

# CRITERIOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA EN MACIZOS ROCOSOS DE LA ZONA ORIENTAL DEL PAÍS

(CRITERIA FOR ESTIMATING THE ROCK MASSIVE STRENGTH  
IN THE COUNTRY'S EASTERN REGION)

**ROBERTO BLANCO TORRENS**

**MADAY CARTAYA PIRE**

**ROBERTO WATSON QUESADA**

Dr. en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Geología y Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

M. Sc. en Ciencias Técnicas, Facultad de Geología y Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Dr. en Ciencias Técnicas, Profesor Asistente, Facultad de Geología y Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

**RESUMEN:** En el trabajo se presentan los resultados alcanzados por los autores en el estudio de la resistencia de un grupo de macizos rocosos de diferentes minas y túneles subterráneos de la región oriental del país, los que se caracterizan por el grado de afectación estructural que poseen.

Inicialmente se dan criterios sobre los principales métodos que hoy son empleados para valorar las características mecánicas en las discontinuidades, y posteriormente entrar a analizar diferentes vías para la estimación de la resistencia en estos macizos rocosos.

Como resultado del trabajo se ofrecen expresiones para la estimación de la resistencia en los macizos rocosos

estudiados, que son de gran importancia, ya que permiten enfrentar diferentes tareas de proyecto y construcción en las zonas de estudio con una mayor economía y confiabilidad, pero además son posibles de extrapolar a otros macizos rocosos del país.

**Palabras claves:** estimación de resistencia, excavaciones subterráneas, juntas, rugosidad, macizos rocosos.

**ABSTRACT:** In this review the results are presented reached by the authors in the study of the strength characteristics of a group of rock massive of different underground mines and tunnels of the country's eastern region that are characterized by the affectation structural degree that possess.

Initially judgment are given on the main methods that at the moment are employed for to value the mechanical characteristics in the joints. Further more to analyze the different ways for the strength estimate in these rock massive.

As result of the research expressions for the strength estimate are offered in these rock massive, that are of great importance, since they allow to face different project tasks and construction in the study areas with a bigger economy and reliability, but also it is possible to extrapolate to other rock massive.

**Keywords:** strength estimate, underground excavation, joints, roughness, rock massive.

## INTRODUCCIÓN

Para estimar la resistencia de los macizos rocosos, caracterizados por la existencia en ellos de afectaciones y discontinuidades geológicas, es necesario conocer las propiedades mecánicas de las rocas, las características de las discontinuidades y el estado y comportamiento mecánico-estructural del macizo rocoso.

Respecto a las propiedades mecánicas de las rocas existe un grado suficiente de información de los métodos para su determinación y del grado de confiabilidad de cada uno de estos métodos, menos estudiados están la valoración de comportamiento y características mecánicas que se presentan en las discontinuidades y su posible rango de variabilidad.

La valoración del comportamiento mecánico estructural del macizo y su caracterización geomecánica, debido

a su complejidad, aún hoy en día es un problema no concluido, por lo que se realizan en la actualidad numerosas investigaciones en este sentido.

El presente trabajo se planteó como objetivo hacer inicialmente un breve análisis de los principales criterios empleados en la valoración de las propiedades mecánicas de las discontinuidades, para posteriormente y basándose en las características mecánico-estructurales del macizo hacer una estimación de la resistencia en los macizos rocosos estudiados.

## MÉTODOS

### Propiedades mecánicas de las discontinuidades

La resistencia al corte de las discontinuidades es un aspecto importante que se debe tener en cuenta a la hora de determinar la estabilidad de un macizo rocoso.

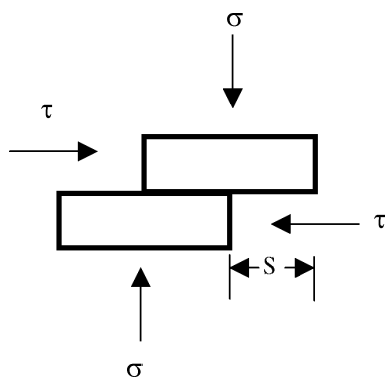


Figura No.1. Junta plana y lisa sometida a la acción de tensiones  $\sigma$  y  $\tau$ .

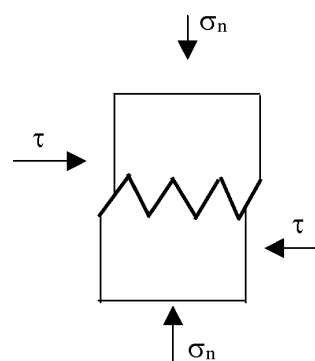


Figura No. 3. Esquema de una junta rugosa sometida al corte directo.

Existen muchos criterios empíricos para definir la resistencia al corte en las discontinuidades. En el presente acápite se hace una breve referencia sólo a los más difundidos y que pueden ser aplicados en los macizos estudiados (Ayala, 1993, Barton *et al.*, 1977; Gian Franco, 1990; Ramírez, 1998).

**Resistencia al corte de una discontinuidad plana y lisa**

Se considera una junta sometida a la acción de tensiones  $\sigma$  y  $\tau$  (figura No.1)

Se producirá un desplazamiento  $\delta$ . Puede darse el caso que la junta esté cementada, entonces la magnitud necesaria de  $\tau$  para que se produzca desplazamiento será mayor.

En la figura No. 2 se representan curvas  $\tau - \delta$  que caracterizan ambas situaciones.

**Resistencia al corte de una discontinuidad rugosa**

La curva 2 de la figura No.2, caracteriza el comportamiento en una discontinuidad rugosa.

Se analizan varios criterios.

Patton fue el primero en cuantificar los efectos de la rugosidad en la resistencia al corte de las discontinuidades. En la figura No. 3, se muestra el esquema de una junta sometida al corte.

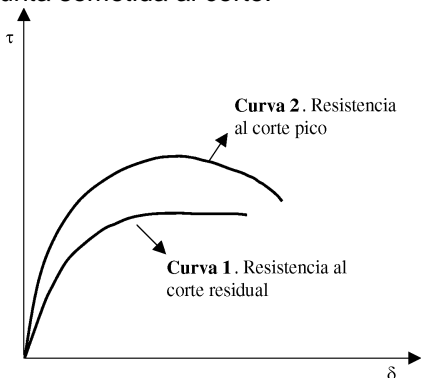


Figura No. 2. Resistencia al corte de discontinuidades cementadas y no cementadas. Curva 1. Para una discontinuidad no cementada. Curva 2. Para una discontinuidad cementada. Esta curva es similar a la de una discontinuidad rugosa.

Para este caso se plantea la siguiente ecuación (Ayala, 1993; Gian Franco, 1990; Ramírez, 1998):

$$\tau = \sigma T_g (\rho + i) \tag{I}$$

Patton experimentalmente comprobó que la expresión anterior es válida para valores bajos de  $\sigma_n$  y llegó a la conclusión de que para  $\sigma_n$  elevados las envolventes de roturas resultantes no son lineales, y recomienda para representar la resistencia al corte de juntas rugosas el gráfico de la figura No. 4.

Jaeger, siguiendo la teoría desarrollada por Patton, plantea la siguiente expresión empírica para representar la resistencia al corte en las discontinuidades rugosas (figura No. 4):

$$\tau = C_1 (1 - e^{-b\sigma}) + \sigma T_g \rho_R \tag{II}$$

Donde:

$C_1$  – Resistencia al corte (cohesión) deducible de las rugosidades.

$\rho_R$  – Ángulo de fricción interna residual de las juntas.

$b$  – Coeficiente empírico de ajuste, es obtenido por el ajuste de las asíntotas.

Según Ladanyi y Archambault, la envolvente bilineal es insuficiente por lo que ellos utilizan una envolvente curva. Para poder reproducir los valores que se obtienen tanto para  $\sigma_n$  altos como bajos, con el fin de definir la resistencia al corte propone la siguiente ecuación (Ayala, 1993; Ramírez, 1998):

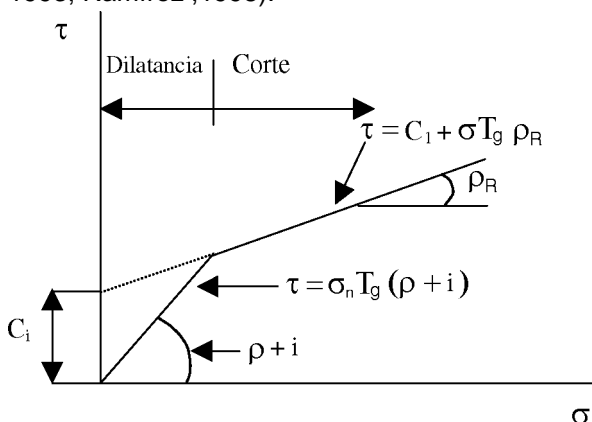


Figura No. 4. Gráfico para representar la resistencia en las juntas rugosas según Patton.

$$\tau = \frac{\sigma(1 - a_s)(V + T_g \rho_m) + a_s \tau_i}{1 - (1 - a_s)V T_g \rho_m} \tag{III}$$

Donde:

$a_s$  - es la fracción de la superficie de la junta que es solicitada al cortante a través de las rugosidades.

$V$  - valor de la dilatación en la resistencia pico.

$\rho_m$  - ángulo de fricción a lo largo de la superficie de contacto en las discontinuidades.

$\tau_i$  - resistencia de la roca intacta.

**Según Barton-Bandis (Modelo JRC - JCS)**

Este criterio actualmente es muy utilizado para el estudio de las propiedades de las juntas sin relleno, situación que se presenta en sectores de los macizos rocosos estudiados. La resistencia al corte según este criterio se da por la expresión (Barton *et al.*, 1977; Ramírez, 1998):

$$\tau = \sigma T \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma} \right) + \rho_R \right] \tag{IV}$$

Donde:

$\tau$  - resistencia al corte.

JRC - coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.

JCS - resistencia a compresión simple del material de los bordes de la discontinuidad.

$\sigma$  - tensión efectiva sobre la discontinuidad.

Si el valor de la tensión  $\sigma$  se aproxima al de JCS se puede mejorar la predicción de la resistencia al corte dada por  $\sigma_1 - \sigma_3$ , o sea, la expresión toma la siguiente forma.

$$\tau = \sigma T_g \left[ JRC \log \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma} \right) + \rho_R \right] \tag{V}$$

En este caso aumenta la resistencia de la rugosidad debido al mayor confinamiento (aumenta la superficie de contacto entre los bordes de la discontinuidad). Este criterio de Barton-Bandis ha sido utilizado por los autores en la valoración de las propiedades mecánicas de las discontinuidades en algunos de los macizos rocosos estudiados.

**CARACTERÍSTICA DE RESISTENCIA DE LOS MACIZOS ROCOSOS**

Para obtener criterios de la resistencia de los macizos rocosos se pueden usar diferentes clasificaciones geomecánicas (índice RMR de Beniaowski, índice Q de Barton, índice RSR de Wickham, índice RMI de Palstrom y otros), también algunos investigadores emplean criterios como el de Fairhurst (para rocas no alteradas) o el de Ladanyi y Archambault (para macizos muy agrietados) (Ayala, 1993; Gian Franco, 1990; Hoek y Brown, 1999; Ramírez, 1998).

En la actualidad se emplean mucho las propuestas de Hoek y Brown (Hoek, 1994; Hoek y Brown, 1988; Hoek

**TABLA NO. 1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS DIFERENTES MACIZOS ROCOSOS ESTUDIADOS**

Obra	Tipos de rocas	Parámetros de cálculo					
		RQD	RMR	GSI	$m_b/m_i$ *	S	a
Mina Merceditas	Peridotita meteorizada	65 - 75	50 - 55	65 - 70	0,094	0,001 **	0,60
	Peridotita	85 - 90	70 - 75	85	0,297	0,017	0,5
	Cromita	85	70	80	0,243	0,026	0,5
	Dunita	75 - 85	60	60 - 70	0,202	0,04	0,5
	Peridotita	85 - 90	45 - 60	60 - 70	0,197	0,018	0,5
Mina Amores	Dunita	80 - 85	45 - 60	60 - 70	0,189	0,019	0,5
	Cromita	90 - 95	60	65 - 70	0,208	0,020	0,5
Mina El Cobre	Tobas andesíticas	90	70	80 - 85	0,274	0,028	0,5
	Andesita porfírica	95	75	85 - 90	0,306	0,036	0,5
	Serpentinita meteorizada	45 - 50	40	55	0,092	0,0006**	0,6
Túneles populares de Moa	Serpentinita no alterada	60 - 75	55 - 60	60 - 65	0,116	0,008	0,5
	Laterita ferroniquelífera	< 45	35 - 40	45 - 50	0,062	0,0007**	0,65

Donde:

\* - valor de la constante  $m_b$  de Hoek y Brown para roca intacta

\*\* - Se recomienda en estos casos tomar el valor de  $S = 0$ , ya que son macizos muy afectados y de muy baja calidad.

**Tabla N o. 2.** Expresiones para la estimación de la resistencia de las rocas .

Obra	Tipo de roca	Criterio para la estimación de la resistencia.
<b>Mina Mercedesitas</b>	Peridotita meteorizada	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (0,5 \div 0,7) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,001 \right)^{0,6}$
	Peridotita	
	Cromita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (5,5 \div 6,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,017 \right)^{0,5}$
	Dunita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (2,0 \div 3,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,036 \right)^{0,5}$
<b>Mina Amores</b>	Peridotita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (4,5 \div 5,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,018 \right)^{0,5}$
	Cromita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (4,0 \div 4,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,020 \right)^{0,5}$
	Dunita	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (5,0 \div 5,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,019 \right)^{0,5}$
<b>Mina El Cobre</b>	Tobas andesíticas	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (4,3 \div 4,8) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,028 \right)^{0,5}$
	Andesita porfirítica	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (6,5 \div 7,0) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,036 \right)^{0,5}$
<b>Túneles populares de Moa</b>	Serpentinita meteorizada	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (0,2 \div 0,4) \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^{0,6}$
	Serpentinita poco alterada	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (2,0 \div 2,5) \frac{\sigma_3}{R_c} + 0,008 \right)^{0,5}$
	Laterita ferroniquelífera	$\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( (0,2 \div 0,3) \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^{0,6}$

\* - podría emplearse también la expresión:  $\sigma_1 = \sigma_3 + R_c \left( 0,6 \frac{\sigma_3}{R_c} \right)^{0,6}$

*et al.*, 1995; Hoek y Brown, 1999), fundamentadas a partir del gran volumen de ensayos y de un sistema de relaciones matemáticas que permiten obtener criterios sobre la resistencia del macizo.

Para la estimación de la resistencia de los macizos rocosos de Cuba oriental estudiados por los autores (Cartaya, 1996; Cartaya y Blanco, 1999; Falero, 1996; Guillermo, 1998) se plantea la expresión dada por Hoek y Brown en 1994 ( Hoek, 1994; Hoek *et al.*, 1995; Hoek y Brown, 1999):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[ m_b \frac{\sigma_3}{R_c} + S \right]^a \tag{VI}$$

Donde:

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$  – tensiones principales efectivas.

$m_b$  – valor de la constante m de Hoek y Brown para el macizo rocoso estudiado.

$R_c$  – resistencia a compresión lineal de la roca intacta.

S y a – constantes que dependen de las características del macizo estudiado.

En algunos de los macizos estudiados por los autores (macizos de rocas fuerte o medianamente fuerte y poco fuerte), que presentan una alta cohesión, se puede considerar  $a = \frac{1}{2}$  (Guillermo, 1998; Hoek, 1994; Hoek y Brown, 1988; Hoek *et al.*, 1995) por lo que la expresión anterior se transforma en:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m_b \frac{\sigma_3}{R_c} + S} \quad (\text{VII})$$

En otros macizos de baja calidad, por ejemplo el caso de las rocas meteorizadas, en los que la fuerza de enlace se ve afectada y la resistencia a tracción se hace débil se emplea el criterio de resistencia modificado, o sea, haciendo  $S = 0$  (Hoek, 1994; Hoek y Brown, 1988; Hoek y Brown, 1999; Ramírez, 1998):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[ m_b \frac{\sigma_3}{R_c} \right]^a \quad (\text{VIII})$$

Para el empleo de las expresiones vistas anteriormente hace falta conocer los valores de  $m_b$ ,  $a$  y  $S$ .

Estos valores, orientativamente se pueden estimar a partir del valor de RMR de Beniaowski, cuando éste sea mayor de 25.

Para el caso en que el RMR es menor que 25 se introduce el empleo del índice de resistencia geológico (GSI) cuyos valores oscilan entre 10 y 100. Este índice tiene en consideración la reducción de la resistencia del macizo rocoso por las diferentes condiciones geológicas.

El valor de GSI, se puede obtener a partir de considerar los cuatro primeros parámetros de la clasificación de Beniaowski (Barton *et al.*, 1977; Cartaya, 1996; Falero, 1996) y suponer el macizo totalmente seco (o sea, añadir 10 puntos) y que la orientación de las discontinuidades sea muy favorable (no se quitan puntos).

De las investigaciones realizadas por los autores en los macizos rocosos estudiados se obtienen los siguientes resultados.

Con los valores obtenidos representados en la tabla No.1 y con el empleo de las expresiones VI, VII y VIII según el caso concreto, se obtienen expresiones generales que permiten estimar la resistencia de los macizos rocosos estudiados.

Estas expresiones para los diferentes tipos de macizos rocosos estudiados se dan en la tabla No. 2.

## CONCLUSIONES

1. Se analizan los principales criterios que se emplean en la actualidad para valorar las características mecánicas en las discontinuidades de los macizos rocosos.
2. Se hace una valoración de los diferentes criterios usados para la estimación de la resistencia del macizo rocoso.
3. Se determinan los valores de Q, RMR, GSI,  $a$ ,  $s$ ,  $m_b/m_i$  para los macizos rocosos estudiados.
4. Se establecen expresiones para estimar la resistencia en los macizos rocosos estudiados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ayala Carcedo, Francisco y otros (1993): *Manual de ingeniería de taludes*. Instituto Geominero de España, Madrid, España.
- Barton N. y V. Choubey (1977): *The shear strenght of rock joints in theory and practice*. Symposium of Rock Mechanics, p. 1-54.
- Cartaya Pire, M. (1996): "Caracterización geomecánica de los macizos rocosos". Tesis de maestría, ISMM, Departamento de Minería.
- Cartaya P., M. y R. Blanco (1999): "Modelos geomecánicos del macizo rocoso en la mina de cromo Merceditas", en *Minería y Geología*. Moa, XVI (2), p. 47-52.
- Falero, S. F. (1996): "Estudio del agrietamiento del macizo rocoso en la mina Merceditas". Tesis de maestría, ISMM, Departamento de Minería.
- Gian Franco, P. (1990): *Diseño geotécnico de túneles*. Universidad Central de Caracas, Venezuela.
- Guillermo, A. R. (1998): "Criterios para el diseño de las cámaras y pilares en la mina Merceditas". Tesis de maestría, ISMM, Departamento de Minería.
- Hoek, E. (1994): "Strength of rock and rock masses" en *ISRM News Journal*. Londres, 2, p. 4-16.
- Hoek, E. y E. T. Brown (1988): "Empirical strength criterious for rock masses" en *Geotechnical Engeneering*, p. 1003-1035.
- Hoek, E., P. K. Kaiser y W. F. Bawder (1995): *Support of underground excavations in hard Rock*. A. Balkema, Rotterdam.
- Hoek, E. y E. T. Brown (1999): *Practical estimates of rock mass strength*. *Miting of Rock Mechanic*. London.
- Ramírez, O. P. (1998): "Caracterización mecánica de los macizos rocosos en los túneles". Trabajo presentado en el II Simposio de Geotecnia de la Universidad Central de las Villas, Santa Clara [inédito].