

Clasificación de masas rocosas con fines geotécnicos

Daniel A. Salcedo Rodríguez

*Profesor de postgrado
Universidad Simón Bolívar
Caracas - Venezuela
Email: dansalc@attglobal.net*

RESUMEN

Se presenta una recopilación general de los sistemas de clasificación de rocas y masas rocosas con fines geotécnicos, y se evalúan en forma más detallada aquellos sistemas más utilizados en Venezuela, destacando las incertidumbres que surgen en la aplicación de los mismos. Se describen los fundamentos de un índice para masas rocosas denominado factor de discontinuidad, recientemente publicado, el cual luce promisorio por estar fundamentado en un extenso programa experimental, y finalmente se propone un sistema de clasificación para rocas metamórficas y sedimentarias, el cual pretende reducir tanto las incertidumbres de los sistemas existentes como la subjetividad en su utilización.

INTRODUCCION

Desde el nacimiento de la mecánica de suelos y su interacción con la geología aplicada y mecánica de rocas, se han publicado diferentes clasificaciones de rocas y masas rocosas con fines geotécnicos. Tales clasificaciones han tenido como objetivo cuantificar en cierta forma las diferentes características de una roca o masa rocosa, y relacionar dichos resultados con propiedades de forma tal que la calidad de la roca sea expresada principalmente en términos de resistencia y módulos. Si bien dichas clasificaciones no constituyen un procedimiento riguroso para estimar otras propiedades, su uso se ha generalizado en la práctica de la ingeniería geotécnica debido a que para obtener parámetros más realistas, se requieren ensayos de campo que consumen mucho tiempo y son costosos, los cuales son deseables pero solo han sido justificados en grandes obras de ingeniería. En todo caso hay que estar conciente que tales métodos son empíricos, pero algunos de ellos tienen el mérito que han relacionado la experiencia práctica obtenida en proyectos previos con el fin de predecir las condiciones de proyectos futuros en un determinado sitio, y la mayoría de ellos han sido probados con éxito en obras ya concluidas.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las principales clasificaciones con fines geotécnicos publicadas en la literatura especializada, indicando el autor y el año de las referencias que se detallan al final de este artículo.

Tabla 1. Principales clasificaciones de roca intacta y masas rocosas con fines geotécnicos.

Clasificación	Referencia
Clasificación de carga de roca	Terzaghi, 1946
Clasificación de masas rocosas para túneles	Laufffer, 1958
Clasificación de masas rocosas para túneles	Protodyakonoff, 1960
Clasificación y propiedades índices de roca intacta.	Deere & Miller, 1966
Clasificación de masas rocosas para túneles basada en el RQD	Deere, Peck, Parker, Monsees & Schmidt, 1970
Clasificación geomecánica de masas rocosas aplicadas a minería.	Laubscher, 1976
Clasificación de masas rocosas para túneles (RSR)	Wickham, Tiedemann & Skinner, 1972
Clasificación geomecánica de masas rocosas (RMR)	Bieniawski, 1973, 1976, 1984
Clasificación de masas rocosas (Q)	Barton, Lien & Lunde, 1974, 2002
Clasificación para estimar escarificación de materiales.	Weaver, 1975
Clasificación de resistencia de masas rocosas con fines geomórficos.	Selby, 1980-1982
Clasificación práctica de masas rocosas para taludes.	Romana, 1985, 1988
Sistema de clasificación para excavación de materiales naturales.	Kirsten, 1982
Clasificación para predecir el tipo de remoción en banquetes y excavaciones para obras viales.	Salcedo, 1988
Índice de Resistencia Geológica (GSI).	Hoek, Kaiser & Borden, 1995, Hoek & Brown, 1997. Hoek, Marinos & Benissi, 1998.
Clasificación para estimación de estabilidad en roca	Haines & Terbrugge, 1991
Extensión de la clasificación Bieniawski-Romana para taludes en masas rocosas.	Perri, 1994
Adaptación del GSI a rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa Venezolana.	Truzman, 2000
Clasificación geomecánica para fundaciones de presas (DMR).	Romana, 2003
El factor de discontinuidad Jf. (Joint factor).	Ramamurthy, 1994, 2001
Clasificación geotecnológica para rocas y masas rocosas.	Ramamurthy, 2004

Es interesante resaltar que así como en muchos tópicos asociados a la Geotecnia, el Dr. Karl Terzaghi con su clasificación de masas rocosas publicada en 1946 y utilizada para túneles, prácticamente señaló el camino para el desarrollo de futuras clasificaciones, destacando la importancia de varios factores tales como la frecuencia y orientación de discontinuidades, características de las superficies de las mismas y la influencia del relleno en el comportamiento de las masas rocosas.

SISTEMAS DE CLASIFICACION DE MASAS ROCOSAS MAS USADOS EN VENEZUELA

De las clasificaciones previamente mencionadas, las más utilizadas en Venezuela, principalmente aplicadas al proyecto y construcción de túneles, son las de Bieniawski (RMR) y el GSI de Hoek et al. Los detalles de ambas clasificaciones son ampliamente conocidos y pueden ser consultados en las referencias correspondientes indicadas en la tabla anterior. Solo para fines de realizar comentarios respecto a dichas clasificaciones, éstas se anexan al presente artículo, resumiendo a continuación las bases de las mismas.

Clasificación Geomecánica de Bieniawski (RMR)

La conocida clasificación de Bieniawski evalúa los siguientes seis parámetros.

- Compresión sin confinar de la roca intacta
- Espaciamiento entre discontinuidades
- Índice de calidad de la roca (RQD)
- Condición de las discontinuidades (rugosidad, persistencia, abertura, relleno)
- Flujo o presión de agua
- Orientación de las discontinuidades

Bieniawski le asigna una puntuación a cada parámetro y define el índice RMR (Rock Mass Rating) como la sumatoria total de las puntuaciones individuales. De acuerdo a los valores del RMR, Bieniawski define cinco categorías de masas rocosas. Cabe destacar que en las distintas publicaciones de dicha clasificación, existen diferencias en los puntos asignados a los parámetros, por lo tanto es conveniente citar el año de la referencia.

Muchos autores han utilizado la Clasificación de Bieniawski considerando los primeros cuatro factores (compresión sin confinar, espaciamiento, RQD, y las condiciones de las discontinuidades), y asignándole 10 puntos al factor de agua subterránea y cero puntos al factor de orientación de discontinuidades. Este valor es referido en la literatura como RMR₇₆. Otros autores utilizan el mismo procedimiento pero asignan 15 puntos al factor de agua subterránea y se refieren al RMR₈₉. Ambos términos han sido correlacionados con el Índice GSI de Hoek et al (1995).

En opinión del autor del presente artículo, si bien la clasificación geomecánica de Bieniawski es de fácil utilización en campo, durante su uso se presentan ciertas dudas e interrogantes entre las que se pueden mencionar:

- Cuál discontinuidad debe ser seleccionada para la asignación de las puntuaciones individuales?
- Debe seleccionarse la discontinuidad más desfavorable en cuanto a su orientación? o más desfavorable en cuanto a su frecuencia? o más desfavorable en cuanto a su persistencia?, o deben emplearse valores promedio de todas las discontinuidades?
- Cuando se desea definir la puntuación de la resistencia a la compresión sin confinar surgen dudas para el caso de rocas metamórficas donde la orientación de la foliación tiene una definitiva influencia en dicho valor. La clasificación no especifica si el valor debe seleccionarse, por ejemplo, asumiendo que la foliación es perpendicular a la

aplicación de la carga.

- En rocas metamórficas foliadas también surgen dudas en cuanto a si el espaciamiento entre superficies debe ser definido independientemente de que la foliación esté abierta o cerrada. Cabe destacar que considerar la foliación con un espaciamiento del orden de 1 mm o 1 cm, castigaría significativamente el valor del RMR resultando una roca de calidad muy pobre, lo que se traduce, en el caso de túneles, en la necesidad de un soporte primario más pesado y como consecuencia más costoso.
- Finalmente, el análisis detallado de las puntuaciones que dicha clasificación asigna a la orientación de las discontinuidades, relacionando las mismas respecto a la orientación del túnel y sentido de la excavación, conlleva a muchas incertidumbres. El autor de este trabajo ha realizado una revisión de la literatura técnica a este respecto y no ha encontrado una explicación satisfactoria o un razonamiento que sea consecuente con las decisiones relativas a los puntos asignados para las diferentes condiciones. Por otra parte la clasificación tampoco especifica cual discontinuidad debe ser seleccionada para tal fin. Para el lector no familiarizado con la clasificación, la tabla y gráficos publicados que evalúan el factor de orientación de discontinuidades se anexa al final del artículo y puede ser consultada en Bieniawski (1973, 1976, 1984, y 1989).

Índice de Resistencia Geológica (GSI)

El índice de resistencia geológica GSI fue introducido por Hoek, Kaiser & Bawden (1995), Hoek & Brown (1997) y extendido por Hoek, Marinos & Benissi (1998). Estos autores propusieron el concepto del GSI tratando de simplificar la clasificación de masas rocosas y correlacionaron el mismo para estimar otras propiedades tales como el ángulo de fricción, la resistencia cohesiva, el módulo de deformación y la resistencia a la compresión sin confinar de la masa rocosa. La correlación entre el GSI y las propiedades de la masa rocosa se considera como una valiosa contribución en el campo de la mecánica de rocas aplicada.

La determinación del GSI requiere en primer lugar, seleccionar la estructura típica de la masa rocosa. En su versión original los autores definieron solo cinco grupos de rocas, en orden decreciente de trabamiento (interlocking) de bloques, a saber: Intacta o masiva, fracturada en bloques (Blocky), muy fracturada en bloques (Very blocky), fracturada/perturbada (Blocky/disturbed), y Desintegrada. En una publicación posterior se incluyó la categoría de “Foliada/laminada”, y se ubicó en la última categoría por debajo de la “desintegrada”. La tabla para la estimación del GSI, anexa, presenta una descripción breve de las diferentes categorías de estructura y las complementa con un pequeño croquis ilustrativo.

En segundo lugar, la estimación del GSI requiere definir la calidad de la superficie de la discontinuidad la cual se divide en cinco grupos que en orden decreciente de calidad varían desde “muy buena” (muy rugosa, fresca, no meteorizada) hasta “muy pobre” (estriada, pulida, muy meteorizada con costras o rellenos arcillosos).

La definición del Índice GSI es realmente un procedimiento muy sencillo, sin embargo, durante su estimación también surgen ciertas dudas tales como:

- No especifica cual discontinuidad debe seleccionarse para determinar las condiciones de la superficie. Una masa rocosa tiene generalmente al menos tres discontinuidades que pueden tener características y orígenes diferentes. Surgen por lo tanto, las mismas preguntas previamente planteadas en el caso de la Clasificación de Bieniawski.

- La incorporación de la categoría “Foliada/laminada” en la última categoría, castiga en forma drástica el valor de GSI para los casos de rocas metamórficas con foliación poco penetrativa.

Basados en la amplia experiencia adquirida por diferentes geólogos en el uso del GSI durante la construcción de los túneles para la nueva red ferrocarrilera Venezolana, Truzman (2000) adaptó la tabla de Hoek et al (1998) para su uso exclusivo en rocas metamórficas. Esta adaptación mejora significativamente la estimación del GSI para las masas rocosas metamórficas, sin embargo, en opinión del suscrito, no resuelve en su totalidad el problema relativo a cual discontinuidad debe seleccionarse para determinar las condiciones de superficie. El usuario de la Tabla anexa publicada por Truzman, tendría siempre la duda si debe seleccionar la discontinuidad más desfavorable por su orientación y/o por sus características tales como rugosidad, persistencia, espaciamiento, etc.

EL FACTOR DE DISCONTINUIDAD “Jf”

Cuando se trata el tema de caracterización de masas rocosas, es necesario incluir un concepto relativamente reciente que a juicio del autor luce promisorio por estar fundamentado en un extenso programa experimental en varios tipos de rocas. Ramamurthy & Arora (1994), Ramamurthy (2001, 2004), han realizado una extensa investigación simulando discontinuidades en núcleos de rocas isotrópicas intactas. Para tal fin desarrollaron una técnica especial para crear discontinuidades en muestras de roca intacta, variando su número e inclinación. En total ejecutaron 250 ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y 1300 ensayos triaxiales en muestras intactas y con discontinuidades.

Entre las principales conclusiones de la investigación, se pueden citar las siguientes:

- Se observó que la resistencia a la compresión disminuye con un aumento en el número de discontinuidades por metro.
- Además del número de discontinuidades por metro, la orientación de la discontinuidad es otro parámetro significativo que controla la resistencia. Las resistencias mínimas se observaron a ángulos β con la vertical entre 30° y 40° . Esta inclinación del plano concuerda con el valor $45 - \phi/2$, derivado teóricamente para materiales friccionantes.
- Los ensayos triaxiales en muestras con discontinuidades revelaron que no hay cambios significativos en el ángulo de resistencia al corte debido a cambios en el número de discontinuidades por metro.
- El intercepto de cohesión c , disminuye con un aumento del número de discontinuidades por metro.

Basados en un extenso programa de ensayos, Ramamurthy & Arora (1994) definieron un factor denominado “Factor de discontinuidad” J_f (Joint factor) que toma en cuenta el número

de discontinuidades por metro, la inclinación de la discontinuidad a lo largo de la cual ocurre el deslizamiento y la resistencia al corte en dicha discontinuidad. Los investigadores encontraron que el factor Jf está relacionado con el cociente $\sigma_{cj} / \sigma_{ci}$ donde σ_{cj} es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca con discontinuidades y σ_{ci} la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, independientemente del tipo de roca. Esta relación es identificada por los autores como σ_{cr} . Ramamurthy & Arora (1994) argumentan que la mayoría de las investigaciones que han estudiado la resistencia y deformación de rocas con discontinuidades, se han concentrado en el efecto individual de tres de los parámetros más significativos de rocas con discontinuidades (frecuencia, orientación y resistencia) pero no han intentado mostrar la influencia combinada de dichos parámetros. Expresan que solamente los trabajos publicados por Hoek & Brown y por Ramamurthy et al, consideran más de un parámetro de la roca con discontinuidades para predecir la resistencia en estado no confinado y confinado.

El factor de discontinuidad Jf ha sido definido con la siguiente relación:

$$Jf = \frac{Jn}{n \cdot r} \quad (1)$$

donde:

Jn = frecuencia de la discontinuidad (Número de discontinuidades por metro).

n = parámetro de inclinación que depende de la orientación de la discontinuidad (β) con respecto al esfuerzo principal mayor. La discontinuidad más cercana a $45 - \phi_j/2$, con la dirección de aplicación de la carga (esfuerzo principal mayor) será la más crítica para que ocurra deslizamiento (ϕ_j = ángulo de fricción en la discontinuidad), y debería ser considerada para estimar el valor de Jf . La discontinuidad que tenga el máximo valor de Jf , será la discontinuidad más débil y define la resistencia. Los autores comprobaron que los valores de n son aproximadamente los mismos, independientemente de la frecuencia de la discontinuidad para una inclinación.

r = parámetro de resistencia de la discontinuidad y toma en consideración la influencia de discontinuidades cerradas o rellenas, espesor del relleno, rugosidad, extensión de la meteorización en las paredes de la discontinuidad y cementación en la discontinuidad. Este factor puede ser determinado en términos de un valor equivalente de ángulo de fricción a lo largo de la discontinuidad como $\phi_j = \tau_j / \sigma_{nj}$, obtenido de ensayos de corte, en los cuales τ_j es la resistencia al corte a lo largo de la discontinuidad bajo un esfuerzo normal σ_{nj} . En otras palabras, el parámetro r se determina como la tangente del ángulo de fricción movilizado a lo largo de la discontinuidad. Se observó durante las investigaciones que el parámetro r en discontinuidades limpias depende del valor de la resistencia a la compresión de la roca intacta σ_{ci} . Cuando existe cohesión a lo largo de la discontinuidad, el valor de r puede ser estimado con $r = \tau_j / \sigma_{nj}$, donde τ_j es la resistencia al corte pico del plano de discontinuidad y σ_{nj} es el esfuerzo normal esperado en dicho plano.

Aun cuando la investigación de Ramamurthy & Arora (1994) ha sido en discontinuidades 100% persistentes, los resultados pueden ser aplicados en discontinuidades sub-persistentes considerando un ángulo de fricción ϕ en la porción abierta, y cohesión c y ángulo de fricción ϕ en la porción intacta, utilizando un ϕ equivalente a lo largo de la discontinuidad en consideración (Ramamurthy, 2004, comunicación personal).

Los valores de n y r , se indican en las Tablas 2, 3 y 4. Los valores en la Tabla 4 son sugeridos solo para ser usados en ausencia de ensayos de corte. Si el relleno de la discontinuidad en una profundidad de 1 m es mayor de 5 mm, el número equivalente de discontinuidades puede ser obtenido dividiendo su espesor en mm por 5 mm. Se considera que 5 mm es un valor mínimo límite para que el relleno trabaje completamente, sin interferencia de la rugosidad de la discontinuidad. El valor Jf revela la debilidad introducida por las discontinuidades en la roca intacta; mientras más bajo es el valor de Jf , mayor es la resistencia.

Tabla 2. Valores de n para diferentes orientaciones del ángulo β .

β en grados	Valores de n	
	Tipo de anisotropía	
	En forma de U	En forma de hombro
0	0.82	0.85
10	0.46	0.60
20	0.11	0.20
30	0.05	0.06
40	0.09	0.12
50	0.30	0.45
60	0.46	0.80
70	0.64	0.90
80	0.82	0.95
90	0.95	0.98

En la Figura 1 se muestra la variación de los valores de n en función de los valores de β , para dos tipos de anisotropía. Estos dos tipos de anisotropía se observaron cuando se representa gráficamente la variación de la resistencia a la compresión con respecto a la orientación de la discontinuidad β .

La anisotropía en forma de U se observa frecuentemente en rocas débiles con un set paralelo de planos de debilidad. La anisotropía en forma de hombro es predominante en rocas resistentes con diaclasas o estratificación muy bien definidas.

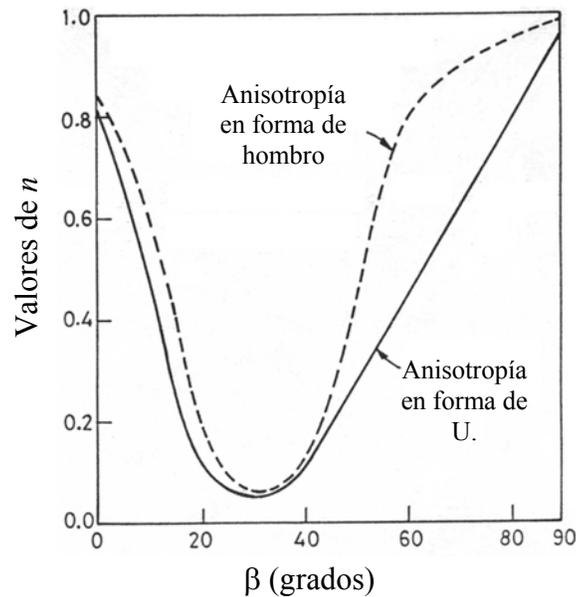


Figura 1. Variación del parámetro de inclinación n , con la orientación de la discontinuidad (Ramamurthy & Arora, 1994).

Tabla 3. Valores propuestos para el parámetro r para diferentes rangos de σ_{ci} .

Compresión uniaxial de la roca intacta σ_{ci} (MN/m ²)	Parámetro r	Observaciones
2.5	0.30	De grano fino, micáceas hasta de grano grueso
5.0	0.45	
15.0	0.60	
25.0	0.70	
45.0	0.80	
65.0	0.90	
100.0	1.00	

Tabla 4. Valores propuestos de r , para discontinuidades rellenas en estado residual.

Material de relleno	Angulo de fricción ϕ_j°	Resistencia de discontinuidad, $r = \tan \phi_j^\circ$
Arena gravosa	45	1.00
Arena gruesa	40	0.84
Arena fina	35	0.70
Arena limosa	32	0.62
Arena arcillosa	30	0.58
Limo arcilloso		
Arcilla-25%	25	0.47
Arcilla-50%	15	0.27
Arcilla-75%	10	0.18

La Figura 2 muestra la variación de σ_{cr} con el factor J_f , donde σ_{cr} es la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial de la roca con discontinuidades y la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta ($\sigma_{cr} = \sigma_{cj} / \sigma_{ci}$). En esta figura se han representado los datos de los experimentos de Ramamurthy & Arora, y los datos de otros autores indicados en el gráfico.

Puede verse en dicha figura que a medida que J_f aumenta, la correspondiente resistencia a la compresión de la roca con discontinuidades disminuye en comparación con la resistencia de la roca intacta. Una curva exponencial ajustada a los datos, conduce a la siguiente expresión:

$$\sigma_{cr} = \exp(-0.008J_f) \quad (2)$$

Es interesante destacar que esta expresión satisface para diferentes tipos de materiales con un amplio rango de valores de resistencia a la compresión de roca intacta. Las rocas representadas en dicho gráfico tienen valores de resistencia a la compresión en roca intacta (σ_{ci} en MN/m²), de 9.5, 11.3, 15.0, 55.1, 62.3, 110 y 123.

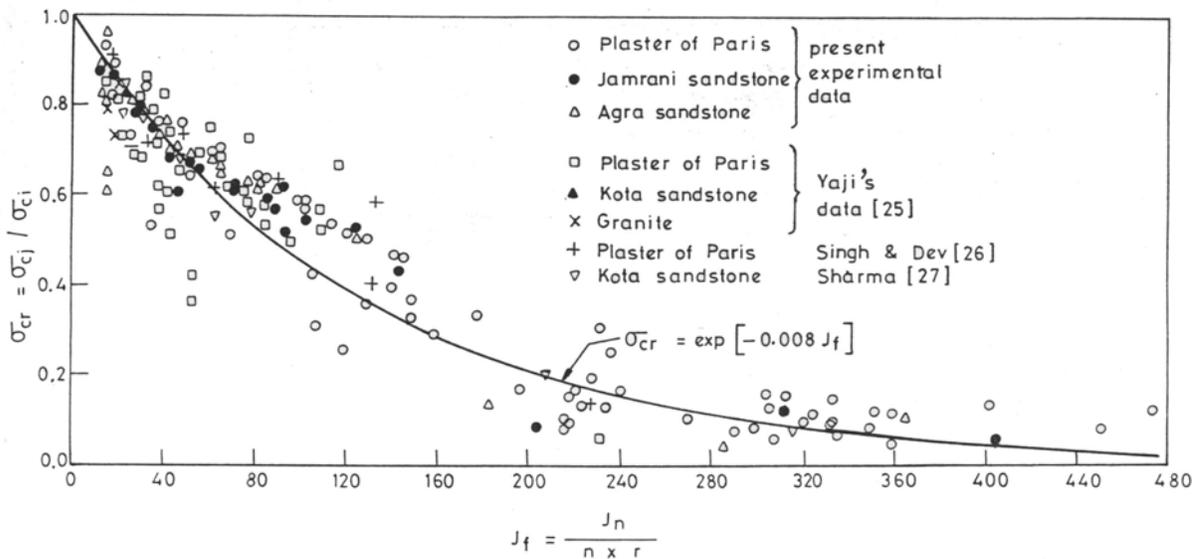


Figura 2. Variación de σ_{cr} con el factor de discontinuidad (joint factor) J_f . (Ramamurthy & Arora (1994). Datos experimentales en “plaster” de París, Areniscas de Jamrani y Agra, y datos publicados de Areniscas de Kota y de Granitos.

La ecuación (2) involucra 5 parámetros importantes identificados como σ_{ci} , σ_{cj} , J_n , n y r , previamente definidos. Conociendo la frecuencia de discontinuidades J_n , y seleccionando el valor apropiado del parámetro de inclinación n de la Tabla 2, dependiendo de la orientación crítica de la discontinuidad (la discontinuidad con orientación más cercana a $45-\phi/2$), y el parámetro de resistencia r (Tablas 3 y 4), que es función de la condición de la discontinuidad, el factor J_f puede ser estimado de la ecuación (1). Con el valor conocido de J_f y σ_{ci} , se puede estimar el valor de σ_{cj} . Ramamurthy & Arora presentan gráficos que comparan las

predicciones de la ecuación (2) con resultados experimentales y concuerdan aceptablemente. En resumen, cuando no se dispone de resultados de ensayos in situ, el método propuesto puede servir de guía para evaluar la resistencia a la compresión uniaxial de masas rocosas.

Adicionalmente a la correlación entre Jf y σ_{cj} , Ramamurthy (2004) ha propuesto la siguiente expresión para estimar el módulo de la masa rocosa:

$$Mrj / Mri = \exp(-0.0035Jf) \quad (3)$$

donde:

Mrj es la “relación modular” definida como el cociente entre el módulo de deformación de la masa rocosa, Ej , y la resistencia a la compresión uniaxial de la masa rocosa, σ_{cj} .

Mri es el módulo de deformación de la roca intacta.

Cabe destacar que de acuerdo al autor, los valores de módulo utilizados en sus ecuaciones corresponden a la tangente al 50% del esfuerzo de falla. Para propósitos prácticos, en el caso de masas rocosas no perturbadas, el módulo de tangente inicial, el módulo secante al 50% del esfuerzo de falla, y el módulo tangente, tienen valores similares.

Ramamurthy (2004) ha publicado una interesante clasificación geotecnológica para rocas y masas rocosas fundamentándose en la clasificación inicial de Deere & Miller (1966) y ha encontrado importantes correlaciones entre la resistencia de la masa rocosa σ_{cj} y el módulo de la masa rocosa Ej , para diferentes modos de falla. El lector interesado puede consultar las bases y resultados de esa clasificación en la mencionada referencia.

Ramamurthy (2001) también ha postulado un nuevo criterio no lineal de resistencia al corte que incluye solo dos parámetros los cuales, a diferencia de la cohesión y del ángulo de fricción que varían continuamente con el confinamiento, permanecen prácticamente constantes con la presión de confinamiento. La expresión general del criterio de falla es la siguiente:

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_3 + \sigma_t} = B \left(\frac{\sigma_c}{\sigma'_3 + \sigma_t} \right)^\alpha \quad (4)$$

donde: σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos principales efectivos, σ_c es la resistencia a la compresión uniaxial, σ_t la resistencia a la tensión, B y α los parámetros de resistencia. El autor ha encontrado que este nuevo criterio no lineal de resistencia al corte, es aplicable a arcillas, limos, arenas, gravas, enrocados, roca intacta y masas rocosas. Igualmente es válido tanto para materiales de comportamiento frágil como de comportamiento dúctil. Para el caso de suelos sin cohesión σ_t es despreciable y para la estimación de un mínimo valor de σ_c , el autor desarrolló una metodología tomando el valor de σ'_1 bajo presiones confinantes de 0.025 MPa,

0.05 MPa y 0.10 MPa, para limos, arenas y gravas, respectivamente. Utilizando el valor de σ_c y realizando ensayos de compresión triaxial a 2 o 3 presiones confinantes, se pueden estimar los valores de los parámetros de resistencia B y α . Para el caso de roca intacta, el análisis de ensayos realizados en diferentes tipos de roca condujo a la definición de las siguientes expresiones para estimar los valores de α_i y Bi :

$$\alpha_i = \frac{2}{3} \quad \text{y} \quad Bi = 1.3 \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Cuando no se dispone de ensayos triaxiales, estas expresiones son muy útiles para una estimación preliminar de la resistencia a la falla de una roca intacta bajo cualquier presión confinante deseada. El autor recomienda que el valor de σ_t sea obtenido preferiblemente mediante el ensayo brasilero.

Para el caso de rocas con discontinuidades se puede asumir que σ_t es cero, y la ecuación (4) se simplifica a:

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_3} = Bj \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma'_3} \right)^{\alpha_j} \quad (6)$$

El subíndice “ j ” se utiliza para referirse a los parámetros de la masa rocosa. Dado que muestras grandes de rocas con discontinuidades no pueden ser sometidas a ensayos triaxiales en laboratorio, Ramamurthy & Arora (1994) encontraron que el factor “ Jf ”, antes definido, permite relacionar la resistencia a la compresión de la roca intacta con la de la masa rocosa.

En resumen, su criterio permite establecer la envolvente de resistencia de una masa rocosa utilizando, además de la ecuación (6), las siguientes expresiones:

$$\frac{\alpha_j}{\alpha_i} = \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$\frac{Bi}{Bj} = 0.13 \exp \left[2.04 \frac{\alpha_j}{\alpha_i} \right] \quad (8)$$

α_i y Bi son los valores de los parámetros de resistencia obtenidos de ensayos triaxiales en roca intacta. Una vez obtenida la resistencia a la compresión de la roca intacta y sus valores de α_i y Bi , se determina el valor de Jf para la masa rocosa, y utilizando la ecuación (2) se puede estimar el valor de la resistencia a la compresión de la masa rocosa bajo condiciones uniaxiales y triaxiales. De esta forma se puede establecer la envolvente de resistencia de la masa rocosa.

Otro aspecto importante como resultado de las investigaciones de Ramamurthy (2001), es su aporte a la definición de la frontera de comportamiento suelo-roca. Como es conocido existen muchas discusiones respecto a si el comportamiento de una masa rocosa fracturada puede ser considerado similar al de un suelo, o si un suelo muy compactado y cementado se comportaría como una roca. En este sentido, la Sociedad de Geólogos Americanos en 1970 y posteriormente la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) han sugerido como una guía que una roca intacta débil que tenga una resistencia a la compresión uniaxial menor de 1 MPa, debe ser tratada como un suelo.

Según Ramamurthy (2001) la respuesta global de un suelo o de una roca no está definida adecuadamente por un simple valor como la resistencia a la compresión o su valor de módulo, pero por la influencia de ambos. Dado que la debilidad introducida en una roca, es debida esencialmente al efecto combinado de discontinuidades, de su inclinación y de su resistencia, representados por el factor Jf antes definido, tanto la resistencia a la compresión como el módulo son influenciados.

El análisis de datos experimentales de muestras de rocas con discontinuidades y muestras de suelos densos, sugieren que cuando la relación modular ($Mrj = E_{tj} / \sigma_{cj}$) para rocas con discontinuidades, y E_t / σ_c para suelos, donde E_t es el módulo tangente, es menor de 50, el material puede ser considerado que se comportará como un suelo. La mayoría de suelos muy densos o suelos rígidos, tiene valores de relación modular en el rango de los 50. El inverso de la relación modular (Mrj) es la deformación axial a la falla (2%) del material cuando exhibe una respuesta lineal o casi lineal bajo compresión uniaxial. De acuerdo a resultados de ensayos en muestras con discontinuidades, la relación entre el Mrj y el porcentaje medido de deformación unitaria axial ($\varepsilon_{aj} \%$) puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{aj} = 50 (Mrj)^{0.75} \quad (9)$$

Igualmente los datos experimentales condujeron a la siguiente expresión:

$$\frac{E_{tj}}{E_t} = \exp(-1.15 \times 10^{-2} Jf) \quad (10)$$

El autor propone los siguientes valores para definir si un material tiene tendencia a responder para efectos de consideraciones ingenieriles, como un suelo o como una roca:

1. $\sigma_{cj} = 1$ MPa (para rocas > 1.0 MPa)
2. $E_{tj} / \sigma_{cj} = 50$ (para rocas > 50 MPa)
3. $Jf = 200/m$ (para rocas $< 200/m$)

En el caso de roca intacta y suelos cementados, solamente son aplicables los dos primeros criterios. Tanto el radio modular como el factor Jf aparentan ser consideraciones más realistas para demarcar la frontera entre suelo y roca. El uso de Jf permite demarcar la frontera en forma rápida y fácil ya que los parámetros involucrados se obtienen durante la investigación de campo.

CONTRIBUCION A LA CLASIFICACION DE MASAS ROCOSAS CON FINES GEOTECNICOS

Conciente de las dudas que comúnmente se presentan en la utilización de las Clasificaciones previamente comentadas, desde 1998 el autor de este trabajo ha venido configurando una clasificación que trate de reducir al máximo la subjetividad, misión sin duda difícil, y que permita la definición de un índice basado en unos parámetros fácilmente medibles y aplicables. Desde 1999 esta clasificación ha venido siendo explicada en los cursos de postgrado de ingeniería geotécnica de la Universidad Simón Bolívar y fue puesta en práctica en dos tesis de grado de la UCV tuteladas por el autor (Sánchez, 2000 y Machado, 2000). Se consideró propicia la oportunidad de este Seminario de Geotecnia para su publicación oficial.

La Clasificación propuesta que puede ser utilizada en masas rocosas tanto metamórficas como sedimentarias, define dos índices. Un índice denominado MRI (Índice de rocas metamórficas) y un índice SRI (Índice de rocas sedimentarias). El uso de la clasificación mediante las Tablas anexas, se fundamenta en los siguientes aspectos:

1. El concepto fundamental de la Clasificación propuesta es que la masa rocosa de mejor calidad tiene un índice (**MRI o SRI**) de 100. Todas las puntuaciones que se obtienen en la tabla, deben irse restando de 100 hasta llegar al valor final del índice. El índice de masas rocosas metamórficas (**MRI**) y el Índice de masas rocosas sedimentarias (**SRI**), se definen de la siguiente manera:

$$\mathbf{MRI} = 100 - f_1 - f_2 - f_{\sigma} - [\Sigma (f_s + f_p + f_c)] \quad (11)$$

$$\mathbf{SRI} = 100 - f_1 - f_2 - f_{\sigma} - [\Sigma (f_s + f_p + f_c)] \quad (12)$$

donde:

Para el caso de rocas metamórficas:

f_1 = factor por proporción de rocas foliadas y no foliadas. (Ej. Esquistos y cuarcitas, filitas y anfibolitas, metareniscas y filitas).

f_2 = factor por penetratividad de la foliación.

f_{σ} = factor por compresión sin confinar de la roca intacta (En el caso de rocas foliadas se refiere a ensayos perpendiculares a los planos de foliación).

f_s = factor por espaciamiento o frecuencia de diaclasa.

f_p = factor por persistencia de la diaclasa.

f_c = factor por contacto y relleno entre paredes de diaclasa.

Para el caso de rocas sedimentarias:

f_1 = factor por proporción de rocas competentes y no competentes. (Ej. Areniscas y lutitas, calizas y limolitas).

f_2 = factor por penetratividad de la estratificación

f_{σ} = factor por compresión sin confinar de la roca intacta (En el caso de rocas finamente estratificadas los ensayos deben ser realizados perpendiculares a los planos de estratificación).

f_s = factor por espaciamiento o frecuencia de diaclasa.
 f_p = factor por persistencia de la diaclasa
 f_c = factor por contacto y relleno entre paredes de diaclasa.

2. La clasificación inicial se basa, en primer lugar, en la proporción de rocas foliadas y no foliadas, para el caso de rocas metamórficas, y en la proporción de rocas competentes a no competentes para el caso de rocas sedimentarias. Se parte del concepto fundamental de que la foliación y la estratificación son discontinuidades de origen geológico muy diferente a las diaclasas y por lo tanto deben ser consideradas en forma separada. En la mayoría de las clasificaciones publicadas, la foliación, estratificación y las diaclasas se agrupan, a nuestro juicio incorrectamente, dentro del término “joint”. El factor correspondiente a la proporción de rocas de diferente tipo, se denomina f_1 .
3. En segundo lugar, se debe decidir en cuanto a la penetratividad de la foliación en rocas metamórficas, o de la estratificación en caso de rocas sedimentarias. Este factor se considera de extrema importancia para definir el comportamiento geomecánico de la masa rocosa. La decisión en cuanto a lo penetrativo de la foliación o de la estratificación, puede fundamentarse en campo en forma muy sencilla. Si es posible extraer fácilmente del afloramiento bloques o fragmentos de roca paralelos a la foliación o a la estratificación, o los bloques de roca pueden separarse fácilmente con la mano según planos paralelos a la foliación o estratificación, dicha superficie es indudablemente muy penetrativa. Si las rocas no pueden separarse con presión de las manos según los planos de foliación o estratificación, la discontinuidad se considera no penetrativa. Condiciones intermedias pueden seleccionarse en la Tabla propuesta. El factor de penetratividad se denomina f_2 .
4. Seguidamente se debe determinar el factor asociado a la resistencia a la compresión sin confinar de la roca intacta (f_σ). La estimación indirecta de la resistencia de la roca intacta puede realizarse mediante ensayos con el Martillo Schmidt y correlaciones con el peso unitario, o mediante ensayos de carga puntual. En el caso de que la masa rocosa a ser clasificada presente rocas de alta resistencia con intervalos de rocas de menor resistencia, se sugiere que para obtener la valoración correspondiente en la Tabla, se utilice un promedio ponderado. Es decir, si la masa rocosa tiene 70% de una roca con un σ_c de 80 MPa, y 30% de una roca con un σ_c de 40 MPa, en la tabla se debe entrar con un valor de $\sigma_c = 0.7*80 + 0.3*40 = 68$ MPa.
5. Finalmente, se debe decidir en cuanto a las características de las diaclasas. En este sentido se ha considerado conveniente que en lugar de definir propiedades “promedio” entre las diferentes familias de diaclasas, lo cual no aparenta ser un enfoque geológicamente adecuado, la tabla permite incluir un máximo de tres sets de diaclasas con sus respectivas características. Esta es una diferencia fundamental con respecto a las clasificaciones previamente publicadas. En aquellos casos donde además de la foliación en rocas metamórficas, o la estratificación en rocas sedimentarias, existan más de tres sistemas de diaclasas, se deben seleccionar para la clasificación las tres consideradas más persistentes. Esta decisión se considera razonable, tomando en cuenta que, además de la foliación o de la estratificación, las familias de diaclasas más persistentes son las que deben tener mayor influencia en el comportamiento de la masa rocosa. Si además de la foliación o de la

estratificación, existen tres o menos sistemas de diaclasas, todas deben ser incluidas para la determinación del **MRI** o el **SRI**, independientemente de sus características, bien sean aleatorias o de muy baja persistencia.

6. Aun cuando es necesario simplificar y agrupar condiciones de las discontinuidades para que la clasificación sea de fácil uso práctico, extremo cuidado se ha tenido en la descripción para evitar confusiones y dificultades en la selección de la puntuación que refleje las propiedades de la diaclasa. Las características de las diaclasas a ser evaluadas, son las siguientes:

- Espaciamiento o frecuencia de la diaclasa. Este factor se denomina f_s y con un levantamiento geológico detallado, no deben existir incertidumbres acerca de su valor.
- Persistencia de la diaclasa. Este factor se denomina f_p y también debe ser determinado con base en un levantamiento geológico detallado.
- Contacto y relleno entre paredes de la diaclasa. Este factor se denomina f_c , y también depende de la correcta caracterización de la masa rocosa por parte de un profesional experto. En la Tabla de clasificación propuesta se consideran tres columnas, las cuales corresponden a una diaclasa esencialmente abierta, una diaclasa esencialmente cerrada, y una diaclasa intermedia. Nótese que solo se utilizan los términos de diaclasa abierta, intermedia o cerrada, sin importar la magnitud de la abertura. Este criterio se fundamenta en el hecho de que una vez que una diaclasa esté abierta no importa la magnitud de la abertura; lo importante es que no hay contacto entre las paredes, a menos que exista un relleno en la fractura, el cual sí se toma en cuenta en la descripción. Para el caso de diaclasas denominadas “intermedias” en la columna central de la clasificación, para obtener el valor se deben promediar los valores correspondientes a las longitudes de las paredes de la diaclasa en contacto y sin contacto. Tales valores se seleccionan de las columnas adyacentes. Aún cuando se ha hecho el máximo esfuerzo para evitar confusiones en el uso de la clasificación, es inevitable que se puedan presentar casos dudosos en la práctica, y siempre será necesario el buen juicio geológico.

7. Como paso final se determina el valor de **MRI** para el caso de rocas metamórficas, o **SRI** para el caso de rocas sedimentarias, de acuerdo a la expresión previamente indicada. Con este valor se selecciona la “Clase” de masa rocosa correspondiente, según los intervalos de puntos indicados en la Tabla anexa.

En resumen, es conveniente puntualizar los siguientes aspectos de la clasificación propuesta:

- Para fines de la clasificación se deben seleccionar, además de la foliación en caso de rocas metamórficas, o estratificación en caso de rocas sedimentarias, los sistemas de diaclasas más persistentes hasta un máximo de tres.
- La orientación de discontinuidades y el efecto de agua no se incluyen en la clasificación. Por lo tanto, deben ser considerados por separado en cada caso específico.

- De acuerdo a la valoración de cada factor, según la Clasificación propuesta, el valor máximo de MRI o SRI que se puede obtener es 95.5, y el valor mínimo es 20. Valores menores o iguales a 20 corresponden a masas rocosas altamente fracturadas, perturbadas, y /o cizalladas.

La clasificación propuesta fue puesta en práctica por Sánchez (2000) en masas rocosas metamórficas de la Cordillera de la Costa Venezolana, y se ha encontrado como un primer intento la siguiente correlación con el Índice de Resistencia Geológica GSI de Hoek & Brown:

$$MRI = 0.87 GSI + 17.9 \quad (13)$$

Esta correlación ha sido determinada para valores de GSI mayores de 30, por lo tanto se requiere su validación para valores menores. Adicionalmente se han encontrado correlaciones entre el MRI y SRI, con los índices RMR de Bieniawski y Q de Barton et al, así como correlaciones con propiedades de las masas rocosas tales como módulos de deformación, cohesión y fricción, las cuales pueden ser consultadas en Sánchez (2000) y Machado (2000).

COMENTARIOS FINALES

Se ha presentado una revisión de los sistemas de clasificación de rocas y masas rocosas con fines geotécnicos más usados en Venezuela y se han destacado las incertidumbres e interrogantes que surgen durante su aplicación en la práctica. En este sentido, se ha propuesto una nueva clasificación de masas rocosas cuya intención es disminuir dichas incertidumbres, incorporando conceptos geológicos fundamentales. Aun cuando hay que estar conciente de la dificultad que representa tratar de modelar en forma simplificada, la cantidad de variables implícitas en una masa rocosa, se espera que la clasificación propuesta sea probada en la práctica y los resultados de su aplicación permitan incorporar sugerencias y recomendaciones para su mejoramiento y optimización. Las correlaciones encontradas hasta la fecha entre los índices identificados como MRI y SRI en la clasificación propuesta, con el GSI (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995, Hoek & Brown, 1997, Hoek, Marinos & Benissi, 1998), permitirán con este último índice, estimar otras propiedades de una determinada masa rocosa.

REFERENCIAS

- Ayres da Silva, L., Fujii, J. & Jardim, C. 1994. "A rock mass classification applied to underwater foundations." *IV Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas. The 1994 ISRM International Symposium*. Santiago, Chile. pp. 823-835.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. 1974. "A classification of rock masses for the design of tunnel support." *Rock Mechanics*. Vol. 6. No. 4. pp. 189-236.
- Barton, N. 2002. "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 39, No. 2. pp. 185-216.
- Bieniawski, Z. T. 1973. "Engineering classifications of jointed rock masses." *Transactions South African Institution of Civil Engineering*. Vol. 15. No. 12. pp. 335-344.
- Bieniawski, Z. T. 1976. "Rock mass classifications in rock engineering." *Proceedings of the Symposium on Exploration in Rock Engineering*. A.A. Balkema. Johannesburg. pp. 97-106.

- Bieniawski, Z. T. & Orr, C. 1976. "Rapid site appraisal for dam foundations by geomechanics classification." *Proceedings 12th. International Congress on Large Dams*. ICOLD. Mexico. Q46. R32. pp- 483-501.
- Bieniawski, Z. T. 1979. "Tunnel design by rock mass classifications." *Technical report GL-79-19- Pennsylvania State University. National Technical Information Service*. 100 p.
- Bieniawski, Z. T. 1979. "The geomechanics classification in rock engineering applications." *Proc. 4th. International Congress on Rock Mechanics*. ISRM. Montreaux. Vol 2. pp. 41-48
- Bieniawski, Z. T. 1984. "Rock Mechanics design in mining and tunneling." A.A. Balkema. 272 p.
- Cai, M., Kaiser, P., Uno H., Tasaka, Y. & Minami, M. 2004. "Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 41. pp. 3-19.
- Deere, D. & Miller, R. 1966. "Engineering classification and index properties of intact rocks." *Technical Report No. AFNL-TR-65-116*. Air Force Weapon Laboratory. New Mexico.
- Deere, D. 1968. Geological considerations. *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Eds. R.G. Stag & O. C. Zienkiewicz. John Wiley & Sons. pp. 1-20.
- Deere, D., Peck, R., Parker, H., Monsees, J., & Schmidt, B. 1970. "Design of tunnel support systems." *Highway Research Record*. No. 339. pp. 26-33.
- Goel, R., Jethwa, J., & Phaitankars, A. 1996. "Correlation between Barton's Q and Bieniawski's RMR. A new approach." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 33, No. 2. pp. 179-181.
- Hanines, A. & Terbrugge, P. 1991. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems." *7th. International Congress on Rock Mechanics*. ISRM. Anchen. pp. 887-892.
- Haines, A. 1994. "Appropriate geomechanical procedures applied to rock engineering." *IV Congreso Sudamericano de Mecánica de Rocas. The 1994 ISRM International Symposium*. Santiago, Chile. pp. 207-218.
- Hoek, E. 2000. "Rock mass classifications." Chapter 3 in *Practical Rock Engineering*. www.rocscience.com/hoek/practicalrockengineering.asp.
- Hoek, E. 1994. "Strength of rock and rock masses." *ISRM News Journal*. 2 (2) pp. 4-16.
- Hoek, E., Kaiser, P. & Bawden, W. 1995-2000. "Support of underground excavations in hard rock." Balkema, Rotterdam. 215 p.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M. 1998. "Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The cases of the Athens Schist Formation." *Bulletin of Engineering Geology and Environment*. 57 (2). Pp. 151-160.
- Hoek, E. & Brown, E. 1997. "Practical estimates of rock mass strength." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 34, No. 8. pp. 1165-1186.

- Kirsten, H. A. D. 1982. "A classification system for excavation in natural materials." *South African Civil Engineering*. July. pp. 293-308.
- Laubscher, D. 1975. "Class distinctions in rock masses." *Coal Gold and Base Minerals of South Africa*. Vo. 23. No. 6. pp. 37-50.
- Laubscher, D. & Taylor, H. 1976. "The importance of geomechanics classifications of jointed rock masses in mining operations." In: *Exploration for rock engineering*. (Ed. Z.T. Biennawski). Capetwon. Balkema. pp.119-128.
- Laubscher, D. 1977. "Geomechanics classification of jointed rock masses-mining applications." *Transactions Institution of Mining and Metallurgy*. 86. A1-P.
- Laubscher, D. 1990. "A geomechanic classification system for the rating of rock mass in rock design." *Journal South African Institution of Mining & Metallurgy*. Vol. 90. No. 10. pp. 257-273
- Lauffer, H. 1958. Gebirgsklassifizierung fur den stollenbau. *Geologie und Bauwesen*. Vol. 24. No. 1. pp. 46-51.
- Machado, T. 2000. "Caracterización geotécnica de las masas rocosas sedimentarias de la Serranía del Interior Oriental." *Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Geólogo*. UCV. 176 p.
- Palmstron, F. 1982. "The volumetric joint count- a useful and simple measure of the degree of rock jointing." *Proceedings 4th International Symposium Association of Engineering Geology*. Dehli 5. pp. 221-228-
- Perri, G 1994. "Una extensión de la metodología de Bieniawski-Romana para estimar la estabilidad de taludes en rocas. *I simposio Panamericano de Deslizamientos de Tierra*. Guayaquil, Ecuador. pp.176-185.
- Perri, G. (1999). "Contribución a la caracterización geomecánica de los macizos rocosos en base al GSI de Hoek". *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia*. No. 75. pp. 3 -20.
- Protodyakonoff, M. 1960. "Klassifikacija gorotworu." Moscú. In French: Tunnels at Ouvrages Souterrains. Paris. 1974. Vol. 1. No. 1. pp. 31-34.
- Ramamurthy, T. & Arora, V. 1994. "Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 13, No. 1. pp. 9-22.
- Ramamurthy, T., 2001. "Shear strength responses of some geological materials in triaxial compression." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 38. pp. 683-697.
- Ramamurthy, T. 2004. "A geoengineering classification for rocks and rock masses." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*. Vol. 41. pp. 89-101.
- Ramírez Oyanguren P. & Lain Huerta, R. 1994. "Presente y futuro de las clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos." *Boletín Geológico y Minero*. España. Vol. 105-6. pp. 48-55.

- Romana, M. 1985. "Practice of SMR classification for slope appraisal." *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*. Laussane. Balkema, Rotterdam. pp. 1227-1231. Also in: *Comprehensive Rock Engineering*. Vol. III. Chapter 23. Editor John Hudson. Imperial College, (1993).
- Romana, M. 1985. "New adjustment ratings for application of Biewniawski classification to slopes". *International Symposium on the role of Rock Mechanics*. Zacatecas, Mexico. pp. 49-53.
- Romana, M. 2003. "DMR, a new geomechanical classification for use in dams foundations adapted from RMR." *4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, Madrid. pp. 689-696.
- Romana, M. 2003. "DMR (Dam mass rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dam foundation." *International Congress on Rock Mechanics (Technology roadmap for rock mechanics)*. South African Institution of Mining and Metallurgy.
- Salcedo, D. 1988. "Clasificación para predecir el tipo de remoción en banqueos y excavaciones para obras viales." *Boletín de la Sociedad Venezolana de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*. No. 56. pp. 5-30.
- Salcedo, D. 2004. "Considerations about failure mechanics of weathered foliation surfaces." *Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides*. Rio de Janeiro, Brasil. pp. 897-903.
- Sánchez, C. E. 2000. "Caracterización geotécnica de masas rocosas metamórficas de la Cordillera de La Costa Venezolana." *Tesis de grado* para optar el título de Ingeniero Geólogo. UCV. 176 p.
- Selby, M. 1980. "A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand." *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 24, pp.31-51.
- Selby, M. 1982. *Hillslopes materials & Processes*. Oxford University Press. 263 p.
- Serafim J. & Pereira, J. 1983. "Considerations on the geomechanics classification of Biewniaski." *Proceedings International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions*." LNEC. Lisboa. Vol. 1. pp. II-31-II-42.
- Stini, L. 1950. *Tunnelbaugologie*. Springer-Verlag. Vienna. 336 p.
- Terzaghi, K. 1946. "Rock defects and load on tunnel support, rock tunneling with steel supports." in Proctor and White editors. Youngstown, OK. pp. 15-99.
- Truzman, M. 2000. "Determinación del índice de resistencia geológica (GSI) en rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa de Venezuela." *Boletín Sociedad Venezolana de Geotecnia*. No. 78. pp. 3-12.
- Weaver, J. M. 1975. "Geological factors significant in the assessment of rippability." *The Civil Engineer in South Africa*. Vol. 171. No. 12. pp. 313-316.
- Wickham, G., Tiedemann, H. & Skinner, E. 1972. "Support determination on geologic predictions." *Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference*. AIME. New York.

ANEXO

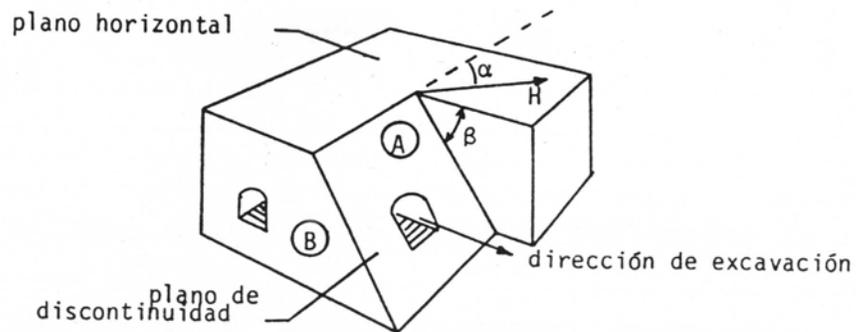
- CLASIFICACION DE BIENIAWSKI, RMR
- INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA GSI (Hoek et al)
- INDICE GSI PARA ROCAS METAMORFICAS (Truzman)
 - CLASIFICACION DE SALCEDO, MRI Y SRI

CLASIFICACION GEOMECANICA DE BIENIAWSKI

1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo de carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	< 1 MPa		
		Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5-25	1-5	<1
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %		
	Valoración		20	17	13	8	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de diaclasas		Muy rugosas, discontinuas, sin separaciones, bordes sanos y duros	Ligeramente rugosa, abertura < 1 mm., bordes duros	Ligeramente rugosa, abertura < 1 mm., bordes blandos	Espejos de falla o con relleno < 5 mm ó abiertas 1-5 mm diaclasas continuas	Relleno blando >5 mm ó abertura >5 mm diaclasas continuas		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua Freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 lts/seg	10-25 lts/seg	25-125 lts/seg	> 125 lts/seg		
		Presión de agua	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Lig. húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Corrección por la orientación de discontinuidades.

Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración para	Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Cimentaciones	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60



Evaluación de los efectos de la orientación de discontinuidades			
Túnel en posición A			
(Buzamiento)			
Consecuente con la dirección de excavación		En contra de la dirección de excavación	
45° - 90°	20° - 45°	20° - 45°	45° - 90°
Muy favorable	Favorable	Desfavorable	medio
Túnel en posición B			
(Buzamiento)			
20° - 45°		45° - 90°	
Medio		Muy desfavorable	
Nota:			
Para un buzamiento = 0 – 20°, se tendrá un efecto desfavorable independientemente de la dirección.			

Clasificación final del RMR con valores adicionales estimados

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Mediocre	Muy mala
Valoración	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
Cohesión	> 400 kPa	300-400 kPa	200-300 kPa	100-200 kPa	< 100 kPa
Angulo de fricción	> 45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (Hoek et al, 1995, 1997, 1998)

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX</p> <p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Geological Strength Index (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p> <p>ESTRUCTURA</p>	CONDICION DE LA SUPERFICIE				
	MUY BUENA Muy rugosa, superficies sin meteorización	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, superficies teñidas de óxido	MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, superficies alteradas	MALA Espesios de falla, superficies muy meteorizadas con rellenos duros o de fragmentos angulares	MUY MALA Espesios de falla, superficies muy meteorizadas con rellenos de arcilla blanda
	DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE				
<p>INTACTA O MASIVA – rocas intactas o rocas masivas in situ con pocas discontinuidades separadas ampliamente</p>	90		N/A	N/A	N/A
<p>FRACTURADA – macizo rocoso poco perturbado consistente de bloques cúbicos formados por tres sistemas ortogonales de discontinuidades, muy bien unidos entre sí</p>	80	70			
<p>MUY FRACTURADA – macizo rocoso parcialmente perturbado consistente de bloques angulares unidos entre sí, formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades</p>		60	50		
<p>FRACTURADA/PERTURBADA – macizo rocoso plegado y/o fallado con bloques angulares formados por la intersección de varios sistemas de discontinuidades</p>			40	30	
<p>DESINTEGRADA – macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente unidos entre sí</p>				20	
<p>FOLIADA/LAMINADA – macizo rocoso foliado, plegado y cizallado tectónicamente. La esquistosidad prevalece sobre cualquier sistema de discontinuidades, completamente carente de bloques</p>	N/A	N/A		10	5
	DISMINUCION EN LA UNION DE LOS BLOQUES DE ROCA				

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (Hoek et al, 1995, 1997, 1998)

(Adaptado por Truzman, 2000)

<p>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA (GSI) PARA LAS ROCAS METAMORFICAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA DE VENEZUELA</p> <p>A partir de la descripción de la estructura y las condiciones de la superficie de la masa rocosa, seleccionar el intervalo apropiado de esta gráfica. Estimar el valor promedio del Índice de Resistencia Geológica (GSI) de dicho intervalo. No intentar ser tan preciso. Escoger un rango de GSI de 36 a 42 es más aceptable que fijar un GSI = 38. También es importante reconocer que el criterio de Hoek-Brown debería ser aplicado solamente en macizos rocosos donde el tamaño de los bloques o fragmentos es pequeño comparado con el tamaño de la excavación a ser evaluada. Cuando el tamaño de los bloques individuales es aproximadamente mayor a un cuarto de la dimensión de la excavación, generalmente la falla estaría controlada por la estructura y el criterio de Hoek-Brown no debería ser utilizado.</p> <p>ESTRUCTURA</p>	CONDICION SUPERFICIE DE DISCONTINUIDAD	MUY BUENA Muy rugosa, superficies cerradas, sin meteorización, ni rellenos	BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 0,1 mm, predominan los rellenos duros	MEDIA Ligeramente rugosa, moderadamente meteorizada, abertura 0,1-1,0 mm, rellenos duros y blandos	MALA Lisa, superficies muy meteorizadas con abertura 1,0 - 5,0 mm, predominan los rellenos blandos	MUY MALA Espejos de falla, superficies descompuestas con abertura > 5 mm con rellenos blandos
	DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE →					
<p>INTACTA O MASIVA – macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación</p>	90	80	N/A	N/A	N/A	
<p>POCO FOLIADA – macizo rocoso parcialmente fracturado con hasta tres sistemas de discontinuidades. Puede contener intercalaciones delgadas de rocas foliadas</p>	70	60	50	40	30	
<p>MODERADAMENTE FOLIADA – macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes</p>	50	40	30	20	10	
<p>FOLIADA – macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas</p>	30	20	10	5	N/A	
<p>MUY FOLIADA – macizo rocoso plegado, muy fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas</p>	10	5	N/A	N/A	N/A	
<p>BRECHADA/CIZALLADA – macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide.</p>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

CLASIFICACION DE MASAS ROCOSAS METAMORFICAS
DETERMINACION DEL INDICE DE MASAS ROCOSAS METAMORFICAS (MRI)
(D. SALCEDO, 1999)

PROPORCION DE ROCAS NO FOLIADAS Y ROCAS FOLIADAS	No foliada (100 % - 0)	Poco foliada (75 % - 25%)	Moderadamente foliada (50 % - 50%)	Foliada (25 % -75 %)	Muy foliada (0-100 %)	Cizallada/ Perturbada
f_1	0	4	8	12	16	MRI < 20*
PENETRATIVIDAD DE FOLIACION	No penetrativa	Poco penetrativa	Moderadamente penetrativa	Penetrativa	Muy penetrativa	
f_2	0	3	8	16	20	

COMPRESION SIN CONFINAR DE ROCA INTACTA	> 200 MPa	100 – 200 MPa	50 – 100 MPa	20 –50 MPa	10 - 20 MPa	1 – 10 MPa
f_σ	0	1	3	4	6	8

ESPACIAMIENTO O FRECUENCIA DE DIACLASA No. 1	S > 100 cm FD: < 1:1	S = 20 – 100 cm FD: 1:1 a 5:1	S = 10 – 20 cm FD: 5:1 a 10:1	S = 5 – 10 cm FD: 10:1 a 20:1	S < 5 cm FD: > 20:1
f_s	0.5	1.5	2	3	3.5
PERSISTENCIA DE LA DIACLASA No. 1	Muy baja persistencia (< 1 m)	Baja persistencia (1 a 3 m)	Persistencia media (3 – 10 m)	Alta persistencia (10 – 20 m)	Muy alta persistencia (> 20 m)
f_p	0.5	1.5	3	4	5

CONTACTO Y RELLENO ENTRE LA LONGITUD PERSISTENTE DE LAS PAREDES DE DIACLASA No. 1 (fc)	ABIERTA (Más del 80% de las paredes de la diaclasa no tiene contacto)		INTERMEDIA Promediar en forma ponderada los valores correspondientes a las características de las longitudes de las paredes sin contacto y en contacto, indicados en las columnas adyacentes.	CERRADA (Más del 80% de la diaclasa tiene las paredes en contacto)	
	CON RELLENO DURO Y PAREDES RUGOSAS	0.5		MUY RUGOSA	0.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES RUGOSAS	1.5		RUGOSA	1.0
	CON RELLENO DURO Y PAREDES LISAS	2.0		RUGOSIDAD MEDIA	1.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES LISAS	2.5		LISA	2.5
	SIN RELLENO	3.5		MUY LISA A PULIDA CON ESTRIAS Y ESPEJOS DE CIZALLAMIENTO	3.0

ESPACIAMIENTO O FRECUENCIA DE DIACLASA No. 2	S > 100 cm FD: < 1:1	S = 20 – 100 cm FD: 1:1 a 5:1	S = 10 – 20 cm FD: 5:1 a 10:1	S = 5 – 10 cm FD: 10:1 a 20:1	S < 5 cm FD: > 20:1
f_s	0.5	1.5	2	3	3.5
PERSISTENCIA DE LA DIACLASA No. 2	Muy baja persistencia (< 1 m)	Baja persistencia (1 a 3 m)	Persistencia media (3 – 10 m)	Alta persistencia (10 – 20 m)	Muy alta persistencia (> 20 m)
f_p	0.5	1.5	3	4	5

CONTACTO Y RELLENO ENTRE LA LONGITUD PERSISTENTE DE LAS PAREDES DE DIACLASA No.2 (fc)	ABIERTA (Más del 80% de las paredes de la diaclasa no tiene contacto)		INTERMEDIA	CERRADA (Más del 80% de la diaclasa tiene las paredes en contacto)	
	CON RELLENO DURO Y PAREDES RUGOSAS	0.5	Promediar en forma ponderada los valores correspondientes a las características de las longitudes de las paredes sin contacto y en contacto, indicados en las columnas adyacentes.	MUY RUGOSA	0.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES RUGOSAS	1.5		RUGOSA	1.0
	CON RELLENO DURO Y PAREDES LISAS	2.0		RUGOSIDAD MEDIA	1.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES LISAS	2.5		LISA	2.5
	SIN RELLENO	3.5		MUY LISA A PULIDA CON ESTRIAS Y ESPEJOS DE CIZALLAMIENTO	3.0

ESPACIAMIENTO O FRECUENCIA DE DIACLASA No. 3	S > 100 cm FD: < 1:1	S = 20 – 100 cm FD: 1:1 a 5:1	S = 10 – 20 cm FD: 5:1 a 10:1	S = 5 – 10 cm FD: 10:1 a 20:1	S < 5 cm FD: > 20:1
f_s	0.5	1.5	2	3	3.5
PERSISTENCIA DE LA DIACLASA No. 3	Muy baja persistencia (< 1 m)	Baja persistencia (1 a 3 m)	Persistencia media (3 – 10 m)	Alta persistencia (10 – 20 m)	Muy alta persistencia (> 20 m)
f_p	0.5	1.5	3	4	5

CONTACTO Y RELLENO ENTRE LA LONGITUD PERSISTENTE DE LAS PAREDES DE DIACLASA No. 3 (f _c)	ABIERTA (Más del 80% de las paredes de la diaclasa no tiene contacto)		INTERMEDIA Promediar en forma ponderada los valores correspondientes a las características de las longitudes de las paredes sin contacto y en contacto, indicados en las columnas adyacentes.	CERRADA (Más del 80% de la diaclasa tiene las paredes en contacto)	
	CON RELLENO DURO Y PAREDES RUGOSAS	0.5		MUY RUGOSA	0.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES RUGOSAS	1.5		RUGOSA	1.0
	CON RELLENO DURO Y PAREDES LISAS	2.0		RUGOSIDAD MEDIA	1.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES LISAS	2.5		LISA	2.5
	SIN RELLENO	3.5		MUY LISA A PULIDA CON ESTRIAS Y ESPEJOS DE CIZALLAMIENTO	3.0

Indice de masas rocosas metamórficas (MRI)

$$MRI = 100 - f_1 - f_2 - f_{\sigma} - [\Sigma (f_s + f_p + f_c)]$$

f₁ = factor por proporción de rocas foliadas y no foliadas. (Ej. Esquistos y cuarcitas, filitas y anfibolitas, metareniscas y filitas).

f₂ = factor por penetratividad de la foliación.

f_σ = factor por compresión sin confinar de la roca intacta (En el caso de rocas foliadas se refiere a ensayos perpendiculares a los planos de foliación).

f_s = factor por espaciamiento o frecuencia de diaclasa.

f_p = factor por persistencia de la diaclasa.

f_c = factor por contacto y relleno entre paredes de diaclasa.

- El RQD está implícito en número de diaclasas y espaciamiento.
- Para fines de la clasificación se deben seleccionar, además de la estratificación, los sistemas de diaclasas más persistentes hasta un máximo de tres.
- La orientación de discontinuidades y el efecto de agua no se incluyen en la clasificación. Por lo tanto, deben ser considerados por separado en cada caso específico.

CLASIFICACION DE MASAS ROCOSAS SEDIMENTARIAS
DETERMINACION DEL INDICE DE MASAS ROCOSAS SEDIMENTARIAS (SRI)
(D. SALCEDO, 1999)

PROPORCION DE ROCAS COMPETENTES A NO COMPETENTES	Rocas competentes (100 % - 0)	Predominio de rocas competentes (75%-25%)	Igual proporción de rocas competentes e incompetentes (50%-50%)	Predominio de rocas incompetentes (25%-75%)	Rocas incompetentes (0-100 %)	Cizallada/ Perturbada
f_1	0	- 4	- 8	- 12	- 16	SRI < 20*
PENETRATIVIDAD DE ESTRATIFICACION	No penetrativa	Poco penetrativa	Moderadamente penetrativa	Penetrativa	Muy penetrativa	
f_2	0	-3	- 8	- 16	- 20	

El resto de las tablas que acompañan a esta clasificación es similar a las indicadas previamente para las rocas metamórficas.

Indice de masas rocosas sedimentarias (SRI)

$$SRI = 100 - f_1 - f_2 - f_{\sigma} - [\sum (f_s + f_p + f_c)]$$

f_1 = factor por proporción de rocas competentes y no competentes. (Ej. Areniscas y lutitas, calizas y limolitas).

f_2 = factor por penetratividad de la estratificación

f_{σ} = factor por compresión sin confinar de la roca intacta (En el caso de rocas finamente estratificadas los ensayos deben ser realizados perpendiculares a los planos de estratificación).

f_s = factor por espaciamiento o frecuencia de diaclasa.

f_p = factor por persistencia de la diaclasa

f_c = factor por contacto y relleno entre paredes de diaclasa.

- El RQD está implícito en número de diaclasas y espaciamiento.
- Para fines de la clasificación se deben seleccionar, además de la estratificación, los sistemas de diaclasas más persistentes hasta un máximo de tres.
- La orientación de discontinuidades y el efecto de agua no se incluyen en la clasificación. Por lo tanto, deben ser considerados por separado en cada caso específico.

**DETERMINACION DE CLASES DE ROCA CON BASE EN LOS VALORES DEL INDICE MRI O SRI
 TABLA PRELIMINAR PARA ESTIMAR PROPIEDADES (EN PROCESO DE REVISION).
 VERSION A SER EVALUADA EN LA PRACTICA**

PARAMETRO	DEFINICION DE CLASES CON BASE EN INDICES MRI O SRI								
	IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	IVA	IVB	V
MRI O SRI	91-100	81-90	71-80	61-70	51-60	41-50	31-40	21-30	< 20
ϕ_m (°)	> 45	45-40	40-35	35-30	30-25	25-20	20-15	15-10	5-10
c_m (MPa)	>1.2	0.9-1.2	0.6-0.9	0.3-0.6	0.1-0.3	0.05-0.1	0.025-0.05	0.005-0.0025	< 0.005
E_m (MPa)	> 45.000	45.000-35.000	35.000-25.000	25.000-15.000	5.000-15.000	<5.000	Por definir	Por definir	Por definir

Nota: Los valores indicados en esta tabla en ningún caso son sustitutos de resultados de ensayos obtenidos mediante pruebas específicos en laboratorio o in situ, sino que deben tomarse como una referencia previa para estudios de factibilidad y en las etapas tempranas de proyectos de ingeniería. Mientras estos valores no sean confirmados, es preferible estimar el GSI con base en el MRI o SRI, y utilizar las múltiples correlaciones publicadas por Hoek y sus colaboradores, con otros parámetros de la masa rocosa.