

Aplicação da Metodologia GSI em Rochas Metamórficas Foliadas Brasileiras

Luana Cláudia Pereira

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, luanac.pereira@ufv.br

Eduardo Antônio Gomes Marques

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, emarques@ufv.br

RESUMO: As classificações geomecânicas são ferramentas de extrema importância para caracterização dos maciços rochosos em fases de projeto. Dentre estas, a metodologia do GSI se destaca por possibilitar a obtenção de uma estimativa das propriedades mecânicas para utilização dos critérios de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb. O Geological Strength Index (GSI) foi criado por Hoek et al. (1995) para classificar maciços segundo a resistência dos blocos rochosos e as condições da superfície das descontinuidades. Posteriormente, houve uma expansão da classificação no intuito de incorporar as rochas laminadas/foliadas a tal metodologia, em trabalho realizado por Marinós et al. (2004). Porém, para as rochas metamórficas brasileiras, em especial àquelas com xistosidade penetrativa e em menor estágio de alteração intempérica, a classificação do GSI tem mostrado resultados conservadores, pois tais rochas, apesar de foliadas/laminadas, podem apresentar boas condições de superfície, gerando valores de GSI inferiores àqueles considerados representativos das condições observadas in situ. Aplicou-se a metodologia do GSI à quatro rochas metamórficas (MSC, MNG, QBX e XGT) presentes do estado de Minas Gerais. Para dois dos litotipos analisados (MSC e MNG) a metodologia apresentou resultados condizentes com o comportamento observado em campo. Já para os demais litotipos, rochas laminadas/foliadas, o valor do GSI obtido foi representativo apenas para uma das rochas (XGT). Para o QBX o valor encontrado foi inferior quando comparado às condições observadas em campo; tal discrepância foi associada ao fato da rocha ser laminada/foliada, o que resultou em uma penalização indevida da resistência. Dados oriundos do mapeamento geológico-geotécnico indicam que o valor do GSI deveria ser superior ao encontrado. Assim, observou-se uma discordância entre o valor real de GSI que o litotipo deveria apresentar e o encontrado pela aplicação do método, caracterizando uma fragilidade da metodologia vigente do GSI. Adicionalmente, no presente trabalho foi empregado o método proposto por Cai et al. (2004) que incorporou a utilização dos parâmetros, tamanho e volume do bloco e fator de condição de junta para classificação do maciço. Fazendo uso do método proposto por estes autores, notou-se uma grande variação dos valores do GSI obtidos com os valores encontrados pela metodologia tradicional e, conclui-se que as rochas analisadas não podem ser caracterizadas corretamente pela metodologia proposta. Assim, com os resultados obtidos observam-se incertezas relacionadas ao uso da metodologia do GSI, tanto da tradicional quanto das modificadas, para rochas metamórficas brasileiras o que corrobora a tese de que uma revisão da classificação geomecânica se faz necessário.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação Geomecânica, GSI, Rochas Metamórficas.

1 INTRODUÇÃO

As classificações geomecânicas são ferramentas

usadas na mecânica de rochas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades e características observadas

diretamente em afloramentos rochosos e determinadas em ensaios realizados in situ ou, ainda, em amostras de testemunhos de sondagens. O objetivo destas classificações consiste em sistematizar o conjunto de informações dos elementos geotécnicos que interessam num determinado maciço rochoso e, assim, possibilitar a separação do maciço em classes de isocomportamento mecânico, permitindo seu uso em projetos de engenharia diversos.

Dentre estas classificações tem-se o Geological Strength Index (GSI). Esta classificação foi proposta por Hoek et al. (1995) e considera, além da resistência dos blocos rochosos (matriz) que constituem o maciço, o comportamento mecânico que é controlado pelas condições das descontinuidades, tais como rugosidade, alteração etc.

Posteriormente, Marinos et al. (2004) propôs a expansão do índice visando abranger rochas laminadas e foliadas. Assim houve uma alteração no ábaco do GSI para agregar tais mudanças. Todavia, de acordo com esses autores a classificação possui ainda, algumas limitações em sua análise, como a não incorporação da anisotropia e da presença de água.

Além disso, alguns tipos de rochas, tais como as metamórficas, especificamente as bem foliadas, são medianamente intemperizadas, não são devidamente classificadas pelo GSI, porque podem apresentar boas condições de superfície. Assim, ao se utilizar a classificação GSI mais atual, obtém-se valores conservadores de GSI e, como consequência, de parâmetros mecânicos, contrapondo o comportamento observado em situações reais em campo. Ressalta-se que conforme citado por Budetta & Nappi (2011), a caracterização mecânica de um maciço rochoso heterogêneo é difícil porque há uma alternância frequente entre estratos resistentes e fracos. Ainda, a estrutura rochosa, o distúrbio tectônico e o grau de alteração afetam fortemente seu comportamento geomecânico.

Assim sendo, o presente artigo tem por objetivo aplicar a metodologia tradicional do GSI a algumas rochas metamórficas brasileiras, discutindo a aderência do resultado do método

com as reais características apresentadas por tais rochas e, ainda, averiguar possíveis fragilidades dessa classificação geomecânica para as rochas estudadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A classificação geomecânica Geological Strength Index (GSI) foi proposta por Hoek et al. (1995) tendo por base sua vasta experiência em obras geotécnicas ao redor do mundo e a necessidade de uma classificação mais prática que pudesse prever parâmetros de entrada para critérios de ruptura. Originalmente o GSI classificava as rochas em 20 diferentes categorias, segundo a resistência dos blocos rochosos e das condições da superfície das descontinuidades. O grid de classificação variava entre 10 e 85 (Sonmez et al., 2003).

Após algum tempo, Marinos et al. (2004) propuseram a incorporação de duas novas categorias de rochas foliadas/laminadas e rochas maciças ou intactas ao ábaco do GSI, conforme Figura 1. Tal sugestão foi baseada na necessidade da classificação representar características inerentes à essas rochas, como a heterogeneidade.

O GSI se popularizou por ser um sistema de classificação geomecânica capaz de estimar propriedades mecânicas, tais como resistência e módulo de deformação, para o critério de Hoek-Brown (Sonmez et al., 2003) e, de maneira equivalente, a coesão e o ângulo de atrito para o critério de Mohr-Coulomb (Cai et al., 2007), ambos, critérios bastante utilizados em projetos geotécnicos diversos.

Todavia, ainda tem-se incertezas associadas à classificação, seja no fato da metodologia apresentar uma faixa de valores que podem ser utilizados para cada tipo de rocha e estrutura e, não um valor único, como citado por Sonmez et al. (2003); seja na subjetividade inerente ao usuário da ferramenta. Assim, alguns pesquisadores, como Sonmez & Ulusay (1999 e 2002), propuseram a incorporação de parâmetros numéricos qualitativos à classificação GSI. Estes parâmetros são baseados no índice volumétrico de juntas (J_v) e em parâmetros como rugosidade,

preenchimento, etc. Entretanto, devido a anisotropia e heterogeneidade das rochas foliadas/laminadas, estas não foram incluídas na proposição mencionada (Sonmez et al., 2003), o que demonstra a dificuldade de utilizar o GSI para este tipo de rocha.



Figura 1. Ábaco da classificação GSI.

Outra incorporação sugerida ao método GSI foi realizada por Cai et al. (2004 e 2007) que recomendaram a utilização dos parâmetros tamanho do bloco, do volume do bloco (V_b) e do fator de condição de junta (J_c) para classificação do maciço rochoso, conforme Figura 2. O tamanho do bloco é determinado através do espaçamento, da orientação, da persistência e do número de descontinuidades. O volume do bloco, por sua vez, é controlado pelo espaçamento e pela persistência das descontinuidades. Por fim, o fator de condição das juntas é controlado pela rigidez, alteração e preenchimento das descontinuidades. Além disso, os mesmos autores desenvolveram e testaram essa metodologia para estimar a

resistência residual do maciço. Outros autores, como Russo et al. (1998) e Ribacchi (2000) também propuseram procedimentos para utilização do GSI para obtenção de parâmetros residuais. Entretanto, ressalta-se que essa metodologia não é usual para rochas foliadas/laminadas.



Figura 2. Ábaco proposto por Cai et al. (2004) - modificado.

3 METODOLOGIA

Para realização do presente trabalho foram utilizados dados de um mapeamento geológico-geotécnico de detalhe de um maciço rochoso a céu aberto, no qual foram encontrados 05 (cinco) litotipos (Tabela 1), todavia excluiu-se um pelo fato de poucos pontos terem sido levantados em campo, Tabela 1. Neste mapeamento, foram obtidas as atitudes das descontinuidades (fraturas, falhas e foliação) e suas propriedades.

No levantamento geológico-geotécnico realizado foram levantados 40 pontos de medição no MSC, 285 no QBX, 11 XGT e 14 no MNG. Estes pontos foram levantados em

função da visualização de tais litotipos em campo e em função da escala de levantamento empregada que foi de 1:2000. Em cada ponto foram levantadas informações referente às seguintes características: resistência, alteração intempérica, grau de fraturamento, Jn, Jv, RQD, persistência, índice, abertura, rugosidade, preenchimento alteração, Jr, Ja e espaçamento.

De posse dos dados de campo, fez-se a classificação do maciço através da metodologia tradicional do GSI, através do ábaco proposto por Marinós et al. (2004) e mostrado na Figura 1. Paralelamente, aplicou-se a metodologia proposta por Cai et al. (2004) na tentativa de quantificar o GSI.

Ainda, foi utilizado o software RocData® (Rocscience) para estimar valores de resistência para o maciço rochoso para os critérios de Hoek-Brown e de Mohr-Coulomb. Por fim, comparou-se os resultados encontrados com dados disponíveis na literatura técnica.

Tabela 1. Litotipos estudados e suas abreviações.

Litotipo	Abreviação
Minério Sílico carbonato	MSC
Quartzo Biotita Xisto	QBX
Xisto Grafítico	XGT
Monzogranito	MNG

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios para os diferentes parâmetros, tanto do maciço quanto das discontinuidades, levantados em campo são apresentados nas Tabelas 2 e 3. Na Tabela 2 os parâmetros de resistência (R), alteração intempérica (W) e grau de fraturamento (F) foram levantados conforme preconizado por ISRM (2007), Norbury (2010) e ISRM (1981), respectivamente. Também são apresentados os dados dos índices de influência do número de famílias de discontinuidades (Jn) desenvolvido por Barton et al. (1974) e o índice volumétrico de discontinuidades (Jv) de acordo com Palmstrom (2005). O cálculo do Rock Quality Designation (RQD) foi realizado utilizando uma metodologia também estabelecida por Palmstrom (2005), conforme Equação 1.

Já na Tabela 3 tem-se a apresentação dos demais parâmetros levantados em campo,

especificamente para as discontinuidades. A persistência (P), a abertura (A), o preenchimento (Pr) e a alteração (Al) foram obtidos conforme preconizado por Bieniawski (1989). Além disso, são apresentados os valores do índice de influência da rugosidade (Jr) e o índice de influência da alteração das paredes das discontinuidades (Ja), ambos estabelecidos por Barton et al. (1974); informa-se que a rugosidade é apresentada na Tabela 3 na coluna intitulada Rg. Ressalta-se, também, que tentou-se levantar em campo o espaçamento (Esp) das discontinuidades, todavia sem sucesso.

$$RQD = 115 - (3,3 * Jv) \quad (1)$$

Tabela 2. Dados médios levantados em campo.

Litotipo	R	W	F	Jn	Jv	RQD
MSC	5	W2	3	12,0	11,0	78,7
QBX	4	W3	3	12,0	10,0	82,0
XGT	4	W4	3	13,5	11,5	77,05
MNG	5	W2	3	10,5	NI	NI

NI – Não identificado

Tabela 3. Dados médios levantados em campo para as discontinuidades

Litotipo	P	A	Rg	Pr	Al	Jr	Ja	Esp
MSC	2	5	3	6	5	2	1	NI
QBX	2	5	3	6	5	2	1	NI
XGT	2	5	3	6	3	2	2	NI
MNG	1	5	3	6	5	2	1	NI

NI – Não identificado

De posse dos dados constata-se que os litotipos apresentam boa resistência, variando de forte a muito forte, cuja correlação com a resistência à compressão uniaxial é de 50 a 100 MPa para o QBX e o XGT e de 100 a 250 MPa para o MSC e o MNG. Em relação a alteração intempérica nota-se que o MSC e o MNG encontram-se levemente intemperizados, o QBX medianamente intemperizado, e o XGT, que apresenta maior intemperização comparado aos demais, encontra-se altamente intemperizado. Observa-se que todos os litotipos apresentaram o mesmo grau de fraturamento, que corresponde a um espaçamento médio das discontinuidades de 20 a 60 cm e cerca de 2 a 5 fraturas por metro. O Jn encontrado demonstra que tem-se, aproximadamente, 3 discontinuidades, compondo um comportamento observado em

todos os litotipos. O índice volumétrico e, consequentemente, o RQD demonstram que o maciço rochoso tem boa qualidade, exceto para o MNG, cujos dados não puderam ser coletados durante o mapeamento geológico-geotécnico.

Prosseguindo na análise dos resultados dos dados coletados em campo, observa-se que as descontinuidades presentes nos litotipos MSC, QBX e XGT possuem entre 3 e 10 m de persistência e no MNG nota-se um aumento da mesma para valores entre 10 e 20 m. Em todos os litotipos a abertura das descontinuidades apresentou o mesmo valor, cerca de 0,1 mm. Comportamento semelhante ao observado para a rugosidade, em que as mesmas são levemente rugosas, e para o preenchimento em que tem-se a ausência do mesmo. Todas as descontinuidades dos tipos de rocha analisados apresentaram leve alteração, exceto as do XGT, que encontram-se moderadamente alteradas. Tem-se, ainda, para o Jr, descontinuidades onduladas e suaves para todos os litotipos. E, por fim, tem-se um Ja para as descontinuidades dos litotipos MSC, QBX e MNG com paredes não alteradas (somente com descoloração), cujo ângulo de atrito correspondente situa-se entre 25 e 35°; enquanto que, para o XGT, cujas descontinuidades apresentam paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas em seu interior obteve-se um ângulo de atrito entre 25 e 30°.

Utilizando o ábaco da Figura 1 em conjunto com os dados de campo procedeu-se à classificação GSI dos litotipos estudados, cujos resultados são mostrados na Tabela 4. Observa-se que o MSC e o MNG apresentaram maiores valores de GSI, sendo estes condizentes com as características observadas em campo. Para o QBX e o XGT, considerou-se ambos como rochas laminadas/foliadas, sendo que o valor obtido para o XGT é representativo das condições observadas em campo. Todavia, o valor do QBX não é fidedigno às reais características do material observadas in situ. O baixo valor obtido foi atribuído ao fato desse litotipo ser uma rocha laminada/foliada, assim houve uma penalização indevida. De posse dos dados de mapeamento geológico-geotécnico acredita-se que este litotipo deveria possuir um

GSI em torno de 40. Este valor é impossível de ser atribuído, considerando a atual metodologia de análise do GSI. Assim tem-se uma discordância entre o valor real do litotipo e o permitido pela aplicação do método, caracterizando assim, uma fragilidade do mesmo para caracterizar este tipo de rocha.

Tabela 4. Valores de GSI obtidos para os litotipos estudados.

Litotipo	GSI
MSC	60
QBX	20
XGT	15
MNG	50

No intuito de verificar e comparar os valores encontrados através da metodologia tradicional do GSI (Tabela 4) aplicou-se o método proposto por Cai et al. (2004). Fez-se o cálculo do volume do bloco (V_b) considerando o RQD e o fator de forma do bloco (β), conforme citado por Palmstrom (1995, 1996), usado quando tem-se descontinuidades irregulares. Além disso, esclarece-se que para o cálculo considerou-se que os blocos condicionados pelas descontinuidades em campo possuem formato tabular para o XGT e o QBX enquanto que para o MSC e MNG considerou-se os blocos como sendo prismáticos.

$$V_b = \beta * \left(\frac{(115 - RQD)}{3,3} \right)^{-3} \quad (2)$$

Também, para aplicação do método proposto por Cai et al. (2004) calculou-se o fator de condição de junta (J_c) que denota as propriedades de atrito entre as faces dos blocos e o efeito de escala imposto pelas descontinuidades, conforme Equação 3, em que J_w e J_s são o índice de ondulação das descontinuidades e o índice de suavidade da superfície, respectivamente; e o J_a que é o índice de alteração de juntas. Estes índices foram definidos por Palmstrom (1995).

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_a} \quad (3)$$

Na Tabela 5 tem-se os resultados da aplicação do GSI calculado através do ábaco da Figura 2 e os dados observados em campo. Nota-se que para o MNG não foi possível calcular o GSI, uma vez que o valor de RQD não foi identificado em campo. Para o MSC o valor obtido para o GSI calculado está próximo do GSI obtido através da metodologia tradicional (Tabela 4). O valor encontrado para o QBX é condizente com as características observadas em campo. Todavia, comparando-se o valor do GSI calculado (Tabela 5) com o GSI obtido via método tradicional (Tabela 4) nota-se uma grande variação entre os valores, demonstrando que, nesse caso, o método tradicional resultou em um GSI mais conservador (menor). Já para o XGT o GSI calculado apresentou um valor superior aquele observado em campo; para este litotipo tem-se que o valor obtido pelo GSI tradicional (Tabela 4) foi mais representativo. Pelo exposto, acredita-se que as rochas metamórficas estudadas no presente trabalho não podem ser caracterizadas corretamente pela metodologia proposta por Cai et al. (2004).

Fez-se, também, uma estimativa para os valores de resistência para o maciço rochoso para o critério de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb, utilizando o software RocData®. Os dados de entrada são apresentados na Tabela 6; na qual os valores de resistência a compressão uniaxial bem como os de σ_{ci} foram atribuídos com base nos valores apresentados na biblioteca do software para as rochas com características similares às estudadas. Em relação ao dano devido ao processo de desmonte das rochas (parâmetro D), considerou-se o valor indicado para desmonte em taludes com pouca qualidade, caso observado em campo.

Tabela 5. Litotipos estudados e suas abreviações.

Litotipo	Vb (cm ³)	Jc	GSI calculado
MSC	$\beta = 32$ Vb = 24.042	J _s = 1,5 J _w = 1,5 J _a = 1 J _c = 2,5	58
QBX	$\beta = 59$ Vb = 59.000	J _s = 1 J _w = 1,5 J _a = 1 J _c = 1,5	52
XGT	$\beta = 59$ Vb = 38.793	J _s = 0,75 J _w = 1,5 J _a = 2 J _c = 0,56	38
MNG	NI	J _s = 1,5 J _w = 1,5 J _a = 1 J _c = 2,25	NI

NI – Não identificado

Tabela 6. Dados de entrada utilizados no RocData.

Litotipo	Resistência compressão uniaxial (MPa)	GSI	σ_{ci}	D
MSC	MSC	60	32	1
QBX	QBX	20	20	1
XGT	XGT	15	13	1
MNG	MNG	50	29	1

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7. Nesta, tem-se os parâmetros de resistência para o critério de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb. Nota-se que menores valores de coesão e ângulo de atrito foram obtidos para o XGT e os maiores foram para o MSC, resultados estes que estão em concordância com as condições de campo. Ainda, comparando os valores de ângulo de atrito encontrados via software com os ângulos de atrito obtidos via correlação com o J_a , observa-se que os valores do primeiro são muito inferiores àquele.

Tabela 7. Dados de entrada utilizados no RocData.

Litotipo	Parâmetros de Hoek-Brown			Parâmetros de Mohr Coulomb	
	mb	s	a	c (MPa)	ϕ (°)
MSC	1,838	0,0013	0,503	31,33	8,751
QBX	0,066	$1,62 \times 10^{-6}$	0,544	8,70	4,99
XGT	0,030	$7,04 \times 10^{-7}$	0,561	5,60	1,411
MNG	0,815	0,0002	0,506	24,73	3,695

Marques et al. (2014) realizaram ensaios de compressão puntiforme em amostras obtidas na região do maciço analisado no presente trabalho. Os resultados, juntamente com o grau de alteração das rochas encontram-se na Tabela 8 em que são descritos, também, os valores de resistência à compressão puntiforme encontrados para os litotipos estudados com o auxílio do software RocData®.

Nota-se que os valores encontrados são muito discrepantes entre si. Deve-se ressaltar que os valores obtidos por Marques et al. (2004) referem-se à rocha intacta e, esperava-se mesmo que fossem superiores aos calculados através do GSI, que referem-se ao maciço rochoso. Ainda assim, acredita-se que os valores de resistência obtidos com base nos dados de GSI são bastante conservadores, em especial para o MSC e o MNG que são as únicas rochas que foram caracterizadas/ensaiadas em condições semelhantes de alteração intempérica.

Para o QBX e o XGT não foi possível realizar a mesma comparação, visto que trata-se de materiais com alteração intempérica muito diferentes.

Tabela 8. Comparação entre resistência à compressão puntiforme.

Litotipo	RocData (baseados no GSI)		RocData (Marques et. al, 2004)	
	Resistência compressão uniaxial (MPa)	W	Resistência compressão uniaxial (MPa)	W
MSC	8,75	W2	174,84	W2/W3
QBX	4,99	W3	37,93	W2/W3
XGT	1,41	W4	72,37	W3
MNG	3,70	W2	178,84	W2/W1

5 CONCLUSÕES

A utilização da metodologia do GSI para caracterização dos maciços rochosos e, consequentemente, inferência dos parâmetros mecânicos para os critérios de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb é de suma importância para projetos geotécnicos em material rochoso. Todavia, a aplicação do GSI para rochas foliadas/laminadas, tais como as estudadas no presente trabalho, precisa ser realizada com cautela.

Diante dos resultados obtidos, ressalta-se que

há uma fragilidade da metodologia atual do GSI para caracterizar rochas foliadas/laminadas com reduzida alteração intempérica, fato este que pode estar relacionado com a sua elevada anisotropia. Assim, entende-se que há uma necessidade de aprofundamento dos estudos relacionados à essa metodologia de classificação, eventualmente resultando em novas atualizações do sistema GSI.

REFERÊNCIAS

- Barton N., Lien R. and Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics* 6, 1974, pp. 189 - 236.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, 215pp.
- Budetta, P., Nappi, M.(2011). Heterogeneous rock mass classification by means of the geological strength index: the San Mauro formation (Cilento, Italy). *Bull Eng Geol Environ* (2011) 70:585–593 DOI 10.1007/s10064-011-0351-1.
- Cai M, Kaiser P K, Uno H, Tasaka Y, Minami M. Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system. *Int J Rock Mech Min Sci* 2004;41(1):3–19.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasakab, Y., Minamic, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44 (2007) 247–265.
- Hoek E, Kaiser PK, Bawden WF, Hoek E, Kaiser PK, et al. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: Balkema; 1995.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. In: E.T. Brown (Ed.), *ISRM Suggested Method: Rock Characterization, Testing and Monitoring*. Pergamon Press, London.
- ISRM (International Society For Rock Mechanics) (2007) *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Suggested Methods* R Ulusay and JA Hudson (eds), Prepared by the commission on testing methods, international society for rock mechanics, compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, p 628.
- Marinos V P, Aggitalis G, Kazilis N (2004) Engineering geological considerations in tunnelling through major tectonic thrust zones—cases along the Egnatia motorway, Northern Greece. In: Hack R, Azzam R, Charlier R (eds) *LNES*, vol 104. Springer, Berlin, pp 527–537.
- Marques A. A., Paes, B. S. T., Marques E. A. G., & Pereira, L. C. (2014). Tentativas de correlações entre resistência à compressão uniaxial e resistência à compressão puntiforme para algumas rochas

- metamórficas de alto grau do Brasil. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. 4,1: 47-58.
- Norbury, D. R., 2010. The Point Load Test. *Engineering Geology Special Publications*. Geological Society, London, 2: 325-329.
- Palmstrom, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*. 20, 362-377
- Palmstrom A., 1996. The weighted joint density method leads to improved characterization of jointing. *Int. Conf. on Recent Advances in Tunnelling Technology*, New Delhi, India, 6 p.
- Ribacchi R. Mechanical tests on pervasively jointed rock material: insight into rock mass behaviour. *Rock Mech Rock Eng* 2000; 33(4):243–66.
- Russo, G. A new rational method for calculating the GSI. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 24, 103-111.
- Russo G, Kalamaras GS, Grasso P. A discussion on the concepts of geomechanical classes behavior categories and technical classes for an underground project. *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee* 1998;54.
- Sonmez, H., Ulusay, R., 1999. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, 743–760.
- Sonmez, H., Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek–Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri* 26, 77–99.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., Ulusay, R., 2003. An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (2003) 251–269.