

Errores en la aplicación de las Clasificaciones Geomecánicas y su corrección

El núcleo de este artículo —que se corresponde con la conferencia pronunciada el pasado 29 de junio en la jornada ADIF-Geocontrol sobre *Caracterización del Terreno*— se centra en comentar los cinco errores más importantes en la utilización de las clasificaciones geomecánicas, insistiendo en que se debe ser muy cuidadoso en la cuantificación de los parámetros que se emplean para la aplicación de dichas *clasificaciones geomecánicas* y en que la caracterización del terreno debe hacerse utilizando dos clasificaciones diferentes, para poder contrastar los resultados. Aplica la misma idea a la utilización de los criterios de rotura; poniendo especial énfasis en resaltar el peligro que puede suponer la utilización a la ligera de programas comerciales para calcular el criterio de *resistencia del terreno*, sin tener en cuenta sus limitaciones.

L cita que reproduzco es muy apropiada para el tema de la Jornada sobre *Caracterización del terreno* por su importancia en muchos campos, incluida la ingeniería, donde las creencias erróneas son una plaga para la humanidad que genera pérdidas de vidas y recursos a gran escala. Recientemente se produjeron errores en la política exterior en 2003, cuando se basó la guerra de Irak en informaciones erróneas aceptadas como *seguras* por los líderes de Norteamérica, Reino Unido y España, o en la crisis financiera de 2008 cuando los expertos en bolsa sabían con *seguridad* cómo controlar la *burbuja* bancaria hasta que explotó.

Entre medias se han producido desastres en la ingeniería, como colapsos de minas de carbón en Norteamérica, y otros en Chile y China, que fueron provocados por hacer *lo que siempre se había hecho de manera segura*. Posteriormente en todos los casos se realizaron grandes esfuerzos para corregir los errores, pero la pérdida de vidas, o el dinero malgastado y los minerales no recuperados son injustificables.

De hecho, el número de *Tunnels & Tunnelling International* (febrero de 2011) enumera no menos de 41 grandes roturas de túneles. El estudio de estos casos, dos de ellos acaecidos en España, muestra que más del 85% se produjeron por condiciones geotécnicas inesperadas y errores interpretativos.

Esta situación me hizo reflexionar sobre nuestra disciplina, túneles en rocas, y sobre mi propia especialidad, diseño y caracterización de macizos rocosos, cuando me pidieron dar un discurso inaugural en Polonia hace diez meses con motivo de recibir la distinción de *Doctor Honoris Causa* por la U. P. de Cracovia, Polonia. De inmediato recordé el discurso que dí en Madrid cuando me otorgaron mi primer *Doctor Honoris Causa* por la distinguida U. P. de Madrid en el año 2001. Hay un lapso de una década entre estos dos discursos que trataban, en ambos casos, sobre la *caracterización y clasificación de macizos rocosos*, aspectos que deben comprenderse bien y evitar los errores, pues proporcionan los datos iniciales a los modelos numéricos, cada vez más sofisticados y complejos. Puesto que la estimación realista de las propiedades mecánicas de los macizos rocosos, principalmente su *resistencia y deformabilidad*, es la esencia de la ingeniería de rocas, lamenté entonces que cuando los da-

Lo que nos crea problemas no son las cosas que no conocemos; sino las que creemos conocer con certeza.

Presidente Dwight Eisenhower



Profesor Richard BIENIAWSKI VON PREIAL.
Presidente de **Bieniawski Design Enterprises, USA.**

tos iniciales resultan erróneos (como la inteligencia militar o la arrogancia financiera), los resultados que proporcionan son también erróneos.

Se dice que *errar es humano* (Alexander Pope, 1688-1744) y que: *los científicos e ingenieros aprenden de sus errores* (Henry Petroski, 1991) pero llega un momento en que debemos revisar nuestros

errores y efectuar las correcciones necesarias para evitarlos en el futuro.

Por mi parte, he recopilado una cantidad significativa de material que demuestra que los *mitos* (o errores de concepto) todavía persisten cuando se usan las clasificaciones geomecánicas y me gustaría ofrecer algunas soluciones que emergieron a lo largo de los 10 años que pasaron entre mis dos *Doctor Honoris Causa* y que siguen desarrollándose.

Mitos frecuentes en las Clasificaciones geomecánicas

He elegido los *cinco* errores de concepto más evidentes que aparecen con frecuencia en la ingeniería geomecánica.

- **Mito N°1: LOS TÚNELES PUEDEN DISEÑARSE USANDO BIEN LAS CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS, BIEN LOS MODELOS NUMÉRICOS, O BIEN A PARTIR DE LOS DATOS DE LA INSTRUMENTACIÓN.**

No es cierto. Hacerlo así es un grave error. Este mito se refiere al *diseño de túneles* en general, que implica tres formas de aproximarse al problema que deberían ir de la mano para formar parte de un único proceso de diseño de ingeniería, como por ejemplo la *Metodología de Bieniawski* (1992), **Fig. 1.**

Es primordial evitar elegir un único método de diseño, justificándolo con: *no teníamos el tiempo y el dinero* para afrontar la aproximación correcta. Los tres métodos señalados son: el *empírico* (por ejemplo la clasificación **RMR** o la **Q**), el *analítico* (por ejemplo, las soluciones concretas que se obtienen en los modelos numéricos de ordenador), y el *observacional* (por ejemplo, las mediciones que se realizan durante la construcción o el *Nuevo Método Austriaco-NMA*).

La razón por la que deberían utilizarse los tres métodos en el Proyecto de un túnel es que cada uno tiene sus virtudes y juega un papel determinado. De esta forma, las clasificaciones geomecánicas empíricas **RMR** o **Q** representan un gran número de experiencias prácticas sobre casos históricos y proporcionan un crite-



■ El Prof. Bieniawski durante su conferencia.



[Figura 1].- Metodología de Diseño y principios de la Ingeniería de Rocas (Bieniawski 1992).

rio técnico veraz y actual. En cuanto al método teórico, los criterios analíticos de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso son fundamentales, puesto que incluyen una relación entre la resistencia del macizo rocoso y los esfuerzos existentes en vistas a la determinación de factores de seguridad. Y en cuanto al método observacional, las medidas de convergencia y deformaciones durante la construcción resultan imprescindibles para comparar las predicciones con el comportamiento real, permitiendo así revisar las hipótesis y estimaciones asumidas en el diseño.

Es asombroso ver cómo en muchas publicaciones se han escrito argumentos en contra de las clasificaciones geomecánicas como método exclusivo para el diseño de túneles, y sin embargo: *¡nunca pretendí esta exclusividad cuando desarrollé el índice RMR hace 38 años!* Siempre he enfatizado que las clasificaciones geomecánicas deben usarse en conjunto con los otros dos métodos de aproximación. Por el mismo argumento estas no deben desestimarse en el proceso de diseño pues juegan un papel crucial en la caracterización de macizos rocosos, que es servir de puente entre las descripciones geológicas cualitativas y los datos cuantitativos que se requieren en la ingeniería.

Por último, *¡una advertencia!* Cuando hablamos sobre los métodos empíricos y considerando como ejemplo las clasificaciones geomecánicas, debe tenerse en cuenta que estas clasificaciones no son iguales; *¡Se desarrollaron para distintos propósitos y a partir de distintas bases de datos!* En esencia el **RMR** y la **Q** están sin duda en la misma categoría de evaluar la calidad del macizo rocoso con el propósito de construir túneles y proporcionar datos para el proyecto y la construcción. En consecuencia, se complementan y correlacionan entre sí (Barton y Bieniawski, 2007). El índice de resistencia geológica **GSI** es diferente de estos dos; *no tiene otro uso que el de proporcionar datos al criterio de Hoek-Brown* (Hoek et al, 1995) siendo un índice de caracterización de macizos rocosos. La clasificación **NMA** difiere también del **RMR** y la **Q**; forma parte de un método observacional de construir túneles que no se propone caracterizar geotécnicamente el terreno, pero que proporciona *unas bases objetivas para calcular el coste de los túneles y las velocidades de avance* (Galler, 2010), es decir, establecer clases de excavación a efectos de compensaciones contractuales.

Debido a los malentendidos que existen sobre la historia y la aplicabilidad del **RMR** (1989) y del **GSI** (1995), los apartados siguientes tratarán estos aspectos con algo de detalle, mientras que el **NMA**, que no pretende caracterizar geotécnicamente el terreno, queda fuera del alcance de la Jornada sobre Caracterización del Terreno.

- **MITO Nº2: PARA MACIZOS ROCOSOS DE MUY MALA CALIDAD, NO ES APLICABLE LA CATEGORÍA INFERIOR DE LA CLASIFICACIÓN RMR.**

No es cierto, son ideas equivocadas sobre los hechos. Los hechos son que el RMR continua usándose con éxito incluso para

“rocas de muy mala calidad”, Clase 5 con RMR < 20, cuando los datos se determinan de manera adecuada.

Este mito se deriva de hábitos erróneos que utilizan las clasificaciones geomecánicas como un *libro de cocina* del que se espera obtener *recetas* válidas para todas las situaciones de proyecto. En una publicación del año 1991, advertí a ingenieros y geólogos de que los macizos rocosos de mala calidad requieren especial atención y una cuidadosa caracterización geotécnica, puesto que la precisión del **RMR**, dependiendo de la pericia, puede estar dentro de un rango de 2-3 puntos (lo mismo que sucede en otras clasificaciones). Pero esto no significa que el **RMR** no pueda aplicarse para evaluar macizos rocosos de muy mala calidad. Después de todo, tenemos numerosos casos históricos donde se registra un **RMR** entre 0 y 3.

El malentendido más grave que se reprodujo en la literatura en la década pasada fue que no se entendió claramente que las puntuaciones para los parámetros del **RMR** son cero en sus valores mínimos. Se pasó por alto que las puntuaciones de la tabla original del **RMR** (Tabla I) representan el valor *promedio* de cada parámetro, y no el valor *mínimo*, como se deduce de Hoek et al (1995).

PARÁMETRO	VALORES DEL RMR SEGÚN BOWEN						
	INTERVALO DE VALORES						
Resistencia de la roca (σ _c)	100-150 MPa	100-200 MPa	100-250 MPa	100-300 MPa	100-350 MPa	100-400 MPa	100-450 MPa
Integridad	1	2	3	4	5	6	7
RQD	90-100%	75-90%	60-75%	45-60%	30-45%	15-30%	0-15%
Integridad de la zona	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14
Integridad de la zona	Muy buena (Integridad > 90%)	Buena (Integridad 75-90%)	Regular (Integridad 60-75%)	Regular (Integridad 45-60%)	Regular (Integridad 30-45%)	Regular (Integridad 15-30%)	Regular (Integridad 0-15%)
Integridad	1	2	3	4	5	6	7
Integridad de la zona	1	2	3	4	5	6	7

[TABLA I].- Valores del RMR (Bieniawski, 1979).

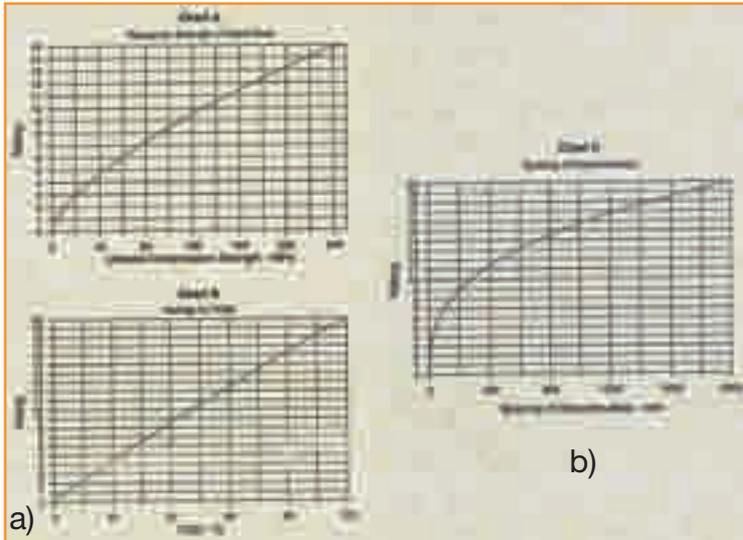
Sin embargo, existían en la literatura gráficas para la valoración de los parámetros, preparadas para facilitar los análisis con ordenadores (Fig. 2), que muestran claramente que las curvas comienzan en cero. Por lo tanto, el *macizo rocoso de peor calidad tiene un valor de RMR = 0*, que significa que en tal caso se trata de un suelo y no de una roca.

Este malentendido surgió cuando Hoek et al. (1995), actuando de buena fe para tratar con macizos rocosos de muy mala calidad, presentó un ejemplo donde en la aplicación del **RMR** se asumían condiciones secas en el macizo y una orientación de las discontinuidades muy favorable para un macizo rocoso de muy mala calidad con resistencia insignificante σ_c . En tal caso, y según la *Tabla I*, el mínimo valor de **RMR** que se tomó erróneamente fue de 8(3+5) concluyendo que el índice **RMR** no funcionaba para macizos rocosos de muy mala calidad. Para superar estas supuestas limitaciones se introdujo el *Geological Strength Index (GSI)*.

Además, se especulaba que en esas condiciones, con **RMR** < 15, podría aplicarse la siguiente ecuación aproximada:

$$GSI = RMR - 5,$$

puesto que los parámetros del **RMR** relativos a la densidad de discontinuidades (**RQD** + espaciado de juntas) y a las condiciones de las discontinuidades serían aproximadamente iguales a los parámetros del



[Fig. 2].- a) Gráficas para la valoración del RMR y RQD (Bieniawski 1993); b) Gráfica para la valoración del RMR en macizos rocosos (Bieniawski 1989).

GSI relativos a la estructura del macizo y las condiciones de las superficies (cuyos valores se obtuvieron de todos modos de la clasificación **RMR**).

El problema de este razonamiento es que dicha equivalencia solo es de aplicación en el rango inferior de los macizos rocosos de muy mala calidad (clase V del **RMR**).

Desafortunadamente, estas ideas se aplicaron de forma errónea por muchos geólogos e ingenieros a macizos de mejor calidad con $RMR \gg 20$, puesto que era más fácil realizar una aproximación descriptiva mediante el **GSI** que una cuantitativa mediante el **RMR**, donde hay que medir los parámetros que lo componen. En este proceso se obtuvieron resultados inexactos que fueron tomados como *fiabes* al introducirlos en sofisticados análisis por ordenador.

De hecho, cuando el **GSI** se introdujo en 1995, las herramientas geológicas no estaban tan avanzadas como lo están hoy y su lema *no intentar ser preciso* condujo a estimaciones rápidas. Los que desarrollaron el **GSI** señalaron que es un **índice de caracterización** de los macizos rocosos y no pretende sustituir a sistemas de *clasificación* del tipo del **RMR** o el **Q**, pero esto se pasa por alto, incluso a día de hoy. Hay que tener en cuenta que la única función que se le exigió al **GSI** fue la de estimar la resistencia del macizo rocoso utilizando el criterio de *Hoek-Brown*, específicamente para macizos rocosos de muy mala calidad.

Otro error fue afirmar que el parámetro **RQD**, utilizado para determinar el **RMR**, es muy difícil de obtener en macizos rocosos de muy mala calidad, ya que puede aproximarse a cero. De hecho, este aspecto fue estudiado en 1989 y publicado en varios artículos que señalaban que el **RQD** se utilizó originariamente tanto en la clasificación **RMR** como en la **Q** porque *contaba con la ventaja de haberse determinado en un gran número de casos históricos*. Este parámetro equivalía en cierta forma al espaciado de las discontinuidades puesto que existían correlaciones entre el **RQD** y el espaciado, (Fig. 3), que condujeron al concepto de *densidad de discontinuidades* introducido en el **RMR** en 1989.

La unión de estos dos parámetros en este único concepto permitió usarlos de manera aventajada en dos situaciones: la primera durante la campaña de sondeos en superficie, donde se utilizaba el **RQD** como parámetro principal para determinar la densidad de discontinuidades, puesto que no había acceso al frente del túnel para medir espaciados de discontinuidades. Y la segunda, cuando



[Fig. 3].- Correlación entre el RQD y el Espaciado (Bieniawski 1989).

en el interior de un túnel se tenía acceso al frente pero no se contaba con sondeos, donde el **RQD** podría ignorarse y utilizar el espaciado de las discontinuidades para obtener el valor de la densidad a partir de la Fig. 3.

Queda claro entonces, que las clasificaciones *cuantitativas* **RMR** o **Q** son igual o más adecuadas para macizos rocosos de muy mala calidad que el índice cualitativo **GSI**.

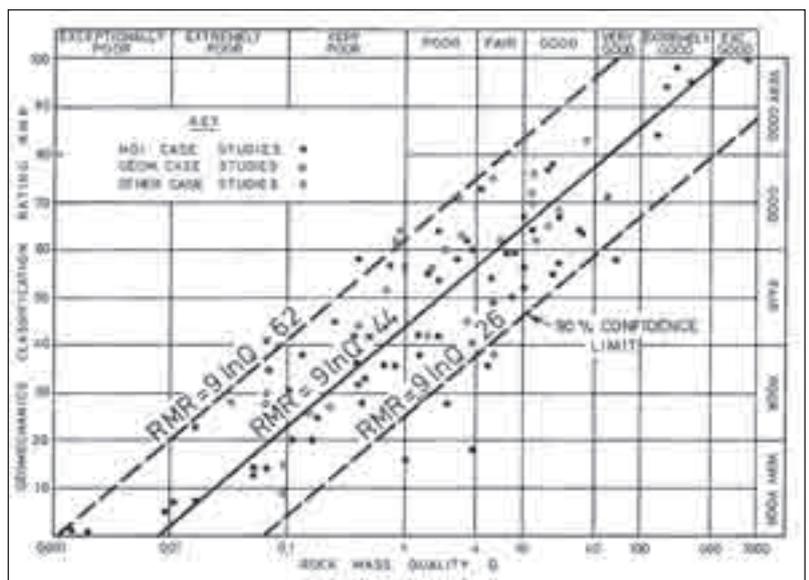
Por último, una prueba de la aplicabilidad de la clasificación **RMR** para evaluar los macizos rocosos de muy mala calidad se obtiene de la observación de los numerosos casos históricos de la Fig. 4, donde se muestra una correlación entre el **RMR** y el **Q** publicada en un año tan temprano como 1976. En la gráfica se observa una notable dispersión de resultados. Por lo tanto, en un proyecto determinado deben emplearse ambas clasificaciones para comprobar que es aplicable la correlación:

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

(la misma correlación figura también en la literatura como:

$$RMR = 9 \log_e Q + 44).$$

Esta expresión no resulta válida cuando se utiliza el **GSI** en lugar del **RMR**.



[Figura 4].- Correlación entre RMR y Q (Bieniawski 1976).

- **MITO N° 3: EL CRITERIO DE HOEK-BROWN Y EL CRITERIO DE MOHR-COULOMB SON LOS ÚNICOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA DE LOS MACIZOS ROCOSOS Y EL FACTOR DE SEGURIDAD.**

No es cierto, el criterio de Mohr-Coulomb, que se remonta a 1773 (!), sirve para bastantes cosas, en particular para el análisis de la estabilidad de taludes, pero existen otros criterios de resistencia de pico –igualmente efectivos– por ejemplo, el criterio de Yudhbir-Bieniawski (1983) que se utiliza para cotejar los resultados del criterio de Hoek-Brown (Edelbro et al, 2006).

Si bien el criterio de Hoek-Brown es más conocido y frecuentemente usado en los cálculos con ordenador, el criterio de Yudhbir (1983), basado en Bieniawski (1974), merece tenerse en cuenta para comprobar las estimaciones de la resistencia del macizo rocoso, lo que resulta necesario, pues este valor es muy difícil medirlo directamente. Estos dos criterios se incluyen en la **Tabla II**.

Si se quiere aplicar el criterio de Hoek-Brown es necesario conocer el **RMR** o el **GSI** y la constante de la roca m_i . Nótese que las ecuaciones originales (1988) para determinar los parámetros m_b (definido como m en 1980) y s del criterio de Hoek-Brown, se basaban en el **RMR** (después de Priest e Brown, 1983), y muchos ingenieros aún las consideran las más apropiadas. Con posterioridad (Hoek et al., 1995) estas ecuaciones se modificaron al sustituirse el **RMR** por el **GSI**, pero manteniendo las mismas expresiones. El criterio original incluía también un término exponencial donde la potencia a tomaba el valor de 0,5, en lugar de la compleja y variable expresión usada en la actualidad (que proporciona un valor máximo para a de 0,666).

Criterio de rotura del macizo rocoso	Parámetros y definiciones	
Hoek-Brown: $\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_1'}{\sigma_c} + s \right)^a$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$	m_i : constante de la roca intacta $m_i = f$ (tipo de roca) p.ej: arenisca $m_i = 12-17$ m_b : valor minorado de la constante m_i s y a : constantes del macizo rocoso D : Factor de perturbación
Yudhbir-Bieniawski: $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = A + B \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \right)^{0.75}$	$A = e^{\frac{RMR - 100}{24}}$	A : constante del macizo rocoso $A = f$ (calidad del macizo) p.ej: $A=1$ para roca intacta B : constante de la roca intacta $B = f$ (tipo de roca) p.ej. arenisca $B = 4.0$

■ [TABLA II].- Los criterios de rotura (Hoek et al, 2002; Bieniawski 1989).

Más recientemente, Malkowski (2010) estudió detalladamente estos aspectos. Determinó cómo el valor del **GSI** afecta a las constantes empíricas m_b y s , así como a la resistencia del macizo rocoso σ_M . Como se muestra en la **Tabla III**, los cálculos de Malkowski demuestran que una variación de 5 puntos en el GSI, de 35 a 40, conlleva dramáticos incrementos en los siguientes valores: un 37% en σ_M , un 20% en el valor del parámetro m_b y un 33% en el módulo de deformación E_M , mientras que el parámetro s se incrementa en un 85%!

En los cálculos anteriores, se necesita también la constante empírica de la roca m_i para obtener la constante m_b del criterio Hoek-Brown (como se observa en la **Tabla II**).

El valor real de la constante de la roca m_i depende de varios factores y puede variar considerablemente para una roca dada según las tablas publicadas por Hoek y Brown en 1995. Posteriormente se puso a disposición del público el programa RocLab que proporciona estimaciones de m_i . Adicionalmente muchos investigadores realizaron ensayos triaxiales sobre la roca intacta, pero la elección del valor de m_i continúa siendo bastante subjetiva. Muy recientemente, Kwasniewski rea-

GSI	m_b	s	σ_M (MPa)	E_M (GPa)
35	0,981	0,0007	1,204	2,982
40	1,173	0,0013	1,654	3,976
45	1,403	0,0022	2,241	5,303
50	1,677	0,0039	3,011	7,071
55	2,005	0,0067	4,022	9,429
60	2,367	0,0117	5,350	12,574
65	2,865	0,0205	7,099	16,768
70	3,425	0,0357	9,401	22,361

■ [TABLA III].- Parámetros m_b y s , resistencia σ_M y módulo de deformación E_M para diferentes valores de GSI con $\sigma_c = 50$ MPa y $m_i = 10$ (de Malkowski, 2010).

lizó 625 ensayos triaxiales (Malkowski, 2010) sobre 75 tipos de rocas y 46 tipos de carbón de varias partes del mundo y concluyó que las desviaciones estándar resultaban demasiado grandes, que si bien había cierta convergencia en el rango de los valores para algunas rocas, la dispersión de los valores arrojaba dudas sobre la fiabilidad en las aplicaciones prácticas, y recomendó revisar y cotejar los resultados.

Debido a las incertidumbres para cuantificar el GSI ya señaladas, y dada la importancia del criterio de Hoek-Brown, una práctica frecuente en Europa es determinar en primer lugar el **RMR** y convertirlo en el **GSI** utilizando la expresión $GSI = RMR - 5$, como recomendaba Hoek et al. (1995). Pero, como se mostró anteriormente, esta ecuación solo es válida para macizos rocosos de muy mala calidad.

También de forma bastante reciente, Brown (2008) reevaluó el criterio de Hoek-Brown al proporcionar una revisión de sus usos, abusos y limitaciones, aclarando que el criterio se creó para su uso en la **estimación aproximada de las resistencias de pico de los macizos rocosos** en estudios preliminares de proyectos de ingeniería de rocas que incluyeran **excavaciones subterráneas**, el autor señaló tres aspectos que requerían de especiales **precauciones**, que son los siguientes:

“(1) el criterio no debería utilizarse en los casos donde aparecen solo una o dos familias de discontinuidades;

(2) existe un límite en el rango de valores del **GSI** para el que se puede aplicar el criterio con confianza: debe tenerse cuidado cuando se trata con roturas frágiles en rocas resistentes y masivas con valores de **GSI** por encima de 75, y del mismo modo, debe tenerse un especial cuidado con los **bajos valores de GSI, por debajo de 30, y casos con baja σ_c** , así como también con las rocas heterogéneas tectonizadas. *La estimación de los valores del GSI, en tales casos, es una labor para especialistas experimentados* porque el criterio de Hoek-Brown puede no ser de aplicación en rocas muy blandas con $\sigma_c < 15$ MPa donde el parámetro a puede superar su valor máximo de 0,65 y aproximarse a uno, valor que normalmente se asigna a los suelos;

(3) El factor de perturbación D está sujeto a errores significativos si se aplica a la totalidad del macizo rocoso en lugar de únicamente a una zona perturbada de unos pocos metros.”

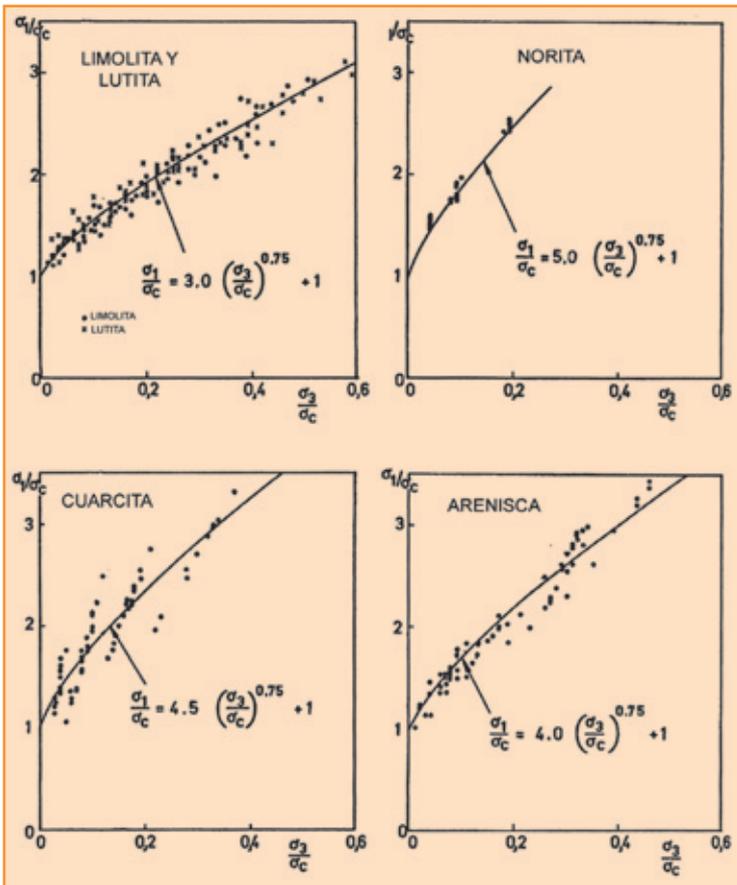
Por consiguiente, parece necesario comprobar y cotejar los resultados proporcionados por el **criterio de Hoek-Brown**. Esto puede lograrse con el apoyo del **criterio de Yudhbir-Bieniawski**, como se señalaba en un estudio de Edelbro et al. (2006) que comparaba todos los criterios disponibles con valores medidos (**Tabla IV**).

El criterio de Yudhbir-Bieniawski tiene la forma dada en la **Tabla II**. La constante A también puede obtenerse de $A = \exp(0.042RMR - 4.167)$. La constante B se obtiene a partir de ensayos triaxiales sobre los litotipos rocosos, representándose en la **Fig. 5** (Bieniawski, 1974).

Laisval Case, $\sigma_M = 19.8 \text{ MPa} \pm 1.4 \text{ MPa}$, $\sigma_C = 180 \text{ MPa}$ RMR = 47 +/- 18

Criterio	σ_M (MPa)	$\sigma_{20\%}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)
Hoek-Brown-RMR (1980)	34,5	12,0	74
Hoek-Brown-GSI (2002)	15,0	2,5	50
Yudhbir-Bieniawski	16,3	4,2	53
Shorey-RMR (1989)	37,0	15,5	81

[TABLA IV].- Resistencia del macizo rocoso σ_M estimada por los criterios de Hoek-Brown y de Yudhbir-Bieniawski comparada con los resultados de ensayos reales a gran escala (según Edelbro et al, 2006).



[Figura 5].- Esfuerzos en la rotura a compresión triaxial para distintas rocas (Bieniawski 1974).

La constante α adopta aquí un valor de $\alpha = 0.75$ pero hay excepciones para algunas rocas, por ejemplo, el carbón de Pittsburgh parece estar mejor caracterizado con $\alpha = 0.65$ y con $B = 4.4$.

Edelbro et al (2006) concluyeron del anterior estudio que los criterios de Hoek-Brown y de Yudhbir-Bieniawski proporcionan coincidencia razonable con las medidas de resistencia y son (a pesar del amplio rango entre los valores mínimos y máximos) los mejores candidatos para estimar la resistencia de forma realista, siempre que se sea cuidadoso en la elección de los valores de cada uno de los parámetros en cada método. No obstante, la concordancia con la resistencia medida fue relativamente escasa, lo que implica que no pueden esperarse estimaciones precisas con ninguno de los criterios.

Para finalizar, todos los criterios anteriores asumen que los macizos rocosos son homogéneos e isotropos, y como señalan los propios autores no deben usarse para analizar macizos rocosos anisotropos o con marcado control estructural. Además, y como señaló Brown (2008),

hasta que se desarrolle una metodología fundamentada en la evaluación explícita de los factores que influyen en las propiedades mecánicas de los macizos rocosos, los criterios empíricos siguen siendo la única alternativa. Por lo tanto, creo firmemente que es muy importante comprobar y cotejar siempre los resultados, y no depender de un único método.

- **MITO N° 4: LA MEJOR FORMA DE ESTIMAR EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN ES A PARTIR DE CUALQUIERA DE LAS CORRELACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN LA LITERATURA DE LA MECÁNICA DE ROCAS.**

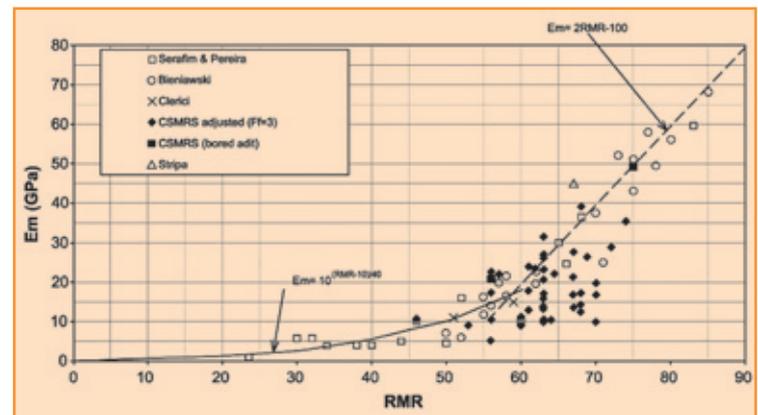
No es cierto, unas correlaciones están mejor sustentadas que otras, y algunas correlaciones deben evitarse si no se confirman con ensayos *in situ*. Pero hay una gran diferencia entre *determinar* y *estimar* la deformabilidad del macizo rocoso: *determinar* es muy deseable; *estimar* se hace en ausencia de datos *in situ* fiables y para diseños preliminares.

Este mito se refiere al *módulo de deformación del macizo*, imprescindible en el diseño de obras subterráneas para determinar deformaciones y desplazamientos en un túnel sometido a la presión litostática y a esfuerzos inducidos. Este dato puede obtenerse a partir de ensayos *in situ*, tales como ensayos de placa de carga o gato plano a gran escala, ensayos muy fiables pero muy caros y de larga duración, por lo que rara vez se usan hoy en día salvo en casos muy especiales (almacenamiento subterráneo de residuos nucleares).

Es cierto que este valor puede obtenerse a partir de una clasificación geomecánica que se haya probado adecuada para este propósito. De hecho, el sistema RMR fue el que primero propuso (en 1978) una correlación directa entre la calidad del macizo rocoso y el módulo de deformación *de campo* E_M , como se muestra en la Fig. 6, en lugar de usar la relación entre el módulo de elasticidad de laboratorio E_C y E_M . La correlación se basó en numerosos ensayos *in situ* a gran escala cuidadosamente supervisados y analizados, constituyendo los datos obtenidos la base de estudios posteriores.

Algunos de esos estudios fueron muy útiles, por ejemplo, aumentando la validez de la correlación original a los macizos rocosos de inferior calidad (Serafim and Pereira, 1983); otros no fueron tan provechosos ya que introdujeron innecesariamente otra variable, la resistencia a compresión simple de la roca intacta σ_c , que sólo añadió la incertidumbre inherente a los procedimientos de los ensayos de laboratorio. Además, el asunto se complicó al utilizar el índice *cualitativo* GSI en lugar de las correlaciones *cuantitativas* y apoyadas en ensayos de campo basadas en el RMR, compuesto por parámetros medibles, y por tanto preferibles para su uso en la ingeniería a las estimaciones descriptivas.

El argumento de que los datos cualitativos son más sencillos y baratos de obtener es claramente erróneo, ya que se trata de un paso



[Figura 6].- Correlación entre el RMR y el módulo de deformación del macizo rocoso E_M (Palmström y Singh 2001).

atrás al añadir más empirismo a un enfoque ya de por sí empírico. No obstante, algunos proyectistas y planificadores aceptan este razonamiento de miras tan limitadas. Por lo tanto la ecuación reproducida a continuación, que incluye la resistencia a compresión simple σ_c , debería evitarse. Además, puesto que el índice **GSI** tiene la única función de proporcionar datos al criterio de *Hoek-Brown*, su papel para la determinación del módulo de deformación es secundario y debería recurrirse al **RMR** para ser mucho más preciso. Por ejemplo, el factor de perturbación **D** introducido en el índice **GSI** resulta innecesario cuando se utiliza el sistema **RMR**, puesto que existe un factor fácilmente ajustable **A_b** para evaluar la calidad de la voladura que forma parte de los procedimientos del **RMR**.

Obsérvese que la sustitución del **GSI** por el **RMR** en la segunda ecuación y en la *Fig. 6* es incorrecta puesto que no hay equivalencia entre la clasificación **RMR** y el índice **GSI**, excepto para rocas de una calidad excepcionalmente mala, como se ha demostrado en apartados anteriores.

En resumen, se recomiendan las ecuaciones incluidas en la *Fig. 6* para los dos rangos de **RMR**, puesto que son las que mejor se ajustan a los datos experimentales y poseen un enfoque realista, apoyándose además en los trabajos de *Palmström y Singh, 2001*. Usar los dos rangos de **RMR** tiene la ventaja de que el módulo **NO** se sobreestima en el rango superior de valores ni se subestima en el rango inferior. Esto resulta más realista que usar una ecuación sigmoideal.

Si se dispone de datos de laboratorio del módulo de elasticidad de la roca intacta, estos podrían incluirse en la expresión para determinar el módulo de deformación del macizo, porque los procedimientos para obtener los módulos en el laboratorio están mejor estandarizados que los de las determinaciones de la resistencia σ_c en el laboratorio.

De esta forma, para estimar el módulo de deformación se pueden utilizar la expresión de *Galera et al (2005)*:

$$E_M \text{ (GPa)} = E_L \cdot e^{\frac{RMR - 10}{20}}$$

donde E_L es el módulo de deformación de la roca intacta, determinada en laboratorio.

Galera (2007) también obtuvo una útil expresión que incluye tanto el módulo del macizo rocoso E_M como la resistencia del macizo rocoso σ_M , que es:

$$E_M / E_L = \{\sigma_M / \sigma_c\}^{2/3}$$

donde E_L y σ_c son los valores del módulo y la resistencia a compresión uniaxial respectivamente determinados en el laboratorio.

La expresión anterior tiene el mérito de resultar útil como comprobación, ya que está de acuerdo con un antiguo concepto propuesto por *Deere y Miller* en 1966: la representación de la relación esfuerzo-deformación mediante el *modulus ratio*, que se muestra en la *Fig. 7*, que proponía que ante la ausencia de datos, E_L podía obtenerse a partir de la relación:

$$E_L = MR \cdot \sigma_c$$

Palmström y Singh (2001), así como *Hoek y Diederichs (2006)*, actualizaron los valores de **MR** para distintas rocas.

Más recientemente. *Ván y Vásárhelvi (2010)* propusieron dos expresiones similares:

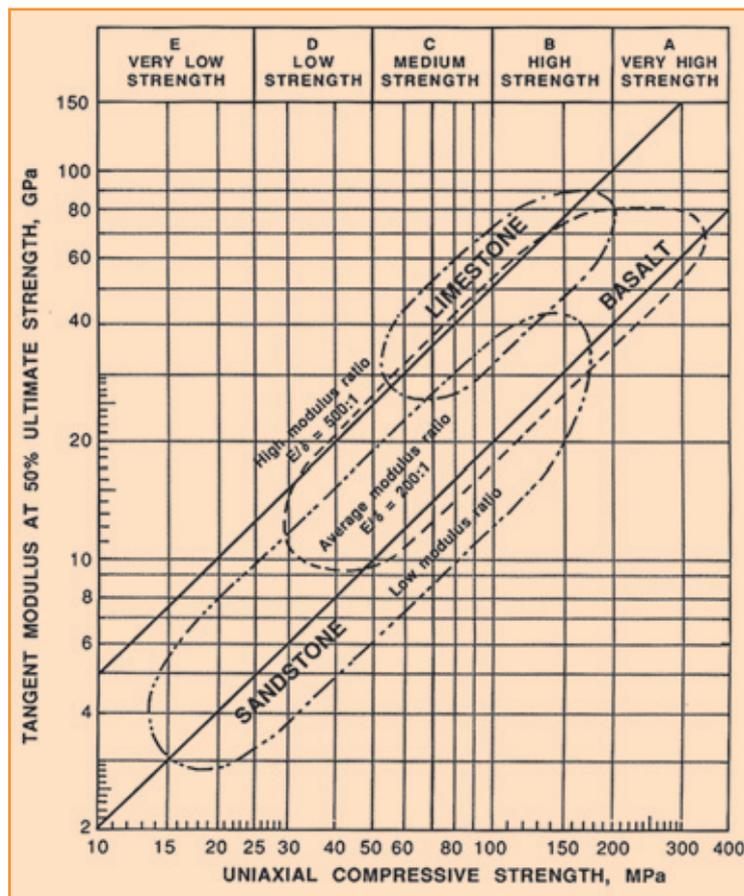
$$E_M / E_L = \sigma_M / \sigma_c = e^{\frac{RMR - 10}{20}}$$

y

$$E_M / E_L = MR \cdot e^{\frac{RMR - 10}{20}}$$

donde **MR** es el *modulus ratio* representativo de una roca en concreto según las tablas de *Palmström y Singh (2001)*, por ejemplo para areniscas; **MR** = 257 (σ_c = 109 MPa, E_L = 28 GPa).

Como es obvio, las expresiones anteriores todavía no se han comprobado con datos experimentales, y las correlaciones empíricas no



[Fig. 7].- El concepto de Modulus Ratio (MR): una representación de la relación esfuerzo-deformación para roca intacta y macizos rocosos (Deere y Miller 1966).

deberían reemplazar a los ensayos *in situ* en los diseños definitivos. Sin duda alguna, la práctica actual de prescindir de los ensayos *in situ*, incluso en los grandes proyectos, es lamentable, poniéndose en peligro con demasiada frecuencia la seguridad del proyecto con la excusa del escaso plazo y del limitado presupuesto.

- **MITO N° 5: ES SUFICIENTE CON BASARSE EN EJEMPLOS ESTUDIADOS Y DESARROLLADOS EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA CIVIL DE TÚNELES.**

¡Una gran equivocación! Hay una gran cantidad de valiosa información que obtener de “nuestros primos” los ingenieros de minas, para aplicarla a la ingeniería civil.

Tanto los ingenieros civiles como los de minas tienen gran tradición y suficientes logros en su haber en el diseño y construcción de túneles de obras civiles y galerías mineras, cavernas y chimeneas. Sin embargo, llama la atención la escasa interacción entre las dos disciplinas, y esto es particularmente evidente en lo que se refiere a las clasificaciones del macizo rocoso. Como estoy involucrado en ambos campos y me he esforzado durante años en integrar en mis proyectos a equipos de ingenieros civiles, ingenieros de minas y geólogos, estoy convencido de que se pierden excelentes oportunidades por no intercambiar ideas.

Por ejemplo, las aplicaciones del **RMR** a las explotaciones mineras por hundimiento en rocas resistentes de Chile y Australia, el denominado **RMR minero**, o a las galerías de carbón norteamericanas en representación de la minería en rocas blandas, el denominado *Valor del techo de las minas de carbón (Coal Roof Mine Rating)*, proporcionaron grandes avances en el diseño de los sostenimientos de excavaciones subterráneas con grandes vanos y en la estabilidad de los pilares de

Caracterización

carbón o roca, incluyendo los efectos de la presión litostática y los esfuerzos inducidos por la minería (Figs. 8 y 9).

El diseño de los pilares es un área específica en la que los ingenieros civiles pueden beneficiarse de las investigaciones y experiencias de sus colegas mineros. Se trata del dimensionamiento de los pilares de roca teniendo en cuenta el efecto de su forma y la resistencia del macizo rocoso, σ_M . La conocida ecuación para este propósito (Bieniawski, 1984), muy utilizada en la minería de los Estados Unidos, es:

$$\sigma_{\text{pilar}} = \sigma_M [0,64 + 0,36 w/h]$$

Donde:

σ_{pilar} = resistencia global del pilar, MPa.

σ_M = resistencia unitaria in situ del macizo rocoso (1m³), MPa.

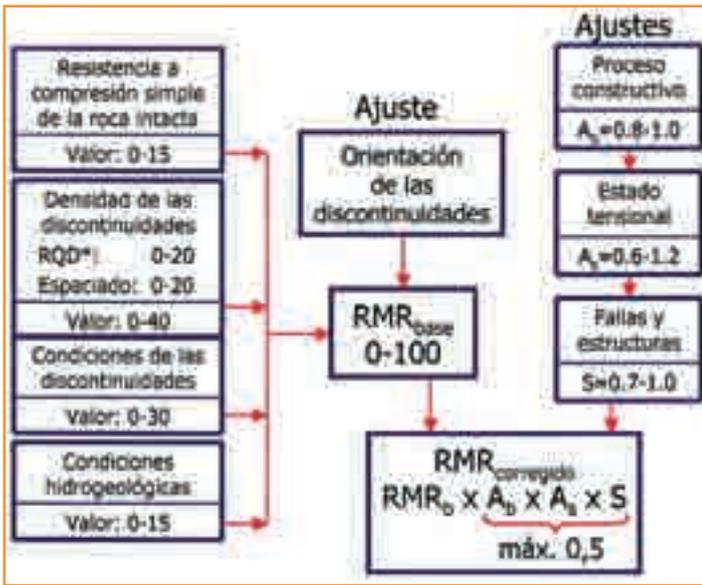
w = anchura del pilar, m.

h = altura del pilar, m.

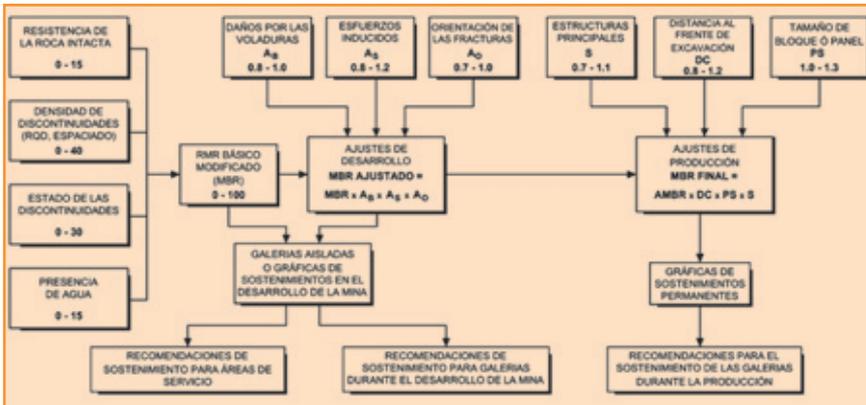
La resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso, σ_M se determinó a partir del criterio de Kalamaras-Bieniawski de 1995 (Figs. 10a y 10b), que es también muy útil para proyectos de ingeniería civil concernientes a túneles y cámaras subterráneas.

Soluciones

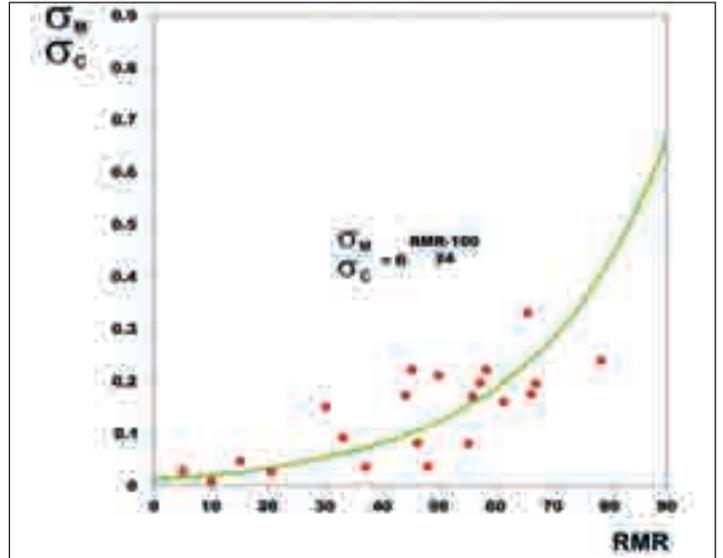
Las clasificaciones geomecánicas RMR y Q, se desarrollaron de forma independiente en 1973 y 1974 con el propósito común de cuan-



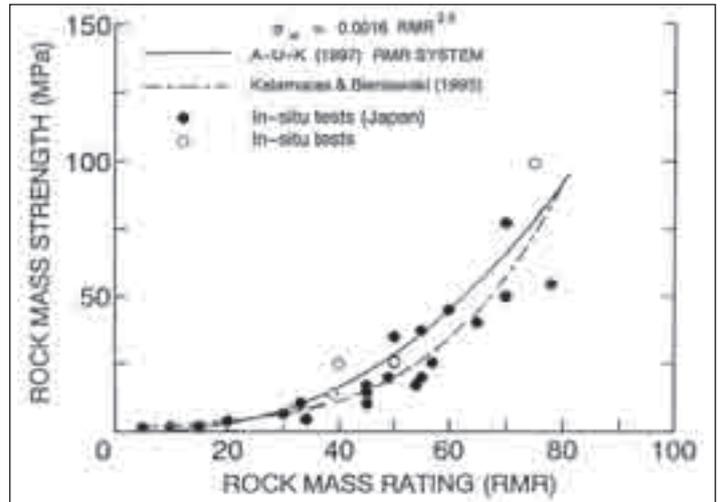
[Figura 8].- RMR y Factores de ajuste (Bieniawski, 1989).



[Figura 9].- Esquema de la clasificación RMR para aplicaciones mineras (Kendorski et al, 1983).



[Fig. 10a].- Un criterio de rotura para macizos rocosos en función del RMR (Kalamaras. y Bieniawski, 1995). (Los datos experimentales de esta figura proceden de los ensayos insitu recopilados por Aydan y Dalgic (1998) en Japon).



[Fig. 10b].- La correlación directa en función del RMR (Aydan, Ulusay y Kawamoto, 1997). (Los datos experimentales de esta figura proceden de los ensayos insitu recopilados por Aydan y Dalgic (1998) en Japon).

ificar preliminarmente las características del macizo rocoso en base a descripciones geológicas cualitativas. Siempre se ha destacado la importancia de un minucioso reconocimiento geológico. Además, se señaló en repetidas ocasiones que estos sistemas de clasificación no eran libros de cocina, sino que debían emplearse con el propósito para el que fueron desarrollados: formar parte del proceso de diseño de los proyectos de ingeniería. Este proceso es reiterativo cuando se aplica a las obras subterráneas, donde el reconocimiento detallado del terreno debe actualizarse día a día.

En la época en la que se desarrollaron las clasificaciones RMR y Q los geólogos trabajaban a menudo en equipos distintos que los ingenieros, lo que conllevaba a potenciales malentendidos sobre lo que el proyecto requería. De hecho, la llegada de nuestras clasificaciones geomecánicas parece haber proporcionado la oportunidad de combinar los esfuerzos de ingenieros y geólogos para actuar como un solo equipo, que cubra las necesidades de procedimientos claros en la ingeniería básica de túneles y los

requerimientos de información geológica cuantitativa y cuidadosamente seleccionada.

Como se muestra en la **Tabla V**, esto propició el desarrollo de muchas variantes en la clasificación para diferentes fines, tales como los túneles, la minería, la estabilidad de taludes y las cimentaciones de presas.

NOMBRE	CREADOR Y FECHA	PAÍS DE ORIGEN	APLICACIONES	
1. Carga en rocas	Terzaghi, 1946	Estados Unidos	Túneles con sostenimiento de acero	
2. Tiempo de autoestabilidad	Lauffer, 1958	Austria	Túneles	
3. Nuevo método austriaco de construcción de túneles (NATM)	Pacher, Rabcewicz, 1964	Austria	Túneles	
4. Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al., 1967	Estados Unidos	Testigos de sondos, túneles	
5. Rock Structure Rating (RSR) concepto	Wickham et al., 1972	Estados Unidos	Túneles	
6. Rock Mass Rating (RMR) sistema	Bieniawski, 1973	Sudáfrica y Estados Unidos	Túneles, minas, taludes y cimentaciones	
	Modificado en 1989			
	Weaver, 1975	Sudáfrica	Ripabilidad	
	Laubscher, 1976	Sudáfrica	Minería en rocas duras	
	Olivier, 1979	Sudáfrica	Resistencia a la meteorización	
	Ghose y Raju, 1981	India	Minería del carbón	
	Moreno Tallos, 1982	España	Túneles	
	Kendoski y Cummings, 1983	Estados Unidos	Minería en rocas duras	
	Nakao et al., 1983	Japón	Túneles	
	Serafim y Pereira, 1983	Brasil	Cimentaciones	
	Gonzalez de Vallejo, 1983	España	Túneles	
	Ónaí, 1983	Estados Unidos	Minería del carbón con claves balonadas	
	Romana, 1985	España	Estabilidad de taludes	
	Newman, 1985	Estados Unidos	Minas de carbón	
Extensiones al sistema RMR	Sandbak, 1985	Estados Unidos	Perforabilidad	
	Smith, 1986	Estados Unidos	Facilidad para el dragado	
	Venkateswarlu, 1986	India	Minería del carbón (CMRS)	
	Robertson, 1988	Canadá	Estabilidad de taludes	
	Thiel, 1985	Polonia	Flysch de los Cárpatos	
	Ónaí, 1996	Turquía	Rocas blandas, carbón	
	Pakalnis et al., 2007	Canadá	Minería en rocas blandas	
	7. Sistema Q	Barton et al., 1974	Noruega	Túneles, cavernas
	Extensiones al sistema Q	Kirsten, 1982	Sudáfrica	Excavabilidad
		Kirsten, 1983	Sudáfrica	Túneles
Barton, 2000		Noruega, Brasil	Túneles con TBM	
8. Resistencia-tamaño	Franklin, 1975	Canadá	Túneles	
9. Clasificación unificada	Williamson, 1984	Estados Unidos	General, comunicaciones	
10. Coal Mine Roof Rating (CMRR)	Molina y Mark, 1994	Estados Unidos	Minas de Carbón	
11. Geological Strength Index (GSI)	Hoek et al., 1995	Canadá	Caracterización de macizos rocosos	
12. Rock Mass index (RMI)	Palmström, 1995	Noruega	Ingeniería de rocas	
13. Deutsche Steinkohle	Withaus, 2006	Alemania	Minas de carbón	
14. Rock Mass Excavability (RME)	Bieniawski et al., 2007	España	Túneles con TBM	

■ [TABLA V].- Principales clasificaciones geomecánicas en la Ingeniería.

Ámbito de aplicación de las clasificaciones RMR y Q

Las clasificaciones **RMR** y **Q** son especialmente adecuadas en la planificación del proyecto de un túnel, donde es necesaria una valoración preliminar del sostenimiento más adecuado basándose en la testificación de sondeos, en la cartografía geológica y en los estudios de sísmica de refracción. Durante la construcción su aplicación es más esencial si cabe, ya que la idoneidad de los sostenimientos se comprueba día a día. Las razones para esto son las siguientes:

1) El **RMR** y **Q** surgieron, y se actualizaron específicamente, para la estimación del sostenimiento de los túneles. Más tarde se utilizaron para evaluar las propiedades del macizo rocoso, como el módulo de deformación, para la interpretación de velocidades sísmicas, y como complemento en el análisis de los datos de auscultación durante la construcción a través de las relaciones entre convergencia, calidad del macizo rocoso y dimensiones del túnel.

2) Estimar las propiedades del macizo rocoso para incluirlas en los modelos numéricos ha demostrado ser una alternativa competitiva a los costosos y complejos ensayos *in situ*, que se basan en una serie de hi-

pótesis interpretativas de los datos. Resulta significativo que los ensayos de placa de carga, el gato plano a gran escala y las células de presión rara vez se utilicen en la actualidad, debido a su coste y a las dudas sobre el comportamiento de la zona perturbada en la excavación.

Las clasificaciones **RMR** y **Q** proporcionan estimaciones realistas para los modelos y, a través de las mediciones sísmicas y su interpretación, pueden ayudar a conocer las características de la zona perturbada.

3) Una adecuada auscultación y el registro de una o ambas clasificaciones geomecánicas durante la construcción del túnel es fundamental para cuantificar las condiciones existentes en el macizo rocoso y seleccionar el tipo de sostenimiento más adecuado, resultando también útiles si aparecen controversias contractuales, peritajes y modificaciones del proyecto.

4) La tecnología ha cambiado mucho en los 38 años que han pasado desde que se desarrolló la clasificación **RMR** por lo que deben revisarse los métodos y elementos de sostenimiento. En consecuencia de vez en cuando se realizan importantes actualizaciones, como la sustitución del mallazo por las fibras.

5) El **RMR** y **Q** resultan ser eficaces tanto en *macizos de muy mala calidad* como en *macizos de muy buena calidad*, y es incorrecto afirmar que métodos descriptivos alternativos podrían ser preferibles en macizos rocosos de mala calidad. De igual forma que las técnicas de la ingeniería geológica mejoran con el avance de la tecnología, nuestros sistemas **cuantitativos** de clasificación siempre serán preferibles a cualquier evaluación *cuantitativa* de tipo descriptivo.

6) Tanto el **Q** como el **RMR** constituyen la base de los nuevos métodos de previsión de avance de tuneladoras, en forma del **Q_{TBM}** y del **RME**, que han generado tanto partidarios como detractores, lo que era de esperar en una especialidad tan dinámica como la nuestra.

7) Para finalizar, puesto que las clasificaciones geomecánicas forman parte de una aproximación empírica, se debería ser cuidadoso, puesto que las soluciones que se obtienen, que son estimadas, no son un comodín ante la complejidad que pretendan una precisión superior a lo que significa una aproximación empírica.

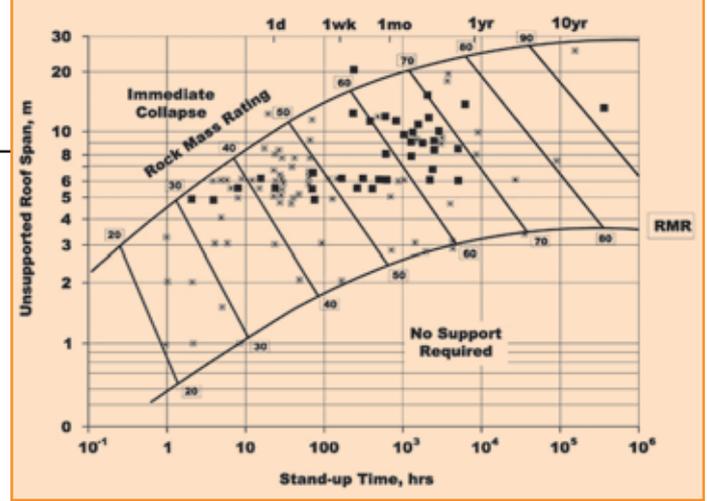
Barton (2007) puso un ejemplo relativo a la formulación de *Hoek-Brown* mostrada en la **Tabla VI** y que se basa en el **GSI**; llamando a esta: *fórmulas extraordinariamente complejas (a la izquierda) creadas para proporcionar datos a algunos modelos continuos recientes, en los que no es posible tener en cuenta la influencia de variaciones locales en la calidad de la roca sobre la resistencia del macizo rocoso, la deformación, ángulo de fricción y cohesión, cuando la formulación requiere de software más que de estimaciones para su resolución.*

Quizás como resultado de las presiones presupuestarias y de plazo, ha habido una clara tendencia a usar códigos continuos *apropiados*, que ofrecen una particularmente buena representación gráfica de los resultados. También están disponibles sencillos programas para manejar las complejas ecuaciones de la **Tabla VI**, de forma que un usuario medio necesita únicamente un conocimiento limitado de los principios de la mecánica de rocas para usar estos códigos *con éxito*.

Como resultado, el informe de un consultor podría contener nada más que distribuciones de esfuerzos y patrones de deformación coloreados, pero *¿Representan todos estos colores algo real? ¿Qué aproximación continua se ha realizado?* La realidad es que usar correctamente códigos sofisticados, con datos iniciales realistas, requiere a la vez experiencia y tiempo, y por lo tanto también presupuesto. Irónicamente, los datos iniciales requeridos para algunos modelos *continuos* parecen ser ahora considerablemente más complejos que los datos requeridos para los códigos *discontinuos*, como se sugiere en la **Tabla VI**.

Además de todo lo anterior, la pretendida precisión de las expresiones de la izquierda de la **Tabla VI** carece de sentido cuando, en cualquier caso, los **factores de seguridad** (también conocidos como **factores de ignorancia**) forman parte del diseño de un túnel. Ellos nos pro-

$E_M \text{ (GPa)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \times 10^{(GSI-10)/40}$	$E_M \text{ (GPa)} = 10^{\frac{RMR-10}{20}}$ $E_M \text{ (GPa)} = 2 \text{ RMR} - 100$
$\sigma_M = \sigma_c \times \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$	$\sigma_M = \sigma_c \times e^{\frac{RMR-100}{24}}$
$\phi = a \sin \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right]$	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{J_r \times J_w}{J_a \times 1} \right)$ $\phi = 20 + 0.05 \text{ RMR}$
$c = \frac{\sigma_c \left[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n} \right] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+u)(2+a) \sqrt{1 + \left(\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{((1+a)(2+a))} \right)}}$	$c = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_c}{100}$ $c = \frac{\sigma_M}{2} \times \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi}$
donde: $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$	



[Figura 11].- La duración los túneles construidos por la perforación y voladura, en función de RMR (Bieniawski, 1989). Cuadrados de color negro representan los casos de minería.

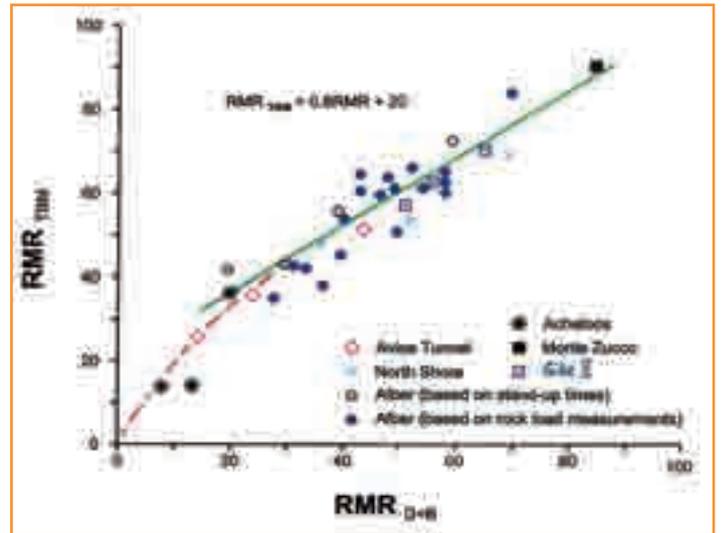
[TABLA VI].- Las extraordinariamente complejas fórmulas (Izda.) requeridas en los modelos continuos en comparación (Dcha.) con sus expresiones equivalentes (modificado de Barton 2007).

tegen de los errores, de las grandes desviaciones estándar, y nos permiten plantear supuestos con un considerable margen de seguridad, ¡con factores entorno a 1,5 en túneles, 2,0 en grandes cavernas, y 3,0 y mas en grandes presas!.

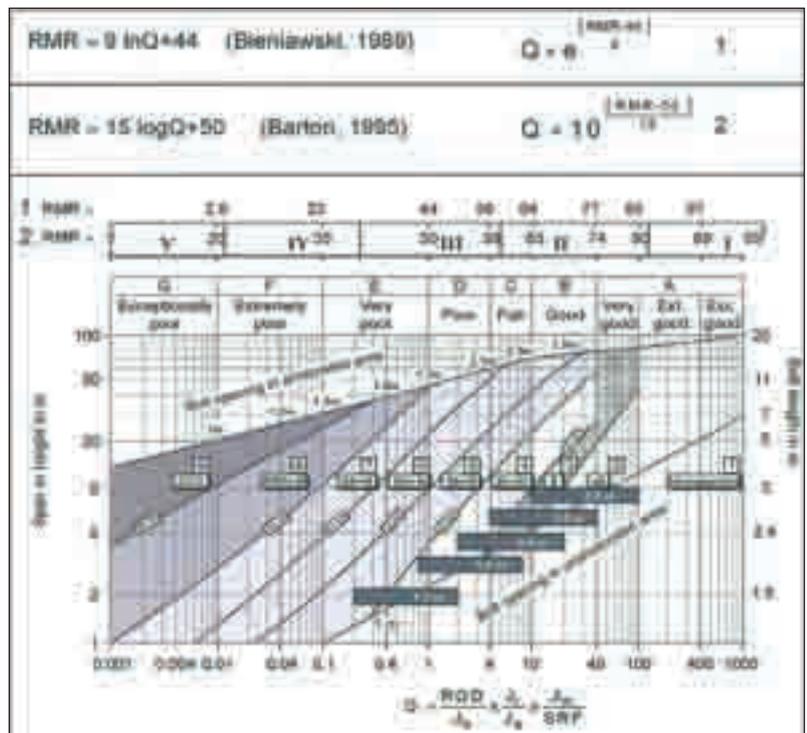
Los Diez Mandamientos para usar las clasificaciones RMR y Q

Para evitar la confusión, me gustaría enumerar los diez mandamientos para un uso correcto de las dos principales clasificaciones geomecánicas (Barton y Bieniawski, 2008).

- I. Asegúrate de que los parámetros de la clasificación son *cuantitativos* (están medidos no solo descritos), adecuados, provienen de ensayos normalizados, pertenecen a cada región estructural geológica, se basan en sondeos, galerías de exploración y cartografía geológica de superficie, además de en sísmica de refracción que permita interpolar entre el inevitablemente escaso número de sondeos.
- II. Sigue los procedimientos establecidos para clasificar los macizos rocosos con el **RMR** y el **Q**, y determina los rangos de variación típicos y los valores medios.
- III. Utiliza las dos clasificaciones y comprueba los valores obtenidos con las correlaciones publicadas entre *Bieniawski* (1976) y *Barton* (2008).
- IV. Estima las propiedades del macizo rocoso, en particular el módulo del macizo (para su uso en modelos numéricos), ver Fig. 6, y el *tiempo de autoestabilidad*, según la Fig. 11. No olvides incluir un ajuste para los túneles construidos con *TBM*, como se muestra en la Fig. 12.
- V. Estima las necesidades preliminares de sostenimiento (Fig. 13), aplicando las dos correlaciones en la selección.
- VI. Utiliza la modelización numérica, obteniendo factores de seguridad, y comprueba que se dispone de suficiente información. Usar por lo menos dos criterios de comparación y cotejar los resultados proporcionados por el criterio de *Hoek-Brown*.
- VII. Si no se dispone de información suficiente, admite que el método de diseño iterativo requiere de una exploración geológica más intensiva y de nuevos ensayos, por ejemplo medidas del estado tensional si fuera necesario.
- VIII. Ten en cuenta el proceso constructivo, y en el caso de los estudios de viabilidad de las tuneladoras, estima las velocidades de avance usando el Q_{TBM} y el *Índice de Excavabilidad* de macizos rocosos **RME**.
- IX. Asegúrate de que toda la información sobre la caracterización del macizo rocoso esté incluida en un *Informe Geotécnico para Especificaciones del Diseño* que trate sobre la metodología de diseño, las hipótesis y estimaciones asumidas y las desviaciones estándar de los datos.



[Figura 12].- Correlación entre las calificaciones de RMR de perforación y excavación explosión y un ajuste por túneles excavados con TBM (Alber, 1993).



[Figura 13].- Gráfica para la selección del sostenimiento de un túnel a partir de las clasificaciones geomecánicas RMR y Q (modificado de Barton y Bieniawski 2008).

X. Realiza los levantamientos del **RMR** y el **Q** a medida que avance la construcción, de manera que puedan compararse las condiciones previstas con las reales con objeto de verificar el diseño o realizar las modificaciones oportunas.

Naturalmente, no es necesario resaltar que deben incluirse ensayos de laboratorio que estén de acuerdo con la normativa y cuenten con un presupuesto adecuado. Los ingenieros y los geólogos deberían trabajar en equipo y comunicarse regularmente entre ellos y con el cliente.

Conclusiones

Los errores en la caracterización de macizos rocosos, en general, y en el uso de las clasificaciones geomecánicas y los criterios de resistencia y deformación, en particular, requieren de una atención especial, como ciertamente lo demuestran los numerosos casos recientes de roturas de túneles.

En cuanto a los criterios de resistencia, esta presentación no se manifiesta en contra del *Índice Geológico de Resistencia GSI* o el criterio de *Hoek-Brown*, que son métodos útiles si se utilizan correctamente. Simplemente uno debe ser consciente de sus limitaciones y ser cuidadoso con las estimaciones realizadas con programas comerciales, que pueden ser erróneas. Así que les recomiendo que siempre cotejen con cuidado los resultados de varios métodos alternativos.

El objetivo de esta presentación ha sido el de estimular el diálogo sobre los aspectos más relevantes de este tema, resaltar las soluciones de las que disponen los ingenieros y geólogos, e instar a actuar de forma adecuada en la planificación y el diseño de los proyectos, así como en la construcción, recomendándose revisar y cotejar las hipótesis asumidas y la metodología aplicada.

Agradecimientos

Para preparar esta presentación, el autor solicitó y recibió los valiosos comentarios de varios de sus colegas y amigos que mejoró las ideas expresadas en esta presentación y le informó de las últimas novedades. En particular, agradezco a las siguientes personas: *Prof. Dr. Hasan Gerçek*, Zonguldak, Karaelmas University, Turquía; *Dr Nick Barton*, Noruega; *Prof. Marek Cala*, AGH University, Cracovia, Polonia; *Dr-ing. Benjamín Celada*, España; *Dr Evert Hoek*, Canada; *Dr Marek Mrugała*, USA; y *Eng. Alex Lowdon*, Reino Unido

Referencias

- AYDAN, O, AND DALGIC, S, 1998. *Prediction of deformation behavior of 3-lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian fault zone (NAFZ)*. Proc. Reg. Symp. on Sedimentary Rock Engng. Taipei, Taiwan, 228-233.
- BARTON, N, 2000. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. Balkema, Rotterdam, 173p.
- BARTON, N, 2007. *Future directions for rock mass classification and characterization*. Proc. Rock Mechanics Challenges. Taylor & Francis, London, 179-188.
- BARTON, N AND BIENIAWSKI, ZT, 2008. *Setting the record straight about RMR and Q*. Tunnels & Tunnelling International, February, 26-29.
- BIENIAWSKI, ZT, 1974. *Estimating the strength of rock materials*. S. Afr. Inst. Min.Met., 74, 312-320.
- BIENIAWSKI, ZT, 1976. *Rock mass classifications in rock engineering*. Exploration For Rock Engineering, A.A. Balkema, Cape Town, 97-106.
- BIENIAWSKI, ZT, 1993. *Engineering Classification of Rock Masses: The RMR System and Future Trends*. Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, New York, v.3, 553-573.
- BIENIAWSKI, ZT, 1978. *Determining rock mass deformability*. Int J Rock Mech Min Sci, 15, 237- 247.
- BIENIAWSKI, ZT, 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. A A Balkema, Rotterdam.
- BIENIAWSKI, ZT, 1989. *Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual*. John Wiley and Sons, New York.
- BIENIAWSKI, ZT, 1992. *Design methodology in Rock Engineering: Theory, Education and Practice*. A A Balkema, Rotterdam.

- BIENIAWSKI, ZT, 2001. *Construyendo puentes para el siglo XXI entre la Ingeniería, la Geología y la Sociedad*. IngeoPres, Madrid, no.100, Diciembre, 10-22.
- BIENIAWSKI, ZT, CELADA, B, AND GALERA, JM, 2007. *Predicting TBM excavability*. Tunnels & Tunnelling International, September, 25-29.
- BIENIAWSKI, ZT AND GRANDORI, R, 2008. *Predicting TBM excavability-Pt 2*. Tunnels & Tunnelling International, January, 15-20.
- BROWN, ET, 2008. *Estimating the mechanical properties of rock masses*. Proc. SHIRMS 2008, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 3-22.
- CELADA, B, FERNÁNDEZ, M, RODRIGUEZ, A, AND TARDÁGUILA, I, 2010. *Definición preliminar de las secciones tipo de sostenimiento en los túneles proyectados por métodos convencionales*. IngeoPres, Mayo, nr 192, 16-22.
- DEERE, DU AND MILLER, RP, 1966. *Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock*. Rock Mechanics in Engineering Practice, eds Stagg K & Zienkiewicz O, Wiley, London, 1-20.
- EDELBRO, C, SJÖLBERG, J, AND NORDLUND, E, 2006. *A quantitative comparison of strength criteria for hard rock masses*. Tunnelling & Underground Space Technology, 22, 57-68.
- GALERA, JM, ÁLVAREZ, M AND BIENIAWSKI, ZT, 2005. *Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR: comparison with dilatometer tests*. Proceedings ISRM Workshop, eds C. Olalla, A. Perucho and M. Romana, Taylor & Francis, Madrid, 71-77.
- GALERA, JM, 2008. *La deformabilidad de los macizos rocosos. Curso sobre Criterios para el diseño de obras subterráneas*. Geocontrol, Santiago de Chile.
- GALLER, R, 2010. *NATM - The Austrian practice of conventional tunnelling*. Proc. Conf. on Underground Construction, Prague, Invited Lecture, 3-13.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L, 2002. *Ingeniería Geológica, Clasificaciones Geomecánicas*. Prentice Hall, Madrid, 199; 229-239.
- Grandori, R, 2007. *TBM performance and RME classification*. Proc. Jornada sobre Tunneladoras, CEDEX, Madrid.
- GRANDORI, R, BIENIAWSKI ZT, VINZINO, D, LIZZADRO, L, ROMUALDI, P AND BUSILLO, A, 2011. *Hard rock extreme conditions in the first 10 km of TBM-driven Brenner Exploratory Tunnel*. Proc. RETC, San Francisco, SME, Denver, 667-685.
- HOEK, E AND BROWN, ET, 1988. *The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update*. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp., Univ. of Toronto, Toronto, 31-38.
- HOEK, E, KAISER, PK, AND BAWDEN, WF, 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.
- HOEK, E, CARRANZA-TORRES, C, AND CORKUM, B, 2002. *Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition*. Proc. 5th North Amer. Rock Mechanics Symp., Toronto, 1, 267-273.
- HOEK E AND DIEDERICHS MS, 2006. *Empirical estimation of rock mass modulus*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43, 203-215.
- KALAMARAS, G AND BIENIAWSKI, ZT, 1995. *A rock mass strength concept incorporating the effect of time*. Proc. 8th ISRM Congress, Tokyo, Sept., 295-302.
- KENDORSKI, FS, CUMMINGS, RA, AND BIENIAWSKI, ZT, 1983. *A rock mass classification scheme for mining*. Proc. RETC, New York, AIME, 193-223.
- MALKOWSKI, P, 2010. *Application of studies in mines and laboratories for selection of the constants in the Hoek-Brown criterion*. Achivum Gornictwa, November.
- PAKALNIS, R, BRADY, TM, HUGHES, P, CACERES, C, OUCHI, AM, AND MACLAUGHLIN, MM, 2008. *Weak rock mass (RMR<45) design for underground mining*. Proc. Int. Workshop on Rock Mass Classification in Mining, NIOSH Information Circular 9498, Pittsburgh, PA, 119- 127.
- PALMSTRÖM, A AND SINGH, R, 2001. *The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates*. Tunnelling and Underground Space Technology, 16 (3), 115 - 131.
- PALMSTRÖM, A AND BROCH, E, 2006. *Use and misuse of rock mass classification systems*. Tunnelling & Underground Space Technology, 21, 21-30.
- PELLIS, P, 2007. *Limitations of rock mass classifications*. Tunnels & Tunnelling International, April, 33-38.
- PELLIS, P, 2011. *Against limit state design in rock*. Tunnels & Tunnelling International, February, 34-38.
- PETROSKI, H, 1991. *Paconius and the pedestal of Apollo: a case study of error in conceptual design*. Research in Engineering Design, 3, 123-128.
- PRIEST, SD AND BROWN, ET, 1983. *Probabilistic stability analysis of variable rock slopes*. Transaction Institution of Mining and Metallurgy, 92, January, A1-12.
- RAMAMURTHY, T, 2008. *Joint factor concept in solving rock engineering problems*. Proc. 5th Asian Rock Mechanics Symposium, IRSMR, Tehran, Iran, 147-156.
- ROMANA, MR, 1993. *Slope Mass Rating (SMR) - La aplicación de la clasificación de Bieniawski a los taludes*. Comprehensive Rock Engineering, 3, Oxford, 575-599.
- ROMANA, MR, 2003. *Dam Mass Rating (DMR) - An adaptation of RMR classification for use in dam foundations*. Proc. ISRM 2003 Symposium, SAIMM, Johannesburg, 972-980.
- STACEY, TR, 2004. *Design - A Strategic Issue*. Proc. 2nd Int. Seminar on Strategic versus Tactical Approaches in Mining. Section 4. Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- TZAMOS, S AND SOFIANOS, AI, 2007. *A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices*. Int J Rock Mech Min Sci, 4, 477-495.
- VÁN, P AND VÁSÁRHELYI, B, 2010. *Relation of rock mass characterization and damage*. Proc. Rock Engineering in Difficult Ground Conditions, Taylor & Francis, London, 399-404.
- YUDHIBIR, RK, LEMANZA, W AND PRINTZL, F, 1983. *An empirical failure strength criterion for rock masses*. Proc. ISRM Congress, Melbourne, 1, B1-B8.