

Compresión triaxial de materiales pizarrosos ordovícicos del NO de España

M. A. Rodríguez Sastre

Quiñones, 5 - 24240 León
marsast@hotmail.com

RESUMEN

Se presentan los resultados de la investigación llevada a cabo, mediante ensayos de compresión triaxial, de las propiedades resistentes de los materiales pizarrosos de las formaciones ordovícicas (Casaio y Rozadais) del Sinclinal de Truchas, en el NO de España. Los resultados de estos ensayos presentan importantes variaciones según la orientación de los planos de anisotropía con la dirección de la carga axial, así como en función de las variaciones litológicas de las muestras pizarrosas. Los valores obtenidos a partir de la aplicación del criterio de rotura de Mohr-Coulomb y en condiciones de saturación de la roca, para la Formación Casaio, con la foliación dispuesta a 0°, 90°, 10° y 25° respecto a la horizontal, están comprendidos entre 112 y 6,3 MPa para la cohesión y entre 4° y 52° para el ángulo de rozamiento interno. Para la Formación Rozadais, con la foliación dispuesta a 0° y 90°, los valores obtenidos están comprendidos entre 51 y 18 MPa para la cohesión y entre 44° y 29° para el rozamiento interno. Comparando estos valores con los de muestras de rocas isotropas de formaciones de la Zona Cantábrica, se observa como los resultados de este estudio presentan mayor dispersión, estando condicionados por la disposición de los planos de anisotropía, que influyen en el análisis de la estabilidad de las distintas estructuras ingenieriles a construir sobre o dentro este tipo de rocas.

Palabras clave: anisotropía, compresión triaxial, pizarras, resistencia

Triaxial compression of Ordovician slate materials in NW Spain

ABSTRACT

This study describes the most significant results of an investigation into the resistance properties of slates from the Ordovician Casaio and Rozadais formations at the Truchas syncline in NW Spain, undertaken using triaxial compression tests. The most important differences in resistance proved to be due to the orientation of the anisotropy planes with regard to the principal axial load and also to the considerable influence of lithological variations in the slate samples themselves. According to the Mohr-Coulomb failure criterion, under saturated rock sample conditions, the slates of the Casaio formation at 0°, 90°, 10° and 25° angles of the foliation plane to the horizontal gave cohesion values of between 112 and 6.3 MPa, and internal friction-angle values of between 4° and 52°. Those from the Rozadais formation, with angles of foliation of 0° and 90°, gave cohesion values of between 51 and 18 MPa, and internal friction-angle values of between 44° and 29°. The resistance values recorded in this study when compared with those of isotropic rocks in the Cantabrian Zone show a far wider dispersion, due mainly to the different inclinations of the anisotropic planes, and so anisotropy has to be taken into consideration when assessing the stability of engineering structures built either upon or within these types of rock.

Key words: anisotropy, slates, strength, triaxial compression

Introducción

Los ensayos triaxiales son fundamentales para establecer las cargas a las que se produce la rotura de las rocas y poder predecir su comportamiento, cuando se planifican o se van a efectuar obras subterráneas, tanto en minería como para obras lineales en la ingeniería civil. Un caso especial para su estudio de detalle lo constituyen las rocas de las formaciones anisótropas pizarrosas, ya que en los modelos de rotura ha de tenerse en cuenta la disposición de la anisotropía respecto a la dirección de los esfuerzos principales aplicados. Además estos ensayos son los que más se

aproximan a las condiciones reales a las que están sometidas las rocas en profundidad en los macizos rocosos.

Las rocas anisótropas han sido estudiadas con el objeto de predecir su comportamiento frente a esfuerzos compresivos por diversos autores (Ramamurphy, 1993; Sheorey, 1997; Singh *et al.*, 2002). Entre los antecedentes sobre estudios triaxiales con el objeto de valorar el comportamiento de las rocas con anisotropías planas tipo foliación metamórfica cabe citar, entre otros, a Mustchler y Natau (1991) y Natau *et al.* (1995).

La compresión triaxial se aplica a través de las pre-

siones σ_1 y σ_3 , y reproducen la compresión producida por la carga normal en tres direcciones, ya que las tensiones laterales tienen una distribución radial y con igual magnitud (representada por la presión de confinamiento) (Buelga *et al.*, 1996).

El criterio de rotura aplicado para la interpretación de los resultados de los ensayos triaxiales es el de Mohr-Coulomb que constituye uno de los más fáciles de interpretar y de mayor aplicación. Expresa la relación entre los esfuerzos normales y tangenciales mediante la expresión:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Este criterio determina de forma gráfica y sencilla los valores de la cohesión y el ángulo de rozamiento interno del material ensayado.

Hoek y Brown (1980) desarrollaron otro modelo donde los esfuerzos compresivos triaxiales se pueden escribir como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2}$$

donde σ_1 es el esfuerzo principal mayor y σ_3 es el menor, σ_c es la resistencia a la compresión uniaxial y m y s son constantes adimensionales para cada material.

Este criterio presenta la ventaja de que permite realizar cálculos preliminares sin ensayos empleando valores aproximados de m para una roca particular y determinando un valor de resistencia compresiva uniaxial. Además este criterio puede aplicarse para rocas isótropas intensamente fracturadas. Liao y Hsieh (1999) han propuesto una modificación de este criterio de rotura para el cálculo de la resistencia residual en los ensayos triaxiales de las rocas anisótropas, estando este valor condicionado por la inclinación de la anisotropía.

Para rocas anisótropas, como es el caso de los materiales pizarrosos, la resistencia compresiva para un mismo estado de esfuerzos varía según el ángulo entre la dirección de los planos de anisotropía y la dirección de carga aplicada (González de Vallejo *et al.*, 2002), pudiéndose deducir la dirección más favorable para la rotura a partir de los criterios de rotura mencionados.

Los valores típicos de la cohesión recogidos en la bibliografía para pizarras sanas están comprendidos entre 10-50 MPa y las fricciones varían entre 40°-55° (González de Vallejo *et al.*, 2002); Waltham (2009) les asigna valores de 25°. A partir de ensayos triaxiales para alternancias de esquistos y pizarras los valores obtenidos de fricción son de 46° y 3,9 MPa para la cohesión (Özsan y Karpuz, 1996). Asimismo para el parámetro m_i se establece un valor de 9 según los

ensayos efectuados en muestras donde se aplica la carga en la dirección normal a los planos de foliación.

Metodología y ensayos

Los materiales pizarrosos estudiados pertenecen a los afloramientos del Paleozoico inferior que constituyen el sinclinal de Truchas, próximos a las localidades de Casaio en Orense (en el flanco sur para la Formación Casaio), y a Odollo en León, emplazado en el flanco norte, en la Formación Rozadais, del mencionado sinclinal. Para cada una de las litologías se diferenciaron distintos términos en cuanto al tamaño de grano, que de menor a mayor son: pizarras finas (C2, R2), limolíticas (C3 y 4 y R1 y 5) y con finas laminaciones areniscosas (C1a y b).

Se han realizado un total de 18 ensayos de compresión triaxial, con tres probetas para cada ensayo y teniendo en cuenta los distintos litotipos. Las probetas se han tallado con distinta orientación de los planos de foliación principal, formando ángulos entre los planos de anisotropía y la horizontal de 0°, 90°, 10° y 25°. Doce ensayos corresponden a la Formación Casaio y seis a la Formación Rozadais.

Se ha empleado una prensa estándar de 120 kN de carga y a la que se ha adaptado un mantenedor de carga tipo Farnell, para conseguir la presión de confinamiento deseada, que permite alcanzar hasta 700 kp/cm². Los datos finales se obtienen por la conexión de ambas prensas a un módulo de adquisición de datos de tipo Mercatest-16 con el vuelco de los datos en un ordenador.

Se ha efectuado el ensayo con muestras en condiciones de saturación en agua, siguiendo el protocolo del tipo I, denominado "individual" y recogido por la Norma UNE 22-950-92-4 (Aenor, 1999), sobre tres probetas cilíndricas de diámetro medio de 54 mm y altura media de 120 mm, condicionado por las dimensiones de la célula triaxial disponible, y se realizaron a temperatura ambiente del laboratorio.

La presión de confinamiento para cada muestra se aplicó manualmente con un aplicador de carga externo a la prensa principal, estando comprendidas estas presiones para las muestras de la Formación Casaio entre 5 y 10 MPa, los ensayos se realizaron para probetas con los planos de anisotropía orientados a 0°, 90°, 10° y 25° con respecto a la horizontal

Las presiones de confinamiento para las probetas de la Formación Rozadais se situaron normalmente entre 5, 9, 10 o excepcionalmente 19 MPa, para esta litología solamente se obtuvieron resultados para ángulos de la foliación de 0° y 90° con respecto a la horizontal.

Para la interpretación de los resultados se ha aplicado el criterio de rotura de Mohr-Coulomb mediante la aplicación informática "rockdata" (Shah y Hoek, 1991).

Resultados

Modelos de rotura triaxiales en probetas de pizarra

La forma de rotura de las probetas en los diferentes ensayos varía según la litología, pero principalmente está condicionada por el ángulo que forman los planos de la principal anisotropía con la dirección de los esfuerzos aplicados.

Normalmente no se produce un único modelo de rotura de las probetas para cada una de los litotipos diferenciados, sino que pueden producirse dos distintos, apareciendo combinados en una misma probeta.

Para orientaciones de 90° de la anisotropía principal con la presión de confinamiento, la principal forma de rotura observada en todos los casos, independientemente del litotipo ensayado, es la partición vertical producida por cizalla a lo largo de los planos de anisotropía, resultando una probeta completamente triturada.

En las probetas que presentan 0° entre la anisotropía principal y la dirección de la presión de confinamiento se han observado roturas por cizalla a 45° de la carga axial en unos casos, y en otras roturas a través de los planos de foliación subhorizontales o paralelos a las bases de la probeta. Cuando están presentes en mayor o menor medida las laminaciones arenosas, existe interferencia de la rotura por cizalla simple con planos de rotura según la anisotropía principal o incluso formando conos en la parte inferior de la probeta.

Para mayores ángulos de inclinación de la anisotropía principal de las muestras ensayadas con respecto a la presión de confinamiento, es decir 10° y 25°, las roturas se producen a favor de planos subparalelos a la foliación, presentando a veces comportamiento dúctil, y escalonadas, es decir comienzan en un plano de foliación a una determinada altura, para descender a través de la probeta y terminar en otro situado por debajo del inicial un par de centímetros. En este caso el tramo intermedio constituye una cizalla simple a 45° escalonada y que afecta sólo a la parte central de la probeta.

Parámetros Mohr-Coulomb

Los rangos de variación de los parámetros resistentes para la Formación Casaio obtenidos a partir de los

ensayos triaxiales en probetas con la foliación dispuesta a 0°, 90°, 10° y 25° están comprendidos entre 112 y 6,3 MPa de cohesión y 4° y 52° de ángulo de rozamiento interno.

En la Formación Rozadais, los rangos de variación de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos a partir de los ensayos triaxiales con la foliación dispuesta a 0° y 90°, la cohesión esta comprendida entre 18 y 51 MPa y con un ángulo de rozamiento interno entre 29° y 44°.

Análisis de los resultados

Si se representan los valores del esfuerzo axial frente a la presión de confinamiento se observa una exce-

| Formación Formation | Muestra Sample | Numero probetas Number samples | β | c (MPa) | ϕ |
|------------------------|-------------------|---|---------|---------|--------|
| Casaio | C4 | 3 | 0 | 112,3 | 4 |
| | | 3 | 90 | 34,35 | 44,5 |
| | | 3 | 10 | 16,18 | 35,3 |
| | C2 | 3 | 90 | 30,99 | 46,2 |
| | C3 | 3 | 0 | 50,97 | 30,8 |
| | | 3 | 90 | 36,94 | 40,2 |
| | | 3 | 10 | 29,87 | 29,2 |
| | C1a | 3 | 90 | 43,95 | 41,3 |
| | | 3 | 25 | 6,36 | 40 |
| | C1b | 3 | 90 | 26,44 | 52,6 |
| | | 3 | 10 | 32,18 | 28,7 |
| | | 3 | 25 | 9,86 | 37,5 |
| Rozadais | R1 | 3 | 90 | 18,07 | 40 |
| | | 3 | 0 | 24,59 | 42 |
| | R2 | 3 | 0 | 51,94 | 29 |
| | | 3 | 90 | 41,04 | 44 |
| | R5 | 3 | 90 | 46,77 | 33 |
| | | 3 | 0 | 48,71 | 29 |

Tabla 1. Parámetros obtenidos a partir de los ensayos triaxiales para los distintos tipos de probetas ensayadas.

Table 1. Strength parameters provided by triaxial assays with the various samples in question.

lente correlación de tipo logarítmico (Figura 1), lo que indica que se puede predecir una variable, σ_3 , en función de la otra, σ_1 . La Figura 2 refleja la variación de las presiones axiales y de confinamiento aplicadas durante las pruebas de compresión triaxial, y la influencia del ángulo de anisotropía, apreciándose una disminución de la carga de rotura, σ_1 , para las inclinaciones intermedias, obteniéndose valores similares y agrupados para las disposiciones de 0° y 90° (σ_1 varía entre 180 y 360 MPa) y diferenciados para los ángulos de 10° y 25°, donde σ_1 está comprendida entre 30 y 210 MPa.

Para los valores de los esfuerzos normalizados (Figura 3), la influencia de la disposición de la anisotropía disminuye y se observa un mayor control de las presiones de confinamiento sobre la rotura, determinada por la variación litológica de las muestras analizadas con diferente disposición de la anisotropía.

Los resultados de los ensayos triaxiales en las muestras de las formaciones ordovícicas presentan importantes variaciones según la disposición de la anisotropía con la carga axial principal, presentando los menores valores de cohesión las probetas con los planos de anisotropía entre 10°-25° con la horizontal, entre 6 y 32 MPa, y fricciones menores de 40°, para las muestras de la Formación Casaio. Cuando estas muestras presentan los planos de anisotropía a 0° y 90° las cohesiones varían entre 26 y 51 MPa, y los

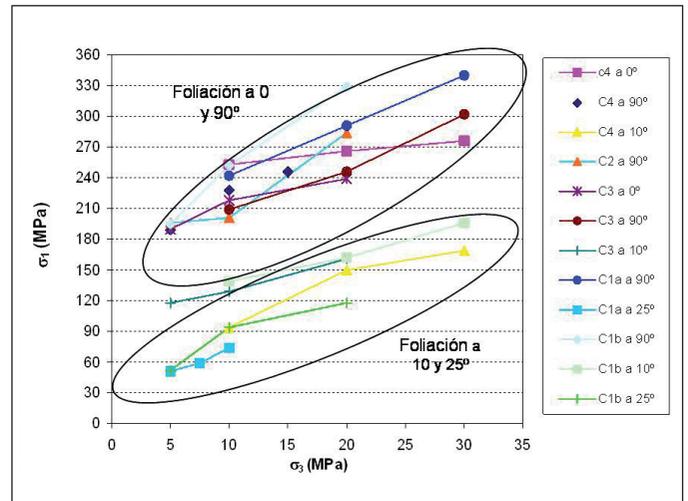


Figura 2. Valores del esfuerzo axial compresivo (σ_1) frente a la presión de confinamiento (σ_3) para la Formación Casaio, para distintas inclinaciones de la anisotropía respecto a la horizontal
 Figure 2. Axial compressive stress versus confinement pressure values (σ_1 and σ_3) for the Casaio formation samples at different angles of anisotropy from the horizontal

valores de fricción entre 30° y 52°, exceptuando el valor de la muestra C4-0, que es anómalo, presentando valores de cohesión de 112 MPa y 4° de fricción.

Los valores obtenidos en las probetas de la Formación Rozadais para las orientaciones de la anisotropía de 0° y 90° respecto a la horizontal son intermedios comparados con los valores de Casaio, estando el rango de las fricciones comprendidos entre 29° y 44° y las cohesiones entre los 18 y 51 MPa.

Comparando estos valores de las rocas anisótropas con los de las rocas de isotropas de otras formaciones de la Zona Cantábrica, se observa como los valores obtenidos presentan mayor dispersión, estando los valores condicionados por la disposición de los planos de anisotropía (Figura 4).

La correlación entre los valores de la tensión tangencial máxima, $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, y la tensión normal media $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ es lineal ($\tau_{max} = 1,097 \sigma_m + 5,98$), con ajustes muy altos, $r^2 = 0,967$ (Figura 5). Por último, al correlacionar los valores $\log(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ y $\log(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ se encuentra una buena asociación entre ambas variables, con una $r^2 = 0,97$ (Figura 6), que matemáticamente tiene la forma de la ecuación: $\log(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = 0,926 \log(\sigma_1 + \sigma_3)/2 + 0,233$, lo que significa que al aumentar la tensión normal media también lo hace la tensión tangencial máxima, pudiéndose utilizar estas correlaciones para la predicción del comportamiento de las tensiones tangenciales máximas a partir de los valores de tensiones medias y viceversa, en este tipo de materiales.

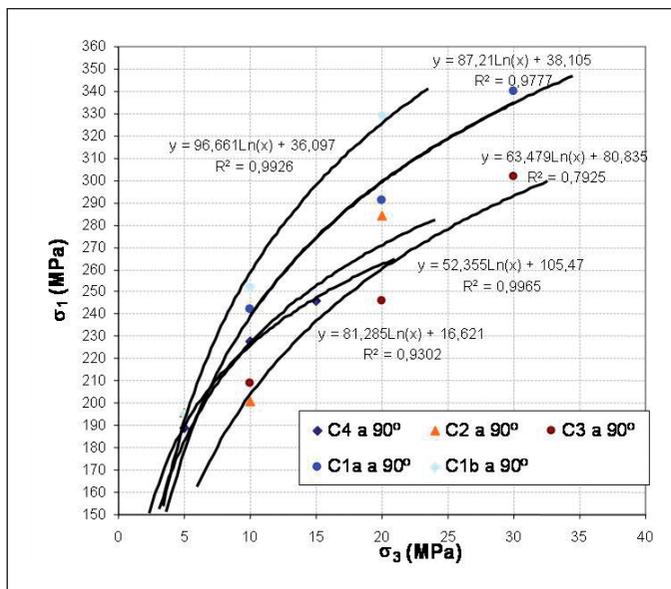


Figura 1. Curvas de esfuerzo axial (σ_1) y de confinamiento (σ_3) para las pizarras de la Formación Casaio con orientación vertical de los planos de anisotropía, es decir a 90°

Figure 1. Axial and confinement stress values (σ_1 and σ_3) for the Casaio formation samples with a vertical anisotropy plane (90°)

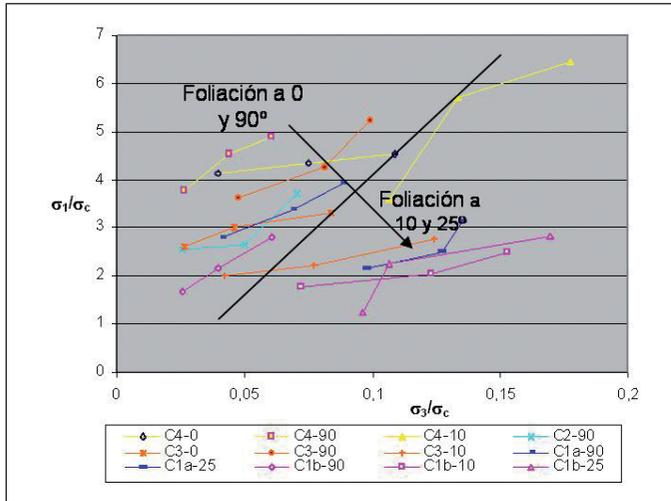


Figura 3. Valores normalizados del esfuerzo axial frente a la presión de confinamiento para las probetas de la Formación Casaio, para distintas inclinaciones de la anisotropía respecto a la horizontal
Figure 3. Normalized values for axial compressive strength versus lateral strength in the Casaio formation samples at different angles of anisotropy from the horizontal

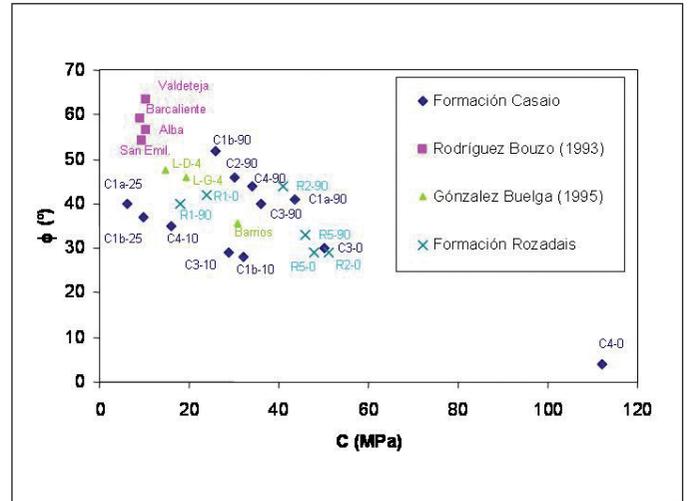


Figura 4. Correlación entre la cohesión y el ángulo de fricción obtenidos de los ensayos triaxiales para las muestras estudiadas, y su comparación con los valores para la cuarcita de Barrios, las formaciones carbonatadas de Lánchara y Valdeteja, Barcaliente, Alba y San Emiliano de la Zona Cantábrica
Figure 4. Correlation between cohesion and the friction-angle values in the triaxial tests compared with values for calcareous samples from the Lánchara, Valdeteja, Barcaliente, Alba and San Emiliano formations and quartzite from the Barrios formation in the Cantabrian Zone

Conclusiones

En este estudio se ha determinado la resistencia a la compresión triaxial de materiales pizarrosos ordovícicos (formaciones Rozadais y Casaio) del Sinclinal de Truchas, en el NO de España. Se ha considerado la diferente inclinación de los planos de la anisotropía principal respecto a la horizontal, además de las variaciones litológicas en las secuencias pizarrosas.

A partir de la aplicación del criterio de Mohr-Coulomb y en condiciones de saturación de la roca, para la Formación Casaio los valores obtenidos en los

ensayos triaxiales, con la foliación dispuesta a 0°, 90°, 10° y 25° respecto a la horizontal, están comprendidos entre 112 y 6,3 MPa de cohesión y 4° y 52° de ángulo de rozamiento interno. Para la Formación

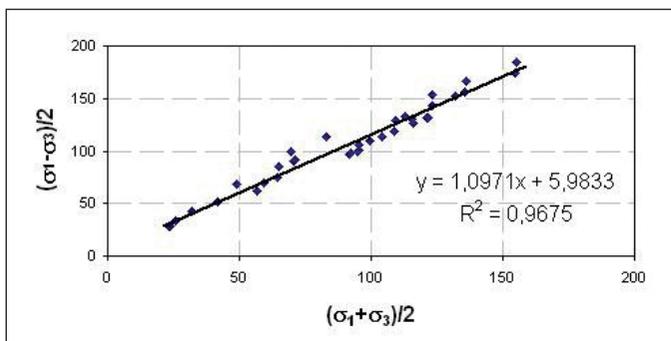


Figura 5. Correlación entre la tensión tangencial máxima $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ y la tensión normal media $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$
Figure 5. Linear correlation between the maximum tangential strength $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ and average tangential strength $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$

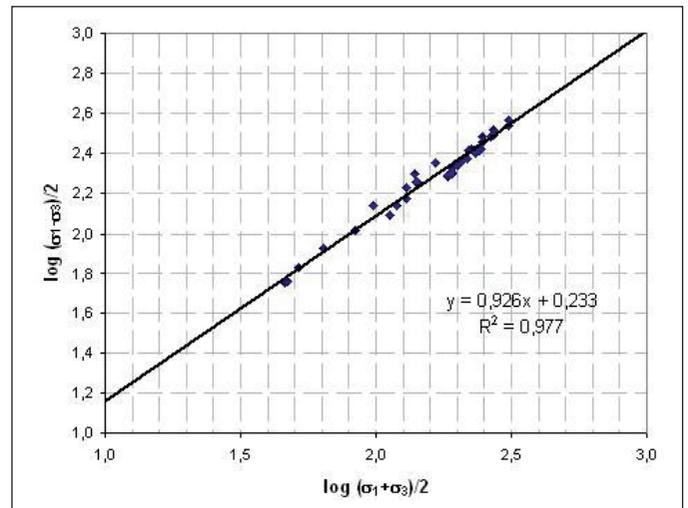


Figura 6. Correlación logarítmica entre los valores de tensión tangencial máxima $\log(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ y los valores de la tensión normal media $\log(\sigma_1 + \sigma_3)/2$
Figure 6. Logarithmic correlation between the maximum tangential strength $\log(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ and average tangential strength $\log(\sigma_1 + \sigma_3)/2$

Rozadais los rangos de de cohesión y fricción obtenidos, con la foliación dispuesta a 0° y 90°, están comprendidos entre 51 y 18 MPa de cohesión y 44° y 29° para el ángulo de rozamiento interno.

Agradecimientos

Expresar mi agradecimiento a los revisores de este trabajo, especialmente a Mercedes Ferrer. Al personal del laboratorio del Instituto Geológico y Minero de España, en Tres Cantos, que hizo posible la realización de estos ensayos, y a D. Manuel Lombardero.

Referencias

- AENOR 1999. *Geotecnia. Ensayos de campo y de laboratorio*. Ed. AENOR, Madrid, 385 pp.
- González Buelga, M. T. 1995. *Caracterización geomecánica y valoración geotécnica de materiales rocosos del Paleozoico inferior en la cuenca alta del Río Bernesga (León, Noroeste de España)*. Tesis doctoral inédita, Biblioteca del Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo, 445 pp.
- González Buelga, M. T., Gutiérrez Claverol, M., Rodríguez Bouzo, L. y Torres Alonso, M. 1996. Comportamiento geomecánico de materiales paleozoicos bajo compresión triaxial (Zona Cantábrica, Macizo Ibérico). *Geogaceta*, 20 (6), 1328-1330.
- González de Vallejo L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo C. 2002. *Ingeniería Geológica*, Pearson Educación, Madrid, 744 pp.
- Hoek E. y Brown E.T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div. ASCE* 106 (GT9), 1013-1035.
- Liao J.J. y Hsieh H.Y. 1999. Triaxial residual strength of an anisotropic rock. *Vail Rocks The 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, Balkema, Rotterdam.
- Muschler, TH., y Natau, O. 1991. Further developments for the determination of the stress-strain behaviour of jointed rock mass by large scale tests. *Proc. 7th Int. Congr. ISRM, Ed Aachen*, vol. 3, 1557-1560.
- Natau, O., Bühler, M., Keller, S. y Mustchler, Th. 1995. Large scale triaxial tests in combination with a FEM analysis for the determination of the properties of a transversal isotropic rock mass. *Proc 8th Int Congr ISRM*, Tokio, 635-643.
- Özsan A. y Karpuz C. 1996. Geotechnical rock-mass evaluation of the Anamur dam site, Turkey. *Engineering Geology*, 42, 65-70.
- Ramamurthy T. 1993. "Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks". En: *Comprehensive Rock Engineering, principles, partice and projects*. Volumen 3, Pergamon Press, 313-329.
- Rodríguez Bouzo L.F. 1993. *Caracterización geomecánica de materiales carbonatados del carbonífero en la zona de Parajes- Villamanín*. Tesis doctoral inédita, Biblioteca del Dpto. de Explotación y Prospección de Minas, Univ. De Oviedo, 416 pp.
- Rodríguez Sastre, M. A. 2003. *Caracterización geomecánica de materiales pizarrosos del Sinclinal de Truchas (León-Orense)*, Tesis doctoral inédita. Biblioteca del Dpto. de Geología, Universidad de Oviedo, 388 pp.
- Shah S. y Hoek E. 1991. *Rockdata v. 2.0. Manual*, Universidad de Toronto, 21 pp.
- Sheorey, P.R. 1997. *Empirical Rock Failure Criteria*. Balkema, Róterdam, 176 pp.
- Singh, M., Rao, K.S. y Rmamurthy T. 2002. Strength and Deformational Behaviour of a Jointed Rock Mass. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 35 (1), 45-64.
- Waltham, T. 2009. *Foundations of engineering geology*. Taylor & Francis, London and New York, 98 pp.

Recibido: marzo 2010

Revisado: marzo 2010

Aceptado: septiembre 2010

Publicado: enero 2011