

Clasificación geomecánica de macizos pizarrosos en el sinclinal de Truchas

Rock mass classification of slate sequences in The Truchas Syncline

M.A. Rodríguez Sastre

Posición postdoctoral en: British Geological Survey, Nicker Hill, Keyworth, Notts, NG12 5GG, UK, mrod@bgs.ac.uk

ABSTRACT

Rock mass characterization and classification are significant in geological investigations involving engineering works and in the field of applied geology. Discontinuities characterization and rock properties determination are essential within the intended engineering work type. An outcrop of the metamorphic rocks from Casajo Formation at The Truchas Syncline has been the target of this investigation. The most widely used rock mass classification systems are the Rock Mass Quality Index (Q system) and the Geomechanics Classification (RMR) and more recently the SRC system and those were applied in this site of investigation. Fair rock with a III RMR class has been described for this outcrop under investigation while Q rock mass classification is set between very poor and poor in that site. In addition the SRC classification provide a class V rock mass.

Key words: *Slates, discontinuities, Casajo Formation, Rock mass classification*

*Geogaceta, 40 (2006), 43-46
ISSN: 0213683X*

Introducción

El conocimiento del comportamiento de los afloramientos a nivel geomecánico cobra una relevante importancia a la hora de planear explotaciones subterráneas principalmente, no restando su importancia en las obras de carácter lineal por los problemas geotécnicos asociados. Además contribuyen a la construcción de un medio ambiente más integrado en el medio natural donde se emplazan. En el caso de la región del sinclinal de Truchas, esta zona se caracteriza por constituir uno de los principales lugares en España donde se está desarrollando la exhaustiva explotación de pizarras como rocas ornamentales, de ahí la importancia del estudio de los afloramientos rocosos y su clasificación en función de las obras a realizar.

Una ventaja es que proporcionan una valoración inicial de las características mecánicas del macizo a bajo coste y de forma sencilla, aunque suponen una excesiva simplificación a la hora de trabajar con macizos rocosos denominados como "blandos", muy tectonizados o alterados, donde se sobreestiman las propiedades mecánicas y resistentes o eluden la deformabilidad de los mismos. Adicionalmente existen las limitaciones asociadas al cálculo del índice RQD.

El objetivo de esta investigación es la aplicación de las clasificaciones más utilizadas como la RMR (Barton, *et al.*, 1974) y Q (Bieniawski, 1976), aunque existen otras

como son la SRC (González de Vallejo *et al.*, 2002), que también se han contemplado en este estudio. El hecho fundamental es esta-

blecer la estimación de la calidad del macizo en relación con su comportamiento frente a las obras extractivas, además de precisar el

Ensayo	Valores
Resistencia a tracción media (MPa) ($\beta = 90^\circ$)	17,06
	rango $\beta = 10-25^\circ$
Resistencia a compresión uniaxial media (MPa)	43,57
Compresión triaxial	C = 28,1 MPa $\phi = 34,14^\circ$ $\mu = 0,68$
Carga puntual Is50(MPa)	6,76
Modulo de Young (MPa)	14250 (MD)
Coefficiente de Poisson (ν)	--
$E_{din} \times 10^4$ (MPa)	2,96
ν_{din}	0,31
$G_{din} \times 10^4$ (MPa)	1,17
$K_{din} \times 10^4$ (MPa)	2,84
$\lambda_{din} \times 10^7$ (MPa)	3,23
Corte directo pizarra fina C2, plano de foliación	C = 0,33 MPa $\phi = 28^\circ$
Criterio rotura Hoek & Brown (1980a)	$\sigma_{cm} = 56,9$ MPa $\sigma_{tm} = 8,75$ MPa s=1 m = 22,6

Tabla I.- Parámetros geotécnicos aplicados en el macizo pizarroso de la formación Casajo

Table I.- Main geotechnical parameters applied for the rock mass classification in Casajo Formation

Serie	Características de las familias de discontinuidades							
	Orientación (%)	Espaciado (mm)	Continuidad (m)	Rugosidad (JRC)	Resistencia pared J.C.S. (MPa)	Abertura (mm)	Relleno (mm)	Observaciones
Bs (403)	259/14(10,5)	Ext. Juntas <20	Muy alta (>20)	VIII Plana Lisa	R5	Cerrada-muy cerrada (0,1-0,25)	Ninguno	Seco
	242/7(10,2)	Separadas-Muy separadas 600-6000	Muy alta (>20)	IV Ondulada rugosa	R5	Abierta-cerrada (1,1-2,5)	Arcillas	Seco
	29/85(9,1)	Moderado 200-600	Moderada-alta (3-20)	V Suave	--	Cerrada (1,1-0,25)	Cuarzo	Seco
	235/40(7,3)	Muy Separadas 2000-6000	Moderada (3-10)	V Suave	R0	Muy ancha (10-100)	Cuarzo + arcillas	Manchoso de humedad
	258/54(6,2)	Separadas 600-2000	Alta-Muy alta (10-20)	IV Ligeramente rugosa	R0	Ancho-muy ancho (10-100)	arcillas	Pueden existir flujo de agua
Bi (70)	85/84(8,4)	Ext.separadas >6000	Alta (10-20)	I Escalonada rugosa	R5	Cerrada-Parcialmente abierta (1,1-0,5)	Ninguno-arcillas	Seco con evidencias de circulación de agua
	9/66(8,4)	Juntas (60-200)	Muy alta (>20)	V Ondulada lisa	R5	Cerrada (0,1-2,5)	Sulfuros	Grado de meteorización IV
	150/12(8,4)	Ext. Juntas (>20)	Muy alta (>20)	VIII Plana lisa	R5	Muy cerrada-cerrada	Ninguno	Seco
	30/49(7,0)	Muy separadas (2000-6000)	Moderada (3-10)	IV Ondulada rugosa	R5	Parcialmente abierta (0,5-1,5)	Sulfuros	Seco
	281/83(7,0)	Muy Juntas (20-60)	Muy alta (>20)	VIII Plana lisa	R5	Cerrada	Cuarzo	Seco, múltiples venillas de cuarzo
C1 (44) R=1m	180/18(25,3)	Ext. Juntas <20	Muy alta (>20)	VIII Plana lisa	R5	Muy cerrada-cerrada	Ninguno	Seco
	6/66(17,5)	Juntas (60-200)	Muy baja (<1)	I Escalonada Rugosa (8-10)	R5	Cerrada	Ninguno	Seco
	19/8(7,4)	Ext.separadas >6000	Baja (1-3)	IV Ondulada rugosa	R5	Parcialmente abierta (1,1-0,5)	Ninguno	Seco
	343/48(7)	Muy Juntas (20-60)	Alta-Muy alta (10-20)	--	R5	Cerrada-muy cerrada (0,1-0,25)	Arcillas	Seco
	190/36(7)	Muy Juntas (20-60)	Muy baja (<1)	VII Plana rugosa	R5	Abierta (0,2-2,5)	Ocasionalmente óxidos	Seco
C2 (19) R=30cm	300/6(17,8)	Separadas	Muy alta (>20)	IV Ondulada rugosa	--	Muy cerrada (<0,1)	Ninguno	Seco
	244/19(15,5)	Juntas (60-20)	Muy baja (<1)	VIII Plana lisa	--	Muy cerrada (<0,1)	Ninguno	Seco
	45/67(11)	Muy Juntas (20-60)	Baja (1-3)	I Escalonada Rugosa (8-10)	R5	Muy cerrada (<0,1)	Ninguno	Seco
	120/62(11)	Juntas (60-20)	Muy alta (>20)	VII Plana rugosa	R5	Muy cerrada (<0,1)	Ninguno	Seco
	154/19(11)	Juntas (60-20)	Baja (1-3)	V Ondulada lisa	--	Abierta	Ninguno	--
C3 (49) R=50cm	204/30 (32,8)	Ext. Juntas <20	Muy alta (>20)	VIII Plana Lisa (0-2)	R5	Cerrada 1,1-0,25	No	Húmedo ocasionalmente
	153/48(28,2)	Juntas 20-60	Baja	I Escalonada Rugosa (8-10)	R5	Abierta 0,5-2,5	Ocasionalmente Arcillas (0,01) o Cuarzo (0,1-5)	Seco
	275/79 (9,4)	Juntas 20-60	Baja	II Escalonada Lisa (6-8)	R5	Parcialmente abierta 2,5-0,5	No	Seco
	30/68(7)	Ext. Separadas >6000	Alta	IV Ondulada rugosa (10-12)	153,4 (R5)	Abierta 0,5-2,5	No	Seco
	252/39(7)	Ext. Separadas >6000	Muy baja	IV Ondulada rugosa (10-12)	R5	Cerrada 1,1-0,25	No	Seco

Tabla II.- Medidas y caracterización de las principales familias de discontinuidades en las distintas localidades.

Tabla II.- Main discontinuity sets measured and characterized at different outcrop sites.

sostenimiento de un posible túnel ubicado en dicho macizo en el caso de obras subterráneas.

Metodología

Geotécnicamente la aplicación de las clasificaciones geomecánicas implica la determinación de los parámetros de resistencia y deformación del macizo rocoso, a través del desmuestre y preparación de muestras de las rocas involucradas. El objetivo es la obtención de los principales parámetros en el laboratorio, para lo cual en este estudio se han seguido las recomendaciones en la realización de los ensayos de la normativa UNE (AENOR, 1999). Los principales valores de la resistencia involucrados son la compresión simple y/o carga puntual, a propuesta de las distintas clasificaciones geomecánicas. No obstante, un parámetro importante a tener en cuenta son los parámetros de cohesión y fricción, más problemáticos de obtener y no siempre se pueden realizar a escala representativa.

Para el análisis de las discontinuidades se han empleado dos métodos:

-medida de discontinuidades al azar a lo largo de una línea de medida.

-medida de discontinuidades en un círculo de inventario con diámetro determinado.

En cada uno de los métodos se ha determinado principalmente la orientación de las discontinuidades, las principales características de las mismas y su espaciado, siguiendo la metodología propuesta por Ferrer y González de Vallejo (1999). Cada familia de diaclasas se presentan agrupadas por rumbos, junto a su orientación, se incluye también su porcentaje con respecto al total de las medidas, registrándose todas aquellas que aparecen en una proporción >10% (Fig.

1). Las medidas realizadas incluyen principalmente discontinuidades de tipo inherente y sistemático en la roca (foliación metamórfica, superficies de estratificación, y pliegues de tipo *kink-band*), así como las discontinuidades inducidas y no sistemáticas (juntas o diaclasas, fallas y venas de cuarzo).

Finalmente el RQD es un parámetro básico además de las condiciones de saturación del macizo para la aplicación de las clasificaciones geomecánicas, junto con el tipo de obra que se pretende construir en el macizo.

Materiales del macizo rocoso

Esta investigación se basa en el análisis de los materiales representados en una columna litoestratigráfica correspondiente a un afloramiento situado en el margen noroeste del arroyo de Riodelas, aproximadamente a 5 km al sur de Casaio (Orense) (Rodríguez Sastre, 2003). En esta zona existe un nivel productivo de dicha formación y aflora con una potencia estimada de 60 m (Foto 1). A muro del tramo pizarroso aflora un nivel cuarcítico de potencia superior a 10 m y que constituye la base de la secuencia estratigráfica en este afloramiento, dando lugar a un mayor resalte topográfico.

Inmediatamente a techo de la cuarcita existen 5 m de pizarras limolíticas sobre las que se dispone un banco de pizarra fina objetivo de la explotación que alcanza una potencia variable aunque algo mayor a los 30 m visibles en el afloramiento. A techo de esta pizarra aparece un tramo de transición de varios metros de pizarras limolíticas, culminando la serie litoestratigráfica con una alternancia decimétrica de pizarras y areniscas de potencia superior a los 10 m.

Se ha contado con la información de varios testigos de sondeos realizados en las inmediaciones del emplazamiento para la Formación Casaio, determinándose a partir de ellos el índice de fracturación RQD.

Resultados y Discusión

A partir de los ensayos de laboratorio se determinaron los parámetros más importan-

Formación	Litología	ρ_d (cm ⁻¹)
Casaio	Pizarra fina	0,039
	Pizarra+arenisca	0,19
	Pizarra limolítica muro	0,15

Tabla III.- Índice de la densidad de diaclasación ρ_d .

Table III.- Density of fracturation ρ_d .

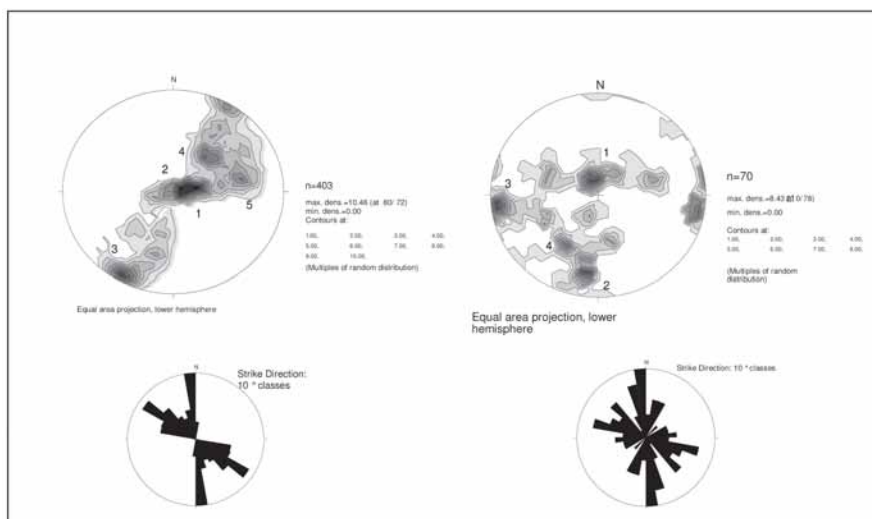


Fig. 1.- Discontinuidades medidas para la formación Casaio.

Fig. 1.- Discontinuity analyses in Casaio Formation.

tes de la matriz rocosa del macizo objeto de investigación. En la tabla I se recogen los resultados de los parámetros obtenidos, considerando el macizo rocoso saturado en agua.

La valoración de la resistencia a partir del ensayo de carga puntual en muestras inalteradas de estas rocas es de resistencia alta, mientras que a partir de la compresión uniaxial la resistencia se ha establecido como baja o moderadamente dura. Sin embargo existen pequeñas alteraciones del color original de la roca a nivel de aflojamiento, clasificándose como macizo ligeramente meteorizado sin recubrimientos.

Para la determinación del estado de fracturación del macizo rocoso se realizaron un total de 5 estaciones en las litologías correspondientes a la Formación Casaio, siendo elegidas las estaciones de medida en función de la accesibilidad. Se efectuaron un total de 597 medidas de discontinuidades, mayoritariamente al azar, a lo largo de varias líneas, así como en 3 círculos de inventario según el método propuesto por Davis (1984) en la Formación Casaio. Solamente se han podido efectuar determinaciones sobre afloramientos según la dirección ortogonal al plano de intersección foliación/estratificación y en un plano normal al eje del pliegue principal que presenta una dirección NO-SE.

Destaca en este sector de estudio la presencia de una falla de gran importancia a escala de aflojamiento y que condiciona el comportamiento del macizo rocoso. Definida como de tipo híbrido (según la nomenclatura propuesta por McClay, 1987), se dispone oblicuamente a la dirección principal de los ejes de pliegue con dirección NE-SO. Además presenta una abertura de orden mé-

trico, rellena de pizarra finamente foliada y abundante materia carbonosa que constituyen superficies semicoherentes con brillo, y con microcataclasis o brechas de fragmentos de pizarra con matriz de cuarzo, y nódulos decimétricos de alta resistencia. Según las clasificaciones de Fry (1984) para venas de rocas metamórficas se correspondería con las de tipo extensivo con rotación en la dirección de extensión durante la propagación de sucesivas ramas.

A partir de la testificación se diferenciaron 3 grupos principales de juntas: la primera presenta como índice de rugosidad JRC = 8-

10, e inclinación aproximadamente de 70°, la segunda constituye una familia de juntas dispuestas a 45° con índice JRC = 4-6 y la última la constituye una vena con relleno de cuarzo en torno a 1 cm y con buzamiento subhorizontal.

En la tabla II se muestran las principales características de los datos medidos en el campo para cada familia como son: orientación, espaciado, continuidad, rugosidad, resistencia de la pared, abertura y relleno, según las recomendaciones de la ISRM (1978), y si existen variaciones se incluyen entre paréntesis.

Las medidas realizadas en los afloramientos de la berma superior han sido según una línea transversal que corta distintos términos pizarrosos y areníticos, donde el grupo dominante de las discontinuidades determinadas presenta una orientación NNO-SSE. Los máximos valores de las familias 1 y 2 establecidas en ese afloramiento forman un sistema con un ángulo 2s entre ellos de 17° subhorizontales o buzando ligeramente al oeste. Asimismo, se define una familia subvertical de dirección NO-SE, y otras NNO-SSE con buzamientos intermedios (40-54°) hacia el sur. El espaciado de las discontinuidades varía de muy cerrado a cerrado, y la abertura de muy sellada, en la mayoría de los casos, a extremadamente ancha en las superficies de estratificación, en las litologías predominantemente areniscosas. La rugosidad es muy variable y oscila entre 0-2 en superficies de foliación y 10-12 en superficies de estratificación donde se observa la existen-



Foto 1.- Aspecto parcial del aflojamiento pizarroso.

Photo 1.- Slate outcrop view.

cia de estructuras tipo *mullions* o microplicues tectónicos.

En cuanto a la presencia de familias en las distintas estaciones de medida destaca que las familias con direcciones NNO y ONO están presentes en todas ellas, lo que imprime un carácter regional a las mismas. Los buzamientos varían en un amplio rango, desde subverticales a subhorizontales sin presentar una clara relación con la estructura tectónica, estando incluidas en estas las discontinuidades de tipo horizontal, asociadas a fenómenos de descompresión del macizo. En las zonas de charnela analizadas es común, para todas las estaciones, la familia ENE. Por otra parte la familia NS está presente en la estación más próxima a la cuarcita de muro, y la EO es característica de las estaciones asociadas a la pizarra fina, mientras que la NE no aparece en las estaciones de medida al azar.

De la aplicación de los círculos de inventario en la medida de discontinuidades se ha obtenido del índice de diaclasación, que para la Formación Casaio se resume en la tabla III, variando entre 0.039 y 0.19 cm⁻¹. Estudios sobre densidades de fracturación realizadas por Rodríguez Bouzo (1993) para materiales carbonatados de la Zona Cantábrica (Formaciones San Emiliano, Valdeteja, Barcaliente y Alba) aportan valores comprendidos entre 0.57 y 0.21 para la Formación Valdeteja.

Dentro de los parámetros característicos del macizo rocoso el valor de la frecuencia de discontinuidades, *I*, definido para estos materiales pizarrosos de la Formación Casaio, está comprendido entre 5 y 6, estimándose una valoración del tamaño de índice de bloque, *I_b*, del orden de 2. En función del tamaño y forma de los bloques (en este estudio una de las dimensiones de los bloques es mucho mayor que las otras dos), se define el macizo rocoso de tipo IV según las valoraciones propuestas por la ISRM.

Para la caracterización de este macizo rocoso se considera el buzamiento real de la foliación hacia el sur de 25°, y considerando parámetros obtenidos a partir de trabajos geotécnicos en el laboratorio así como medidas de reconocimiento en los afloramientos.

Por otra parte se ha partido del supuesto de una construcción de una galería o cámara de 25 m de diámetro a 200 m de profundidad para la determinación de la clasificación del macizo rocoso en la Formación Casaio. El fin último sería la estimación del sostenimiento y demás índices de caracterización frente a las actividades extractivas en función de los estudios geotécnicos de campo. A partir de los sondeos estudiados la valoración del índice RQD es de “regu-

lar” a “muy malo”, con valoración del espaciado de la fracturación de “moderadamente ancho” a “muy cerrado”.

La clasificación RMR (Bieniawski, 1976) permite estimar a estos terrenos como de Tipo III, esto es de calidad media, con índices de puntuación del orden de 53. En función de las características geotécnicas definidas en esta clasificación cabe establecer que durante una semana la excavación se mantendría estable con 5 m de vano, y asimismo se asigna para este tipo de rocas una cohesión comprendida ente 2 y 3 Kp/cm² y ángulos de rozamiento comprendidos entre los 25 y 35°.

Aplicando la clasificación Q se obtiene, con las mismas características del macizo rocoso, un índice Q de 0,429 que permite valorarlo como muy malo.

A partir de la clasificación SRC (González de Vallejo *et al.*, 2002) este macizo rocoso se enmarca dentro de la clase IV estimándose la calidad de la roca como mala. El índice SRC obtenido para el macizo con las características determinadas es del orden de 32.

Respecto al comportamiento geotécnico de estos materiales frente a la actividad extractiva se ha evaluado que las pizarras son difícilmente excavables con medios mecánicos, mientras que la rozabilidad es “muy buena” (excepto niveles de pizarras limolíticas en las que se han observado los mayores tamaños de grano en el cuarzo). Se evalúan como rocas de “baja abrasividad” y con un índice de fragilidad de tipo “medio” a “poco resistente”. En general definen excavaciones de tipo estable con sostenimiento de bulonado sistemático, mallazo en clave y gunitado en clave y hastiales.

Conclusiones

El macizo pizarroso objeto de estudio (Formación Casaio) presenta una fracturación elevada definiéndose hasta 5 familias de discontinuidades. Predominan las familias con tendencia de buzamientos subvertical y subhorizontal aunque se encontraron variaciones en las direcciones de las discontinuidades según la disposición estructural y las diferencias litológicas.

La valoración del macizo rocoso se resume como:

- índice RMR: calidad “media” tipo III
- índice Q: calidad “malo”
- índice SRC: calidad “muy mala” de clase V

A pesar de la baja calidad que presenta el macizo rocoso para este tipo de afloramientos, en excavaciones subterráneas

la rozabilidad es buena con valoraciones de baja abrasividad para las rocas. Las medidas correctoras de ingeniería consistirían en la aplicación de bulonado sistemático con mallazo en clave y gunitado en clave y hastiales.

Agradecimientos

Esta publicación ha sido realizada durante una estancia postdoctoral financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y deporte en el British Geological Survey a partir de los datos financiados por el proyecto Feder ID-97-0959-C03. El autor agradece a José Carlos Barros Lorenzo su aportación a este estudio durante la medida de las discontinuidades así como al Profesor Manuel Gutiérrez Claverol por sus comentarios para la elaboración de este trabajo.

Referencias

- AENOR (1999). *Geotecnia. Ensayos de campo y de laboratorio*. Aenor, 385 p.
- Barton, N., Lien R. y Lunde, J. (1974). *Rock Mechanics*, 6, 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1976). En: *Symposium Exploration for Rock Engineering*, Balkema, 97-106.
- Davis, G. H., (1984). *Structural Geology of Rocks and Regions*. John Wiley and Sons, 492 p.
- Ferrer, M. y González de Vallejo, L. (1999). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. IGME, 109 p.
- Fry, N. (1984). *The field description of metamorphic rocks*. Geological Society of London Handbook. John Wiley and Sons, 110 p.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, 744 p.
- ISRM (1978). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. Pergamon Press, 15, 319-368.
- McClay, K. (1987). *The mapping of geological structures*. Geological Society of London, Handbook, 161 p.
- Rodríguez Bouzo, L. F. (1993). *Caracterización geomecánica de materiales carbonatados del carbonífero en la zona de Pajares-Villamanín*. Tesis Doctoral (inédita), Univ. de Oviedo, 416 p.
- Rodríguez Sastre, M. A. (2003). *Caracterización geomecánica de materiales pizarrosos del Sinclinal de Truchas (León-Orense)*. Tesis Doctoral (inédita), Univ. de Oviedo, 388 p.