

# FATORES GEOLÓGICOS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE UM TBM

Milton A. Kanji<sup>1</sup>; Rodrigo B. Teixeira<sup>1</sup>; Marcela R. Cezar<sup>1</sup>; Tales S. Mattos<sup>2</sup>

**Resumo** – O trabalho apresenta os fatores geológicos que influem na performance do TBM – Tunneling Boring Machine, como a abrasividade da rocha, a resistência da rocha, e características da estrutura do maciço rochoso, como fraturamento e foliação ou xistosidade. A abrasividade depende dos minerais constituintes da rocha, principalmente o quartzo, e tem impacto direto no desgaste de cortadores, acarretando conseqüências econômicas e de produtividade. A resistência da rocha também influi na eficiência dos cortadores, apresentando maior dificuldade quanto maior a resistência. Menciona-se também a influência dos fatores de estrutura do maciço rochoso, indicando que quanto mais perpendicularmente forem as descontinuidades melhor é o desempenho da escavação. Cita-se a produtividade relativa em função do grau de fraturamento do maciço.

**Palavras-Chave** – Túneis, TBM, maciço rochoso, abrasividade.

## INTRODUÇÃO

O desempenho de escavação de um TBM ao longo de um projeto depende de fatores mecânicos, operacionais, logísticos e geológicos. Este trabalho se restringe aos aspectos geológicos, sendo estes importantes para a definição do tipo de TBM para a execução da escavação.

A performance de corte e perfuração assim como o desgaste das ferramentas e equipamentos são importantes para o aspecto econômico e de produção da escavação, fazendo com que várias investigações se dediquem à sua previsão. Importantes trabalhos de campo e ensaios de laboratório já foram realizados para estudar a conexão entre algumas feições geológicas e parâmetros geotécnicos, com a performance de perfuração ou corte e o consumo de brocas ou discos.

A taxa de avanço de um TBM e seu rendimento geral podem, portanto, ser diretamente relacionados com o nível de desgaste de suas ferramentas de corte (discos cortadores) e com as condições do terreno. O desgaste dos cortadores é de tal importância que normalmente a troca dos cortadores é considerada como um item separado na precificação da obra. Outros fatores, além da abrasividade, são a resistência da rocha, as descontinuidades do maciço, o nível de tensões e a classificação geomecânica do maciço, conforme se trata no artigo.

## ABRASIVIDADE

A abrasividade é extremamente importante no desgaste de cortadores, pois o seu consumo e o tempo gasto na sua troca influi no rendimento da escavação.

A abrasividade pode ser definida por alguns índices diferentes. O mais comum é o índice Cerchar, desenvolvido pelo Instituto CERCHAR (Centre de Etudes et Recherches des Charbonnages) na França, e que consiste no risco da superfície de rocha por uma agulha de aço padronizada, na extensão de 10 mm, medindo-se depois o desgaste da agulha (Cerchar, 1986 e Käsling e Thuro, 2010). A correlação entre o índice Cerchar, normalmente denominado CAI (Cerchar Abrasivity Index) e a abrasividade é apresentada na Tabela 1.

Outro índice utilizado é o LAC (LCPC Abrasivity Coeficient), determinado sobre 500g de amostra de rocha fragmentadas entre 4 e 6,3 mm acomodadas em um cilindro sobre as quais se aplica uma chapa retangular de 25x20x5 mm de aço de dureza padronizada, com rotação de 4.500 rpm durante 5 minutos, medindo-se a perda de massa da placa metálica antes e depois do ensaio relacionados à massa da amostra inicial (LCPC, STS 224). A sua correlação com o índice CAI e a abrasividade é também indicada na Tabela 1.

Tabela 1. Correlação entre índices CAI, LAC e Abrasividade

CAI	LAC	ABRASIVIDADE
0 – 0,3	0 – 50	Não abrasivo
0,3 – 0,5	50 – 100	Muito pouco abrasivo
0,5 – 1,0	100 – 250	Pouco abrasivo
1,0 - 2,0	250 – 500	Medianamente abrasivo
2,0 – 4,0	500 -1250	Muito abrasivo
4,0 – 6,0	1250 - 2000	Extremamente abrasivo

<sup>1</sup> Shaft Consultoria Ltda, Av. das Américas 3333, Rio de Janeiro, RJ, (21) 24391565, shaft@shaftconsultoria.com.br

<sup>2</sup> Petrobrás S/A, Av. Almirante Barroso 81, Rio de Janeiro, RJ, (21)32293037, tales@petrobras.com.br

Um índice relativamente novo que tem se mostrado promissor como forma de avaliação de abrasividade é o RAI - Rock Abrasivity Index (Plinninger, 2002). O índice é calculado a partir da equação:

$$RAI = \sum_{i=1}^n A_i \cdot S_i \cdot UCS \quad (1)$$

Onde UCS = Unconfined Compressive Strength i.e. Resistência à Compressão Uniaxial (MPa);  $A_i$  = quantidade específica de mineral (%);  $S_i$  = abrasividade Rosiwal e n = número de todos os minerais.

Conhecendo-se o tipo de mineral e daí sua dureza Mohs, pode-se determinar a abrasividade Rosiwal pelo gráfico da Figura 1. Nota-se que o índice é influenciado diretamente pela resistência da rocha e por seu conteúdo de quartzo ou equivalentes. Plinninger et al. (2004) estudaram a correlação entre os índices CAI e RAI, conforme apresentado na Figura 2, a partir de ensaios em 60 amostras de diferentes tipos de rocha.

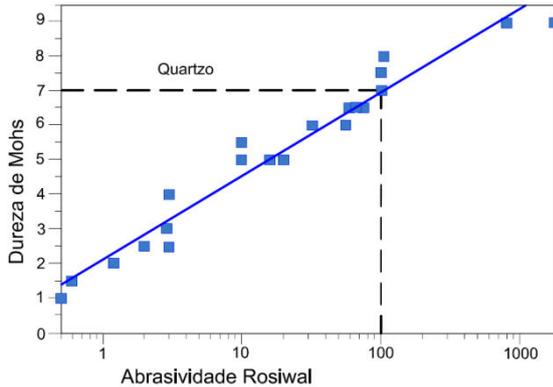


Figura 1. Correlação entre abrasividade Rosiwal e escala de dureza de Mohs.

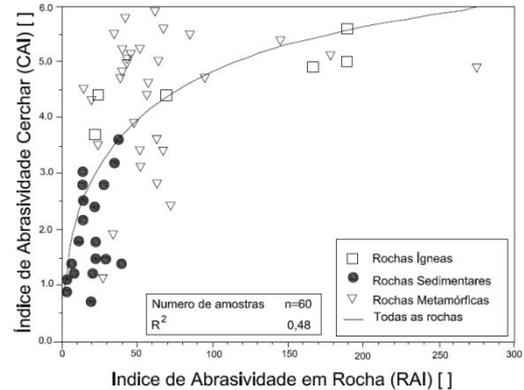


Figura 2. Correlação entre os índices CAI e RAI (segundo Plinninger et al., 2004)

De modo geral a abrasividade é causada pelo teor de quartzo na rocha, sendo tanto maior quanto maior o teor de quartzo. Porém, outros minerais também causam abrasividade, como os feldspatos, por exemplo, levando a definir-se um índice de “equivalência de teor de quartzo”, para representar a abrasividade geral da rocha, conforme reproduzido na Figura 3 (Thuro e Käsling, 2009).

Conforme definido por Thuro e Plinninger (2003), a “equivalência de teor de quartzo” ou o Quartzo Equivalente é determinado a partir da análise modal em microscópio petrográfico de cada mineral constituinte da rocha, determinando-se o índice RAI de cada mineral a partir de sua dureza na escala Mohs, e empregando a fórmula (2), onde  $A_i$  é a quantidade de cada mineral e  $R_i$  é o respectivo índice RAI.

$$eQu = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (2)$$

Os estudos de Käsling (in Plinninger et al, 2004) mostraram que a melhor forma de se interpretar os resultados do CAI através de parâmetros clássicos de mecânica de rochas é através do produto do Módulo de Young pelo conteúdo equivalente de quartzo, levando a suposição que a abrasividade de uma rocha determinada através do teste de CERCHAR é influenciada principalmente por sua deformabilidade e seus minerais abrasivos. Essa correlação é indicada na Figura 4, embora a correlação não indique melhoria significativa.

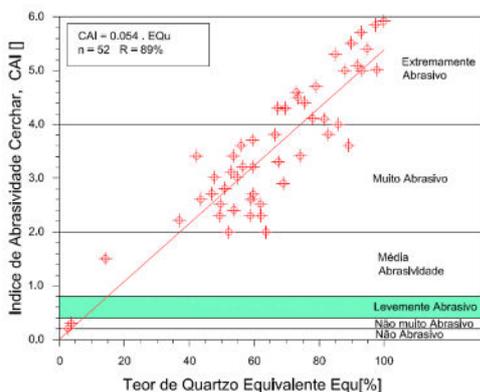


Figura 3. Índice CAI em função do Equivalente de Quartzo (%) (Thuro e Käsling, 2009)

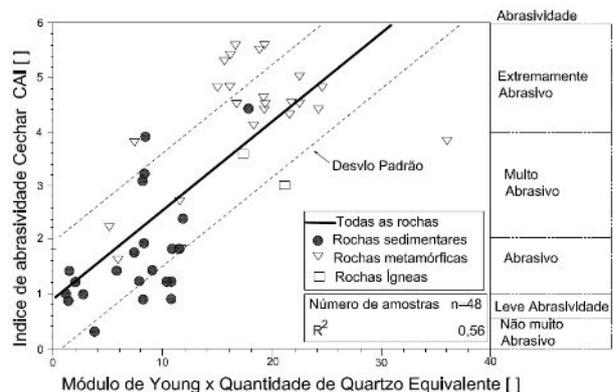


Figura 4. Índice CAI correlacionado ao produto do Equivalente de Quartzo pelo Módulo de Young da rocha (Plinninger et al, 2004)

Algumas investigações demonstraram que além dos fatores mencionados, o índice CAI pode variar em função da resistência da rocha, exemplificado pela Figura 5, e em função das pressões confinantes (Ruehl e Alber, 2006), conforme demonstrado na Figura 6.

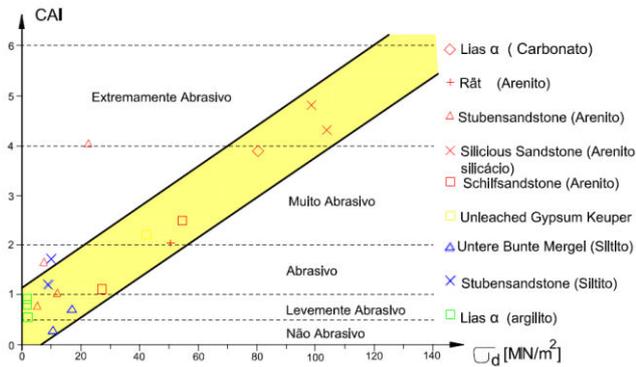


Figura 5. Variação do índice CAI em função da resistência da rocha (Keuper marl e rochas Jurássicas)

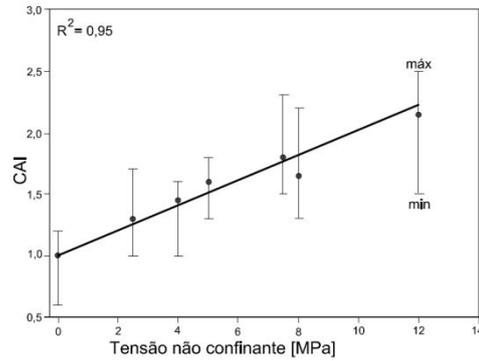


Figura 6. Variação de CAI em função das tensões de confinamento (Ruehl e Alber, 2006).

Como já mencionado, a abrasividade causa maior ou menor desgaste de cortadores, requerendo sua troca. A durabilidade específica média dos cortadores pode ser determinada pelo volume unitário de rocha escavada, expresso em m<sup>3</sup>/disco. Maidl et al (2001) apresentam um excelente gráfico que demonstra a relação entre a durabilidade de cortadores em função do tipo de rocha, sua resistência (UCS – unconfined compressive strength ou resistência à compressão uniaxial) e seu índice CAI, conforme representado na Figura 7. O desgaste dos discos pode ser considerado baixo se a durabilidade específica for maior que 1.000 m<sup>3</sup>/disco, alta a muito alta entre 1.000 e 200 m<sup>3</sup>/disco e extremamente alta se menor que 200 m<sup>3</sup>/disco. Nota-se que os granitos e gnaisses, pela sua mais alta resistência e teor de quartzo correspondem aos maiores índices de abrasividade e desgaste de cortadores.

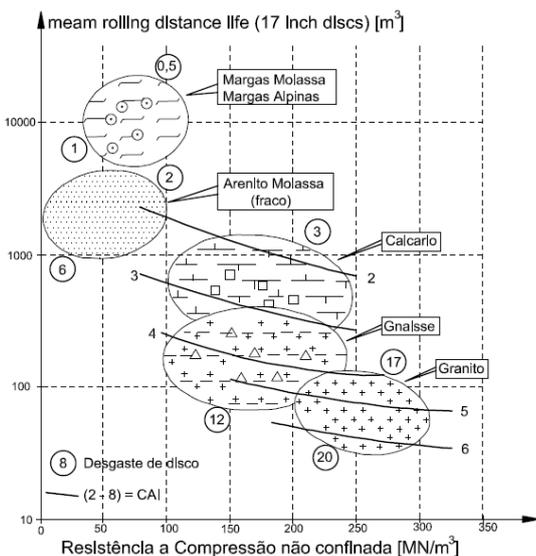


Figura 7. Durabilidade de cortadores em função da resistência e tipo de rocha, e do índice CAI. (Maidl et al., 2001)

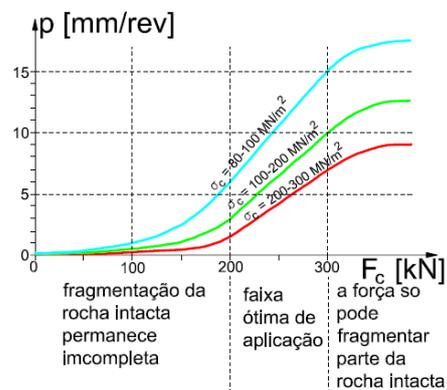


Figura 8. Taxas de penetração do TBM previstas em função da força de empuxo e da resistência da rocha.

## RESISTÊNCIA DA ROCHA

Em geral, a taxa de penetração depende da dureza da rocha e também das características das juntas do maciço rochoso. Devido ao mecanismo de ruptura da rocha sob a carga dos cortadores, a resistência à tração é provavelmente o parâmetro mais relevante para a escavabilidade da rocha e, portanto, Sanio (1985) e Barton (2000) propuseram a utilização de índices obtidos através de testes indiretos de tração (como o Point Load Test- PLT e o Ensaio Brasileiro).

Klein et al. (1995) e Barton (2000), afirmam que a taxa de penetração é maior quando a razão  $\sigma_c/I_s$  (resistência à compressão uniaxial/PLT) é mais baixa do que o valor típico (24) indicado no respectivo método de ensaio, como sugerido pela ISRM. Na prática isso pode confirmar que o índice obtido a partir do PLT é mais representativo do

mecanismo de ruptura da rocha sob as cargas dos cortadores do TBM. Entretanto, mesmo quando algum parâmetro relacionado à resistência à tração (como o Ensaio Brasileiro ou o PLT) é adotado para caracterizar a resistência do material rochoso, uma diferença marcante no comportamento da escavação entre rochas sedimentares e rochas ígneas intrusivas continua a existir. Howarth e Rowlands (1986) consideram que a textura das rochas possui uma marcante influência, devendo ser ainda melhor investigada.

Babendererde (1999) apresenta uma tabela para seleção do tipo de TBM onde a resistência à compressão uniaxial e as condições do maciço rochoso (RQD – Rock Quality Designation e distância entre as juntas) são parâmetros para definição do tipo de TBM, conforme Tabela 1, reforçando a importância destes para a eficiência na escavação.

Tabela 1. Critério de Seleção de TBM. (Babendererde., 1999)

	Ground Strength		Requirement on Tunnelling Method			Ground Structure			
	Uniaxial Compr. MPa	Cohesion Cu KN/m <sup>2</sup>	Face Support	Shield	Lining Install.	Jointing		Grain size	
						RQD	Distance	<0,002mm	<0,06mm
Rock	250					100 - 90%	> 2 m		
	250 - 100				behind TBM	90 - 75%	2,0 - 0,6 m		
	100 - 50			possible	behind TBM	75 - 50%	0,6 - 0,2 m		
	50 - 25		Possible mechanical	probably required	in TBM area	50 - 25%	0,2 - 0,06 m		
	25 - 5		mechanical	probably required	under shield	< 25%	< 0,06 m		
	5 - 1		mechanical poss. EPB	required	under shield	< 25%	< 0,06 m		
Soil	< 1	> 30	mechanical poss. EPB	required	under shield	< 25%	< 0,06 m	very	fine
		30 - 10	mechanical or EPB	required	under shield			> 30%	
		10 - 5	EPB or Slurry	required	under shield			> 20%	> 60%
		5 - 1	EPB or Slurry	required	under shield			> 10%	> 30%
		0	EPB or Slurry	required	under shield			< 10%	< 20%

É intuitiva a noção de que a taxa de penetração do TBM é menor com o aumento da resistência da rocha. A Figura 8 mostra as penetrações previstas em função da força de empuxo do TBM e da resistência à compressão uniaxial da rocha, indicando que as taxas de penetração (em mm de penetração por revolução do TBM) podem quase dobrar se a resistência da rocha é reduzida à metade.

### EFEITO DAS DESCONTINUIDADES.

Um maciço rochoso fraturado torna a escavação mais fácil, pois exige menos energia dos cortadores para realizar a quebra da rocha. Porém, após certo grau de fraturamento e espaçamento entre as fissuras, a taxa de penetração do TBM é diminuída, pois a quantidade de material escavado se torna muito grande, muitas vezes produzindo fragmentos de grandes dimensões, levando ao entupimento das saídas utilizadas na cabeça de corte. Pode também impedir os cortadores de girarem em contato com a rocha, o que provoca o desgaste de somente uma parte do disco e rapidamente inutiliza o cortador interrompendo dessa forma a escavação. A Figura 9 mostra a taxa de penetração de acordo com o espaçamento das fraturas no túnel Schonberg, na Áustria (Thuro e Plinninger, 2003), exemplificando o dito acima.

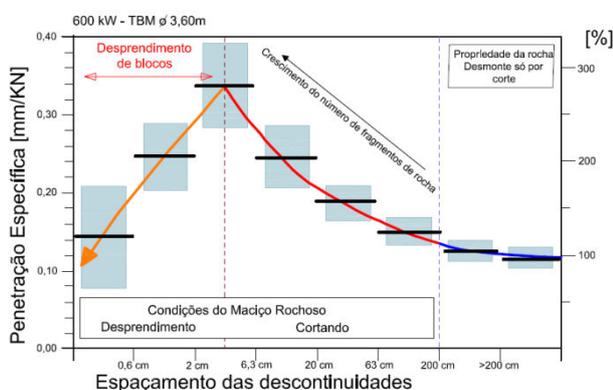


Figura 9. Taxa de penetração específica versus o espaçamento de descontinuidades em filitos (Thuro e Plinninger, 2003).

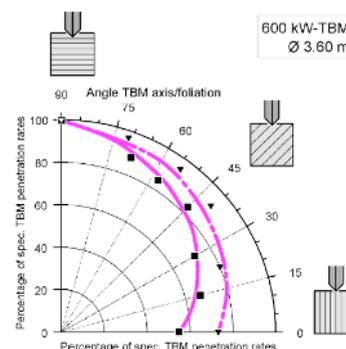


Figura 10. Valores médios da taxa de penetração específica do TBM (filitos, linha contínua e carbonato-xisto, tracejada) em função do ângulo da foliação (Thuro e Plinninger, 2003).

Segundo Thuro & Plinninger (2003), o processo de escavação é altamente dependente da orientação dos planos de fraqueza em relação à direção ao avanço. Quando a direção da penetração é perpendicular à orientação da foliação, o material rochoso é comprimido perpendicularmente a esses planos, mas é cisalhado paralelamente à foliação. Normalmente, as mais altas taxas de penetração do TBM são obtidas com a orientação favorável da foliação quando ela é perpendicular ao avanço da escavação, reduzindo-se drasticamente quando ela é paralela ao sentido do avanço, como ilustrado na Figura 10, igualmente correspondente ao túnel Schonberg, na Áustria. O mesmo efeito é observado nos resultados do Ensaio Brasileiro.

## EFEITO DA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO.

As classificações geomecânicas levam em consideração todos os fatores acima mencionados, mais as características de presença de água e resistência das fraturas, sintetizando as características do maciço rochoso. Por esse motivo, vêm sendo utilizadas para sua correlação com a performance do TBM na escavação. Deve ser levado em conta que no TBM de duplo shield a classificação somente pode ser feita pelo acesso limitado à cabeça de corte quando da interrupção da sua operação para efeitos de manutenção, o que em geral ocorre uma vez por dia. Dessa forma, todo o trecho escavado entre paralisações não é diretamente inspecionado, o que não ocorre no caso de TBM aberto. Por isso, as correlações correspondentes podem ser imprecisas em vários casos.

As classificações mais comumente empregadas são as dos sistemas RMR (Bieniawski, 1979) e Q (Grimstad e Barton, 1993). Uma das primeiras correlações genéricas entre taxa de penetração e qualidade do maciço expressa pelo índice Q, foi apresentada por Barton (2000) exprimindo sua experiência com TBM abertos, conforme visto na Figura 11. Nota-se que em maciços de qualidade mediana, fraturados, a taxa é maior e que para maciços de excelente qualidade, muito pouco fraturados e de rocha muito dura essa taxa diminui, sendo que nesse caso a escavação convencional pode ser competitiva em termos de velocidade de avanço.

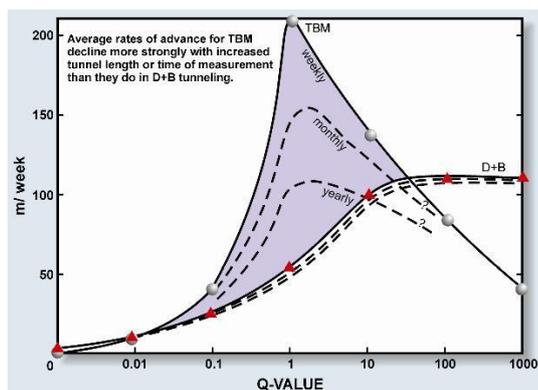


Figura 11. Taxas de penetração em função da qualidade do maciço, índice Q (Barton, 2000)

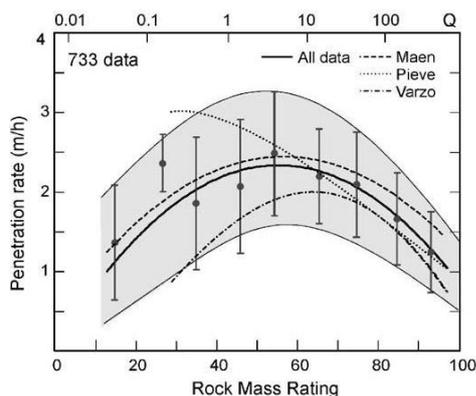


Figura 12. Relação entre a taxa de penetração e o RMR para três diferentes túneis (Sapigni et al, 2002).

Um dos raros dados de performance de taxas de penetração com a classificação do maciço em termos de RMR na execução de túneis por TBM é fornecido por Sapigni et al. (2002), referente a três diferentes túneis, conforme reproduzido na Figura 12. Novamente se observa que maciços de qualidade mediana promovem maior taxa de penetração.

## CONCLUSÕES.

Embora nenhum índice de abrasividade seja definitivo, os índices existentes indicam clara correlação entre a abrasividade, teor de quartzo e desgaste de cortadores. Na tentativa de realizar melhor previsão de desgaste de cortadores usualmente é feita a correlação entre os diversos índices de abrasividade. Entretanto, não pode ser negligenciado que o desgaste de cortadores também está sujeito a outros fatores não geológicos, como por exemplo, o projeto da cabeça de corte e distribuição dos cortadores.

As taxas de penetração de TBM podem variar em função do grau de fraturamento e orientação das descontinuidades, sendo mais favorável quando se orienta perpendicularmente à direção de escavação. Da mesma forma, maciços de qualidade mediana, quando fraturados e com rocha não excessivamente resistente, as velocidades de avanço da escavação são as maiores.

## BIBLIOGRAFIA.

- BARTON, N. (2000). *“TBM Tunelling in Jointed and Faulted Rock”*, Balkema, 173p.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1979). *“Engineering rock mass classification”*, J. Wiley, N.Y.
- BABENDERERDE, L. “Evaluation of Geotechnical Risks as a Precondition for a Successful TBM Project”. Presentation at the TU Graz Probalistics in Geotechnic, 1999
- CERCHAR (1986). The CERCHAR abrasiveness index, 12 S., Verneuil.
- EPFL. *“Rock Abrasivity – Cerchar Test”*, Swiss Testing Standard 224.
- GRIMSTAD, E. E BARTON, N. (1993). Updating the Q System for NMT (Ed. Kompen, Opsahl e Berg), Oslo.
- HOWARTH, D. F., ROWLANDS, J. C. (1986). “Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. Rock Mechanics. Rock Engineering”. 20, 57-85.
- KÄSLING, H. E THURO, K. (2010). *“Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory”*, in: Geologically Active, Williams et al, Taylor e Francis Gr., London.
- KLEIN, S., SCHMOLL, M., AVERY, T. (1995): “TBM performance at four hard rock tunnels in California”, in: Williamson, G., Gowing, S. (Eds.). Proc. RETC, S. Francisco, 61-75. Klein et al. (1995)
- MAIDL, B., SCHMID, L., RITZ, W. e HERRENKNECHT, M. (2001). *“Tunnelborh machinen im hartgainstein”*, Berlin, Ernst & Sohn., 350p.
- PLINNINGER, R.J., SPAUN, G. E THURO, K. (2002 ). Prediction and classification of tool wear in drill and blast tunnelling. In: Van Rooy JL. Jenny CA (Eds.). Engineering geology for developing countries. Proc. 9<sup>th</sup> Congr. IAEG, Durban, South Africa. 2226-2236.
- PLINNINGER, R. J., KÄSLING, H., E THURO , K. (2004). “Wear Prediction in Hardrock Excavation using the Cerchar Abrasivity Index – CAI”, Anais, Eurock 2004 e 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquium.
- RUEHL, S E ALBER, M. (2006). *“Initial stress conditions influencing the Cerchar abrasiveness index”*, Anais, IAEG2006, Paper number 436, The Geological Society of London.
- SANIO, P. (1985): “Prediction of the performance of disk cutters in anisotropic rock”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 22, 153-161.
- SAPIGNI, M., BERTI, M., BETHAZ, E., BUSILLO, A., CARDONE, G. (2002). TBM performance estimation using rock mass classifications. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39, 771–788.
- THURO, K. e PLINNINGER, R. J. (2003). *“Hard rock tunnel boring cutting, drilling and blasting: rock parameters or excavatability”*, Anais, Technol. Roadmap for Rock Mech., ISRM, S. African Inst. Min and Metal.
- THURO, K. E KÄSLING, H. (2009). *“Classification of the abrasiveness of soil and rock”*, Geomechanics and Tunnelling 2 No. 2, 178-188.