eficaz, relativa facilidad para el pulido y notable belleza, debido en gran parte a la presencia de fósiles y de carbonato mesocristalino cementante de la porosidad inter e intrapartícula; caracte-

terísticas petrográficas que se reflejan en unas buenas propiedades físicas que las definen como buen material para su utilización en exteriores (ver apartado de propiedades físicas).

Tradicionalmente, en estas calizas se han distinguido una serie de bancos, separados entre sí por niveles no coherentes, y que presentan ligeras diferencias petrográficas. Estos bancos, de techo a muro, son:

- Cabezal, cuya potencia oscila entre 0,5 m y 0,8 m.
- Banquillo, con potencia de 0,2 m a 0,4 m.
- Sobrebanco, con potencia de 0,8 m a 1,0 m.
- Banco Gordo, como su nombre indica el más potente: de 1,2 m a 1,8 m.
- Banco de Levante, de 0,4 a 0,7 m, antiguamente, cuando estas canteras se explotaban mediante minería subterránea, se extraía el mineral de este banco para dejar caer el *Banco Gordo*, de ahí su nombre.
- Lastra: de potencia inferior a 0,3 m.
- Banco Vidrioso: de 0,1 m a 0,8 m de potencia.

Petrográficamente, las calizas que constituyen estos bancos pueden definirse como calizas micriticas más o menos fosilíferas con cantidades variables de esparita que pueden incrementarse hasta llegar a constituir rocas que pueden definirse como bioesparitas, siendo su componente fósil más característico las charáceas, tanto tallos (parte vegetativa) como girogonitos (oogonios) (lámina I, 4, 5 y 6). Los gasterópodos, tanto en forma de moldes, como ejemplares completos, son también relativamente abundantes, especialmente en el techo del Banco Vidrioso y del Sobrebanco, así como en el Banquillo. Encontramos facies de ostrácodos orientados (biomicritas) en el techo del Banco de Levante y del Banco Gordo. Es frecuente que la porosidad intrapartícula (huecos correspondientes a charáceas y helícidos) esté tapizada de cristales de calcita, originando unas microgeodas con morfología orgánica, lo que reduce considerablemente la porosidad eficaz y es una de las características que a simple vista sirve para identificar a las Calizas de Colmenar.

Explotaciones más recientes son las de la planta de áridos de machaqueo de Campo Real y varias explotaciones menores en las proximidades del pueblo de Morata de Tajuña, de las que se

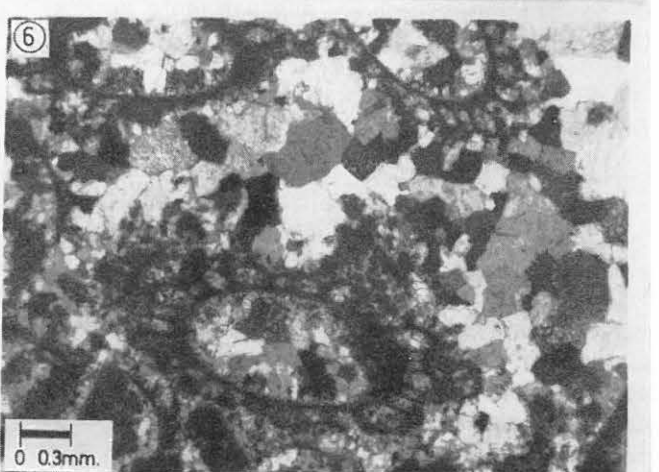
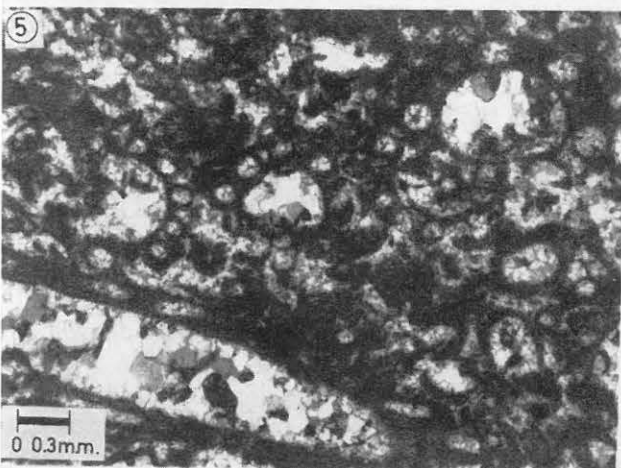
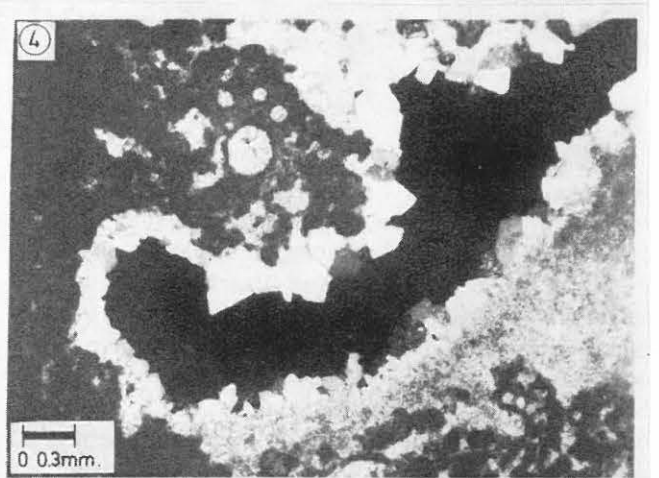
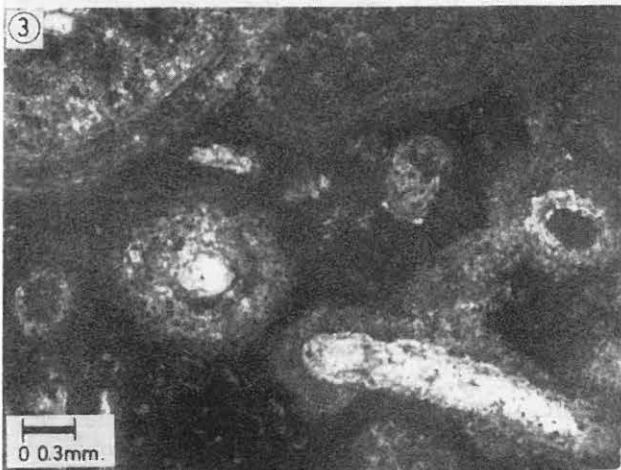
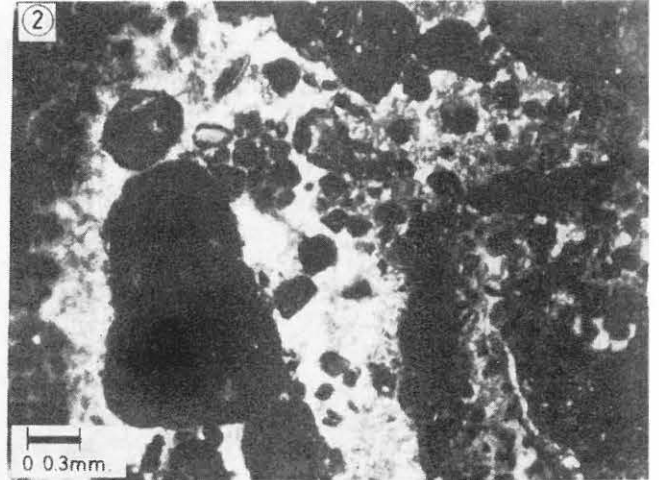
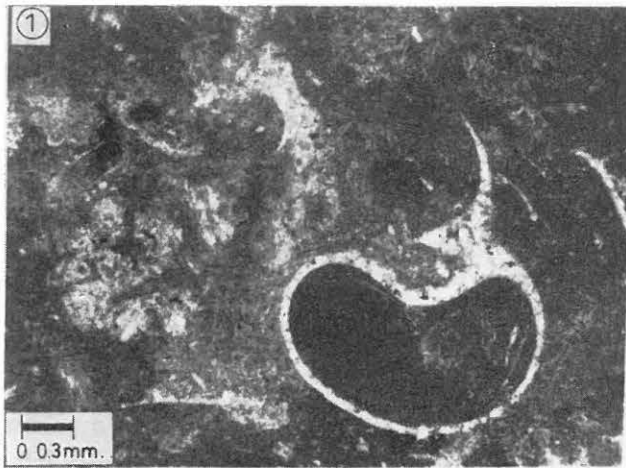


Lámina I.—1) Microfotografía de micrita fosilífera mostrando una sección parcial de gasterópodo. Cantera de El Hoyón. Nícoles cruzados. 2) Microfotografía de intraesparita con algunas microestructuras algáceas. Vertedero de residuos inertes de Arganda (antigua cantera de Dragados). Nícoles paralelos. 3) Microfotografía de biomicrita con estructuras estromatolíticas (toba estromatolítica de charáceas) y fragmentos de ostrácodos. Cantera de El Hoyón. Nícoles paralelos. 4) Microfotografía de geoda con relleno calcítico polifásico en una biomicrita de charáceas. Caliza de Colmenar; Banco de Levante. Nícoles cruzados. 5) Microfotografía de bioesparita con diferentes secciones y fragmentos de *tallos* de charáceas. Caliza de Colmenar; Sobrebanco. Nícoles cruzados. 6) Microfotografía de bioesparita con secciones transversales de *tallos* de charáceas. Caliza de Colmenar; Sobrebanco. Nícoles cruzados.

ha estudiado las propiedades físicas de sus materiales.

3. Propiedades físicas

Se realizaron una serie de ensayos sobre *probetas cilíndricas*, con unas dimensiones de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura obtenidas de los bloques recogidos en los frentes de canteras actualmente en explotación, obteniéndose al menos dos probetas de cada bloque. Los ensayos realizados, según las correspondientes normas, fueron los siguientes:

- 1) Ensayos para determinar la absorción, realizados según la norma ASTM C-97-83.
- 2) Ensayos para determinar el peso específico aparente, realizados según la norma ASTM C-97-83.
- 3) Ensayos para determinar la resistencia a compresión simple, realizados según la norma ASTM D-3148.80, con una velocidad de deformación inferior a 1,3 mm/minuto.
- 4) Ensayos para determinar la velocidad de propagación de ultrasonidos, realizados según la norma ASTM D-2845-69 (1976).
- 5) Ensayos para determinar el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, realizados según la norma D-3148.80.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos.

Absorción:

Determinada según la norma ASTM C-97-83, permite conocer los huecos accesibles de una roca. Los resultados se recogen en la tabla I. El valor

medio de la absorción es 1,73 y está comprendido entre 0,62 y 3,73 (en las Calizas de Colmenar el valor medio es 1,1).

Peso específico aparente:

Los resultados de los ensayos se recogen en la tabla I. El intervalo de variación de estas densidades se encuentra entre $\delta = 2,48$ y $\delta = 2,64$ y su valor medio es $\delta = 2,54$ gr/cm³ (en las Calizas de Colmenar dicho valor medio es de 2,55 g/cm³, siendo el valor menor el correspondiente a las calizas del *Banco Gordo* que variaba entre 2,38 y 2,46 g/cm³).

Resistencia a compresión simple y ensayo de carga puntual (Franklin):

Los valores obtenidos en las probetas de calizas ensayadas se recogen en la tabla II. Su valor medio es $q_n = 89,04$ MP_a. En las Calizas de Colmenar este valor oscila entre 58 y 98 MP_a.

En la ingeniería práctica la resistencia a rotura es un buen criterio de clasificación de rocas. La resistencia a rotura puede ser determinada mediante el ensayo de compresión simple, como se ha visto, o bien mediante el ensayo de carga puntual. El método de compresión simple, exige una infraestructura, que impide poder usarlo en el campo con facilidad. Sin embargo el ensayo de carga puntual puede ser usado sobre el terreno sobre probetas irregulares además de permitir obtener un número elevado de datos para cada afloramiento o cuerpo a explotar. Por esta razón se pensó que el ensayo de carga puntual podría resultar útil para una definición rápida de la calidad de los materiales, ya que en el caso que nos ocupa las canteras presentan frentes de dimensiones pequeñas y de una gran heterogeneidad aparente.

Entre los datos procedentes del ensayo de carga puntual y la resistencia a compresión simple se estima un factor de conversión de 24, ver BROCH y FRANKLIN (1972). Más recientemente TURK y DEARMAN (1985), han señalado que quizá este ensayo debería tomarse como un test rápido de calidad de rocas. Recientemente GHOST y SRIVASTAVA (1991), señalan la posibilidad de que el ensayo de carga puntual pueda ser usado como un criterio de clasificación ingenieril de rocas.

MUESTRA	P.E.A.	P.E.S.	P.E.R.	A %
HOYON	2,53/.03	2,57/.02	2,65/.01	1,79/.40
HOYON	2,60/.03	2,63/.02	2,68/.01	1,09/.34
MORATA	2,63/.01	2,64/.00	2,67/.00	0,65/.04
MORATA	2,57/.02	2,61/.02	2,67/.01	1,71/.39
MORATA	2,54/.03	2,58/.03	2,64/.04	1,48/.19
MORATA	2,49/.02	2,56/.02	2,68/.01	2,84/.32
CAMPO REAL	2,56/.04	2,60/.03	2,67/.02	1,71/.37
CAMPO REAL	2,51/.09	2,56/.06	2,65/.02	2,22/.99

Tabla I.—Valores medios y desviación estándar del peso específico aparente (P.E.A.); peso específico aparente (P.E.S.); peso específico real (P.E.R.), y % de absorción de agua (A %).

El método seguido para la determinación fue siguiendo la *Propuesta de nueva Norma NLT: Ensayo para determinar el índice de resistencia puntual*, elaborada por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Del análisis de la Propuesta de Norma, se desprende que *está pensada para obtener resultados en muestras de campo*, pudiendo ensayarse las probetas saturadas en agua. Por otra parte, aunque se prefieren las probetas de forma cilíndrica, existe la posibilidad de ensayar probetas de formas irregulares, ver el apartado de procedimientos de la Propuesta de Norma, siempre que tengan una dimensión media entre $+50/-35$ mm, y con una relación D (diámetro)/W(anchura) entre 0,3 y 1, preferiblemente 1. La distancia L (longitud punto de aplicación-extremo más próximo), debe ser por lo menos $0,5 W$. A partir de estos datos se puede calcular el valor del *Índice de Resistencia a la Carga Puntual (I_s)*, definido para el caso que nos ocupa por la ecuación:

$$I_s = \frac{P \cdot \pi}{4W \cdot D}$$

para obtener el índice $I_s(50)$, *Índice de Resistencia a la Carga Puntual Estadarizado*, se aplica la ecuación:

$$I_s(50) = I_s \cdot \sqrt{\frac{AW \cdot D}{50\pi}}$$

Los resultados del estudio mediante el *test de carga puntual* aparecen reflejados en la tabla II, por orden de menor a mayor, incluyendo para comparación los datos de resistencia a compresión simple.

Una clasificación basada en el ensayo de carga puntual, aplicable a estabilidad de taludes, ha sido desarrollada por SELBY (1980), y permite aplicar los datos del test al diseño de los taludes y bermas de las explotaciones. La clasificación se recoge en la tabla III.

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 muestran en la tabla IV.

CANTERA.	I (50)	q_c
MORATA	30,3	*
MORATA	38,5	451,4
HOYON	49,5	*
HOYON	52,3	*
CAMPO REAL	55	*
HOYON	57,8	1000,4
MORATA	57,8	989,
HOYON	60,5	*
MORATA	60,5	*
CAMPO REAL	60,5	*
CAMPO REAL	60,5	*
MORATA	63,3	*
CAMPO REAL	66,0	*
CAMPO REAL	66,0	*
CAMPO REAL	66,0	*
MORATA	71,5	1192,5

Tabla II.

Calidad	I (50) Kg/cm ²
Muy débil	0.4 - 10.
Débil	10. - 20.
Medio	20. - 40.
Fuerte	40. - 80.
Muy fuerte	> 80.

Tabla III.

La velocidad de propagación de ondas longitudinales varía entre un máximo de $V_p = 6,531$ m/seg y $V_p = 5,589$ m/seg. La media de los resultados se sitúa en $V_p = 6,100$ m/seg. En las Calizas de Colmenar la velocidad de propagación de ondas longitudinales varía entre un máximo de $V_p = 6.185$ m/seg en el banco *Cabezal* y $V_p = 4.490$ m/seg en el *Banco Gordo*, situándose la mayoría de los resultados entre $V_p = 5.216$ m/seg y $V_p = 5.667$ m/seg.

Los coeficientes de Poisson oscilan entre $\nu = 0,34$ y $\nu = 0,38$. En las Calizas de Colmenar esta oscilación es entre $\nu = 0,25$ en el *Banco Gordo* y $\nu = 0,36$ en el *Banquillo*.

El módulo de elasticidad dinámico está entre $47.989 \text{ MP}_a \leq E \leq 61.413 \text{ MP}_a$. En cuanto a las Calizas de Colmenar este módulo también tiene sus valores menores en el *Banco Gordo*: entre 39.000 MP_a y 46.100 MP_a , correspondiendo los mayores valores de módulo elástico a muestras

MUESTRA	E (Mpa)	G (Mpa)	Poisson
HOYON	56.302	20.752	0,36
HOYON	55.354	20.403	0,36
HOYON	57.328	21.312	0,34
HOYON	59.130	21.640	0,37
MORATA	57.401	20.844	0,38
MORATA	57.401	20.844	0,38
MORATA	60.150	22.156	0,36
MORATA	61.143	22.637	0,36
MORATA	53.762	19.698	0,36
MORATA	52.493	19.253	0,36
CAMPO REAL	47.989	17.717	0,35
CAMPO REAL	48.486	17.901	0,35
CAMPO REAL	54.186	19.705	0,37
CAMPO REAL	59.359	21.879	0,36
CAMPO REAL	56.026	20.628	0,36
CAMPO REAL	55.931	20.493	0,36

Tabla IV.—Módulos de Poisson, G y E, obtenidos mediante el uso de velocidades sónicas.

del banco *Cabezal*: 63.800 MP_a, en el resto de los bancos de las Calizas de Colmenar el módulo elástico varía entre 50.000 y 60.000 MP_a.

4. Usos

— Fabricación de clinker de cemento Portland

En general las calizas de la Unidad Superior del Mioceno de la Cuenca de Madrid presentan una calidad aceptable como componente principal del crudo del clinker del cemento portland, con algunos problemas de bajos rendimientos en la molienda en algunas calizas poco coherentes (margosas y/o micríticas poco cementadas). Además en la Unidad Inferior, especialmente en facies marginales, se encuentran sedimentos detríticos finos (lutitas y arcillas) que pueden utilizarse como componente secundario del clin-

ker del cemento portland (arcillas de Alcalá de Henares y de La Sagra). Estas arcillas, debido a su composición, son susceptibles de ser utilizadas en cementos especiales que tienen un factor limitante en álcalis más elevado. Es de interés resaltar al respecto que la Unidad Intermedia del relleno neógeno de la citada Cuenca suministra también yesos de buena calidad, sin inclusiones de anhidrita, que pueden ser utilizados como regulador de fraguado (por ejemplo yesos de Chinchón y de Colmenar de Oreja).

A modo de resumen se puede decir que las calizas de la Unidad Superior del Mioceno de la Cuenca de Madrid, constituyen una magnífica materia prima de componente primario para la fabricación de clinker de cemento Portland, tanto por sus características químicas, como por la proximidad de materiales susceptibles de ser usados como componente secundario, y regulador de fraguado. Sin embargo, la existencia de otros usos más nobles aconseja que los rechazos de estos usos: recubrimientos de cantera, residuos de elaboración de rocas ornamentales, finos de trituración de áridos..., pudieran ser usados perfectamente en la preparación del componente primario del clinker, contribuyendo así a una racionalización del uso del recurso.

— Fabricación de cales

La especificación, que debe cumplir una roca calcárea para la fabricación de cales, desde el punto de vista mecánico, es la de presentar una resistencia superior a 39 MP_a, para evitar problemas de apelmazamiento por machaqueo en el horno. La composición química depende de los usos, en general se exige que el contenido en CaO de la caliza supere el 50 por 100; el MgO debe de ser inferior al 1 por 100; el contenido en Al₂O₃ y Fe₂O₃, se limitan al 1 por 100; otros componentes sometidos a penalización son el contenido en azufre, y en cationes pesados.

La calidad física, mineralógica y química de las calizas de la Unidad Superior ha permitido instalar una planta de calcinación en la Carretera de Valencia, en la que se fabrican unas 25.000 tm/año de cal viva, que se comercializan como hidrato de cal. Este producto se usa en tratamientos industriales como producto alcalinizante en la inmovilización de cationes pesados, tratamiento de residuos orgánicos, acondicionador de

aguas residuales...; así mismo se usa en la estabilización de suelos en Obras Públicas, corrector de suelos agrícolas, retardador de fraguado de yeso y elaboración de morteros de cal.

El producto elaborado presenta las características físicas que aparecen en la tabla V.

PROPIEDADES FISICAS	
Aspecto	Polvo blanco seco.
Estructura cristalina	Hexagonal.
Peso molecular	74,09
Densidad	2,24 g/ml
Densidad granel	426 kg/m ³
Finura (tamizado) < 90 micras	97 %
Blancura Cie Lab.	L > 96
Solubilidad en agua (10°C).	1,7 g/l
Temperatura de deshidratación.	580 °C
Tamaño medio Laser (micras)	12

Tabla V.

Las características químicas de las cales elaboradas en la zona de Arganda del Rey se muestran en la tabla VI.

PROPIEDADES QUIMICAS.	
Ca (OH) ₂ tot.	91,9 %
Ca (OH) ₂ util.	90,2 %
Pérdida por calcinación.	24,5 %
CO ₂	1,7 %
MgO	0,35 %
SiO ₂	0,39 %
Al ₂ O ₃	0,13 %
Fe ₂ O ₃	0,06 %
MnO ₂	0,01 %
S	0,51 %
CaO equivalente	75,0 %
Humedad a 105°C	0,1 %
pH	12,4

Tabla VI.

El contenido en elementos traza de las cales, al igual que el azufre, no son imputables a la materia prima, sino que por el contrario están relacionados con el combustible usado en la fabricación de las cales. Los datos se recogen en la tabla VII.

ELEMENTO	ppm <
Arsénico	20
Cadmio	2
Cromo	20
Níquel	20
Plomo	20
Antimonio	4
Selenio	4

Tabla VII.

— Fabricación de cargas

Las calizas para la fabricación de cargas de pinturas, papel..., exigen fundamentalmente unas características de blancura iguales o superiores al 85 por 100. Esta medida debe ser realizada en un reflectivímetro en relación a un patrón de blancura que se tomará como 100.

Desde el punto de vista químico las especificaciones para el uso como carga de las calizas vienen dadas en la tabla VIII:

OXIDO	%
CaO >	55
Al ₂ O ₃ <	0.2
Fe ₂ O ₃ <	0.2

Tabla VIII.

— Aridos de machaqueo

Cualquier material granular o de machaqueo, que se use en construcción, sólo o bien mezclado con un aglomerante, se denomina árido. La amplia demanda en volumen y calidades de áridos para los diferentes usos constructivos ha hecho que los estudios sobre yacimientos de áridos, así

como las técnicas de caracterización hayan evolucionado muy rápidamente (IAEG, 1984).

Un yacimiento de áridos se define por su forma, dimensiones, posición con respecto al nivel freático, discontinuidades, recubrimiento de estériles y/o material alterado, y por el aprovechamiento (coeficiente) de la masa explotable. Estos parámetros permiten señalar el volumen, el ratio y, como consecuencia, los costes de explotación de los áridos, que permiten definir un valor por unidad de producto natural extraído. En este último parámetro influyen también las características geomecánicas de los materiales de recubrimiento y estériles, tanto en cuanto a consumo de explosivos, como al tipo de maquinaria y su conservación.

Las características mineralógicas y petrográficas del material canterable, y fundamentalmente la naturaleza y el grado de alteración de los minerales, grado de fracturación, así como las propiedades mecánicas del material van a definir las restricciones al uso, tanto en cuanto a los costes unitarios de producción, como a los usos en función de las normativas para su utilización en construcción.

A título meramente indicativo de la influencia de la naturaleza de la roca sobre los costes de extracción y tratamiento, se puede ver la tabla IX, en la que se muestra un estudio comparativo entre los tres tipos básicos de rocas para la obtención de áridos de machaqueo:

- Calizas y dolomías;
- areniscas, gabros y granitos;
- diabasas, ofitas y basaltos.

El uso de las calizas como roca para machaqueo presenta una serie de limitaciones que vienen definidas por las propias características mecánicas intrínsecas de los materiales (resistencia a compresión simple, del mismo orden que la exigible al mortero u hormigón que se va a elaborar con ellos), así como unas características de resistencia mecánica o desgaste mutuo entre los elementos que forman el árido. Existen una serie de ensayos clásicos para caracterizar estas propiedades: Resistencia al desgaste de los áridos en la máquina de los Angeles (dinámico) NLT - 149/72, Coeficiente de friabilidad (estático

Proceso	Calizas y dolomías	Areniscas, gabros y granito.	Ofitas, diabasas, basalto.
Desmante	0.03	0.03	0.03
Sondeos	0.07	0.08	0.13
Explosivos	0.10	0.10	0.11
Carga	0.48	0.48	0.48
Transporte	0.06	0.06	0.06
Machaqueo	0.13	0.19	0.23
Almacenaje	0.13	0.13	0.13
Mantenimiento	0.54	0.67	0.87
C. Polvo	0.04	0.04	0.04
Impuestos	0.10	0.10	0.10
Ventas	0.06	0.06	0.06
Costes prod.	1.30	1.50	1.80
Depreciación	0.38	0.58	0.58
Gastos Gen.	0.10	0.10	0.10
Costes fijos	0.48	0.67	0.67
Costes totales	1.78	2.18	2.47
Coste planta	1925.10 ¹	2885.10 ¹	2885.10 ¹
Costes prod.*	1	1.15	1.38
Costes fijos*	1	1.40	1.40

Tabla IX.—Costes de producción y fijos de una planta de áridos de 272 t/h. Los valores están expresados en \$ del año 1972, salvo los señalados con *, que representan valores relativos referidos a áridos de machaqueo de calizas y dolomías. Adaptado y modificado de Lefond (ed.) (1983).

bajo carga) NLT - 351/74. Las especificaciones según usos son las siguientes:

Aridos para hormigones y capas de base y sub-base de carreteras:

Los Angeles < 35 por 100

Coeficiente de friabilidad < 35 por 100

Aridos para capas de rodadura, deberá de procederse a un ensayo de determinación del coeficiente de pulido acelerado (CPA > 0,45 - 0,55 en función de la densidad y tonelaje del tráfico, dentro de una escala de 0 a 1, NLT - 174/73.

Los Angeles < 25.

Aridos para balasto:

Los Angeles < 20.

Los áridos de machaqueo muestreados en el presente trabajo dan los valores para el ensayo de Los Angeles que se reproducen en la tabla X:

CANTERAS	%
HOYON	31,5
MORATA	29,0
CAMPO REAL	34,0

Tabla X.

Estos valores indican que los áridos estudiados elaborados con las calizas de la Unidad Superior tienen unos coeficientes de desgaste elevados, en torno al 30 por 100, pudiendo cumplir la normativa, en lo que a este ensayo se refiere, de áridos para hormigones y áridos para base y sub-base de carreteras. Si se quisieran utilizar en otras unidades de obra, a las que se exija una mayor calidad, debería realizarse un estudio del material más sano del frente de cantera.

— *Rocas ornamentales:*

(Caliza de Colmenar - Travertino de Morata)

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, ASTM, en su especificación ASTM C-568-79, califica las calizas para utilizar en exteriores de edificios como de alta, media y baja calidad, en función de cinco características: absorción, densidad, resistencia a compresión simple, módulo de ruptura y resistencia a la abrasión.

Según los valores de la absorción, prácticamente todas las calizas estudiadas se mantienen por debajo del 3 por 100, por lo que podrían considerarse como de *alta densidad*. Los valores de la densidad son más restrictivos, situándose el límite de *alta densidad* en $2,560 \text{ g/cm}^3$, que es superado por el 44 por 100 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 $q = 550 \text{ Kg/cm}^2$, que es superado en el 75 por 100 de los resultados obtenidos, pudiendo considerarse de *alta densidad*.

Por tanto las calizas de dichas canteras puede considerarse de *media-alta densidad* (calidad) con vistas a su utilización en exteriores, según

la especificación ASTM C-568-79, con propiedades muy similares a las Calizas de Colmenar que se utilizaron intensamente desde el siglo XVIII, en la construcción monumental en Madrid.

Como vimos al estudiar las propiedades físicas de estas rocas, las principales canteras, actualmente en explotación, de la zona cumplen perfectamente las especificaciones para considerarlas rocas de construcción: rocas ornamentales utilizables en exteriores, con calidades muy similares a las Calizas de Colmenar, cuyo buen comportamiento geotécnico y frente a la alteración urbana puede observarse hoy día en muchos monumentos madrileños (Palacio Real, estatuas de la Plaza de Oriente, Palacio de Aranjuez, Puerta de Alcalá, Museo del Prado, ...) y en otros monumentos de otras regiones como la Catedral de Toledo.

El estudio petrográfico nos indica que gran parte de las rocas calizas de la zona estudiada constituyen un recurso potencial de rocas ornamentales, especialmente las zonas de Campo Real (con bonitas facies travertínicas de la Unidad Superior) y proximidades de Arganda (en el actual vertedero de residuos inertes de Arganda hemos recogido facies de gran belleza cuyas características petrográficas hacen prever buenas propiedades físicas para su utilización como rocas ornamentales. El encontrarse en un país con importantes recursos en rocas carbonáticas ornamentales (LOMBARDERO y REGUEIRO, 1992) es tal vez la causa de que aún no hayan sido explotadas con ese fin, pero creemos que su belleza y sus propiedades físicas, así como la proximidad a un centro de consumo como Madrid hacen de ellas un importante recurso.

c) Características de las explotaciones

Sistemas de explotación

- Canteras en laderas (pequeña importancia económica y gran impacto visual).
- Cortas en superficie, siguiendo la estructura de los bancos de caliza.
- Minería subterránea, utilizada en diferentes épocas para la extracción de bloques en las canteras de Colmenar.

CARTELA APLICADA A LA CARTOGRAFIA GEOMORFOLOGIA DE CANTERAS CALIZAS

1.—GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA.

-  Calizas Neógenas
-  Travertinos
-  Anticlinal
-  Sinclinal
-  Falla
-  Basculamiento
-  Buzamiento
-  Zonas de intenso diaclasmado
-  Pequeños escarpes naturales
-  Valles de arroyos en forma de «V»
-  Valles de arroyos con fondo plano
-  Coluviones amorfos
-  Suelos
-  Paleosuelos argílicos
-  Horizonte edáfico petrocálcico o encostramiento palustre




2.—FORMAS ANTROPICAS EN CANTERAS Y PROCESOS

-  Frente abandonado escarpe > 10 m.
-  Frente abandonado escarpe de 5 a 10 m.
-  Frente abandonado escarpe < 5 m.
-  Frente activo (> 10 m.) (5 a 10 m.) (< 5 m.)
-  Grietas de «llamada vacío»
-  Frentes ocultos y regularizados
-  Frentes con cornisa y talud
-  Frentes de antiguas escombreras regularizados naturalmente
-  Relieves positivos (cerros testigos, mesas y elevaciones, etc.)
-  Depresiones
-  Superficies irregulares
-  Superficies allanadas
-  Taludes o superficies remodeladas en rampa
-  Desprendimientos de capas
-  Pequeñas cárcavas
-  Procesos gravitatorios

3.—ACUMULACIONES ANTROPICAS.

-  Bloques gravitatorios
-  Acumulaciones de bloques y piedra de taqueo
-  Acumulaciones heterogéneas de stock
-  Acopios de piedra molida
-  Materiales de rechazo
-  Montículos de tierra y tierra vegetal
-  Vertederos: escombros (E) y basura (B)

4.—OTROS SIMBOLOS

-  Edificios e instalaciones
-  Pistas de acceso
-  Charcas episódicas
-  Cota altimétrica 70m
-  Ferrocarril desmantelado
-  Cinta transportadora
-  Carreteras
-  Escombreras antiguas

5.—USOS DEL SUELO









-  Matorral xerófilo
-  Viña
-  Olivos
-  Formaciones Subarbuscivas
-  Olivar de repoblación
-  Caducifolios de repoblación
-  Cereal de secano
-  Pinos de repoblación

Figura 2.

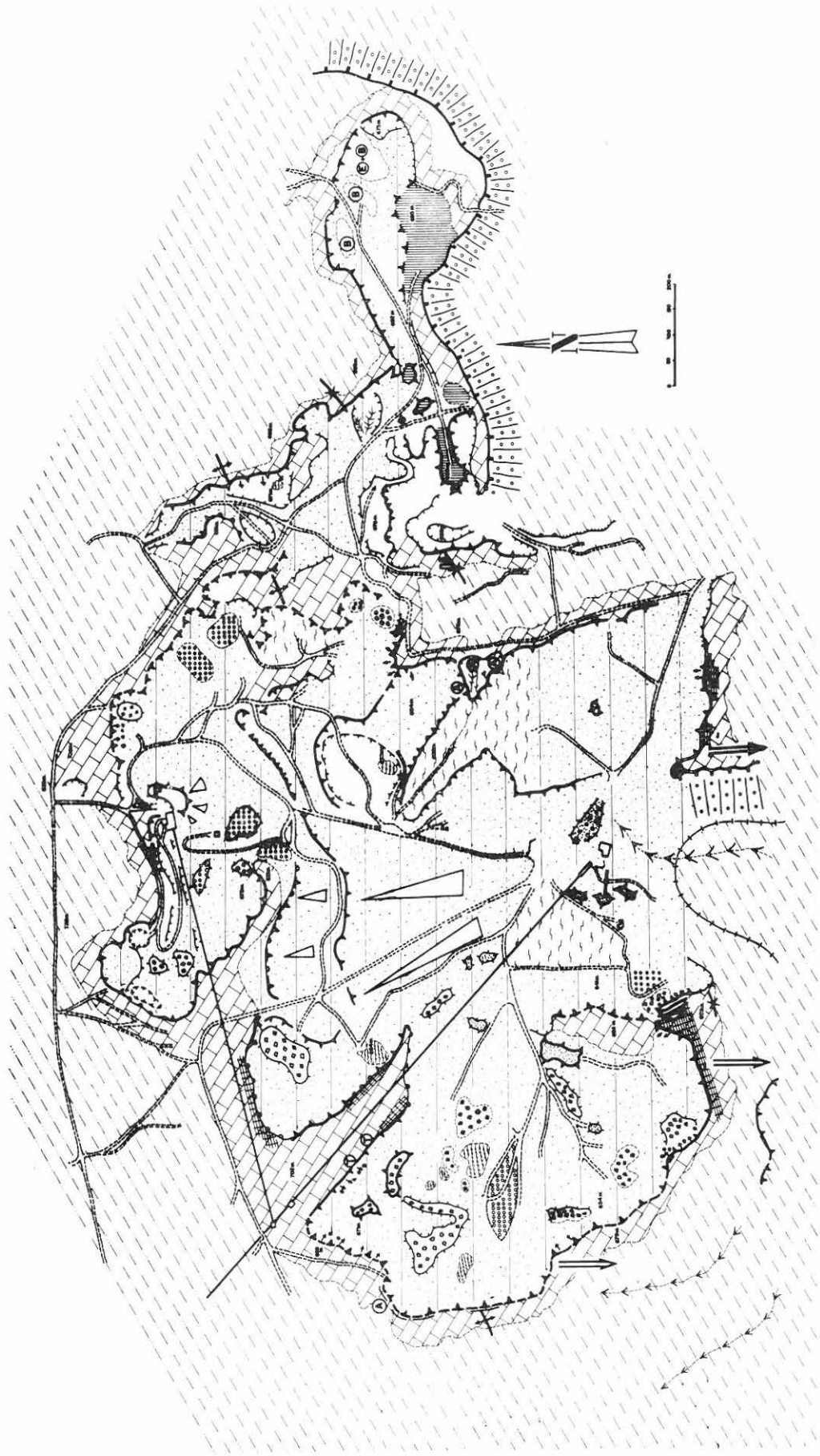


Figura 3.—Cartografía geomorfológica de las canteras situadas al oeste de la Ctra. Arganda-Morata de Tajuña (Valderribas) y usos del suelo.

Extensión y volumen de las explotaciones

Las explotaciones presentan una extensión evaluable provisionalmente en 4-8 km², lo que implica un volumen extraído superior a 30 millones de m³. Las explotaciones no activas presentan síntomas de revegetación natural al cabo de diez años. En la zona no se observa el desarrollo de técnicas de conservación del suelo vegetal, que en general suele acopiarse en los vertederos de rechazo. Las características geomecánicas de las rocas permiten el diseño de taludes verticales, con alturas superiores a 10 m, sin bermas intermedias y que se mantienen estables durante años. La mayoría de estos taludes carecen de señalización, y son comunes los desprendimientos de bloques rocosos en la mayoría de ellos. Las figs. 2 y 3 son una muestra de las posibilidades de la cartografía geomorfológica en el estudio de la evaluación de la extensión y características de las explotaciones a cielo abierto.

Extensión y volumen de los vertederos de rechazo

Los acopios de rechazo, presentan volúmenes importantes, centenares de miles de m³, a veces depositados sobre la superficie erosiva, dando lugar a *relieves artificiales*, y otras veces se han depositado en vaguadas, quedando en este caso mejor integrados en el paisaje.

IV. CONCLUSIONES

Refiriéndonos a las posibles reservas de calizas en la zona de estudio, hay que señalar que son aproximadamente de mil millones de toneladas, que podríamos considerar prácticamente ilimitadas a efectos de la producción de cemento. Sin embargo, para otros usos alternativos de estas calizas: rocas ornamentales, áridos de machaqueo, cales, cargas, etc. ..., las reservas son menores, precisándose un estudio específico detallado para cada uno de los usos posibles para establecer las correspondientes reservas.

Planificación a largo plazo

— En el futuro debería llegarse a centralizar todas las explotaciones existentes en dos o

tres cortas diseñadas correctamente en cuanto a la minimización del impacto ambiental.

- Estas cortas permitirían incluso un aprovechamiento integral de los productos, con la minimización de la producción de acopios de rechazo. El orden podría ser: rocas ornamentales >> áridos de machaqueo >> cargas >> cales >> clinker de cemento. Los áridos naturales de la base de las calizas podrían extraerse y los materiales arcillosos podrían utilizarse como componente secundario para la fabricación de clinker. Estas explotaciones crearían grandes explanaciones, fácilmente integrables desde el punto de vista geomorfológico en el paisaje de los Páramos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Plan Regional de Investigación de la Comunidad de Madrid, formando parte del Proyecto C 190/90 *Las canteras de calizas de los interfluvios de los ríos Jarama-Tajuña-Tajo en la Comunidad de Madrid: valoración de recursos, impacto ambiental y propuesta de restauración de explotaciones.*

REFERENCIAS

- ASTM (1981): *Anual Book of ASTM Standards, part. 19 Soil and Rock: building Stones C568-79.*
- BROCK, E y FRANKLIN, J. A. (1972): *The point-load strength.* Int. J. Rock Mech. Min Sci., 9, 669-697.
- CALVO, J. P.; ORDOÑEZ, S., y GARCIA DEL CURA, M. A. (1986): *Facies carbonáticas del páramo terminal de la zona Ocaña-Yepes (Sector Sur de la Cuenca de Madrid).* XI Congreso Español de Sedimentología, Barcelona. Resúmenes de Comunicaciones, 41.
- CALVO, J. P.; ORDOÑEZ, S.; GARCIA DEL CURA, M. A.; HOYOS, M.; ALONSO ZARZA, A. M.; SANZ, E., y RODRIGUEZ ARANDA, J. P. (1989): *Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid.* Acta Geológica Hispánica, 24: 281-298.
- DAPENA, E.; ORDOÑEZ, S., y GARCIA DEL CURA, M. A. (1989): *Estudio de las rocas calizas utilizadas durante los siglos XVIII y XIX en la construcción de palacios de Madrid.* Ingeniería Civil, 71, 67-77.
- GARCIA CALLEJA, M. A. (1991): *Estudio petrológico y geoquímico de las materias primas de la Cuenca de Madrid para su uso en la industria cementera.* Tesis Doctoral U.C.M. Madrid, 463 pp.

- GARCIA CALLEJA, M. A.; SORIANO, J., y ORDOÑEZ, S. (1991): *Materias primas para la fabricación de clinker de cemento Portland en el área de Madrid*. IV Congreso de Geoquímica de España, 493-506.
- GARCIA DEL CURA, M. A.; ORDOÑEZ, S.; GONZALEZ MARTIN, J. A. (1991): *Los carbonatos biogénicos de los episodios terminales del relleno Neógeno de la Cuenca de Madrid*. Comunicaciones I Congreso del Grupo Español del Terciario, 136-139.
- GARCIA DE MIGUEL, J. M.; SANCHEZ CASTILLO, L.; PUCHE RIART, O., y GONZALEZ AGUADO, M. T. (1992): *Study of the monumental stone from Madrid district*. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone, Lisboa, June 1992, 1, 47-56.
- GHOST, D. R., y SRIVASTAVA, M. (1991): *Point-load strength: An index for classification of rock material*. Bull. Int. Assoc. Engineering Geology, 44, 27-34.
- GONZALEZ MARTIN, J. A., y ASENSIO AMOR, I. (1983): *Geomorfología y sedimentología de los conglomerados fluviales neógenos de la «Mesa de Ocaña-Tarancón»*. Rev. Mat. Proc. Geol. I, 83-102.
- HERNANDEZ PACHECO, F. (1945): *Los materiales litológicos de Madrid empleados en la construcción*. Las Ciencias X, 4, 959-982.
- HERNANDEZ PACHECO, E., y HERNANDEZ PACHECO, F. (1926): *Aranjuez y el territorio al sur de Madrid*. Excursión B 3. XIV. Int. Geol. Congress, Madrid.
- IAEG (1984): *Symposium International Sur les Granulats*. Niza, 1984, Bull. Int. Assoc. Engineering Geology, n.º 29 y 30.
- ITGE (1988): *Atlas Geocientífico del Medio Natural de la Comunidad de Madrid*. MIE, Madrid, 83 pp.
- LEFOND, S. J. (ed.), 1983: *Industrial Minerals and Rocks*. (5 ed.). 2 vols. Am. I. Min. Metal & Petroleum Eng. New York. 1446 pp.
- LOMBARDERO, M., y REGUEIRO, M. (1992): *Spanish natural stone*. Industrial Minerals, 30, 81-97.
- LOPEZ VERA, F., y PEDRAZA GILSANZ, J. (1976): *Síntesis geomorfológica de la Cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid*. Estudios Geológicos, 32, 499-508.
- MEGIAS, A. G.; ORDOÑEZ, S., y CALVO, J. P. (1983): *Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la Cuenca de Madrid*. Revista de Materiales y Procesos Geológicos, 1, 163-191.
- ORDOÑEZ, S., y GARCIA DEL CURA, M. A. (1983): *Recent and Tertiary fluvial carbonates in Central Spain*. In Ancient and Modern Fluvial Systems (Ed. by J. D. Collinson & J. Lewin) Spec. Publ. IAS, 6, 485-497.
- ORDOÑEZ, S., y GARCIA DEL CURA, M. A. (1986): *Secuencias fluvioacustres del páramo terminal de Campo Real (Cuenca de Madrid)*. XI Congreso de Sedimentología, Barcelona. Resúmenes de Comunicaciones, 126.
- ORDOÑEZ, S.; GONZALEZ, J. A., y GARCIA DEL CURA, M. A. (1986): *Carbonatos fluviales en la Mesa Ocaña-Tarancón*. Actas IX Congreso Nacional de Sedimentología, Salamanca, 1980, I, 277-298.
- PEREZ GONZALEZ, A. (1982): *Mioceno y Cuaternario de la Llanura Manchega y sus relaciones con la Cuenca del Tajo*. Tesis Doctoral Universidad Complutense. Madrid. 787 pp.
- SANZ, E.; CALVO, J. P.; GARCIA DEL CURA, M. A., y ORDOÑEZ, S. (1989): *Desarrollo de perfiles de calcreta en calizas del Terciario Superior de la Cuenca de Madrid*. Com. XII Cong. Español de Sedimentología, 257-260.
- SANZ, E.; CALVO, J. P.; GARCIA DEL CURA, M. A., y ORDOÑEZ, S. (1991): *Origin and diagenesis of calcretes in Upper Miocene limestones, Southern Madrid Basin, Spain*. Rev. Soc. Geol. de España, 4: 127-142.
- SANZ, E.; CALVO, J. P., y ORDOÑEZ, S. (1994): *Rasgos y procesos de karstificación asociados a depósitos lacustres carbonáticos: El tránsito Mioceno-Plioceno en el Sur de la Cuenca de Madrid*. II Congreso del Grupo Español del Terciario. Jaca. 283-286.
- TURK, N, y DEARMAN, W. R. (1985): *Improvements in the determination of point load strength*. Bull. Int. Assoc. Engineering. Geol., 31, 137-142.
- VAUDOUR, J. (1979): *La région de Madrid. Altérations, sols et paléosols*. 390 pp. Ed. Ophrys. Aix.

Original recibido: Septiembre de 1994.

Original aceptado: Noviembre de 1994.