

CONTRIBUCIÓN A LA CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN BASE AL GSI DE HOEK

Gianfranco Perri Ingeniero Consultor, Profesor de "Mecánica de Rocas" Universidad Central de Venezuela

Resumen

Después de una introducción sobre la problemática relativa a las objetivas dificultades intrínsecas a la definición y determinación de las características geotécnicas de los macizos rocosos, se describe y comenta el índice de calidad geomecánica de los macizos rocosos (GSI) recientemente propuestos por el Dr. E. Hoek y se resume la más reciente formulación del criterio de resistencia de Hoek y Brown. Luego, se ilustra la propuesta relativa a un conjunto de formulas empíricas deducidas para estimar cohesión fricción y compresión uniaxial de los macizos rocosos en función del GSI y de dos parámetros básicos del material rocoso, en acuerdo, o en alternativa, o a complemento de los gráficos y formulas empíricas propuestas recientemente por el Dr. Hoek.

Introducción

En geotecnia, es muy conocida y reconocida la dificultad práctica y conceptual de obtener o estimar y hasta definir los parámetros de resistencia y deformación cuando el medio al que se refieren es un macizo rocoso, por antonomasia heterogéneo, anisotropeo y discontinuo.

En efectos, con el desarrollarse de la mecánica de rocas fue evidente la imposibilidad de poder extender a los macizos rocosos los valores numéricos de las características de deformación, como por ejemplo el modulo longitudinal (E), obtenidas de ensayos de laboratorio sobre rocas, obligando a la ideación y realización de complicados costosos y no siempre totalmente representativos ensayos en sitio.

Igualmente, se evidenciaron pronto los fuertes limite de los criterios de resistencia, como por ejemplo el de Mohr-Coulomb basado en el uso de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}) la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ), cuando se trató de aplicarlos ya no solo al cálculo de la resistencia del material rocoso o de los planos de discontinuidades definidas, sino al macizo rocoso en su conjunto así como resultaba necesario en un gran numero de problemas prácticos en los que el comportamiento mecánico del macizo no resultaba directamente controlado ni por planos específicos de discontinuidades ni por las resistencias a la compresión uniaxial o al corte intrínsecas a los materiales rocosos constituyentes el macizo, sino por la resistencia global del conjunto constituido por los materiales rocosos, las discontinuidades, los eventuales fino, la geometría específica y relativa de las macroestructuras del medio discontinuo, entre otros.

Surgieron entonces las preguntas siguientes:

¿Cuales son y como se determinan los parámetros (E_m), (σ_{cm}), (c) y (ϕ) del macizo rocoso, heterogéneo y discontinuo?

¿Son iguales a los de los materiales rocosos constituyentes el macizo?

¿O son iguales a los de las discontinuidades presentes? (¿A los valores picos, o a los valores residuales?)

¿O se debe hacer la media entre los parámetros de los diferentes materiales presentes y los de las discontinuidades?

¿Pero se hará una media ponderada? (¿y según cual ponderación?)

¿Se determinarán con ensayos en laboratorio o en sitio?

¿Y luego finalmente, como se pasará de los valores de ensayo a los parámetros del macizo, que son en definitiva los que requiere el ingeniero proyectista?

El "Geological Strength Index" (GSI)

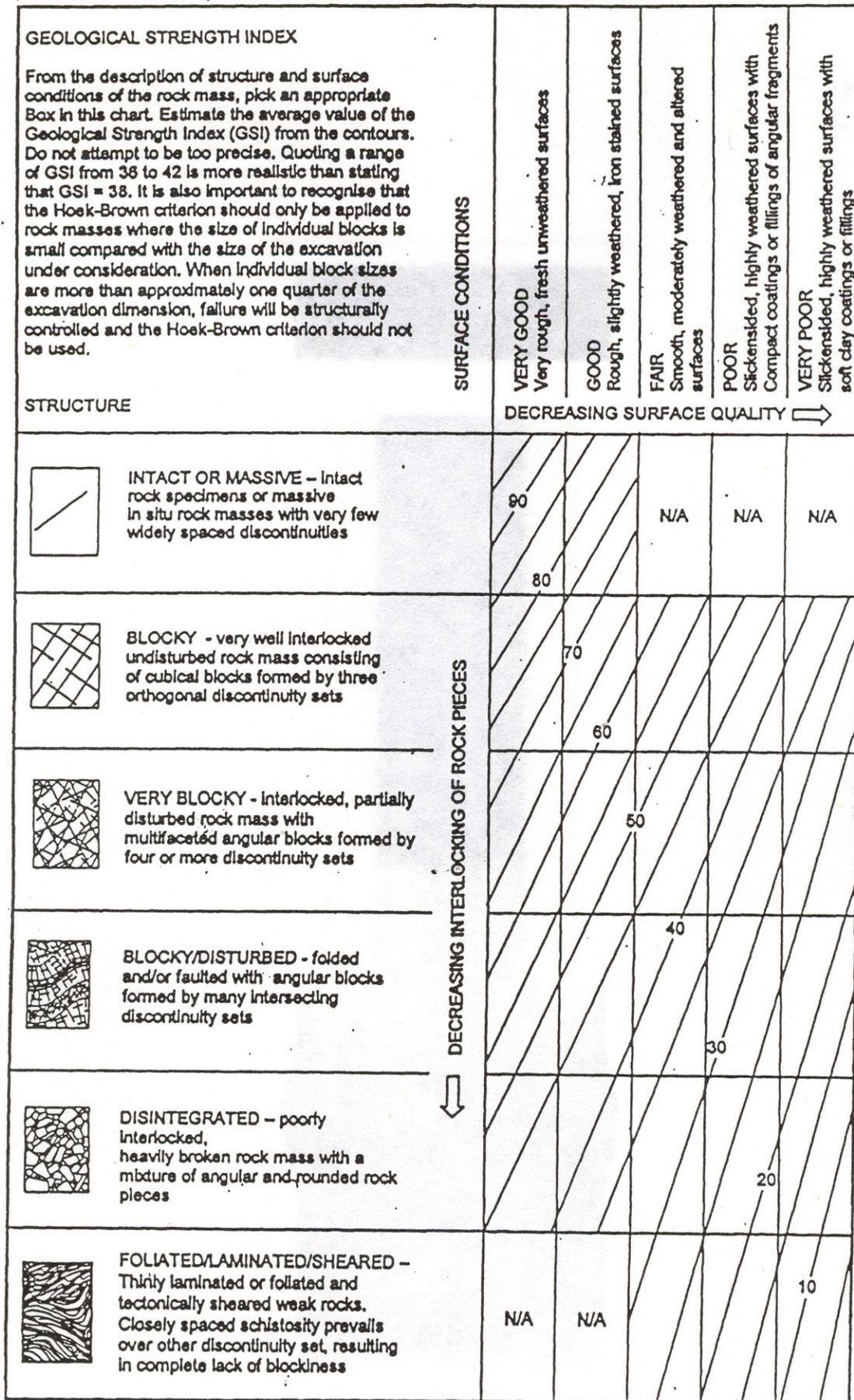
En 1994, el Doctor Evert Hoek publicó sobre el noticiero oficial de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Hoek, 1994) el artículo titulado "*Strength of Rock and Rock Masses*" en el cual introdujo, definiéndolo "Geological Strength Index", un nuevo índice de calidad geomecánica para los macizos rocosos cuyo rango numérico, comprendido entre 0 y 100, se basa en la identificación y clasificación en campo de dos de las características físico-mecánicas de un macizo rocoso: la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades.

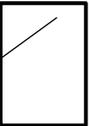
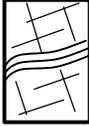
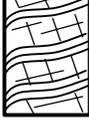
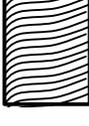
En la figura 1 se reporta la versión del GSI más recientemente publicada por el Autor (Hoek, 1998) y en la figura 2 se reporta la versión en castellano que ha sido elaborada por el geólogo Miguel Truzman, adaptando la clasificación original a los macizos rocosos constituyentes las formaciones metamórficas de la Cordillera de la Costa Venezolana.

Hoek recomienda hacer siempre referencia a un rango numérico y nunca a un solo valor del GSI y también sugiere la posibilidad, a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, de estimar este a partir del RMR de Bieniawski, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua. Russo (1998), propone estimar el GSI también a partir del índice Q de Barton, depurándolo del factor de tensión (SRF) y asignando 1 al parámetro agua (J_w), obteniendo luego, de acuerdo con la preexistente correlación entre Q y RMR: $GSI = 9 \lg Q' + 44$.

Lo que más hace interesante el GSI, además de su sencillez y agudeza, es su carácter intrínseco a la geomecánica de los macizos rocosos, toda vez que el mismo no depende de factores extrínsecos cuales por ejemplo, la orientación, la pretensión, la humedad, etc., así como en cambio sucede para la mayor parte de los otros índices de calidad propuestos y

FIGURA N°1



<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>		<p>CONDICION DE LA SUPERFICIE</p> <p>MUY BUENA Rugosa, superficies cerradas sin meteorización</p> <p>BUENA Rugosa, ligeramente meteorizada, abertura < 1mm, rellenos duros</p> <p>MEDIA Plana, moderadamente meteorizada, abertura 1-5 mm, rellenos duros y blandos</p> <p>MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas con abertura > 5 mm, predominan los rellenos blandos</p> <p>MUY MALA Espejos de falla, superficies muy meteorizadas y abiertas con rellenos blandos</p> <p>DISMINUCION EN CALIDAD DE SUPERFICIE</p>				
 <p>INTACTA O MASIVA – macizo rocoso con pocas discontinuidades, carentes de planos de foliación <i>Ej: Cuarzitas, anfíbolitas o mármoles</i></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 <i>Ej: Cuarzita fracturada intercalada ocasionalmente con esquistos y/o filitas</i></p>	70	60	50	40	30	
 <p>MODERADAMENTE FOLIADA – macizo rocoso fracturado constituido por intercalaciones de rocas foliadas y no foliadas en proporciones semejantes <i>Ej: Intercalaciones de esquistos y/o filitas con mármoles fracturados en proporción similar</i></p>	60	50	40	30	20	
 <p>FOLIADA – macizo rocoso plegado y/o fallado, muy fracturado, donde predominan las rocas foliadas, con ocasionales intercalaciones de rocas no foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas intercaladas ocasionalmente con mármoles lenticulares</i></p>	50	40	30	20	10	
 <p>MUY FOLIADA – macizo rocoso plegado, altamente fracturado, constituido únicamente por rocas muy foliadas <i>Ej: Esquistos y/o filitas muy fracturadas sin la presencia de mármoles, gneises o cuarzitas</i></p>	40	30	20	10	5	
 <p>BRECHADA/CIZALLADA – macizo rocoso muy plegado, alterado tectónicamente, con aspecto brechoide. <i>Ej: Brecha de falla o zona influenciada por fallas cercanas</i></p>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

utilizados, como por ejemplo el RMR de Bieniawsky, el RSR de Wickham y el Q de Barton, ni se reduce a la caracterización casi únicamente geométrica del macizo, como por ejemplo ocurre para el RQD de Deere. Quizás el único índice de calidad que posee carácter igualmente intrínseco es el también interesante RMI de Palmstrom (1996).

Es en efectos tal carácter intrínseco del GSI, que permitió a su Autor proponerlo para que fuera utilizado esencialmente para el importante objetivo de estimar y cuantificar numéricamente las principales características geomecánicas de los macizos rocosos, marcando de tal manera un paso gigantesco hacia la resolución de uno de los más álgidos problemas de la mecánica e ingeniería de rocas: el GSI provee un sistema para estimar la reducción de la resistencia y aumento de la deformabilidad de las rocas que se producen al pasar de los materiales a los macizos, al pasar o sea de la caracterización de laboratorio sobre muestras de dimensiones necesariamente muy limitadas a las formaciones naturales dentro de las cuales se realizan las obras de ingeniería que requieren ser numéricamente analizadas diseñadas o verificadas.

El criterio de resistencia de Hoek-Brown

En este mismo orden de ideas, la introducción del criterio de resistencia de Hoek y Brown (1980) para rocas y macizos rocosos fracturados, ya había producido un gran salto cualitativo en la mecánica de rocas, al permitir este desvincularse finalmente del uso (impuesto por la falta de alternativas prácticas valederas) del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb el cual, habiendo sido rígidamente trasladado de la mecánica de suelos a la mecánica de rocas, obligaba a la adopción de parámetros de resistencia al corte (c y ϕ), supuestamente representativos también del nuevo medio: el macizo rocoso.

El criterio de Hoek-Brown en efectos, introdujo parámetros de resistencia al corte propios, sea del material rocoso como el nuevo parámetro para la roca intacta (m_i) a lado de la tradicional resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}), sea del macizo rocoso (m_b) y (s) con la formula:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Siendo (σ_1 y σ_3) los esfuerzos principales máximos y mínimos respectivamente (eventualmente efectivos) al momento de la rotura.

Para el material rocoso: ($m_b = m_i$), ($s = 1$), ($a = 0.5$) y el criterio se transforma en:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

Con la formulación original del criterio, se sugirieron valores numéricos para los parámetros (m , s) de los materiales y de los macizos rocosos en función de las características de estos y haciendo referencia para ello, entre otros, a las clasificaciones de Bieniawsky y Barton.

Sucesivamente Hoek (1988), propuso formulas empíricas para los parámetros (m , s) en función del índice RMR de Bieniawsky y finalmente (1994) en función del nuevo índice GSI.

Para el macizo rocoso (cuando $GSI \geq 25$), los parámetros (m_b , s , a), valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad a = 0.5$$

Para el macizo rocoso (cuando $GSI < 25$), los parámetros (m_b , s , a), valen:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad s = 0 \quad y \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

Además, ya que en muchas aplicaciones resulta importante considerar el comportamiento post-falla del macizo rocoso, los Autores del criterio indicaron en cada nueva formulación, también valores numéricos (1980) y luego (1988) nuevas formulas en función del RMR y finalmente (1994) en función del GSI, para los valores residuales de los parámetros (m_r , s_r).

A este respecto se introdujo recientemente (Hoek y Brown, 1997) el concepto del GSI residual (GSI_{res}) con el cual se sugirió, para el calculo de los valores residuales de los parámetros (m_r , s_r), hacer aún referencia a las mismas formulas arriba indicadas para los valores naturales en las cuales solamente se sustituyera el GSI con el GSI_{res} .

En cuanto a los valores numéricos del GSI_{res} , en el mismo trabajo de 1997 Hoek y Brown por intermedio de tres ejemplos relativos a macizos rocoso de optima, media y baja calidad, a los cuales asignan valores numéricos para los parámetros naturales y residuales, permiten deducir los valores del GSI_{res} en cada caso, resultando una relación no lineal entre GSI_{res} y GSI presentando, los valores residuales, una caída tanto más acentuada cuanto mejor es la calidad geomecánica del macizo rocoso natural: el GSI_{res} vale del orden de 2/3 del GSI para macizos rocosos de buena calidad ($GSI > 75$), 4/5 para macizos de calidad intermedia y se mantiene en el mismo orden ($GSI_{res} \approx GSI$) para macizos rocosos de baja calidad ($GSI < 30$).

La explicación de este resultado, debe ser buscada en el comportamiento post-falla que presentan los macizos rocosos de diferente calidad: desde un comportamiento elasto-frágil para una calidad optima, a un comportamiento elasto-plástico con ablandamiento para una calidad intermedia, hasta un comportamiento elasto-perfectamente plástico para una calidad pésima. Russo (1998) propone, para estimar el valor del GSI_{res} , la siguiente relación lineal con el GSI natural: $GSI_{res} = 0.36GSI$.

Claro está que no todos los problemas estarían resueltos con la sola adopción del criterio de Hoek-Brown. Queda el problema de la selección del más representativo valor de los parámetros del material (σ_{ci}) y (m_i) para macizos heterogéneos; el índice geomecánico (GSI) tiene mucho de cualitativo y por lo tanto de subjetivo; la determinación en laboratorio del parámetro (m_i) es dificultosa: para cada material presente, según Hoek y Brown (1997), se deben realizar por lo menos 5 ensayos triaxiales sobre igual número de muestras del mismo

material con presiones de celda entre 0 y el 50% del valor de (σ_{ci}) y finalmente; es ciertamente todavía difundida, aunque no del todo justificada, la práctica de emplear el criterio de Mohr-Coulomb y sus parámetros (σ_{cm} , c , ϕ), supuestamente asociados al macizo rocoso, como consecuencia de la existencia de mucho software especializado que aún lo utiliza, en casi todos los campos de la geotecnia.

Y es probablemente por este último motivo, que Hoek y Brown en su trabajo de 1997 dedican muchos esfuerzos y mucho espacio para presentar los resultados de una amplia investigación conducida con el fin de estimar los valores numéricos aproximados de los tradicionales parámetros de resistencia, (c) y (ϕ), para que puedan ser realísticamente aplicados a los macizos rocosos. Esta estima se lleva a cabo partiendo del conocimiento de las características básicas del material rocoso (σ_{ci}) y (m_i) y de la determinación del GSI del macizo.

Desafortunadamente, los Autores presentan sus importantes resultados solo en forma gráfica, siendo en cambio más cómodo en muchas aplicaciones numéricas, disponer de formulaciones analíticas y por lo tanto luce interesante buscar la derivación de estas posibles formulas.

Formulas aproximadas para c y ϕ

Se siguieron los siguientes pasos:

- A partir de los dos gráficos de Hoek y Brown, en los que respectivamente se relacionan (ϕ) y (c/σ_{ci}) con el GSI y (m_i), se construyeron dos correspondientes tablas numéricas.
- Con el ayudante de gráficos de Excel se obtuvieron las 9 ecuaciones, una para cada uno de los 9 valores de (m_i) entre 5 y 35, de mejor correlación para las 9 curvas de cada uno de los dos gráficos, respectivamente relativos a (ϕ) y (c/σ_{ci}) en función de GSI.
- Se construyeron tablas numéricas de cada uno de todos los coeficientes numéricos de las ecuaciones obtenidas, en función de los 9 valores de (m_i) y con el ayudante de gráficos de Excel se obtuvieron las ecuaciones de mejor correlación de cada uno de los coeficientes en función de (m_i).
- Se sustituyeron estas últimas ecuaciones a los valores numéricos de los coeficientes en correspondencia de la ecuación base de las dos series de correlaciones iniciales, resultando en cada caso una única ecuación para el parámetro, respectivamente (ϕ) y (c/σ_{ci}), en función de GSI y (m_i).
- A partir de las dos ecuaciones obtenidas, se construyeron dos tablas numéricas correspondientes a los dos parámetros, (ϕ) y (c/σ_{ci}) en función de GSI y (m_i).
- Se construyeron dos nuevas tablas como diferencia entre los valores de los gráficos originales de los parámetros y los valores calculados con las formulas recabadas, resultando para (ϕ) una diferencia máxima de 2 grados y para (c/σ_{ci}) una diferencia máxima del 20%.

MATRICES NUMÉRICAS PARA EL ANGULO DE FRICCIÓN

Tabla N. 1 PHI (Hoek):										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		14	18	21	23	25	27	29	30	32
7		16	20	23	26	29	31	33	34	35
10		19	23	26	29	32	34	36	38	39
13		21	25	28	31	34	37	38	41	42
16		23	27	30	33	36	39	41	43	44
20		25	29	32	35	38	40	43	45	47
25		27	31	34	37	40	42	45	47	49
30		29	33	36	39	42	44	47	49	51
35		30	34	37	40	43	45	48	50	52

Tabla N.2 PHI (Perri): $-0.0016GSI^2+0.424GSI-6+9Ln(mi)$										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		13	16	20	23	26	28	30	32	34
7		16	19	23	26	29	31	33	35	37
10		19	23	26	29	32	34	37	38	40
13		21	25	28	31	34	37	39	41	42
16		23	27	30	33	36	39	41	43	44
20		25	29	32	35	38	41	43	45	46
25		27	31	34	37	40	43	45	47	48
30		29	32	36	39	42	44	46	48	50
35		30	34	37	40	43	46	48	50	51

Tabla N.3 PHI (Perri) - PHI (Hoek):										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		-1	-2	-1	0	1	1	1	2	2
7		0	-1	0	0	0	0	0	1	2
10		0	0	0	0	0	0	1	0	1
13		0	0	0	0	0	0	1	0	0
16		0	0	0	0	0	0	0	0	0
20		0	0	0	0	0	1	0	0	-1
25		0	0	0	0	0	1	0	0	-1
30		0	-1	0	0	0	0	-1	-1	-1
35		0	0	0	0	0	1	0	0	-1

MATRICES NUMÉRICAS PARA LA COHESIÓN

Tabla N.4 c/Co (Hoek):										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		0,0092	0,0140	0,0250	0,0310	0,0380	0,0495	0,0700	0,1080	0,1720
7		0,0110	0,0160	0,0270	0,0330	0,0400	0,0510	0,0710	0,1055	0,1620
10		0,0120	0,0180	0,0290	0,0350	0,0420	0,0530	0,0720	0,1025	0,1550
13		0,0140	0,0200	0,0310	0,0370	0,0450	0,0550	0,0730	0,1000	0,1500
16		0,0150	0,0220	0,0320	0,0390	0,0470	0,0580	0,0740	0,0990	0,1450
20		0,0170	0,0240	0,0350	0,0410	0,0490	0,0600	0,0760	0,0985	0,1410
25		0,0190	0,0260	0,0370	0,0440	0,0520	0,0630	0,0780	0,0980	0,1370
30		0,0200	0,0280	0,0400	0,0460	0,0540	0,0650	0,0800	0,0975	0,1330
35		0,0220	0,0300	0,0420	0,0480	0,0560	0,0670	0,0820	0,0970	0,1300

Tabla N.5 c/Co (Perri): (0.0058+0.0004 mi)exp [GSI(0.0455-0.0073 Ln(mi))]										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		0,0109	0,0153	0,0215	0,0301	0,0422	0,0591	0,0828	0,1161	0,1627
7		0,0118	0,0161	0,0220	0,0301	0,0411	0,0562	0,0769	0,1051	0,1438
10		0,0131	0,0174	0,0232	0,0309	0,0411	0,0548	0,0730	0,0973	0,1296
13		0,0144	0,0188	0,0246	0,0321	0,0420	0,0548	0,0717	0,0937	0,1225
16		0,0157	0,0202	0,0260	0,0335	0,0431	0,0555	0,0715	0,0920	0,1185
20		0,0175	0,0221	0,0280	0,0355	0,0450	0,0570	0,0722	0,0914	0,1158
25		0,0197	0,0245	0,0306	0,0381	0,0475	0,0592	0,0737	0,0919	0,1145
30		0,0219	0,0269	0,0331	0,0407	0,0500	0,0615	0,0757	0,0930	0,1144
35		0,0241	0,0293	0,0356	0,0433	0,0526	0,0640	0,0778	0,0946	0,1150

Tabla N.6 c/Co (Perri-Hoek)/Hoek %:										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		19	9	-14	-3	11	19	18	7	-5
7		7	1	-19	-9	3	10	8	0	-11
10		9	-3	-20	-12	-2	3	1	-5	-16
13		3	-6	-21	-13	-7	0	-2	-6	-18
16		5	-8	-19	-14	-8	-4	-3	-7	-18
20		3	-8	-20	-13	-8	-5	-5	-7	-18
25		4	-6	-17	-13	-9	-6	-5	-6	-16
30		9	-4	-17	-12	-7	-5	-5	-5	-14
35		9	-2	-15	-10	-6	-5	-5	-3	-12

- Finalmente, para el parámetro (c/σ_{ci}) que presenta una dispersión limitada respecto al parámetro (m_i) , se estimó una fórmula aproximada más sencilla para un valor medio función solamente del GSI.

En las figuras 3 y 4, se reportan los gráficos correspondientes a las fórmulas obtenidas de acuerdo con el procedimiento descrito, para los parámetros de resistencia al corte del criterio de Mohr-Coulomb para los macizos rocosos, (ϕ) y (c/σ_{ci}) , en función del GSI y (m_i) :

$$\phi = 0.424 \text{ GSI} - 0.0016 \text{ GSI}^2 - 6 + 9L_n m_i$$

$$c = \sigma_{ci} (0.0058 + 0.0004 m_i) e^{\text{GSI}(0.0455 - 0.0073 L_n m_i)}$$

$$c = \sigma_{ci} 0.0013 e^{0.026 \text{ GSI}}$$

Hoek y Brown sugieren, en las aplicaciones, reducir del 25% los valores que del gráfico se obtienen para la cohesión del macizo rocoso.

Formulas aproximadas para σ_{cm}

Se siguieron los siguientes pasos:

- Se construyó una tabla de los valores numéricos de $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$ en función de (m_i) y GSI, a partir de la relación del criterio de Mohr-Coulomb: $\sigma_{cm} = 2 c \cos \phi / (1 - \sin \phi)$ y tomando en cada caso los valores numéricos de cohesión y fricción de los correspondientes gráficos de Hoek y Brown.
- Con el ayudante de gráficos de Excel se obtuvieron las 9 ecuaciones, una para cada uno de los 9 valores de (m_i) entre 5 y 35, de mejor correlación para las 9 curvas relativas a $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$ en función de GSI.
- Se construyeron tablas numéricas de cada uno de todos los coeficientes numéricos de las ecuaciones obtenidas, en función de los 9 valores de (m_i) y con el ayudante de gráficos de Excel se obtuvieron las ecuaciones de mejor correlación de cada uno de los coeficientes en función de (m_i) .
- Se sustituyeron estas últimas ecuaciones a los valores numéricos de los coeficientes en correspondencia de la ecuación base de la serie de correlaciones iniciales, resultando una única ecuación para el parámetro $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$, en función del GSI y (m_i) .
- A partir de la ecuación obtenida, se construyó la tabla correspondiente al parámetro $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$, en función de GSI y (m_i) .

- Se construyó la última tabla, como diferencia entre los valores de la ecuación del criterio de Mohr-Coulomb obtenidos de los gráficos originales de los parámetros (c y ϕ) y los valores calculados con la formula recabadas, resultando para $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$ una diferencia máxima del 20%.
- Finalmente, para este parámetro $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$ que presenta una dispersión limitada respecto al parámetro (m_i) , se estimó una formula aproximada mas sencilla para un valor medio función solamente del GSI.

En las figura 5, se reporta el gráfico correspondiente a las formulas obtenidas de acuerdo con el procedimiento descrito para el parámetro de resistencia a la compresión uniaxial de los macizos rocosos $(\sigma_{cm}/\sigma_{ci})$ en función del GSI y (m_i) :

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} (0.0115 + 0.0016m_i) e^{GSI(0.038-0.0003m_i)}$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} 0.033 e^{0.035 GSI}$$

Hoek (1998) también ha propuesto formulas aproximadas para la resistencia a la compresión uniaxial de los macizos rocosos en función del GSI y (σ_{ci}) :

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} 0.022 e^{0.038 GSI} \text{ para } GSI > 35 \quad \text{y} \quad \sigma_{cm} = \sigma_{ci} 0.019 e^{0.050 GSI} \text{ para } GSI < 35$$

Es interesante observar que la aceptación de la validez de estas formulas para la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso (σ_{cm}) , obligaría eventualmente a una revisión de las formulas relativas al parámetro (s) del criterio de resistencia de Hoek y Brown, para mantener la debida compatibilidad entre el criterio y estas formulas, toda vez que debe ser satisfecha también la relación $\sigma_{cm}/\sigma_{ci} = \sqrt{s}$ con lo cual entonces habría que modificar las formulas de (s) en función del GSI de la manera siguientes:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{14}\right) \qquad s_r = \exp\left(\frac{GSI_{res} - 100}{14}\right)$$

En otras palabras podría también afirmarse que las formulas empíricas originales del parámetro (s) presentan un carácter conservador en comparación con la mas reciente estima de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{cm}) . En la figura 6 se ilustran las diferencias comentadas.

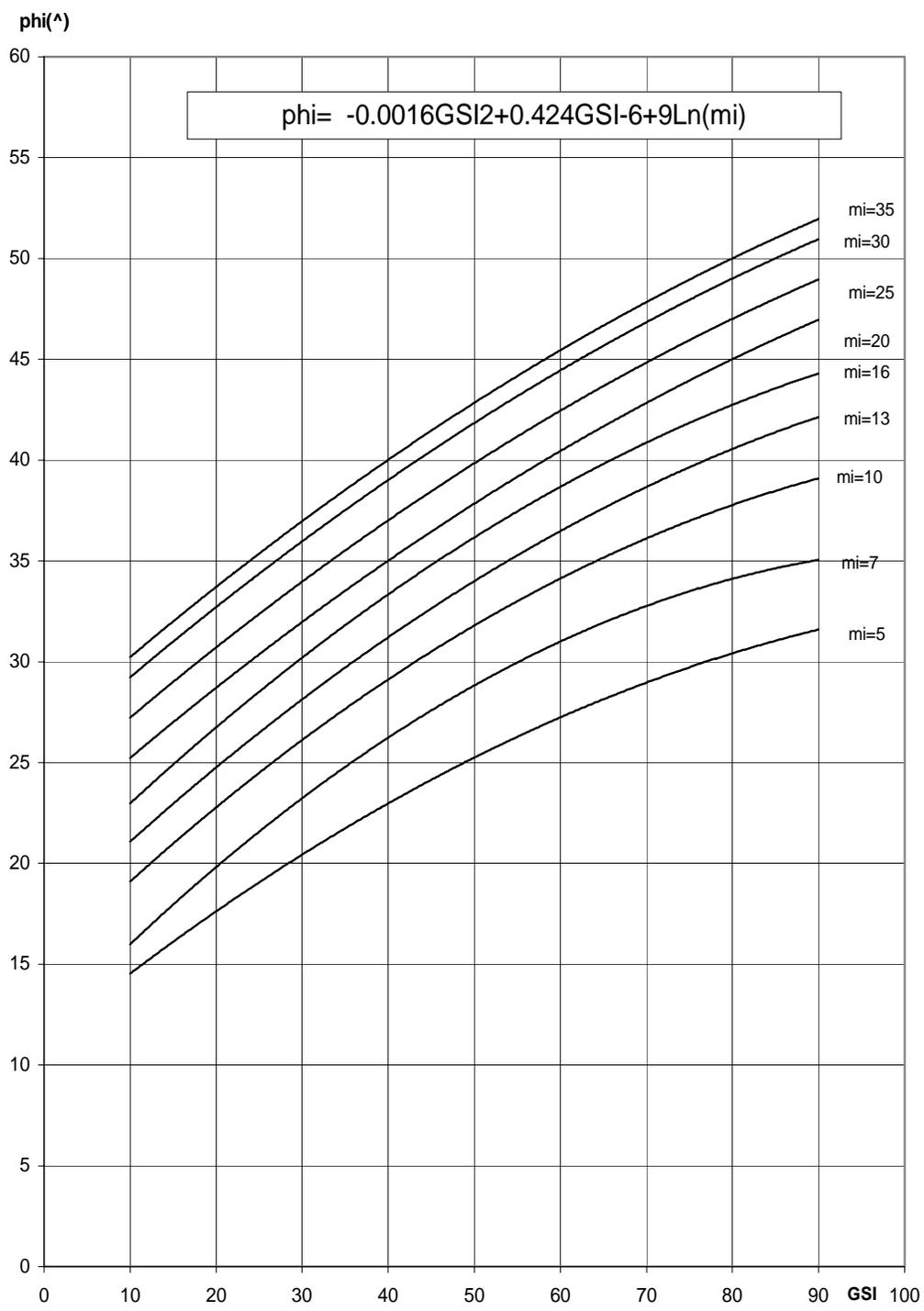
Claro que podría también recomendarse para la compresión uniaxial del macizo rocoso, la misma reducción del 25% que, para las aplicaciones, sugieren Hoek y Brown en el caso de la cohesión. De tal manera, la diferencia entre las formulas se reduciría: el nuevo valor del dividendo sería de 12 en lugar que 14 y por lo tanto mas sería algo mas cercano al valor original de 9.

MATRICES NUMÉRICAS PARA LA COMPRESIÓN UNIAXIAL

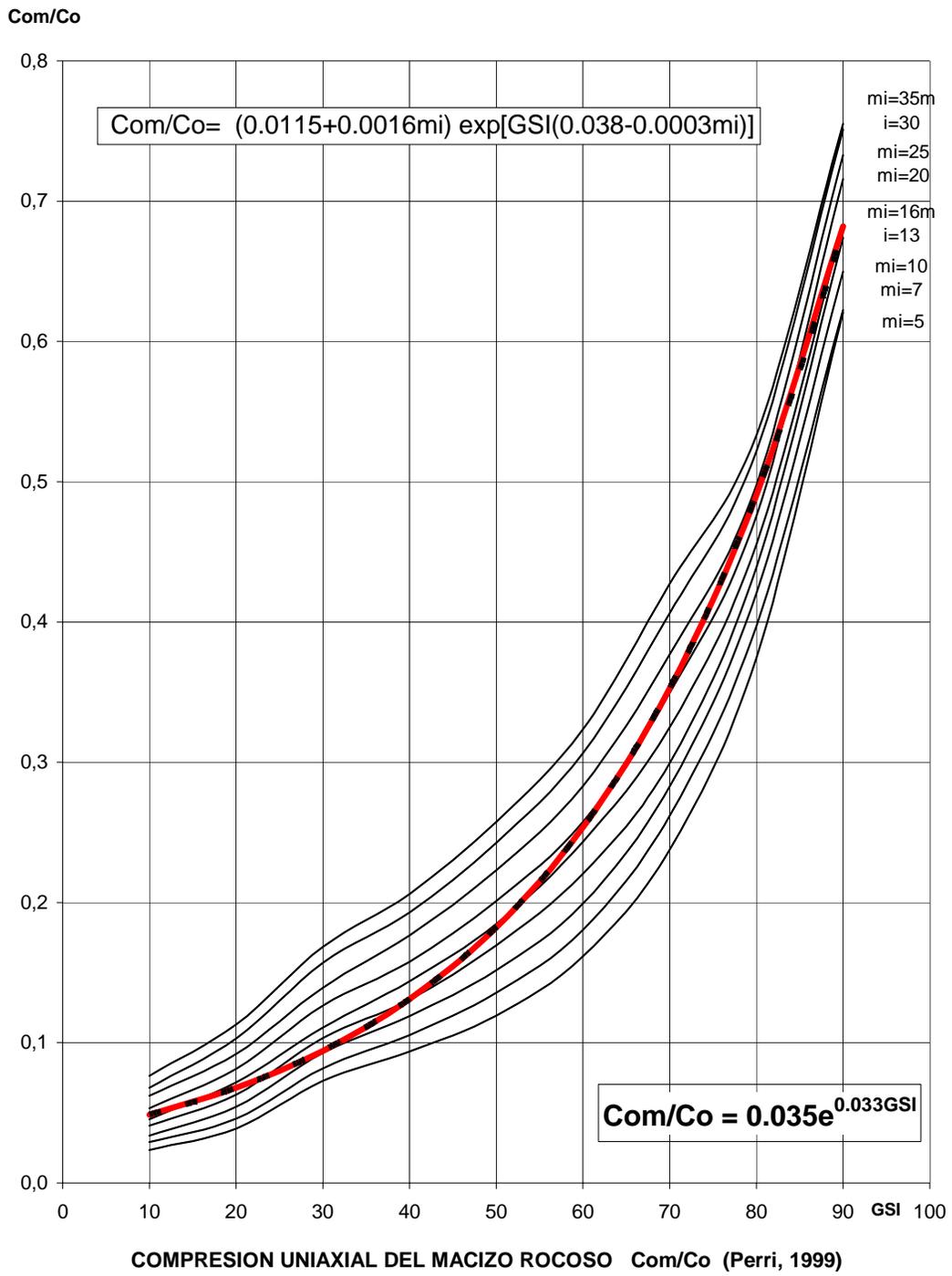
Tabla N.7 Com/Co (Hoek):										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		0,0236	0,0385	0,0728	0,0937	0,1193	0,1616	0,2377	0,3741	0,6206
7		0,0292	0,0457	0,0816	0,1056	0,1358	0,1803	0,2615	0,3968	0,6224
10		0,0336	0,0544	0,0928	0,1188	0,1515	0,1994	0,2826	0,4203	0,6499
13		0,0407	0,0628	0,1032	0,1308	0,1693	0,2206	0,2993	0,4389	0,6738
16		0,0453	0,0718	0,1109	0,1437	0,1845	0,2432	0,3248	0,4554	0,6832
20		0,0534	0,0815	0,1263	0,1575	0,2009	0,2573	0,3496	0,4756	0,7159
25		0,0620	0,0919	0,1392	0,1765	0,2230	0,2830	0,3766	0,4976	0,7328
30		0,0679	0,1031	0,1570	0,1929	0,2426	0,3063	0,4062	0,5216	0,7512
35		0,0762	0,1128	0,1685	0,2059	0,2576	0,3235	0,4272	0,5330	0,7551

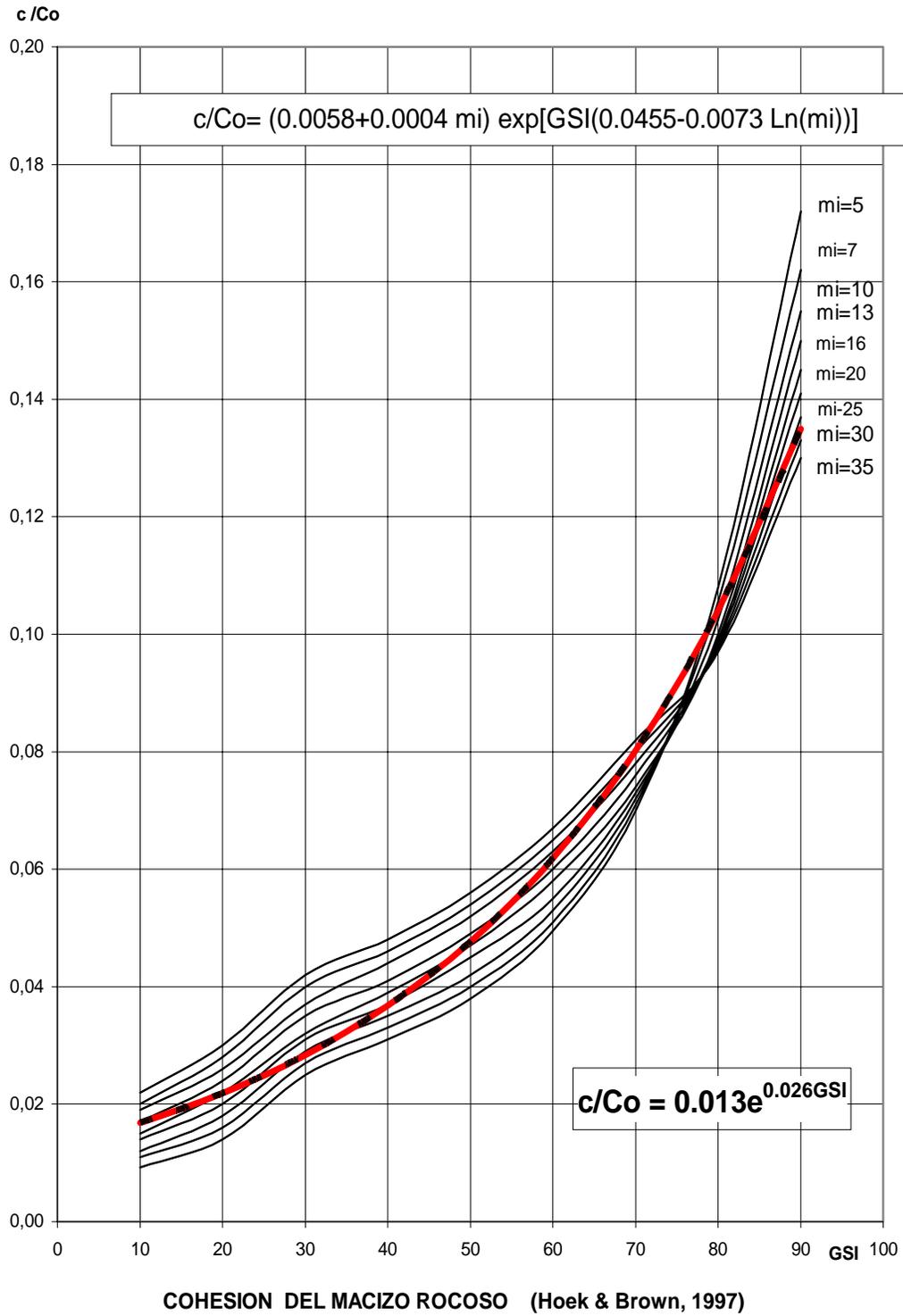
Tabla N.8 Com/Co (Perri): $(0.0115+0.0016mi)\exp[GSI(0.038-0.0003mi)]$										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		0,0281	0,0405	0,0583	0,0840	0,1210	0,1742	0,2510	0,3616	0,5208
7		0,0325	0,0465	0,0666	0,0954	0,1366	0,1957	0,2802	0,4012	0,5744
10		0,0390	0,0554	0,0786	0,1115	0,1583	0,2246	0,3187	0,4522	0,6417
13		0,0454	0,0639	0,0898	0,1264	0,1777	0,2499	0,3514	0,4943	0,6951
16		0,0517	0,0721	0,1004	0,1400	0,1951	0,2719	0,3790	0,5283	0,7363
20		0,0599	0,0825	0,1136	0,1565	0,2155	0,2967	0,4086	0,5627	0,7749
25		0,0699	0,0948	0,1286	0,1744	0,2366	0,3210	0,4355	0,5909	0,8016
30		0,0795	0,1063	0,1420	0,1898	0,2537	0,3390	0,4530	0,6055	0,8091
35		0,0889	0,1170	0,1540	0,2028	0,2670	0,3515	0,4627	0,6092	0,8020

Tabla N.9 Com/Co (Perri-Hoek)/Hoek %:										
mi	GSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
5		19	5	-20	-10	1	8	6	-3	-16
7		11	2	-18	-10	1	9	7	1	-8
10		16	2	-15	-6	4	13	13	8	-1
13		11	2	-13	-3	5	13	17	13	3
16		14	0	-9	-3	6	12	17	16	8
20		12	1	-10	-1	7	15	17	18	8
25		13	3	-8	-1	6	13	16	19	9
30		17	3	-10	-2	5	11	12	16	8
35		17	4	-9	-2	4	9	8	14	6

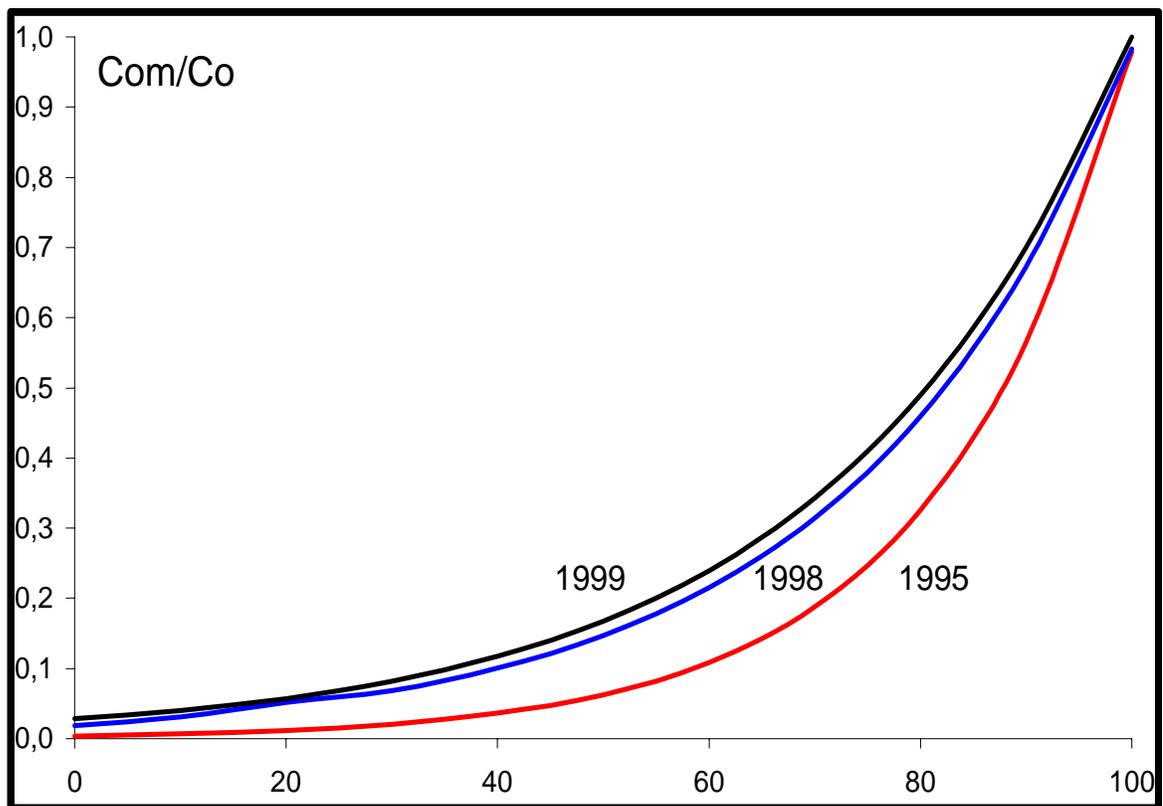


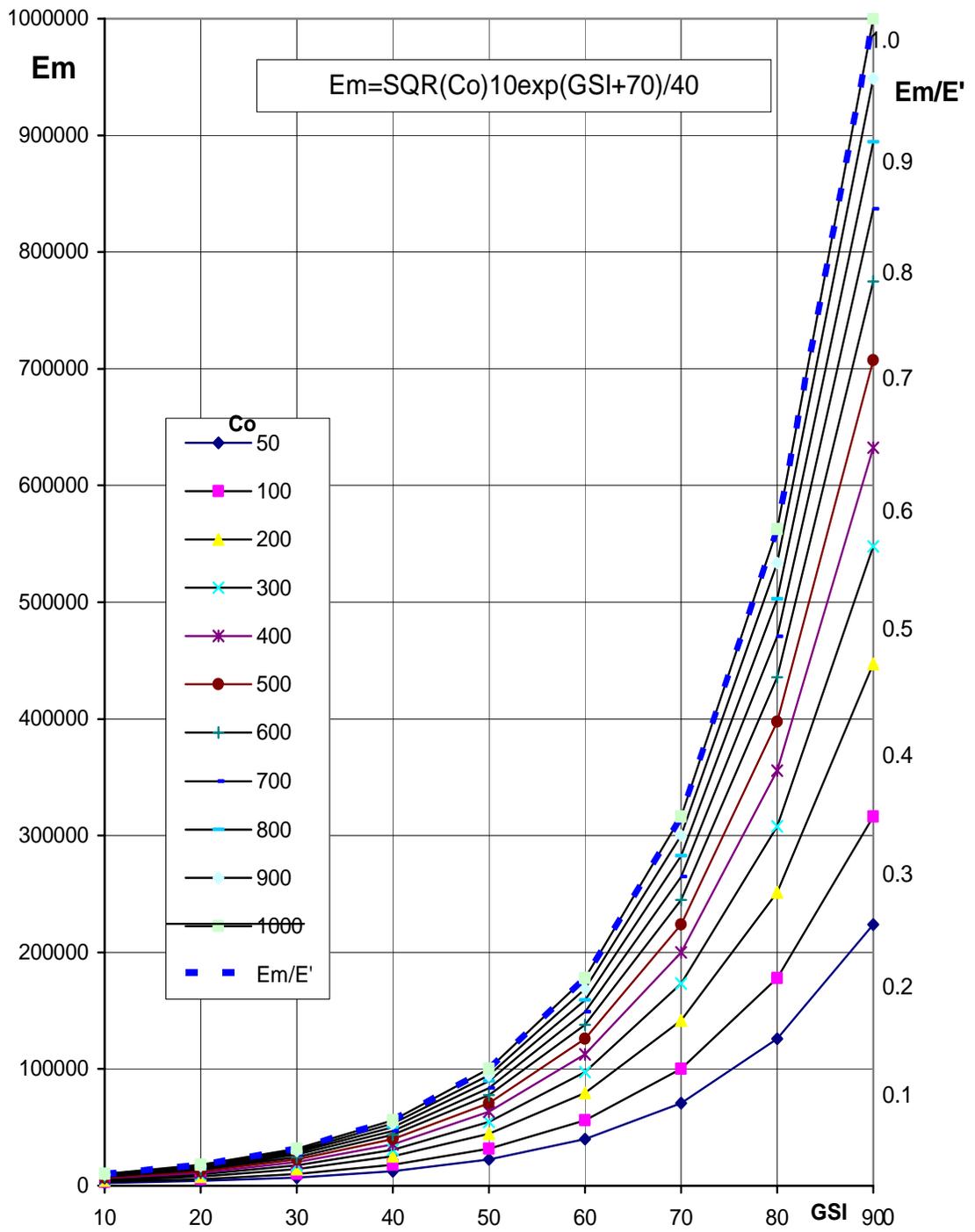
ANGULO DE FRICCIÓN DEL MACIZO ROCOSO (Hoek & Brown, 1997)





COMPRESION UNIAXIAL DEL MACIZO ROCOSO Vs RESISTENCIA DEL MATERIAL Y GSI DEL MACIZO						
GSI	Com/Co	Hoek, 1995	Com/Co	Hoek, 1998	Com/Co	Perri, 1999
	SQR(s)	$0.004 \exp(0.055GSI)$	$0.019 \exp(0.050GSI)$	SQR(s)	$0.035 \exp(0.033GSI)$	SQR(s)
	$s = \exp(GSI-100)/9$		$0.022 \exp(0.038GSI)$	$s = \exp(GSI-100)/13$		$s = \exp(GSI-100)/14$
0	0,00	0,00	0,02	0,02	0,04	0,03
10	0,01	0,01	0,03	0,03	0,05	0,04
20	0,01	0,01	0,05	0,05	0,07	0,06
30	0,02	0,02	0,09	0,07	0,09	0,08
40	0,04	0,04	0,10	0,10	0,13	0,12
50	0,06	0,06	0,15	0,15	0,18	0,17
60	0,11	0,11	0,22	0,21	0,25	0,24
70	0,19	0,19	0,31	0,32	0,35	0,34
80	0,33	0,33	0,46	0,46	0,49	0,49
90	0,57	0,56	0,67	0,68	0,68	0,70
100	1,00	0,98	0,98	1,00	0,95	1,00





MODULO DEL MACIZO (Em) en Kg/cm2 SEGUN GSI y Co(Kg/cm2)

Modulo de deformación longitudinal Em

Hoek y Otros (1995), primero recomendaron modificar la formula empírica originalmente propuesta por Serafim y Pereira para estimar el modulo de deformación longitudinal de un macizo rocoso (Em), en el sentido de sustituir en la formula ($E_m = 10^{(RMR-10)/40}$) el índice RMR con el índice GSI y luego añadieron una corrección para el caso de rocas débiles ($\sigma_{ci} < 100$ MPa) ya que la formulación original indicaba valores aparentemente elevados para el modulo de deformación de tales macizos rocosos obteniendo así finalmente la siguiente formula empírica, con unidades en MPa: $E_m = \sqrt{\sigma_{ci}} 10^{(GSI+70)/40}$ (Hoek y Brown, 1997).

Por otro lado, resulta interesante en ciertas aplicaciones, poder estimar el modulo del macizo también a partir del modulo del material (E') además que del GSI del macizo, ya que la determinación del primero en laboratorio es bastante fácil y casi rutinaria.

Si se considera el hecho que un GSI=100 debería en principio corresponder a un macizo rocoso prácticamente intacto y por lo tanto con propiedades geomecánicas muy próximas a las del correspondiente material rocoso (en particular $E_m = E'$); y si se mantiene una dependencia matemática similar a la de las formulas ya comentadas entre Em y GSI, luce aceptable asumir también la siguiente relación empírica:

$$E_m = E' 10^{(GSI-100)/40}$$

En la figura 7, se reportan gráficamente las relaciones descritas: las correspondientes a la formula empírica propuesta por Hoek y Brown y la correspondiente a la formula empírica propuesta para el modulo del macizo Em en función del modulo del material E' .

Bibliografía

- Hoek E. and Brown E.T.** 1980. Underground excavations in rock. *I.M.M. London.*
- Hoek E. and Brown E.T.** 1988. The H & B failure criterion – a 1988 update. In *Rock Engineering for Underground Excavations. 15th Can. Rock Mech. Simp. Toronto.*
- Hoek E.** 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal, 2(2).*
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F.** (1995) Support of Underground Excavations in hard Rock. *Balkema, Rotterdam.*
- Palmstrom A.** 1996 Characterizing rock masses by the Rmi for use in practical rock engineering. *Tunneling and Ynderground space Technology. Vol 11 N.2 and N.3.*
- Hoek E. and Brown, E.T.** 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34(8).*
- Hoek E.** 1998. Support for very weak rock associated with faults and shear zones
- Hoek E.** 1998. Putting number to geology- an engineer's viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology.*
- Russo, G., Kalamaras, G.S. and Grasso P.** 1998. Geomechanical Classes, behaviour categories and technical classes for an underground proyect. *Gallerie e grandi opere sotterranee. March 1998, N.54.*