

Características mecánicas del mármol de Gualba (Barcelona) bajo compresión uniaxial

por M. MONTOTO* y J. ORDAZ**

RESUMEN

Se determina la resistencia mecánica a la rotura del mármol de Gualba, bajo esfuerzos compresivos uniaxiales. Los resultados experimentales son realmente bajos, promedio 391 kg/cm², en comparación con los que suelen presentar estos tipos rocosos (500-700 kg/cm²).

Asimismo se analiza y discute la naturaleza de la rotura experimental de estas rocas.

SUMMARY

The mechanical strength of Gualba marble (Barcelona, Spain), under compressive stresses is determined. Experimental results appear to be very low, mean value 391 kg/cm² (5.560 psi), compared with those shown by some other marbles: 500-700 kg/cm², (7.000-10.000 psi).

The nature of the experimental failure of this rock is analyzed.

INTRODUCCIÓN

En un trabajo previo, MONTOTO y ORDAZ (1972), se estudió el mármol de Gualba (Barcelona) desde el punto de vista petrográfico y estructural en relación a los caracteres de significado mecánico que pudieran condicionar su posterior comportamiento bajo carga. En el presente trabajo se estudian experimentalmente las características mecánicas de dicho mármol bajo esfuerzos uniaxiales, con el fin de obtener datos acerca de su resistencia a la rotura bajo compresión simple. Estos estudios se complementan con una tercera publicación, MONTOTO y ORDAZ (1973), en la que se interpretan los resultados mecánicos en función de las características estructurales y mineralógicas de esta roca.

MUESTREO Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Los bloques de roca con que realizar los ensayos experimentales fueron seleccionados en la propia can-

tera de manera que tuviesen el mínimo de diaclasas y fisuras aparentes, y estuvieran lo menos meteorizados posible. Ya en el laboratorio se serraron a partir de ellos varios bloques de tamaño aproximado 40 × 20 × 20 cm, y finalmente se seleccionaron para la fabricación de probetas aquellos que parecían ser más representativos y de características más parecidas.

A partir de estos bloques se sondearon mediante sonda eléctrica "Longyear" de 5 CV de potencia, varios testigos con los que fabricar probetas cilíndricas de 52 mm de diámetro; se utilizó corona de diamante normal de sondeos con varilla de 66 mm de diámetro externo y 52 mm de diámetro interno y refrigeración por agua. Los testigos se sacaron prácticamente perpendiculares a la ligera foliación que presentaban los mármoles, seleccionándose aquellos que presentaban menos defectos e irregularidades, y que por lo tanto podían considerarse como intactos y representativos para los ensayos mecánicos.

Las probetas se fabricaron de forma cilíndrica, de 52 mm de diámetro y de acuerdo con la norma propuesta por HAWKES y MELLOR (1970) de $D/d > 20$, siendo D el diámetro de la probeta y d el diámetro máximo medio de grano observado en la roca (en nuestro caso de 2 a 2,5 mm). La esbeltez (relación: longitud — diámetro de la probeta) fue de $L/D = 2$, relación mínima aceptable según los citados autores y recomendada como óptima por COATES y GYENGE (1966).

Las probetas fueron luego finamente pulimentadas con vistas a conseguir unas superficies lisas, sin rugosidades, corrigiendo en lo posible tanto las asperezas perfilográficas y defectos de corte como las desviaciones de perpendicularidad y paralelismo entre caras. Se consiguió un error de 0,05 mm considerado como suficiente para los propósitos y precisión de los ensayos a realizar. El mismo criterio se usó en la elección del número de probetas para el ensayo, que fue de 10.

* Departamento de Petrología. Universidad de Oviedo.

** Departamento de Petrología. Universidad de Barcelona.

Se utilizó para este tipo de ensayo mecánico una prensa hidráulica Tonindustrie, con capacidad de carga de hasta 200 tm y plato superior móvil.

Las probetas previamente desecadas a estufa (110°C) fueron colocadas cuidadosamente en la parte central de los platos, procurando que éstos se acoplaran perfectamente sobre las bases de la probeta.

Las velocidades de aplicación de carga empleadas estuvieron comprendidas entre los 5 y 10 kg/cm²/seg dentro del campo admitido para este tipo de ensayos, PROTODYAKONOV (1969). La velocidad se mantuvo constante a lo largo de toda la prueba, registrándose el valor máximo de la carga alcanzada por la roca inmediatamente antes de su rotura final.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la tabla I se exponen los resultados de la resistencia a la compresión simple (en kg/cm²) y carga media *P* de rotura (en kg) para las dos series de cinco ejemplares ensayados, así como las dimensiones medias de las probetas (en mm) y las velocidades de carga *V_p* (en kg/cm²/seg). Estos resultados propor-

TABLA - I

| Muestras | n | φ m.m. | h m.m. | P (kg) | Rc (kg/cm ²) | V _p (kg/cm ² /seg) | Entorno (kg/cm ²) |
|----------|----|--------|--------|--------|--------------------------|--|-------------------------------|
| Serie 1 | 5 | 51,6 | 103,0 | 7058 | 376 | 5 | 440 - 306 |
| Serie 2 | 5 | 51,6 | 103,2 | 8213 | 393 | 7 | 536 - 344 |
| | 10 | 51,6 | 103,1 | 8635 | 384 | 6,5 | 536 - 306 |

cionan un valor medio para la resistencia a la compresión *Rc* de 384 kg/cm². El valor de 391 kg/cm² proporcionado por una probeta de la primera serie es el más próximo al promedio citado, y en general más del 50 % de los datos encontrados se hallan dentro del entorno 411-344 kg/cm². La velocidad de aplicación de carga no parece haber influido demasiado en los resultados, dado que se encuentran valores bastante similares (exceptuando los extremos) en las dos series.

El valor medio de 384 kg/cm² es superior en 28 kg/cm² al encontrado por uno de nosotros, Ordaz (1971), para este mármol de Gualba (6 probetas).

Una medida de la variabilidad de las muestras ensayadas lo proporciona la desviación típica o standard *S*, que en este caso oscila alrededor de 60 kg/m², lo que supone un factor de variación de resistencia $V = S/Rc$, en tanto por ciento de alrededor de 15 %. Esta gran dispersión en los resultados parece ser una característica en el comportamiento mecánico de los mármoles de grano grueso de Gualba.

La rotura del mármol de Gualba es netamente de tipo fractura, —como corresponde a un material frágil cuyo comportamiento deformacional es preponderantemente elástico—, con pérdida de cohesión interna que origina la disgregación en varios trozos de la roca.

Esta rotura se realiza de una manera violenta y explosiva, aunque sin excesivos macrorruídos. Ello se explica por el súbito relajamiento de energía de deformación del sistema de ensayo, que se ha venido acumulando progresivamente en la probeta durante la aplicación de la carga, una vez se ha alcanzado el límite máximo de la capacidad de resistencia de la probeta.

En rigor, cabe suponer con SCHOLZ (1968) que la roca empieza a romperse cuando las tensiones actantes son considerablemente más bajas que las de su resistencia a la rotura propiamente dicha y que la macrofractura misma o fallamiento final es un complicado y gradual proceso que comporta el crecimiento, propagación y coalescencia de muchas microfisuras, tanto inter como transgranulares, predominantemente a lo largo del eje mayor principal de carga (compresión). A similares conclusiones llegan otros autores en diferentes estudios experimentales: BRACE (1963), HOEK y BIENIAWSKI (1966), BIENIAWSKI (1967), BOMBOLAKIS (1968), HOSHINO y KOIDE (1970), etc. Asimismo hemos podido comprobar este mecanismo de fractura en estudios experimentales mediante cargas cíclicas uniaxiales compresivas (fatiga), realizados con el granito norteamericano de Barre, MONTOTO (1972).

En cuanto a los tipos de rotura, HAWKES y MELLOR (1970) distinguen tres amplios modos en esta clase de ensayos de compresión:

- a) Cataclasis. Consistente en un desmoronamiento general interno de la roca por formación de múltiples microfisuras en la dirección de la carga aplicada; cuando la probeta se colapsa lo hace según fragmentos cónicos terminales opuestos por el vértice, con fragmentos astillosos de roca dispuestos periféricamente.
- b) Exfoliación axial ("Axial Cleavage"). O partición vertical ("vertical splitting") en la que una o más fracturas importantes hienden la muestra a lo largo de la dirección del esfuerzo máximo.
- c) Cizalla. En la que la muestra se parte esencialmente en dos partes según un plano de fractura de cizallamiento oblicuo con respecto al eje de compresión.

De todas maneras es difícil encontrar estos tres tipos de rotura en sentido puro. Más frecuentemente

aparecen combinados dos o incluso los tres modos enunciados, dependiendo en cada caso no sólo de la propia naturaleza y características intrínsecas de la roca (destacando las isotropías y anisotropías estructurales) sino también de múltiples factores experimentales y circunstanciales. Según PENG y JOHNSON (1972) dependerían en gran parte del modo de inserción de la probeta entre los platos de la prensa.



FIG. 1. — Fragmento de probeta cilíndrica ensayada en compresión. Se observa en su mitad inferior el cono de penetración de carga.

En el caso de los mármoles de Gualba, puede considerarse la fractura frágil en la mayoría de las muestras ensayadas como una combinación de los modos cataclástico y de exfoliación axial. Los dos conos internos de penetración de carga en los dos extremos de las probetas —debidos a la retención de las bases de las mismas—, están por lo general bien conformados, así como las particiones externas verticales que escinden a los ejemplares en varias lascas más o menos paralelas a la dirección de aplicación de la carga. En algunos casos, sin embargo, hay una tendencia de las líneas de fractura a disponerse en ángulos de cizalla, oblicuamente al eje de compresión máximo. En las zonas más críticamente compresionadas la microgranulación ha sido tan intensa que ha convertido al material en un fino agregado pulverulento. En cualquier caso la rotura de estos mármoles es bastante característica en todos ellos, sin direcciones anormales destacables que la hayan desvirtuado, por lo que se puede considerar como normal o buena a efectos de cálculo de la resistencia.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los datos obtenidos mediante ensayos de compresión uniaxial del mármol de Gualba muestran en primer lugar que su resistencia a la compresión es bastante baja, considerado como mármol y como roca cristalina.

Si se comparan los resultados obtenidos, realmente representativos, con los señalados para otros mármoles destaca que sus características mecánicas son en términos generales relativamente más bajas. Así, el promedio general para este tipo de rocas monominerálicas granoblásticas suelen situarse entre los 500 y 1.000 kg/cm² (que correspondería a una resistencia media, clase "C", de acuerdo con la clasificación mecánica de rocas intactas dada por DEERE y MILLER, 1966).

El valor medio encontrado para los mármoles de Gualba es 384 kg/cm², lo que sitúa a estas rocas,

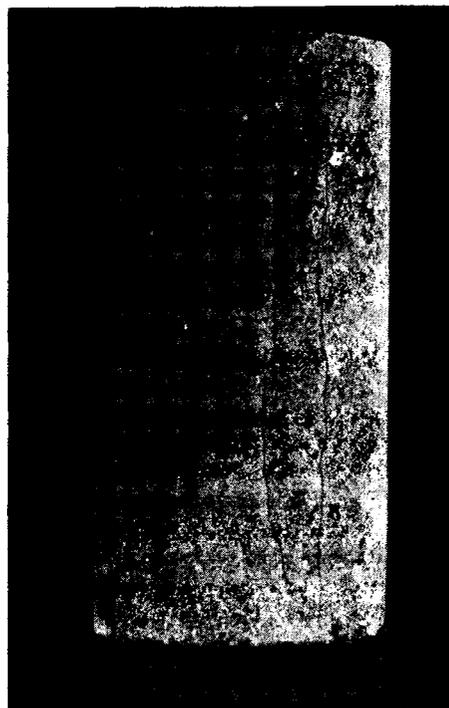


FIG. 2. — Detalle de fracturas verticales, 1 y 2, desarrolladas según la dirección de aplicación de carga compresiva. Las 3 y 4, oblicuas a ellas, son de cizallamiento.

aun incluyendo un valor extremo observado de 536 kg/cm², a un nivel inferior mecánicamente hablando, clasificándose por entero en la clase "D" o de resistencia baja, cuyos límites extremos convencionales abarcan 280 a 560 kg/cm².

En resumen la resistencia media a la compresión simple del mármol de Gualba es baja (aproximadamente la mitad de la que presentan por término me-

dio otras rocas calcáreo-cristalinas), lo que hace que geomecánicamente pueda considerarse como débil.

AGRADECIMIENTOS

Hacemos constar nuestro especial agradecimiento a la empresa Aymar S. A. por las facilidades concedidas en la extracción de bloques de la cantera "Xauxa", Gualba, Barcelona; y al Sr. D. Enrique Vázquez, Director del Laboratorio Regional de Materiales de la 5.^a Jefatura Regional de Carreteras del M. O. P. por la ayuda y colaboración prestada en la realización de los ensayos mecánicos.

BIBLIOGRAFÍA

- BIENIAWSKI, Z. T. (1967): "Mechanism of brittle fracture of rock". *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 4, pp. 395-430.
- BOMBOLAKIS, E. G. (1968): "Photoelastic study of initial stages of brittle fracture in compression". *Tectonophysics*, vol. 6 (6), pp. 461-473.
- BRACE, W. F. (1963): "Brittle fracture in rocks". En. "State of the stress in the earth's crust". Elsevier Ed. New York, pp. 111-174.
- COATES, D. F., GYENGE, M. (1966): "Plate-load testing on rock deformation and strength properties". En "Testing Techniques for Rock Mechanics". *Am. Soc. Testing Mater. Spec. Techn. Publ.*, vol. 402, pp. 19-40.
- DEERE, D. V., MILLER, R. P. (1966): "Engineering classification and index properties for intact rock". *Techn. Rept.* núm. AFWL-TR-65-116. Air Force Weapons Lab. Kirtland Air Force Base, New Mexico. USA.
- HAWKES, Y., MELLOR, J. R. (1970): "Uniaxial techniques in rock mechanics laboratories". *Eng. Geol.*, vol. 4 (3), pp. 117-285.
- HOEK, E., BIENIAWSKI, Z. T. (1966): "Fracture propagation mechanism in hard rock". *Ist. Congr. Int. on Rock Mech.* Lisboa, pp. 2-3.
- HOSHINO, K., KOIDE, H. (1970): "Process of yieldings and the macroscopic features in the rocks". *Rock Mech. in Japan.*, vol. 1, pp. 41-43.
- MONTOTO, M. (1972): "Técnicas instrumentales y microscópico-estructurales para la investigación de la fractura por fatiga en materiales rocosos". Fundación "Juan March". Madrid.
- MONTOTO, M., ORDAZ, J. (1972): "Características petroestructurales de significado mecánico en el mármol de Gualba". *Pbl. Inst. Inv. Geol. de la Diput. Prov. Barcelona*, vol. XXVI, pp. 57-75.
- ORDAZ, J. (1971): "Propiedades mecánicas de los mármoles bajo esfuerzos uniaxiales, en relación a sus características petroestructurales". (Tesis de Licenciatura.) Fac de Ciencias. Universidad de Barcelona.
- PENG, S., JOHNSON, A. M. (1972): "Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* vol. 9, pp. 37-86.
- PROTODYAKONOV, M. M. (1969): "Method of determining the strength of rocks under uniaxial compression". En "Mechanical properties of rocks." Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem., pp. 1-9.
- SCHOLZ, Ch. (1968): "Experimental study of the fracturing process in brittle rock". *J. Geophys. Res.* vol. 73, (4), pp. 1.447-1.454.