

Comportamiento geomecánico de materiales paleozoicos bajo compresión triaxial (Zona Cantábrica, Macizo Ibérico)

Geomechanical behaviour of paleozoic materials under triaxial stresses (Cantabrian Zone, Iberian Massif)

M.T. González Buelga (*), M. Gutiérrez Claverol (*), L. Rodríguez Bouzo (**) y M. Torres Alonso (**)

(*) Dpto. de Geología. Universidad de Oviedo. Arias de Velasco s/n., 33005 Oviedo.

(**) Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Independencia 13, 33004 Oviedo.

ABSTRACT

The results of several triaxial tests have been analyzed. Intact rock samples have been used from Cambrian, Ordovician and Carboniferous materials from the Bernesga Valley located in northern León. Several calculations of the following have been made: failure envelope equation, compressive strength (σ), cohesion (c), sliding friction angle (ϕ), friction coefficient (μ), and angle between shear fractures and the uniaxial compressive strength (α). A correlation between σ_1 and σ_3 , shear stress and normal stress, and $\log(\sigma_1 - \sigma_3)$ vs. $\log(\sigma_1 + \sigma_3)$ has also been calculated.

Key words: Engineering Geology, limestones, dolomites, quartzites, brittle failure, stress-strain, Mohr's circles, Cantabrian Zone, NW Spain.

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1328-1330

ISSN:0213683X

Introducción

Entre los múltiples métodos de ensayo de rotura de rocas, el ensayo de rotura a compresión triaxial es el más riguroso y completo ya que simula el comportamiento real de la roca, en sus condiciones naturales de macizo, sometida a presiones litoestáticas de confinamiento. A pesar de ello es un ensayo poco utilizado debido a su complejidad técnica y operacional y a su elevado coste económico.

El ensayo consiste en aplicar hasta rotura una tensión vertical axial (σ_1) sobre las superficies planas y paralelas de una probeta cilíndrica aplicando, simultáneamente, una presión de confinamiento (σ_3) sobre el contorno lateral de la probeta para determinar su tensión de rotura y, en algunos tipos de ensayo, medir también la evolución de las deformaciones, de la presión de confinamiento y de la presión intersticial.

En un sentido estricto, la compresión triaxial es la producida por la aplicación de una tensión normal en tres direcciones perpendiculares, si bien en el ensayo comúnmente así denominado sólo se aplican dos tensiones (σ_1 y σ_3) ya que las dos tensiones laterales tienen una distribución radial y son de igual magnitud (presión de confinamiento). Esta circunstancia, además de hacer menos complejo el equipo de ensayo, simplifica el proceso de cálculo al permitir hacer una

representación gráfica de las condiciones de rotura en un plano.

Para la realización del ensayo se introduce la probeta en una cámara triaxial, en la cual la presión de confinamiento se consigue inyectando un fluido (normalmente agua o aceite). Para que el fluido no penetre a través de los poros y fisuras de la roca es necesario revestir sus paredes con una membrana impermeable de material plástico.

La interpretación de los resultados obtenidos en el ensayo puede realizarse utilizando diversos criterios de rotura. En este caso se eligió el criterio de Mohr-Coulomb por ser uno de los más precisos y de sencilla aplicación. Se basa en realizar, sobre un sistema de coordenadas cartesianas, una representación gráfica denominada diagramas o círculos de Mohr, en la cual las abscisas y ordenadas son la resistencia normal (σ_n) y la resistencia corte (τ), respectivamente. Sobre estos ejes se traza un círculo para cada combinación de esfuerzo compresivo (σ_1) —cociente entre la carga axial aplicada a la probeta en el momento de la rotura y el área transversal inicial de la misma— y tensión de confinamiento (σ_3); los círculos tienen su origen en el eje horizontal, de modo que: origen (O) = $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ y radio (R) = $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$.

Los círculos correspondientes a las roturas para cada presión de confinamiento se hacen tangentes en el punto de rotu-

ra a una línea envolvente, la envolvente de Mohr o curva de resistencia intrínseca de la roca ensayada. El empleo de esta representación gráfica facilita una determinación sencilla de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno en un plano no determinado, además de proporcionar el esfuerzo normal y el de cizalla bajo determinadas condiciones de confinamiento. Aunque el desarrollo de la envolvente es una línea curva que indica las variaciones del ángulo de rozamiento interno en función de la presión de confinamiento, una simplificación muy utilizada —sobre todo cuando se realizan ensayos con rocas frágiles a bajas presiones de confinamiento— es sustituir a la envolvente por una línea recta y considerar que el coeficiente de rozamiento interno (μ) es constante.

De acuerdo con esto, la relación entre el esfuerzo normal y el de cizalla que actúan sobre la probeta viene definida según una ecuación lineal: $\tau = c + (\sigma_n \cdot \mu)$, donde τ = esfuerzo de cizalla, c = cohesión, σ_n = esfuerzo normal y μ = coeficiente de rozamiento interno. Siendo $\tau = R \cdot \sin 2\alpha$ y $\sigma_n = O - (R \cdot \cos 2\alpha)$, donde α = ángulo entre la superficie de rotura y el esfuerzo principal (σ_1).

La cohesión (c) es el valor del esfuerzo de cizalla correspondiente al punto en el que la envolvente corta a la ordenada en el origen y representa el esfuerzo de cizalla máximo que la roca es capaz de sopor-

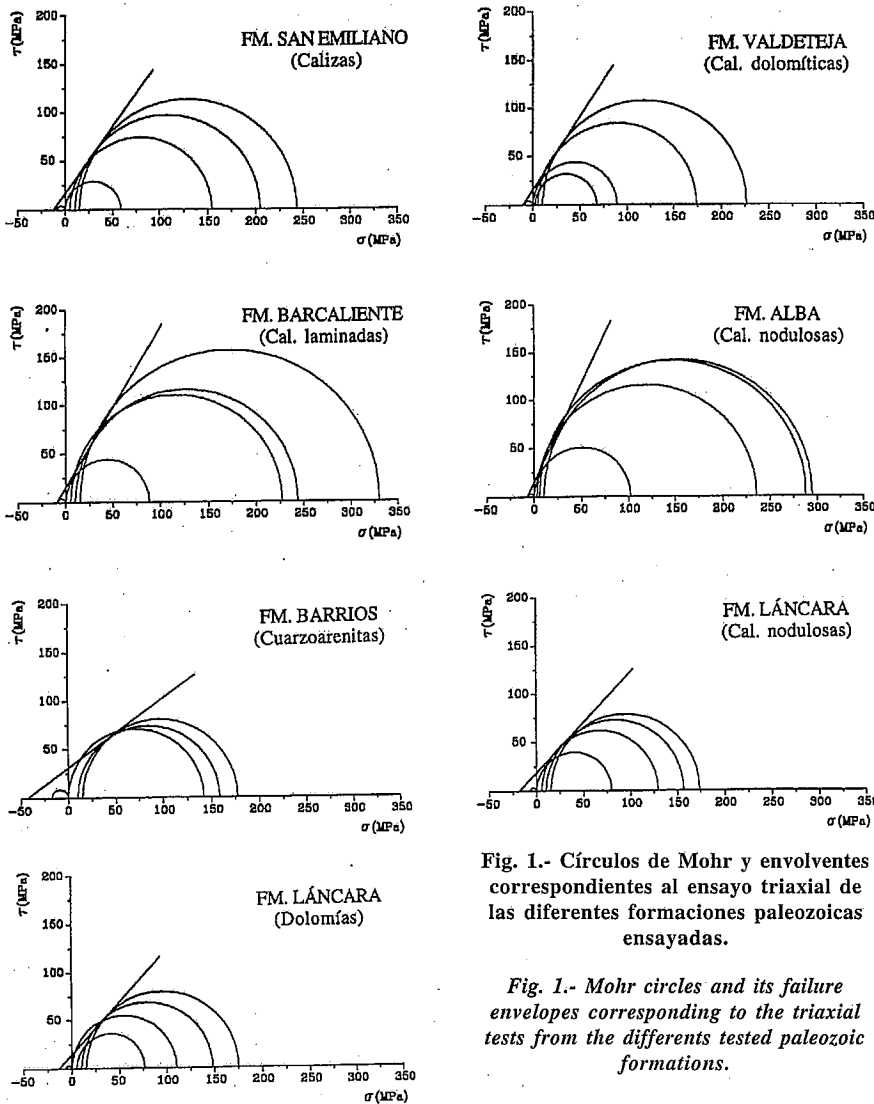


Fig. 1.- Círculos de Mohr y envolventes correspondientes al ensayo triaxial de las diferentes formaciones paleozoicas ensayadas.

Fig. 1.- Mohr circles and its failure envelopes corresponding to the triaxial tests from the different tested paleozoic formations.

Formación estratigráfica	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	c(MPa)	ϕ (°)	μ	α (°)	Ecuación de la envolvente
San Emiliano (Calizas)	15	243,0	16,9	54,0	1,38	18	$\tau = 16,9 + (\sigma_n \cdot 1,38)$
	10	205,0					
	5	154,0					
Valdeteja (Cal. dolomítica)	10	226,0	16,0	56,5	1,51	17	$\tau = 16,0 + (\sigma_n \cdot 1,51)$
	5	174,0					
	2,5	67,0					
Barcaliente (Cal. laminadas)	15	330,0	15,3	59,0	1,66	16	$\tau = 15,3 + (\sigma_n \cdot 1,66)$
	10	243,0					
	5	227,0					
Alba (Cal. nodulosas)	10	295,0	15,9	64,0	2,05	13	$\tau = 15,9 + (\sigma_n \cdot 2,05)$
	5	288,0					
	2,5	235,0					
Barrios (Cuarzoarenitas)	15	177,2	30,8	35,7	0,71	27	$\tau = 30,8 + (\sigma_n \cdot 0,71)$
	10	158,3					
	5	344,2					
Láncara (Cal. nodulosas)	15	173,6	19,3	46,0	1,03	22	$\tau = 19,3 + (\sigma_n \cdot 1,03)$
	10	156,6					
	5	129,2					
Láncara (Dolomías)	15	175,0	14,7	47,5	1,09	21	$\tau = 14,7 + (\sigma_n \cdot 1,09)$
	10	147,7					
	5	77,3					

Tabla I.- Resultados obtenidos en los ensayos y valores calculados a partir del análisis de los círculos de Mohr.

Table I.- Results obtained from the values and tests calculated from the analysis of Mohr circles.

tar sin fracturarse a la presión ambiente (sin presión de confinamiento).

El ángulo de rozamiento interno (ϕ) es el que forma la envolvente de Mohr con el eje de abscisas, y adquiere un valor para cada presión de confinamiento. A partir del ángulo de rozamiento interno se puede calcular el coeficiente de rozamiento interno ($\mu = \text{tg } \phi$) que cuantifica la dificultad que presenta la rugosidad del material para el desplazamiento sobre una superficie de fractura ya iniciada.

El ángulo entre el plano de la superficie de rotura y la dirección del esfuerzo principal (α) puede calcularse teóricamente, a partir del ángulo de rozamiento interno, mediante la expresión: $\alpha = 45^\circ - \phi/2$. El valor de α aumenta a medida que lo hace la presión de confinamiento y disminuye a medida que aumenta el ángulo de rozamiento interno; nunca supera los 45° y para la mayoría de los materiales rocosos adquiere valores comprendidos entre 10° y 33° , con valores medios próximos a los 30° . Dado que es una constante fuente de confusión, parece oportuno indicar que se suele denominar θ al ángulo formado entre σ_1 y la normal a la fractura, es decir el complementario de α .

Metodología y resultados

Los materiales seleccionados para este estudio pertenecen a afloramientos de la serie paleozoica del valle del Bernesga (norte de León), próximos a las localidades de Busdongo ($42^\circ 59' 20''\text{N} - 5^\circ 42' 53''\text{O}$), Camplongo ($42^\circ 59' 10'' - 5^\circ 41' 15''$), Millaró ($42^\circ 58' 40'' - 5^\circ 38' 50''$), Villanueva de La Tercia ($42^\circ 58' 30'' - 5^\circ 40' 10''$ y $42^\circ 58' 00'' - 5^\circ 40' 05''$), Viadangos de Arbás ($42^\circ 57' 10'' - 5^\circ 44' 30''$) y La Vid ($42^\circ 54' 13'' - 5^\circ 38' 38''$).

Utilizando tres probetas por ensayo, se realizaron 7 pruebas de compresión triaxial: dos para la Formación Láncara (Cámbrico), una para la Formación Barrios (Ordovícico) y una para las Formaciones Alba, Barcaliente, Valdeteja y San Emiliano, pertenecientes al Carbonífero.

Los diámetros de las probetas ensayadas oscilaron entre 50,9 y 53,6 mm, con una esbeltez comprendida entre 1,99 y 2,50. Se siguieron las indicaciones de la norma UNE 22-950-92/4.

La prensa utilizada, de la firma Controls, aplica la presión axial de forma automática, hasta un valor máximo admisible de 2.000 kN, y la presión de confinamiento de manera manual mediante una bomba de aceite. Las muestras fueron ensayadas en condiciones de temperatura y

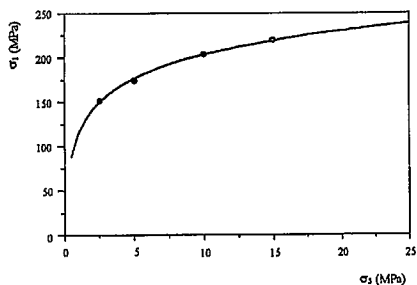


Fig. 2.- Correlación entre esfuerzo compresivo (σ_1) y presión de confinamiento (σ_3).

Fig. 2.- Correlation between compressive strength (σ_1) and confinement pressure (σ_3).

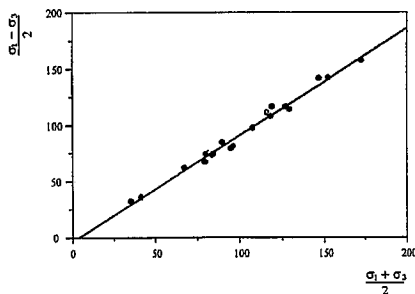


Fig. 3.- Correlación tensión tangencial máxima ($tmáx.=(\sigma_1-\sigma_3)/2$) versus tensión normal media ($sm=(\sigma_1+\sigma_3)/2$).

Fig. 3.- Maximum tangential strength correlation ($tmáx.=(\sigma_1-\sigma_3)/2$) versus medium normal strength ($sm=(\sigma_1+\sigma_3)/2$).

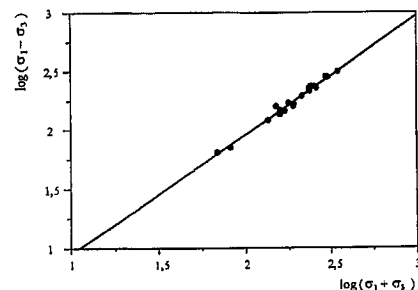


Fig. 4.- Correlación $\log (\sigma_1-\sigma_3)$ versus $\log (\sigma_1+\sigma_3)$.

Fig. 4.- Correlation $\log (\sigma_1-\sigma_3)$ versus $\log (\sigma_1+\sigma_3)$.

humedad ambiente, aplicando presiones de confinamiento de 5, 10 y 15 MPa, a excepción de las probetas de las Fms. Alba y Valdeteja que fueron 2,5, 5 y 10 MPa; en ningún caso se midió la presión de poro. Con los datos resultantes de los ensayos se dibujaron los círculos de Mohr y su envolvente; también se representaron los valores medios de resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño) y de resistencia a compresión uniaxial (Fig. 1).

Análisis y discusión

De la observación de la Tabla I y de los círculos de Mohr de la Fig. 1 se deducen varias consideraciones:

- Los valores obtenidos para las formaciones carbonatadas carboníferas son muy parecidos entre sí: bajas cohesiones –bastante inferiores a las halladas por Franklin y Dusseault (1989) para calizas similares ($c = 30-35$)–, altos ángulos de rozamiento y bajos valores para el ángulo entre las fracturas y el esfuerzo principal. Los materiales carbonatados cámbricos de la Formación Láncara presentan unos parámetros de magnitud algo diferente.

- En el caso de las cuarcitas ordovícicas se alcanzan los valores más altos de cohesión y del ángulo fracturas-esfuerzo y, paradójicamente, los inferiores del ángulo de rozamiento interno; este último se encuentra bastante por debajo de la media obtenida por Franklin y Dusseault (op. cit.). Reseñar que el valor de σ_1 obtenido con la menor presión de confinamiento es anómalo (Tabla I).

- Las mayores presiones compresivas se obtuvieron para las muestras micríticas

cas (calizas micríticas de las Fms. Alba y Barcaliente), al igual que los mayores ángulos de rozamiento, observándose una disminución en el caso de carbonatos recristalizados (Fms. San Emiliano).

- Las rocas que resultaron más frágiles presentan unas líneas de rotura con un menor grado de inclinación respecto a la dirección del esfuerzo principal.

- Respecto al tipo de rotura, en todas las muestras se produjo una rotura frágil, por cizalla simple en el caso de las rocas carbonatadas y explosiva con cataclisis en dos probetas y con lastración vertical (axial) en la tercera para las cuarzoarenitas de la Fm. Barrios.

Con los datos proporcionados por los ensayos triaxiales, mediante análisis de regresión se ha estudiado la posible asociación entre dos atributos (Figs. 2, 3 y 4), a fin de establecer modelos predictivos de comportamiento geotécnico. Los resultados obtenidos se indican a continuación:

- Si se representan valores medios del esfuerzo compresivo (σ_1) versus presión de confinamiento (σ_3) se observa una excelente correlación (Fig. 2) que sigue un modelo logarítmico del tipo: $\sigma_1 = -2,967 + \ln \sigma_3$, con un elevado coeficiente de determinación ($r^2 = 0,998$) del mismo orden de magnitud que los hallados por otros autores (Byerlee, 1967; Franklin, 1971). De acuerdo con esto, puede afirmarse que la variable σ_3 es, en este caso, una buena predictora de σ_1 .

- Haciendo la correlación entre los valores de la tensión tangencial máxima ($tmáx. = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$) y de la tensión normal media ($sm = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$), se obtiene una relación lineal (Fig. 3): $tmáx. = -4,095 +$

$0,952 \sigma_m$, también con ajustes muy altos ($r^2 = 0,985$), del mismo tipo que otras encontradas en la bibliografía (Murrell, 1966; Priest, 1993).

- Por último, al correlacionar $\log (\sigma_1 - \sigma_3)$ frente a $\log (\sigma_1 + \sigma_3)$, aplicando un modelo de ajuste lineal, se encuentra una buena asociación entre ambas variables (Fig. 4), similar a la obtenida por Franklin (op. cit.), que matemáticamente puede expresarse mediante la ecuación: $\log (\sigma_1 - \sigma_3) = -0,0614 + 1,011 \log (\sigma_1 + \sigma_3)$, con un $r^2 = 0,983$.

Agradecimientos

A los profesores Dr. Celestino González Nicieza de la ETS Ingenieros de Minas de Oviedo y Dr. Bernardo Llamas de la EIT Minera de León por su colaboración en la realización de los ensayos.

Referencias

Byerlee, J.D. (1967): *J. Geophys. Res.*, 72: 3639-3648.
 Franklin, J.A. (1971): *Rock Mech.* (Springer), 3: 86-98.
 Franklin, J.A. y Dusseault, M.B. (1989): *McGraw-Hill Publ. Co.*, New York, 600 pp.
 González Buelga, M.T. (1996): *Tesis Doctoral*. Univ. Oviedo, 461 pp. (inéd.).
 Murrell, S.A.F. (1966): *Geophys. J.*, 3: 231-281.
 Priest, S.D. (1993): *Ed. Chapman & Hall*, London, 473 pp.
 Rodríguez Bouzo, L. (1993): *Tesis Doctoral*. Univ. Oviedo, 416 pp. (inéd.).