VILMONDES RIBEIRO

**ABRASIVIDADE PENDULAR E A RESISTÊNCIA
MECÂNICA DAS ROCHAS**

**São Paulo
2010**

VILMONDES RIBEIRO

**ABRASIVIDADE PENDULAR E A RESISTÊNCIA
MECÂNICA DAS ROCHAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

São Paulo
2010

VILMONDES RIBEIRO

**ABRASIVIDADE PENDULAR E A RESISTÊNCIA
MECÂNICA DAS ROCHAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Doutor
Lineu Azuaga Ayres da Silva

São Paulo
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de julho de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Ribeiro, Vilmondes
Abrasividade pendular e a resistência mecânica das rochas /
V. Ribeiro. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
69 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.

1. Mecânica de rochas 2. Abrasão (Medição) I. Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
de Minas e de Petróleo II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às minhas filhas
Fernanda e Renata

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da Silva, pela confiança depositada em mim, pela orientação e estímulo para conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Cesar Sansone pelas valiosas críticas e sugestões.

Adalberto Aurélio Azevedo pelo encorajamento, pela permanente disponibilidade, pelas valiosas discussões e por viabilizar o apoio administrativo e operacional.

Ao Eduardo Brandau Quitete pela competência e profissionalismo demonstrado no acompanhamento da pesquisa, bem como pela dedicação e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Amilton Sinatora (Poli Mecânica – USP), pelas idéias criativas, bem como pela cobrança de resultados.

Ao Prof. Dr. Fábio Taioli pelas críticas, sugestões e discussões no tocante aos aspectos geológicos, bem como pelo seu apoio incondicional, durante o transcorrer desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin por permitir acesso às instalações e equipamentos do Laboratório de Metalografia (Poli Metalurgia – USP), condição necessária para desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas Alcides Fernandes Scarpelini e Francisco Uema pela confecção de várias ferramentas, pelo interesse e estímulo.

Aos colegas Joaquim Ireno e Arlindo Francisco Dias pelo apoio operacional.

À Maria Lúcia Félix Gonçalves pelo cuidado na digitação e editoração da dissertação e, mais do que isso, pela dedicação e amizade.

À Maria Solange de O.P. Fierro, pela revisão bibliográfica.

Às colegas Mírian Cruxên Barros de Oliveira e Maria Heloísa Barros de Oliveira Frascá pelas contribuições nos estudos petrográficos, além de valiosas críticas e sugestões.

Aos colegas Fábio Conrado e Severino José da Silva pela preparação das amostras.

Ao Eliel dos Santos, pelo apoio na execução dos ensaios.

Ao Aroldo Ribeiro da Silva, pelo apoio com os aplicativos (software) e execução de figuras.

À Maristela Amaral Martins, secretária da pós-graduação, que sempre me atendeu com a maior paciência, simpatia e eficiência.

À colega Priscila Melo Leal Menezes, pela análise e seleção de amostras.

Finalmente agradeço a Eliana Beatriz Borges, esposa, pela compreensão, carinho, amor e paciência em todos os momentos no decorrer deste trabalho.

RESUMO

A interação entre rocha e metal, na forma de operações como perfuração, escavação e cominuição, dá origem a dois efeitos: um desejado, desagregação da rocha e outro indesejado, desgaste do metal. Como o desgaste, dramaticamente, influencia o desempenho dos equipamentos, é fundamental para estabelecer uma base para equações de predição de taxas de desgaste potencial. Neste contexto, Golovanevskiy e Bearman (2008), propuseram mais um método para avaliação da abrasividade. Este método, ensaio de abrasão por impacto deslizante (*Gouging Abrasion Test*), é realizado em condições de alta tensão/alto impacto de desgaste e é caracterizado pela maior taxa de remoção de material de todos os modos de desgaste e, portanto, representa o modo mais severo de desgaste abrasivo. O método consiste, basicamente, de uma ponteira cilíndrica com uma ponta cônica de 90°. Esta ponteira, em trajetória pendular, atinge uma amostra de rocha com energia de impacto de aproximadamente 300 joules e velocidade da ordem de 5,2 m/s. Semelhante à metodologia de cálculo de abrasividade Cerchar (CAI), o *Gouging Abrasion Index* (G_i) é calculado como sendo a média do diâmetro da ponta cônica, após desgaste, em milímetros e multiplicado por 10. Este trabalho verificou a adequabilidade do *Gouging Abrasion Test*, para um pequeno número de amostras de rocha que representam, qualitativamente, os principais tipos de rocha encontrados no Brasil e a sua correlação com outros ensaios consagrados como resistência à compressão, desgaste *Amsler* e dureza *Knoop*. Está análise mostrou alta correlação entre G_i e dureza *knoop* ($R^2 = 0,94$), baixa correlação com desgaste *Amsler* ($R^2 = 0,41$) e nenhuma correlação com resistência à compressão uniaxial.

Palavras-chave: Mecânica de rochas. Abrasão. Esclerometria pendular.

ABSTRACT

The rock-metal interaction, like occurs in operations as drilling, excavation and crushing, generates two effects: the desired rock degradation and the undesirable metal wear. As the wear dramatically influences the process performance of the equipment, it is critical to establish a basis for predictive equations to estimate potential wear rates. Following this context, in 2008 Golovanevskiy and Bearman proposed a method for abrasiveness evaluation. The method, Gouging Abrasion Test, employs high-stress load gouging/sliding impact wear and is characterized by the highest material removing rate than all wear modes, therefore representing the most severe type of abrasive wear. The method consists, in a few words, of a steel wear tool with a 90° sharp conical tip. This tip attacks a rock sample in a swinging trajectory with a impact energy of more than 300 joules and a speed around 5,2 m/s. Like the Cerchar Abrasivity Index (CAI) calculation, the Gouging Abrasion Index (Gi) is determined as 10 times de average diameter in millimeters of de conical tip (now flat) after one event of wear. This work intends to improve the knowledge about Gouging Abrasion Test, and evaluates its suitability in a small group of rocks that represents some of the main types to be found in Brazil's rock cutting, drilling and crushing works. It's relation to other frequent tests like uniaxial compressive strength, Amsler abrasive wear and Knoop hardness were also verified. The results show high correlation between Gi and Knoop hardness ($R^2 = 0,94$), low correlation with Amsler wear ($R^2 = 0,41$) and no relation to uniaxial compressive strength.

Keywords: Rock Mechanics. Abrasion. Gouging Abrasion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desgaste a dois e a três corpos.....	4
Figura 2 – Desempenho de escavação por fresadora versus resistência à compressão uniaxial (ardósia e quartzito, túnel para saneamento, Zeulenroda, Alemanha).....	6
Figura 3 – Curvas tensão-deformação de amostras de mármore e filito	7
Figura 4 – Desempenho de escavação por fresadora versus trabalho destruidor (ardósia e quartzito, túnel para saneamento, Zeulenroda, Alemanha).....	8
Figura 5 – Desempenho de perfuração para desmonte à fogo versus trabalho destruidor.....	8
Figura 6 – Correlação entre abrasividade <i>Rosinwall</i> e dureza <i>Mohs</i> , considerando 24 minerais distintos.....	10
Figura 7 – Vida útil de brocas tipo <i>button bit</i> utilizadas para desmonte à fogo versus Teor Equivalente em Quartzo	10
Figura 8 – Aparelho para realização de ensaio de abrasividade Cerchar. Fabricante Ergotech.....	11
Figura 9 – Compilação de valores típicos de CAI para algumas rochas. Ca/f – matriz argilosa ou cimento ferruginoso; cc – cimento carbonático; cs – cimento silicoso.	12
Figura 10 – Correlação CAI versus vida útil de broca de 45mm tipo <i>button bit</i> para perfuração em escavações por desmonte a fogo.....	12
Figura 11 – Vida útil de brocas tipo <i>button bit</i> versus Índice de Abrasividade de Rochas – RAI. Brocas para perfuração em escavações por desmonte a fogo.....	13
Figura 12 – Leitura do Martelo de <i>Schmidt</i> versus desempenho da perfuração por percussão.....	15
Figura 13 – Resistência à Compressão Puntiforme versus desempenho da perfuração por percussão	16
Figura 14 – Resistência à Compressão Uniaxial versus desempenho da perfuração por percussão	16
Figura 15 – Serra com disco diamantado para corte em rochas, no Laboratório de Petrologia e Tecnologia de Rochas	17
Figura 16 – Dispositivo para medida de espessuras do corpo-de-prova para desgaste abrasivo <i>Amsler</i> , no Laboratório de Componentes e Sistemas do IPT.....	18
Figura 17 – Desenho do dispositivo para medida de espessuras do corpo-de-prova para desgaste abrasivo <i>Amsler</i>	18
Figura 18 – Máquina <i>Amsler</i> , modelo A 154, do Laboratório de Componentes e Sistemas do IPT	19
Figura 19 – Desenho da Máquina <i>Amsler</i> para ensaio de desgaste abrasivo	19
Figura 20 – Impressão produzida por carga de 200 gf em cobre. O comprimento da diagonal maior é 160 µm. Aumento 480 x.....	21
Figura 21 – Impressão produzida por carga de 200 gf em biotita-hornblenda quartzo monzonito (amostra IPT-SP 18) como é visualizada no microdurômetro Miniload 2. O comprimento da diagonal maior é 66 µm. Notar a presença de 3 grãos minerais na área da foto (esquerda, centro e direita). Aumento 650x ...	22

Figura 22 – Esquema das 40 impressões realizadas em cada corpo-de-prova. Os números indicam a ordem em que foram feitas	23
Figura 23 – Microdurômetro marca E. Leitz, modelo Miniload 2. Os corpos-de-prova da foto têm 5 cm de largura. O objeto redondo é a placa de cobre usada para limpeza da ponta de diamante	24
Figura 24 – Descrição do tipo de ensaio	25
Figura 25 – Diagrama do aparelho de ensaio abrasivo por impacto deslizante	27
Figura 26 – Base do porta amostra	28
Figura 27 - Base do porta amostra destacando as duas possibilidades de fixação	28
Figura 28 – Aparelho de ensaio abrasivo por impacto deslizante.....	29
Figura 29 – Corpo-de-prova preparado para ser desgastado pelo torno	30
Figura 30 – Aparência de corpo-de-prova para ensaio.....	30
Figura 31 – Ponteira de desgaste	31
Figura 32 – Ponteira de desgaste fixada na porta-ponteira.	32
Figura 33 – Micrômetro fixado na base da máquina de ensaio para permitir a leitura de 1 mm de deslocamento vertical.	33
Figura 34 – Base do porta amostra de rocha com nível de bolha.....	33
Figura 35 – Comprimento e profundidade da ranhura da amostra de rocha após ensaios....	34
Figura 36 – Aspecto da amostra de rocha após ensaio.....	35
Figura 37 – Direções de medidas dos diâmetros na ferramenta de desgaste	36
Figura 38 – Ponteira com perfil adequado para leitura de diâmetros. Lupa Nikon (x30).....	36
Figura 39 – Ponteira com perfil inadequado para leitura de diâmetros. Lupa Nikon (x30).	37
Figura 40 – Face de ponteira adequada para medida de diâmetros (Microscópio óptico, marca Olympus BX60M).....	37
Figura 41 – Face de ponteira inadequada para medida de diâmetros (Microscópio óptico, marca Olympus BX60M).....	38
Figura 42 – Direções dos ensaios para amostras estratificadas.....	39
Figura 43 – Três tipos de ranhura em uma mesma amostra de rocha	40
Figura 44 – Valores de compressão uniaxial x Gi	47
Figura 45 – Valores de desgaste <i>Amsler</i> x Gi	47
Figura 46 – Valores de dureza <i>Knoop</i> x Gi.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de dureza <i>Mohs</i>	5
Tabela 2 – Informações geológicas importantes para previsão do desgaste de brocas tipo <i>button</i> bit utilizadas em perfurações para desmonte a fogo	14

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Bege Bahia.	41
Quadro 2 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Mármore Branco Mantiqueira.....	42
Quadro 3 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Arenito	43
Quadro 4 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Basalto	43
Quadro 5 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Gabro	44
Quadro 6 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Granito Cinza Mauá	44
Quadro 7 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Granito Vermelho Capão Bonito.....	45
Quadro 8 – Gouging abrasion index (Gi) das rochas estudadas	45
Quadro 9 – Resumo da caracterização tecnológica	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAI	Cerchar Abrasiveness Index
eQc	Equivalent Quartz Content
Gi	Gouging Abrasion Index
HK	Dureza Knoop
HRC	Hardness Rockwell C
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISRM	International Society for Rock Mechanics
RAI	Rock Abrasivity Index
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial
RPM	Rotações por Minuto
TBM	Tunnel Boring Machine
UCS	Uniaxial Compressive Strength
Wz	Trabalho Destruidor Específico

LISTA DE SÍMBOLOS

J	Joule
m	Metro
Pa	Pascal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Justificativa	3
3 ABRASIVIDADE	4
3.1 Definição.....	4
3.2 Testes para avaliar abrasividade	4
3.2.1 Dureza <i>Mohs</i>	4
3.2.2 Resistência à compressão uniaxial	5
3.2.3 Trabalho destruidor específico	7
3.2.4 Teor equivalente em quartzo (<i>Equivalent Quartz Content</i> – eQc).....	9
3.2.5 Índice de abrasividade Cerchar (<i>Cerchar Abrasiveness Index</i> – CAI)	11
3.2.6 Índice de abrasividade de rochas (<i>Rock Abrasivity Index</i> – RAI).....	13
3.2.7 Martelo de <i>Schmidt</i> e resistência à compressão puntiforme.....	15
3.2.8 Desgaste abrasivo <i>Amsler</i>	17
3.2.9 Dureza <i>Knoop</i>	20
4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO RISCO	25
5 ENSAIO DE ABRASÃO POR IMPACTO DESLIZANTE	26
5.1 Introdução	26
5.2 Gouging Abrasion Index (Gi)	26
5.2.1 Equipamentos e método de ensaio	26
5.2.2 Corpos-de-prova	29
5.2.3 Ponteira de desgaste	31
5.2.4 Procedimento de ensaio	31
5.2.5 <i>Gouging Abrasion Index</i> (Gi).....	35
5.2.6 Considerações do ensaio.....	39
6 TRABALHO REALIZADO	41
6.1 Seleção de rochas para estudo de abrasividade pendular	41
6.2 Resultados	46
7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
8 CONCLUSÃO.....	49
9 DESENVOLVIMENTO FUTURO	50
REFERÊNCIAS.....	51
APÊNDICE	54

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de ferramenta é um problema de grande importância em vários campos da engenharia civil e de minas, especialmente com implicações econômicas, pois há casos em que uma inesperada alta taxa de desgaste das ferramentas de corte e baixa produção, resultaram em elevadas perdas financeiras e litígio entre empreiteiros, consultores e cliente (DEKETH, 1995).

Deve-se estar atento sobre as várias e diferentes aplicações técnicas nos campos da engenharia civil e mineração: perfuração de rocha, escavação de rocha por máquinas (TBM's, fresadoras), corte e lavra de rochas em minas e pedreiras, cominuição de rocha por trituradores, e assim por diante. Frequentemente, para uma determinada aplicação corresponde um particular funcionamento do instrumento ou da máquina, de modo que os parâmetros envolvidos no fenômeno podem ser diferentes de um caso para outro (INNAURATO; MANCINI, 1996).

A abrasividade é uma propriedade que reflete o efeito da perda de volume que rochas e minerais aplicam em materiais em contato e, portanto, tem uma grande influência sobre a vida útil e eficiência dos equipamentos que manuseiam estes materiais. Há vários métodos para estimar a abrasividade de rochas e minerais, usados com vários graus de sucesso e relevância. Eles podem ser amplamente divididos em três categorias:

- Os métodos indiretos – avaliação da abrasividade através de uma combinação de resistência à compressão, dureza e outras propriedades fundamentais da rocha;
- Métodos diretos – avaliação da abrasividade através de um método onde há um movimento relativo da amostra de rocha e a ferramenta de desgaste em contato, sob condições de teste padrão controlado;
- Abordagem holística – avaliação da abrasividade através de uma combinação de propriedades fundamentais da rocha e dos muitos e variados parâmetros de processo e das condições ambientais.

Como exemplo de medidas indiretas para se avaliar a abrasividade das rochas, pode-se citar, martelo de *Schmidt*, escleroscopia e *Cone Indenter tests*. Os

resultados ainda podem ser complementados com os valores de propriedades fundamentais das rochas como resistência à compressão simples, resistência à tração, dureza e tenacidade.

Como exemplo de abordagem holística, Lim et al. (1997) estudaram o desgaste dos rolos em um dispositivo de moagem de alta pressão. O estudo levou em conta os efeitos de escala da máquina, a estrutura da superfície de desgaste dos rolos, pressão de moagem e velocidade dos rolos, ajuste de abertura, granulometria de alimentação e teor de umidade para uma faixa de minérios. Os autores propuseram um mecanismo de desgaste predominante e uma metodologia para minimizar o desgaste dos rolos de moagem, ambos específicos para um determinado tipo de moedor de alta pressão.

Um exemplo de método direto, baseado nos trabalhos de Valantin e Guillon (1971), Bougard (1974) e West (1989) que desenvolveram um dispositivo onde a abrasividade da rocha é estimada através da medição da marca deixada na ferramenta de desgaste depois de esta roçar a amostra de rocha, sob uma carga predeterminada, ao longo de um determinado tempo e distância de trabalho.

Os métodos de avaliação indiretos da abrasividade têm a vantagem de usar dados prontamente disponíveis ou que são de fácil obtenção. No entanto, eles não levam em conta variáveis de processo específico do modo de desgaste. Assim, eles não são normalmente utilizados isoladamente, mas sim em combinação com métodos diretos, ou abordagens holísticas, para complementar ou confirmar outras medidas diretas mais relevantes. Por outro lado as abordagens holísticas de avaliação da abrasividade das rochas são específicas para determinados equipamentos ou processos e, portanto, de valor limitado.

Os métodos diretos de avaliação da abrasividade de rochas usam condições padronizadas para determinar a abrasão em um específico modo de desgaste, como por exemplo, em baixa ou alta tensão, ou abrasão por impacto. Tais testes avaliam o efeito do movimento relativo da amostra de rocha e a ferramenta de desgaste em contato, em alta e baixa velocidade.

2 OBJETIVOS

Pretende-se com este estudo, avaliar se o *Gouging Abrasion Test* apresenta resultados coerentes com outras metodologias quando aplicado a um pequeno número de amostras de rochas, mas que representam, qualitativamente, os principais tipos de rochas encontrados no Brasil, com resistência à compressão uniaxial entre 100 e 250 MPa. Portanto, estas amostras serão ensaiadas, segundo este método, e a partir daí será verificada a sua correlação com outros ensaios consagrados como resistência à compressão, desgaste *Amsler* e dureza *Knoop*.

2.1 Justificativa

Ocorre com frequência o desgaste de peças no processamento de minerais e em equipamentos de mineração porque são muitas vezes submetidos a elevadas cargas aplicadas em altas velocidades e em diferentes ângulos de incidência, onde o modo predominante de desgaste é a abrasão por impacto deslizante. Exemplos incluem o revestimento de trituradores, desgaste de revestimento em *hoppers* e *chutes*, *picks* em fresadoras, discos em *tunnel boring machines* (TBM) e ferramentas de corte. Abrasão, sob estas condições é caracterizada por uma elevada taxa de remoção de material e, portanto, tem um impacto direto sobre as taxas de desgaste e vida útil de equipamento. No entanto, atualmente não se conhece um método para avaliação da abrasividade da rocha sob estas condições. Portanto, o propósito específico deste trabalho, haja vista que um método de avaliação da abrasividade normalmente não deve ser utilizado isoladamente, mas sim em combinação com outro método, é o de analisar mais um método que, diferente dos outros, simula condição severa do fenômeno de desgaste.

3 ABRASIVIDADE

3.1 Definição

É o tipo de desgaste que ocorre quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza em uma superfície mais macia e impinge uma série de ranhuras nela. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas, geralmente, soltas (RABINOWICZ, 1965).

Para Zum-Gahr (1987), o desgaste por abrasão se caracteriza por movimento relativo entre um corpo duro e uma superfície mais “mole”. Neste processo, tanto o corpo duro pode ser fraturado como a superfície mais mole pode ser trincada e/ou deformada, sendo posteriormente removidos da superfície, resultando em mensurável perda de volume. O desgaste abrasivo pode ser de contato a dois e a três corpos (Figura 1). O primeiro ocorre quando o abrasivo desliza ao longo de uma superfície e o outro, quando ele desliza entre duas superfícies.

Figura 1 - Desgaste a dois e a três corpos.
Fonte: Zum-Gahr (1987).

3.2 Testes para avaliar abrasividade

3.2.1 Dureza Mohs

A dureza Mohs é a escala clássica utilizada na mineralogia que quantifica a dureza dos minerais a partir da resistência que um determinado mineral oferece ao risco, por exemplo, o diamante risca o vidro, portanto, este é mais duro que o vidro. Esta escala foi criada em 1812 pelo mineralogista alemão Friedrich Mohs com 10 minerais de diferentes durezas existentes na crosta terrestre. Atribuiu valores de 1 a

10. O valor de dureza 1 foi dado ao material menos duro que é o talco, e o valor 10 dado ao diamante, que é a substância mais dura existente na natureza. A Tabela 1, exibe a escala de dureza *Mohs*.

Tabela 1 – Escala de dureza Mohs. (fonte: ABGE, 1998).

ESCALA DE DUREZA	MINERAIS PADRÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	REFERENCIAS RELATIVAS	TIPOS DE MINERAIS
1	Talco	$Mg_3Si_4(OH)_2$	Riscam-se com a unha	Moles
2	Gipso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$		
3	Calcita	$CaCO_3$	Risca-se com objeto de cobre	
4	Fluorita	CaF_2	Riscam-se com o canivete ou com o canto do vidro	Semiduros
5	Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$		
6	Ortoclásio	$KAlSi_3O_8$	Risca o vidro com dificuldade	
7	Quartzo	SiO_2	Riscam o vidro	Duros
8	Topázio	$Al_2SiO_4(OH,F)_2$		
9	Coríndon	Al_2O_3	Riscam o vidro com facilidade	
10	Diamante	C		

3.2.2 Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial (RCU) é um parâmetro obtido por ensaio definido pela norma ASTM D7012 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2007) e procedimento International Society of Rock Mechanics (1979), amplamente utilizado pela comunidade geotécnica em diversas aplicações. Seu valor representa a tensão necessária para provocar a ruptura da rocha, quando submetida a esforços compressivos. É determinada pela seguinte relação:

$$RCU = W / A$$

onde:

RCU - resistência à compressão uniaxial (Pa);

W - força de ruptura (N);

A - área de carga do corpo de prova (m²).

Por meio de estudo estatístico, onde analisa diversos parâmetros que influenciam a perfurabilidade de rochas, Kahraman (1999), conclui que, para equipamentos que trabalham apenas por rotação, a resistência à compressão uniaxial, é o parâmetro mais significativo. Entretanto, o próprio autor faz ressalva ao

fato de ter trabalhado quase que exclusivamente com rochas sedimentares calcárias.

Thuro e Plinninger (2003), trabalhando com rochas metassedimentares, correlacionam a resistência à compressão uniaxial e o desempenho de escavação de túneis por fresadora, obtendo o valor de 62% para o coeficiente de determinação (R^2 - quadrado do coeficiente de correlação), conforme ilustrado na Figura 2.

Este trabalho analisou os dados da construção de um túnel para saneamento de 11 m² de seção transversal e 2,4 Km de extensão, localizado nas proximidades de Zeulenroda, Turingia, Alemanha. O material rochoso foi caracterizado como ardósia e quartzito Ordovicianos. A ardósia variava de laminada a maciça, por vezes com dobras fechadas e frequentemente com mica. A ardósia estava intercalada com quartzito muito duro e de alta resistência à compressão. A faixa de valores de resistência à compressão, do material analisado, variou de 10MPa (ardósia) à 120MPa (quartzito). Durante os trabalhos de escavação, uma grande zona de falha – falha de Weissendorf – foi cortada pelo túnel, com material tipicamente fraturado e moído e alta densidade de juntas nas suas proximidades (THURO; PLINNINGER, 1998).

Figura 2 – Desempenho de escavação por fresadora versus resistência à compressão uniaxial (ardósia e quartzito, túnel para saneamento, Zeulenroda, Alemanha).

Fonte: Thuro e Plinninger (2003).

3.2.3 Trabalho destruidor específico

O trabalho destruidor específico (W_z), ou simplesmente trabalho destruidor, é um parâmetro desenvolvido por Thuro e Spaun (1996), correspondente ao trabalho (energia) necessário para fragmentar uma determinada amostra de rocha. Numericamente, corresponde à área sob a curva tensão-deformação (integral), incluindo o trecho pós-ruptura, conforme ilustrado na Figura 3.

O mármore (Figura 3, gráfico da esquerda) exibe comportamento rúptil (ruptura do tipo frágil), em que os picos das curvas para diferentes tensões não ultrapassam o limite de deformação máxima. O filito (Figura 3, gráfico da direita) apresenta comportamento plástico, para compressão não confinada, realizada em direção subparalela à foliação, em que os picos das curvas para diferentes tensões, migram para a direita na seção pós-ruptura. O trabalho destruidor corresponde à área sob a curva.

Figura 3 – Curvas tensão-deformação de amostras de mármore e filito.
Fonte: Thuro e Spaun (1996)

A Figura 4 exibe a correlação entre o trabalho destruidor e o desempenho de escavação por fresadora, onde se obteve o valor de 89% para o coeficiente de determinação. Relação semelhante pode ser verificada na Figura 5, que mostra a correlação entre o trabalho destruidor e o desempenho de perfuração para desmonte a fogo.

Figura 4 – Desempenho de escavação por fresadora versus trabalho destruidor (ardósia e quartzito, túnel para saneamento, Zeulenroda, Alemanha).

Fonte: Thuro e Plinninger (2003).

Figura 5 – Desempenho de perfuração para desmorte a fogo versus trabalho destruidor.

Fonte: Thuro e Plinninger (2003).

3.2.4 Teor equivalente em quartzo (*Equivalent Quartz Content* – eQc)

Grande parte das ferramentas de perfuração é produzida em aço (dureza *Mohs* aproximadamente 5,5). Dessa forma, considerando-se a abundância e frequência do quartzo (dureza *Mohs* 7) na crosta terrestre, verifica-se que este mineral é o agente abrasivo de maior expressão presente nas rochas. O teor equivalente em quartzo (*Equivalent Quartz Content*- eQc) é um índice que foi desenvolvido para considerar os efeitos abrasivos dos demais minerais formadores de rochas. É obtido por meio de análise modal, executada ao microscópio petrográfico em seção delgada e definido pela equação a seguir:

$$eQc = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i$$

em que:

eQc – teor equivalente em quartzo em porcentagem;

A_i – porcentagem em volume do mineral;

R_i – abrasividade *Roswall* do mineral.

A abrasividade *Roswall* é calculada a partir da perda de volume gerada pelo atrito entre o mineral e coríndon:

$$R_i = [1000 \times PV_{\text{coríndon}}] / [PV_{\text{mineral}}]$$

onde:

PV – Perda de volume.

A abrasividade *Roswall* também pode ser correlacionada com a dureza *Mohs*, por meio do gráfico da Figura 6.

Figura 6 – Correlação entre abrasividade *Rosiwall* e dureza *Mohs*, considerando 24 minerais distintos.
 Fonte: Thuro e Plinninger (2003).

Thuro e Plinninger (2003) obtiveram o valor de 95% para o coeficiente de determinação, para correlação entre valores de eQ_c e a vida útil de brocas tipo *button bits* para execução de furos de mina, utilizado em desmonte por explosivo (Figura 7).

Figura 7 – Vida útil de brocas tipo *button bit* utilizadas para execução de furos de mina versus Teor Equivalente em Quartzo.
 Fonte: Thuro e Plinninger (2003).

3.2.5 Índice de abrasividade Cerchar (*Cerchar Abrasiveness Index – CAI*)

O ensaio de abrasividade Cerchar (Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France) foi desenvolvido pelo centro de pesquisas homônimo, na França, em meados da década de 1970 (WEST, 1982). O aparelho original difere um pouco do ilustrado na Figura 8, que corresponde a uma versão apresentada por West (1989) em trabalho que é referência sobre o tema.

Consiste fundamentalmente de uma ponta metálica de dimensões e material específicos, sob a carga de 70N, com a qual se efetua um risco de 10mm de extensão em um corpo-de-prova de rocha, verificando-se então o desgaste dessa ponta. O resultado do ensaio, expresso sob o índice CAI (*Cerchar Abrasiveness Index*), corresponde à medida do diâmetro da área plana da ponta metálica (em décimos de milímetro), oriunda do desgaste.

Figura 8 – Aparelho para realização de ensaio de abrasividade Cerchar.
Fabricante Ergotech

Fonte: www.ergotech.co.uk. Acessado em: 2007.

A partir do trabalho de West (1989), o ensaio tem sido progressivamente adotado pela indústria de escavações subterrâneas. Entretanto, Plinninger et al. (2003) alertam para a elevada variabilidade dos resultados, conforme ilustrado na Figura 9 e Plinninger et al. (2004) obtiveram o valor de 26% para o coeficiente de determinação, para correlação entre valores de CAI e a vida útil de brocas do tipo *button bit* utilizadas para desmonte a fogo (Figura 10).

Figura 9 – Compilação de valores típicos de CAI para algumas rochas. ca/f – matriz argilosa ou cimento ferruginoso; cc - cimento carbonático; cs - cimento silicoso.

Fonte: Plinninger et al. (2003).

Figura 10 – Correlação CAI versus vida útil de broca de 45mm tipo *button bit* para perfuração em escavações por desmonte a fogo.

Fonte: Plinninger et al. (2004).

3.2.6 Índice de abrasividade de rochas (*Rock Abrasivity Index – RAI*)

O índice de abrasividade de rochas é um parâmetro geotécnico desenvolvido por Plinninger et al. (2002) voltado à avaliação do desgaste de brocas tipo *button bit* utilizadas em perfurações para desmonte a fogo. Baseia-se numa investigação em diversas escalas, incluindo desde aspectos de minerais até características dos maciços rochosos, usualmente utilizadas para análise de estabilidade de obras subterrâneas.

É calculado multiplicando-se a resistência à compressão uniaxial (MPa) pelo teor equivalente em quartzo. Conforme indicado pelos criadores do índice, a resistência à compressão uniaxial representaria os aspectos da rocha que teriam influência na abrasividade, enquanto o teor equivalente em quartzo corresponderia à influência da composição mineralógica. As características dos maciços rochosos listadas na Tabela 2 são consideradas apenas de forma qualitativa e são utilizadas com base na experiência profissional para aumentar ou diminuir o índice calculado.

A correlação entre o RAI e a vida útil de brocas tipo *button bit* utilizadas em perfuração para desmonte à fogo está representada na Figura 11 e fornece o valor de 48% para o coeficiente de determinação.

Figura 11 – Vida útil de brocas tipo *button bit* versus Índice de Abrasividade de Rochas - RAI. Brocas para perfuração em escavações por desmonte a fogo.

Fonte: Thuro e Plinninger (2003).

Tabela 2 – Informações geológicas importantes para previsão do desgaste de brocas tipo *button bit* utilizadas em perfurações para desmonte a fogo.

1. Escala de Maciço Rochoso (dm-km)
Quais áreas de composição rochosa homogênea e de características rochosas idênticas podem ser distinguidas?
Como essas áreas estão localizadas (orientação, espessura, ocorrência)?
Como são as características (número de famílias, espaçamento, rugosidade, abertura, orientação) das descontinuidades (juntas, falhas, estratificações) dessas áreas?
Existem áreas onde as características das rochas foram modificadas por alteração intempérica ou hidrotermal?
Como é a situação das águas (quantidade, localização e composição química das surgências)?
Qual é o campo de esforços principal (orientação e intensidade)?
2. Escala de Rocha (cm-dm)
Quais as quantidades dos minerais que compõem a rocha?
Qual é a petrofábrica da rocha (tamanho e forma dos grãos, orientação dos minerais, densidade de distribuição)?
Quais são as propriedades mecânicas da rocha (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração)?
3. Escala de Mineral (mm-cm)
Quais minerais compõem a rocha?
Qual o estado de alteração dos minerais?

Fonte: Plinninger et al. (2002)

3.2.7 Martelo de *Schmidt* e resistência à compressão puntiforme

Para perfurações por percussão, utilizadas para desmonte a fogo, Kahraman et al. (2003) procuraram identificar os parâmetros que apresentassem maiores coeficientes de correlação com os desempenhos de perfuração (m/min) registrados em escavações de taludes rodoviários e mineiros.

Dentre os resultados obtidos pelos autores, destacam-se os elevados coeficientes de correlação obtidos para ensaios de simples execução em campo, como o martelo de *Schmidt* (esclerômetro; $R=0,90$) e a resistência à compressão puntiforme ($R=0,87$), conforme ilustrado na Figura 12 e na Figura 13. Para efeito de comparação, a Figura 14 representa a correlação do desempenho de perfuração por martelos pneumáticos, com a resistência à compressão uniaxial.

Figura 12 – Leitura do Martelo de *Schmidt* versus desempenho da perfuração por percussão.

Fonte: Kahraman et al. (2003).

Figura 13 – Resistência à Compressão Puntiforme versus desempenho da perfuração por percussão.

Fonte: Kahraman et al (2003).

Figura 14 – Resistência à Compressão Uniaxial versus desempenho da perfuração por percussão.

Fonte: Kahraman et al (2003).

3.2.8 Desgaste abrasivo *Amsler*

Os ensaios de desgaste abrasivo *Amsler* foram realizados segundo a norma NBR 12042 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), cujos principais aspectos são assinalados a seguir.

- Para cada amostra, são preparados, com serra diamantada (Figura 15), dois corpos-de-prova com dimensões 70mm x 70mm x 30mm.

Figura 15 – Serra com disco diamantado para corte em rochas, no Laboratório de Petrologia e Tecnologia de Rochas do IPT.

- As laterais são medidas com paquímetro e a espessura com relógio comparador, em quatro pontos, nas diagonais, a 30mm dos vértices. Para a medida de cada uma das quatro medidas da espessura, o corpo-de-prova é apoiado em um dispositivo composto por três pinos metálicos verticais, em posições correspondentes a três dos quatro pontos de medida, sendo que cada medida é feita com a haste do relógio

aproximadamente sobre o pino mais próximo ao vértice (Figura 16 e Figura 17).

Figura 16 – Dispositivo para medida de espessuras do corpo-de-prova para desgaste abrasivo *Amsler*, no Laboratório de Componentes e Sistemas do IPT.

Fonte: Quitete (2002).

Figura 17 – Desenho do dispositivo para medida de espessuras do corpo-de-prova para desgaste abrasivo *Amsler*.

Fonte: Quitete (2002).

- Após as medidas os dois corpos-de-prova são colocados na máquina *Amsler*, modelo A 154 (Figura 18 e Figura 19).

- 1 - suporte dos corpos-de-prova;
- 2 - escovas;
- 3 - reservatório de areia;
- 4 - disco de aço e
- 5 - motor elétrico

Figura 18 – Máquina *Amsler*, modelo A 154, do Laboratório de Componentes e Sistemas do IPT.

Fonte: Quitete (2002).

- 1 - Regulador de carga
- 2 - Controle de fluxo de areia
- 3 - Polia(motor)
- 4 - Sapata de acoplamento do corpo-de-prova
- 5 - Corpo-de-prova
- 6 - Anel
- 7 - Odômetro
- 8 - Escova direcional do fluxo de areia

Figura 19 – Desenho da Máquina *Amsler* para ensaio de desgaste abrasivo.

Fonte: Frazão (2002)

- Na máquina de ensaio os corpos-de-prova ficam dispostos diametralmente opostos, sob carga de 66N em um disco de ferro fundido, com 2m de perímetro no centro dos corpos-de-prova e largura de 160 mm. Esse disco é alimentado com areia normal IPT 50¹ com vazão de 72 cm³/min e posto a girar com 30rpm, enquanto que os corpos-de-prova rotacionam a 0,6 rpm em torno de seu próprio eixo, perpendicular à superfície de contato.
- Após o equivalente a 500 m e 1.000 m de percurso, os corpos-de-prova são limpos com escova macia e sua espessura é novamente registrada em quatro pontos com o relógio comparador, no dispositivo descrito anteriormente. Após os 500m iniciais os dois corpos-de-prova são recolocados na máquina *Amsler*, com as posições trocadas.
- No caso de uma diferença de 20% entre a perda de espessura dos dois corpos-de-prova após 1.000 m, a amostra é submetida a novo desgaste, sendo adotado o conjunto que apresentar a menor diferença após 1.000 m de percurso. Essa eventual repetição é um procedimento específico adotado pelo Laboratório de Componentes e Sistemas Construtivos do IPT, não sendo citado pela NBR 12042. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992)

3.2.9 Dureza *Knoop*

A dureza *Knoop* (KNOOP et. al. 1939) é definida como a área projetada (na superfície em teste) de uma cavidade microscópica produzida no material em estudo, utilizando-se uma ponta de diamante de formato padronizado, a “ponta *Knoop*”, dividida pela carga aplicada na ponta, normal à superfície em estudo. A impressão produzida tem a forma de um losango alongado, idealmente com razão largura:comprimento igual a 1:7,1 (Figura 20). Como essa relação é conhecida, mede-se apenas a diagonal maior.

¹ Areia quartzosa, conforme NBR 7214 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982), passante na peneira de malha quadrada com abertura 0,6mm e retida na peneira de malha quadrada com de abertura 0,3mm.

Figura 20 – Impressão produzida por carga de 200gf em cobre. O comprimento da diagonal maior é 160 μ m. Aumento 480X.

Fonte: Quitete (2002).

A dureza *Knoop* é então calculada como:

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{1.450,6 \cdot F}{l^2} \cdot 9,807$$

onde:

HK = Dureza *Knoop* (GPa)

F = Carga aplicada em N (1,961 N = 200gf)

A = Área da impressão, projetada na superfície ortogonal à carga (mm²)

l = Comprimento da diagonal maior da impressão (μ m)

Após a seleção das amostras a serem estudadas, a face submetida a desgaste, do corpo-de-prova designado 1, é polida com politriz manual, utilizando-se discos abrasivos em granulações decrescentes (60, 150, 300, 500, 1.000, 2.000 e 3.000 *mesh*; equivalentes a 250, 105, 45, 25, 12, 6 e 4 μ m). Após polimento, a base do corpo-de-prova é desgastada mediante torno com rebole diamantado, para garantir o paralelismo com a superfície polida.

A dureza *Knoop* é então determinada através de 40 impressões em cada corpo-de-prova (Figura 21). O comprimento da diagonal é medido, em micrômetros, imediatamente após cada impressão, sob a objetiva de 50X (aumento total de 500X) com o auxílio da escala *vernier* no sistema da ocular do aparelho. Se a superfície na área da impressão ficar danificada a ponto de impedir a identificação das extremidades da diagonal, uma nova impressão é feita, de preferência no mesmo grão mineral, ou seja, em área adjacente e com mesma cor (refletância) e textura.

Figura 21 – Impressão produzida por carga de 200 gf em biotita-hornblenda quartzo monzonito “Preto Piracaia” (amostra IPT-SP 18) como é visualizada no microdurômetro *Miniload 2*. O comprimento da diagonal maior é 66µm. Notar a presença de 3 grãos minerais na área da foto (esquerda, centro e direita). Aumento 650X.

Fonte: Quitete (2002).

Como a ponta *Knoop* produz uma impressão anisotrópica e o aparelho utilizado não permite sua rotação de forma fácil e sistemática, o Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT optou por, ao invés da simples movimentação da platina (base) nos eixos X-Y, pela movimentação da platina em apenas um eixo e rotação do corpo-de-prova, conforme descrito a seguir. As primeiras 5 medidas são

obtidas, 4mm a partir do centro do corpo-de-prova, em um mesmo segmento de reta na direção da diagonal maior da impressão, espaçadas por 4mm. A seguir o corpo-de-prova é rotacionado por aproximadamente 45° e mais 5 medidas são feitas, inicialmente a 20mm a partir do centro e com o mesmo espaçamento. Este procedimento é repetido até se completar as 40 medidas, conforme o esquema ilustrativo na Figura 22.

Figura 22 – Esquema das 40 impressões realizadas em cada corpo-de-prova. Os números indicam a ordem em que foram feitas.

Fonte: Quitete (2002)

De acordo com o procedimento descrito, baseado na norma EN14205 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2003), são realizadas 10 medidas em 4 direções a 45° . As impressões são feitas com carga de 1,96N (200gf) e medidas em um aparelho modelo *Miniload 2*, marca E. Leitz (Figura 23). Previamente às medidas em cada um dos corpos-de-prova, são efetuadas 3 impressões em uma placa de cobre, para limpeza da ponta de diamante.

Após o cálculo da dureza nas 40 impressões os valores são distribuídos em ordem crescente. Dessa distribuição obtêm-se os valores relativos aos primeiros 25% (25º percentil ou quartil inferior), 50% (mediana) e 75% (75º percentil ou quartil superior) da curva, designados “frequências cumulativas”: HK_{25} , HK_{50} e HK_{75} . Calcula-se também a dureza média e o “coeficiente de heterogeneidade”, adotado como HK_{75}/HK_{25} .

Figura 23 – Microdurômetro marca E. Leitz, modelo Miniload 2. Os corpos-de-prova da foto têm 5cm de largura. O objeto redondo é a placa de cobre usada para limpeza da ponta de diamante.

No manual do aparelho, o fabricante considera uma incerteza de 2 a 3% na medida de diagonais maiores que $30\mu\text{m}$. Como a dureza é inversamente proporcional ao quadrado da diagonal, a incerteza na dureza varia entre 4 e 9%, em condições ideais (superfície com bom polimento e extremidades da diagonal bem definidas).

4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO RISCO

Os ensaios de resistência ao risco são utilizados para produzir sulcos na superfície de um material, servindo para o estudo dos mecanismos de deformação e/ou remoção do material; avalia-se também a resistência à abrasão dos materiais, a dureza dinâmica e a adesão de camadas num substrato.

Nos equipamentos que simulam abrasão em condições de baixa velocidade, o movimento do penetrador pode ser linear numa única direção, linear alternado ou circular, como ilustrado na figura 24a-c. Nestes equipamentos a carga é fixada através de pesos ou molas; a profundidade de penetração, portanto, depende da resposta do material frente aos esforços (VÉLEZ-RESTREPO, 1997).

A simulação do desgaste abrasivo no qual a partícula se desloca com alta velocidade sobre o material pode ser feita num pêndulo para ensaio Charpy modificado (Figura 24d), denominado esclerômetro pendular, ou numa retífica modificada (Figura 24e). A carga normal não pode ser escolhida, pois ela é o resultado da profundidade do risco e das propriedades do material (VÉLEZ-RESTREPO, 1997).

Figura 24 – Descrição do tipo de ensaio.
Fonte: Vélez-Restrepo (1997).

5 ENSAIO DE ABRASÃO POR IMPACTO DESLIZANTE

5.1 Introdução

O ensaio de abrasão por impacto deslizante (*Gouging Abrasion Test*), proposto por Golovanevskiy e Bearman (2008), é realizado em condições de alta tensão/alto impacto de desgaste e é caracterizado pela maior taxa de remoção de material de todos os modos de desgaste e, portanto, representa o modo mais severo de desgaste abrasivo.

Como o desgaste, dramaticamente, influencia o processo de desempenho dos equipamentos, é fundamental para estabelecer uma base para equações de predição de taxas de desgaste potencial. Até a presente data ainda não houve um teste que possa ser usado para estabelecer as bases de aplicação deste tipo de desgaste.

No próximo item, o *Gouging Abrasion Index* é apresentado e descrito o método de ensaio.

5.2 *Gouging Abrasion Index* (Gi)

5.2.1 Equipamentos e método de ensaio

Este ensaio simula tensões de abrasão muito elevadas em condições de alta energia de impacto. O ensaio é realizado como descrito a seguir.

Uma amostra de rocha plana retangular é colocada em um porta-amostra. Uma ponteira de aço, com a ponta cônica, é afixada ao braço de um pêndulo em balanço e o arco da viagem do pêndulo é ajustado de modo que a ponteira, forçosamente, entre em contato com a superfície da amostra da rocha. Este contato deve ocorrer na região de maior energia cinética do pêndulo e em uma única passada.

O esquema do aparelho de ensaio de abrasão *Gouging* é mostrado na Figura 25. O equipamento, nada mais é do que o pêndulo para ensaio de impacto *Charpy* modificado. Aqui, a amostra da rocha é fixada de forma segura no porta-amostra. O porta-amostra pode ser movido verticalmente através de parafusos (1; 3; 4 e 6). Isto é possível porque a base do porta-amostra é composta de duas placas

metálicas superpostas (Figura 26), de modo que, a placa superior desloca-se em relação à placa inferior com o auxílio dos parafusos já mencionados. O porta-amostra pode ser fixado, em sua base, em duas posições diferentes, o que permite dois ensaios para cada corpo-de-prova. (Figura 27). Uma ponteira de desgaste, 8, é rigidamente posicionada no porta-ponteira, 7, do braço do pêndulo, 9. O braço do pêndulo é liberado de sua posição de trabalho e assim a ponta da ponteira é aplicada à superfície da amostra de rocha na descida do pêndulo. A energia de impacto total disponível é de aproximadamente 300J e a velocidade de impacto é da ordem de 5,2 m/s.

Figura 25 – Diagrama do aparelho de ensaio abrasivo por impacto deslizante.

Figura 26 – Base do porta-amostra.

Figura 27 – Base do porta-amostra destacando as duas possibilidades de fixação.

A Figura 28 mostra o aparelho de ensaio que foi utilizado (marca: WEB-WERKSTOFFPRÜFMASCHINE).

Figura 28 – Aparelho de ensaio abrasivo por impacto deslizante.

5.2.2 Corpos-de-prova

É essencial assegurar a uniformidade das condições de ensaio para permitir a comparação de testes. No ensaio *Gouging*, grande ênfase é dada sobre as dimensões e qualidade da superfície de desgaste do corpo-de-prova, sendo assim, cada corpo-de-prova, com dimensão final de 100 x 30 X 11 mm (C x L x E), foi preparado, inicialmente, com serra diamantada (Figura 15). Após esta etapa, a base e o topo, do corpo-de-prova, foram desgastados mediante torno com rebolo diamantado (Figura 29), para garantir paralelismo entre ambos, bem como para excluir a influência da rugosidade da superfície no resultado dos ensaios. Isto está ilustrado na Figura 30.

Figura 29 – Corpo-de-prova preparado para ser desgastado pelo torno.

Figura 30 – Aparência de corpo-de-prova para ensaio.

Após cada uma das duas etapas, citadas no parágrafo anterior, o corpo-de-prova deve ser inspecionado quanto a defeitos inerentes ou defeitos induzidos pelo corte ou desgaste e descartado, caso seja considerado impróprio para o teste. Se considerado satisfatório, o corpo-de-prova deve então ser seco por 3 h em uma estufa a 60°C, ou por 24 h, em temperatura ambiente.

5.2.3 Ponteira de desgaste

A dureza da ponteira de desgaste deve ser tal que garanta uma medida confiável da remoção de material, sofrida por esta ferramenta, durante o teste de abrasão *Gouging* para uma ampla faixa de rochas e minerais. Ela não pode ser muito alta ou muito baixa, pois isto poderia levar a um insuficiente ou excessivo desgaste da ferramenta. Neste contexto, o nível de dureza *Rockwell* de 40/42 HRC foi encontrado como sendo razoável para testar uma série de rochas, cobrindo uma boa faixa de abrasividade (GOLOVANEVSKIY; BEARMAN, 2008).

As ponteiras têm, em uma de suas extremidades, um perfil cônico de 90° terminando em uma seção de 9 mm de diâmetro. A outra extremidade tem diâmetro de 5,6 mm, sendo este o lado que encaixa no porta-ponteiras. O comprimento total é de 19 mm (Figura 31).

Figura 31 – Ponteira de desgaste.

5.2.4 Procedimento de ensaio

Os corpos-de-prova, preparados como descrito na seção 5.2.2, são montados no porta-amostra do aparelho de ensaio e presos de forma segura, de modo a impedir qualquer possibilidade de movimento durante o ensaio. Especial ênfase é dada para garantir que a superfície de desgaste da amostra de rocha esteja bem

nivelada. Para permitir ajuste e facilidade de utilização, o porta-amostra, como já descrito na seção 5.2.1, pode ser movido na vertical (de forma contínua) e na horizontal (duas posições).

A ponteira de desgaste deve ser encaixada no porta-ponteira do braço do pêndulo, de modo a garantir que quando o braço estiver totalmente suspenso (ou seja, na vertical), a ponta cônica deve apontar, verticalmente, para o corpo-de-prova. Neste ponto, há um leve contato entre a superfície do corpo-de-prova e a ponta cônica da ponteira e é, neste instante, que ela é firmemente fixada no porta-ponteira, através de parafuso (Figura 32).

Figura 32 – Ponteira de desgaste fixada na porta-ponteira.

Em seguida, o braço do pêndulo é levantado até sua posição inicial (aproximadamente 160° em relação à vertical). Um micrômetro (ver Figuras 33 e 34), fixado em uma base magnética, é posicionado de modo a medir um deslocamento vertical (ascendente, realizado como já descrito na seção 5.2.1), da base do porta amostra, de 1 mm. Isto garante 1,0 mm de profundidade, disponível entre o contato da ferramenta de desgaste e o corpo-de-prova, que por sua vez, fornece a corda de um ângulo de 78 mm de comprimento, cortando o corpo da amostra de rocha, como

ilustrado na Figura 35. Para garantir que a superfície do porta amostra está bem nivelada, um nível de bolha (tipo olho de boi) foi utilizado.

Figura 33 – Micrômetro fixado na base da máquina de ensaio para permitir a leitura de 1 mm de deslocamento vertical.

Figura 34 – Base do porta amostra de rocha com nível de bolha.

Figura 35 – Comprimento e profundidade da ranhura da amostra de rocha após ensaio.

O pêndulo, então, é liberado. A ponta cônica faz uma fenda, na amostra de rocha, na trajetória de descida do pêndulo. O pêndulo continua sua trajetória, após passar pela amostra de rocha, até parar, quando então é travado. Após o travamento do pêndulo retira-se a ponteira de desgaste para inspeção e medida de desgaste. Em seguida, o porta amostra é sacado de sua posição inicial e deslocado, lateralmente, para sua segunda posição de fixação no porta amostra (10 mm distante da posição anterior). A partir deste ponto, repete-se a operação até aqui descrita para permitir um novo desgaste na superfície da amostra em uma próxima passagem do pêndulo. Portanto, o procedimento assim descrito constitui-se de um teste com uma única passada. Para cada passagem subsequente, uma nova ponta é colocada no braço do pêndulo e repete-se o procedimento acima. A Figura 36 mostra uma seleção de amostras de rochas após o teste.

Figura 36 – Aspecto das amostras de rochas após ensaio.

5.2.5 *Gouging Abrasion Index (Gi)*

Semelhante à metodologia de cálculo de abrasividade das rochas relatado por West (1989) para o teste Cerchar, *Gouging Abrasion Index* (G_i) é calculado como sendo a média do diâmetro da ponta cônica, após desgaste, em milímetros multiplicado por 10 e é determinado como se segue.

Após o teste, a ponta cônica da ferramenta de desgaste é limpa de quaisquer detritos de rocha e a face de desgaste da ferramenta é examinada visualmente com um estereomicroscópio x4, ou maior ampliação, para avaliar sua adequação para a medida dos diâmetros. Se a face de desgaste parece ser irregular, com ranhuras, e geralmente tendo uma superfície não uniforme, a ferramenta é considerada imprópria para medida dos diâmetros e, portanto, o correspondente teste feito por esta ponta é considerado perdido.

Quando a face de desgaste encontrada for plana e, portanto, adequada para medições, as medidas de diâmetro são feitas através de um estereomicroscópio x20, ou superior ampliação, equipado com micrômetro graduado em 0,001 mm ou sistema digital de medidas com igual ou superior resolução. Como a face desgastada pode gerar uma área que não tenha o mesmo diâmetro em toda

superfície, são feitas duas medidas de diâmetro, para cada ponta, que são tomadas em direções ortogonais (Figura 37). A média, destas duas leituras, é relatada como o diâmetro da superfície da ponta cônica após desgaste, em milímetros. As projeções dos perfis de uma ponta adequada para medidas e de outra inadequada para medidas, pode ser visto na tela de projeção do microscópio x20 e são mostrados nas Figuras 38 e 39, respectivamente.

Figura 37 – Direções de medidas dos diâmetros na ferramenta de desgaste.

Figura 38 – Ponteira com perfil adequado para leitura de diâmetros. Lupa Nikon (x30).

Figura 39 – Ponteira com perfil inadequado para leitura de diâmetros. Lupa Nikon (x30).

Projeções das faces de uma ponta adequada para medidas e de outra inadequada para medidas, podem ser vistas nas Figuras 40 e 41, respectivamente.

Figura 40 – Face de ponteira adequada para medida de diâmetros (Microscópio óptico, marca Olympus BX60M).

Figura 41 - Face de ponteira inadequada para medida de diâmetros (Microscópio óptico, marca Olympus BX60M).

Para que se obtenha um valor representativo de G_i , uma série de testes devem ser realizados em uma única amostra de rocha. Na realidade, no entanto, isto é limitado pelo número de ferramentas de desgaste e pelo tamanho da amostra de rocha. Como em cada passagem usa-se uma ponta nova, um grande número de testes em uma única amostra de rocha, pode esgotar o estoque de pontas rapidamente. Por outro lado, a produção de amostras de rochas com mais de 25 mm de largura para acomodar um grande número de passagem, de pontas de desgaste, é muito difícil devido às propriedades intrínsecas da rocha (por exemplo, friáveis e/ou baixa resistência). Portanto, na prática, um mínimo de três passagens de teste deve ser feito em uma única amostra de rocha, cada uma usando uma nova ferramenta de desgaste e uma nova superfície a ser desgastada. Isto pode ser feito com três ferramentas de desgaste e uma amostra de rocha de 25 a 30 mm de largura. Golovanevskiy e Bearman (2008).

Neste trabalho, optou-se por duas passagens de teste para cada corpo-de-prova, sendo que a amostra de rocha é considerada avaliada com no mínimo 4 ponteiros com leituras de diâmetros consideradas válidas.

5.2.6 Considerações do ensaio

Sempre que estratificação é observada na rocha, os testes devem ser feitos em duas direções ortogonais: ao longo das faces e cruzando as camadas estratificadas (Figura 42), com a direção do teste claramente indicada. Este regime de teste irá garantir a mais ampla gama possível de valores de abrasividade.

Figura 42 – Direções dos ensaios para amostras estratificadas.

Quando a ferramenta de desgaste faz contato com a amostra de rocha durante o ensaio, os três seguintes resultados são possíveis:

- Uma ranhura é produzida na amostra de teste, com nenhum desgaste na ferramenta de desgaste;
- Uma ranhura é produzida na amostra, com correspondente desgaste da ferramenta de desgaste;
- Não fica claramente visível uma ranhura na amostra de teste, mas ocorre um grande desgaste da ferramenta.

Neste último caso, quando a ferramenta de desgaste não faz uma fenda na superfície da amostra de rocha, uma “marca de lápis” é produzida em vez de uma ranhura. No teste de abrasividade Cerchar, que utiliza as ferramentas de desgaste

com geometria similar, tais amostras de rocha são relatadas como sendo muito difícil para testar West (1989). No entanto, em muitos casos de ensaio de abrasão *gouging*, algumas amostras de rochas apresentam um comportamento misto, produzindo ranhura irregular, variando desde “marca de lápis”, passando por ranhura moderada a até bem definida, dentro da mesma amostra ensaiada. Isto foi especialmente evidente no caso de bandamento pronunciado ou conglomerados, como ilustrado na Figura 43. Portanto, para garantir o valor máximo dos estudos de abrasão *gouging*, os resultados de G_i para rochas que não produzem uma ranhura bem definida ainda deve ser relatado, com uma nota informando sobre a condição.

Figura 43 – Três tipos de ranhura em uma mesma amostra de rocha. (Golovanevskiy e Bearman, 2008).

6 TRABALHO REALIZADO

6.1 Seleção de rochas para estudo de abrasividade pendular

Para este estudo foi selecionado um pequeno número de amostras de rochas, mas que representam, qualitativamente, os principais tipos de rocha encontrados no Brasil, com resistência à compressão uniaxial entre 100 e 250 MPa. Estas amostras possuem suas propriedades já determinadas, e estão disponíveis para novos ensaios, os quais apresentam grande variedade de resultados destas propriedades e que tem contexto geológico conhecido. Assim pode-se obter o comportamento da abrasividade pendular sem a necessidade de uma amostragem exaustiva.

As rochas selecionadas foram:

- **Bege Bahia** – Embora comercialmente designadas como “Mármore”, o “Bege Bahia” não é uma rocha metamórfica, mas sedimentar e corresponde aos calcários da Formação Caatinga, de idade Mioceno-Pleistoceno (inferior a 23 milhões de anos), resultantes da alteração física, química e biogênica de calcários marinhos neoproterozóicos da Formação Salitre. Trata-se, então, de calcários secundários, do tipo **calcrete** (ou caliche) Ribeiro et al. (2002). É uma rocha constituída principalmente por calcita com alguma dolomita (perfazem cerca de 95% da rocha) com quantidades variáveis de sílica como quartzo e calcedônia. É extraído principalmente no município de Ouralândia, BA.

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA	
Calcário Micrítico	
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	
Compressão uniaxial (MPa)	154,2
Desgaste Amsler (mm/1000m)	2,18
Dureza Knoop (GPa)	1,870
Gouging Abrasion Index (Gi)	13,02

Quadro 1 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Bege Bahia.

- **Mármore Branco Mantiqueira** – Embora praticamente sem exploração comercial, representa os mármore, encontrados em diversos locais no Brasil, como por exemplo, na região de Cachoeiro do Itapemirín, ES (FRASCÁ, 2000). Constitui corpos isolados associados aos gnaisses paleoproterozóicos do Complexo Piracaia. É um dolomita mármore (rocha metamórfica, portanto) constituído por cerca de 90% de dolomita e 7% de calcita com a sílica sob a forma de silicatos tais como olivina, tremolita, serpentina e talco. Ocorre no município de Campos do Jordão, SP.

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA	
Calcita dolomita mármore	
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	
Compressão uniaxial (MPa)	108,5
Desgaste Amsler (mm/1000m)	4,42
Dureza Knoop	2,982
Gouging Abrasion Index (Gi)	15,46

Quadro 2 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Mármore Branco Mantiqueira.

- **Arenito** – Os arenitos ocorrem na região central do Estado de São Paulo nas Formações Botucatu e Pirambóia, da Bacia do Paraná. Possuem origem eólica, como fruto do clima árido que ocorreu na região, na transição entre o Permiano e o Triássico (cerca de 250 milhões de anos). São constituídos praticamente por 100% de grãos finos e arredondados de quartzo, com graus variados de cimentação, principalmente por calcedônia (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1981).

<i>CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA</i>	
Quartzo Arenito	
<i>CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA</i>	
Compressão uniaxial (MPa)	131,5 par 192,8 ort
Desgaste Amsler (mm/1000m)	1,25
Dureza Knoop (GPa)	11,070
Gouging Abrasion Index (Gi)	20,17 par 19,92 ort

Quadro 3 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Arenito.

- **Basalto** – Formado pelos extensos derrames vulcânicos cretáceos – entre 119 e 145 milhões de anos - na Bacia do Paraná que ocorrem nos estados de SP, PR, MS, GO, SC, RS e MG. A amostra utilizada é procedente do MS.

<i>CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA</i>	
Basalto	
<i>CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA</i>	
Compressão uniaxial (MPa)	229,9
Desgaste Amsler (mm/1000m)	1,24
Dureza Knoop (GPa)	4,340
Gouging Abrasion Index (Gi)	16,44

Quadro 4 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Basalto.

- **Gabro** – O diabásio utilizado é extraído no município de Taió, SC na localidade designada de Cachoeira e ocorre como intrusões concordantes (sills) e por vezes discordantes (diques) do magma correlato à Formação Serra Geral nos sedimentos mais antigos da Bacia do Paraná.

Contemporâneos, portanto aos basaltos, foram formados no Período Cretáceo – entre 119 e 145 milhões de anos. Predomina labradorita [feldspato] (50%). Augita [piroxênio] (30%), opacos – magnetita e ilmenita (15%) e até 5 % de quartzo.

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA	
Diabásio	
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	
Compressão uniaxial (MPa)	243
Desgaste Amsler (mm/1000m)	0,52
Dureza Knoop (GPa)	5,990
Gouging Abrasion Index (Gi)	17,05

Quadro 5 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Gabro.

- **Granito Cinza Mauá** – Extraído no Município de Suzano, SP é um biotita monzogranito porfirítico, rocha ígnea intrusiva no Complexo Embu, com idade de 710 milhões de anos. Apresenta matriz fina com fenocristais de até 2 cm e é composto por microclínio (25%), plagioclásio (30%), quartzo (30%) e biotita (15%).

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA	
Biotita Monzogranito Porfirítico	
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	
Compressão uniaxial (MPa)	147,3
Desgaste Amsler (mm/1000m)	0,76
Dureza Knoop (GPa)	7,146
Gouging Abrasion Index (Gi)	18,60

Quadro 6 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Granito Cinza Mauá.

- **Granito Vermelho Capão Bonito** – extraído no município homônimo, no sul do Estado de São Paulo. É um biotita monzogranito, rocha ígnea intrusiva na Faixa Ribeira, com idade de aproximadamente 700 milhões de anos. Possui granulação média, homogênea e é composto principalmente por microclínio (35%), quartzo (30%), plagioclásio (25%) e biotita (10%).

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA	
Biotita Monzogranito	
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	
Compressão uniaxial (MPa)	149,8
Desgaste Amsler (mm/1000m)	0,60
Dureza Knoop (GPa)	7,926
Gouging Abrasion Index (Gi)	17,98

Quadro 7 – Classificação petrográfica e caracterização tecnológica: Granito Vermelho Capão Bonito.

Em seguida, é apresentado um quadro com o Gi das rochas estudadas, bem como um quadro resumo da caracterização tecnológica.

Rocha	Gi		
	Média	Desvio Padrão	Nº de Ponteiros
Bege Bahia	13,02	1,32	5
Branco Mantiqueira	15,46	0,55	4
Capão Bonito	17,98	0,85	6
Arenito Paralelo	20,17	0,87	6
Arenito Perpendicular	19,92	0,98	5
Gabro	17,05	1,63	6
Basalto	16,44	0,91	5
Cinza Mauá	18,60	0,85	5

Quadro 8 – Gouging Abrasion Index (Gi) das rochas estudadas.

		Bege Bahia	Branco Mantiqueira	Capão Bonito	Arenito	Gabro	Basalto	Cinza Maua
Procedência (Estado)		BA	SP	SP	SP	SC	MS	SP
Amostra (Ref. IPT)		243/09	SP29	SP02	417/09	322/08	013/10	AM21/SP01
Classificação Petrográfica		Calcário micrítico	Calcita dolomita mármore	Biotita monzogranito	Quartzo arenito	Gabro	Basalto	Biotita monzogranito porfirítico
Gouging Abrasion Index (Gi)		13,02	15,46	17,98	20,17	17,05	16,44	18,60
Quartzo (% em volume)		0	0	30	55	0,5	<1	30
Granulação (aproximadamente)		fina	média	média	fina	fina	muito fina	fina/ porfirítica
Desgaste Amsler	C.P. 1	2,070	4,330	0,590	1,310	0,490	1,230	0,780
	C.P. 2	2,300	4,520	0,620	1,190	0,540	1,250	0,750
	Média	2,180	4,420	0,600	1,250	0,520	1,240	0,760
Dureza Knoop (Gpa)	Media (GPa)	1,870	2,982	7,926	11,070	5,990	4,340	7,146
	C.de Heter.	1,350	2,290	1,410	1,360	1,240	1,310	1,450
RCU NBR 12767	MPa	154,2	108,5	149,8	131,5 par 192,8 ort	2,430	229,9	147,3
	Desvio Padrão	16,30	12,10	13,60	8,1 par 18,6 ort	29,00	8,50	22,00

Obs.: par = paralelo ort = ortogonal

Quadro 9 – Resumo da caracterização tecnológica.

6.2 Resultados

Após execução dos ensaios, para se obter os valores de Gi para as rochas selecionadas, pode-se, então, verificar o grau de correlação entre este parâmetro e os demais propostos, quais sejam, resistência a compressão uniaxial, desgaste *Amsler* e dureza *Knoop*.

A partir destes dados obteve-se os seguintes valores de coeficiente de determinação:

- Resistência à Compressão Uniaxial e *Gouging Abrasion Index* de 0,1351 (Figura 44).
- Desgaste *Amsler* e *Gouging Abrasion Index* de 0,4122 (Figura 45).
- Dureza *Knoop* e *Gouging Abrasion Index* de 0,9464 (Figura 46).

Figura 44 – Valores de compressão uniaxial x Gi.

Figura 45 – Valores desgaste Amsler x Gi.

Figura 46 – Valores de dureza Knoop x Gi.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Resgatando-se a essência do que cada ensaio realmente representa e sob esta ótica, avaliar o grau de correlação obtido.

Resistência à compressão uniaxial, pode ser considerado um ensaio quase-estático, que irá determinar a menor resistência da rocha, que em sua grande maioria está condicionada pela existência de planos de fraqueza (evidentes ou não).

O desgaste *Amsler* é um ensaio dinâmico que verifica o desgaste à abrasão (por atrito) em uma superfície de rocha utilizando-se de um agente intermediário (areia). É influenciado pela mineralogia e textura (granulação, arranjo mineral) da amostra.

A dureza *Knoop* é um ensaio quase-estático, onde se tem a medida em um número de pontos (40) significativos e que, portanto, ao final, irá fornecer um parâmetro representativo da influência das características mineralógicas, texturais e estruturais.

O *Gouging abrasion index* (Gi) é um ensaio dinâmico em que uma ponteira de metal impacta e atrita contra a rocha, com alta energia. O resultado do ensaio é fortemente condicionado pelas características mineralógicas, texturais e estruturais da rocha.

8 CONCLUSÃO

Pelas correlações encontradas (R^2 de RCU x Gi de 0,1351; R^2 de Amsler x Gi de 0,4122; R^2 de Knoop x Gi de 0,9464), e tendo em vista a natureza dos ensaios estudados, pode-se inferir que: os dois métodos, Knoop e Gi, verificam as mesmas propriedades dos materiais estudados.

Embora Gi seja essencialmente dinâmico e o Knoop quase-estático, ambos fornecem resultados influenciados fortemente pelos aspectos mineralógicos, texturais e estruturais das rochas ensaiadas. Daí ser bastante consistente a correlação entre os resultados obtidos sobre as mesmas amostras de rochas para ambos.

Deve-se notar que o volume percentual de quartzo nas amostras, foi um forte condicionante de desgaste da ponteira. (ver Quadro 9).

9 DESENVOLVIMENTO FUTURO

Como o equipamento de ensaio tem como recurso a leitura da energia inicial e final do pêndulo, pode-se constatar que, em um reduzido número de ponteiros, apesar de o desgaste das mesmas terem sido praticamente idênticos, o pêndulo ficou com energia final diferente.

Portanto, este efeito deve ser melhor avaliado para verificar se, a rocha que deixou o pêndulo em posição de menor energia, apesar de proporcionar o mesmo tempo de vida útil, por exemplo de uma broca, exigirá maior energia quando submetida a um mesmo trabalho que a outra rocha (em que o pêndulo ficou em posição de maior energia final).

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D7012**: standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 12042: materiais inorgânicos, determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1992.

BOUGARD, J.F., 1974. Propositions relatives aux mesures et essais a effectuer dans le cadre d'un chatier de creusement mecanique. Tunnels et Ouvrages Souterrains(5), 215.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN14205: natural stone test methods, determination of Knoop hardness. Brussels, 2003.

DEKETH, H.J.R. **Wear of rock cutting tools**: laboratory experiments on the abrasivity of rock. Rotterdam: A.A.Abalkema, 1995. 143p.

FRASCÁ, M.H.B.de O. (Coord.). **Rochas ornamentais e de revestimento do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 2000. 1Cd-Rom. (IPT, Publicação, 2651)

FRASCÁ, M.H.B.de O.; SARTORI, P.L. Minerais e rochas. In: OLIVEIRA A.M.dos S.; BRITO, S.N.A.de (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. Cap.2, p.15-38.

FRAZÃO, E.B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. São Paulo: ABGE, 2002. 132p.

GOLOVANEVSKIY, V.A.; BEARMAN, R.A. Gouging abrasion test for rock abrasiveness testing. **International Journal of Mineral Processing**, v.85, p.111-120, 2008.

INNAURATO, N.; MANCINI, R. Forecasting the rock abrasivity in the civil and mining technological fields. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF THE ROCK MECHANICS REGIONAL SYMPOSIUM PREDICTION AND PERFORMANCE IN ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING, EUROCK'96, 1996, Torino. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1996. v.2, p.699-706.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. 2v. (IPT. Publicação, 1184, Monografia, 6)

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, Int Soc Rock Mech Commun Stand Lab Field Tests. **International Journal of Rock**

Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v.16, n.2, p.135–140, 1979.

KAHRAMAN, S. Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v.36, p.981-989, 1999.

KAHRAMAN, S. et al. Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v.40, p.711-723, 2003.

KNOOP, F. et al. A sensitive pyramidal-diamond tool for indentation measurements. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v.23, p.39-61, 1939. (RP1220).

LIM, W.I.L.; CAMPBELL, J.J.; TONDO, L.A., 1997. Extrusion effects in the high pressure grinding rolls. In: Kawatra, S.K. (Ed.), *Comminution Practices*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton,, Colorado, pp. 293-301.

PLINNINGER, R.J. et al. Prediction and cassification of tool wear in drill and blast tunnelling. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF THE ENGINEERING GEOLOGY CONGRESS: ENGINEERING GEOLOGY FOR DEVELOPING COUTRIES, 9., 2002, Durban, South Africa. **Ext. Abstracts: 395...** 2002. Cd-Rom 2226-2236.

PLINNINGER, R.J. et al. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v.40, p.259-263, 2003.

PLINNINGER, R.J. et al. Wear prediction in hardrock excavation using the CERCHAR abrasiveness index (CAI). In: SCHUBERT, W. (ed.) **Rock engineering: theory and practice**. Essen: Glückauf, 2004. p.599-604. (Proceedings of the International Society of Rock Mechanics Regional Symposium of EUROCK, 2004 and Geomechanics Colloquym, 53., 2004, Salzburg.)

QUITETE, E.B. (2002). **Dureza Knoop em rochas para revestimento: Metodologia e correlação com desgaste abrasivo**. São Paulo, 2002. 70p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. New York: John Wiley, 1965. 244p.

RIBEIRO, A.F. et al. (2002). **Mármore Bege Bahia em Ouarolândia-Mirangaba-Jacobina, Bahia: geologia, potencialidade e desenvolvimento integrado**. Salvador: CBPM. 56p. (Série Arquivos Abertos; 17).

THURO, K., PLINNINGER, R.J. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, TECHNOLOGY ROADMAP FOR ROCK MECHANICS, 2003- South African Institute of Mining and Metallurgy. p.1–7.

THURO, K., PLINNINGER, R.J. (1998). Geological limits in roadheader excavation – four case studies. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY CONGRESS, 8., Vancouver, 1998. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1998. v.5, p.3545-3552.

THURO, K., SPAUN, G. (1996). Introducing 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill- and blast tunnelling. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF THE ROCK MECHANICS REGIONAL SYMPOSIUM PREDICTION AND PERFORMANCE IN ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING, EUROCK'96, 1996, Torino. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1996. v.2, p.707-713.

VALANTIN, A.; GUILLON, P., 1971. Determination de La nocivité des roches vis-à-vis des pics. Tests de dureté et d'abrasivité. Ref. AMO-PGu/ES-71-73-37/1, (CERCHAR) Verneuil-en-halette.

VELEZ RESTREPO, J.M. **Estudo da resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos nodulares austemperados e temperados e revinidos utilizando um esclerômetro pendular.** São Paulo, 1997. 226p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

WEST, G. (1982). A review of rock abrasiveness for tunneling. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK ROCK, Tokyo, 1981. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1982. v. 3, p.585-594.

WEST, G. (1989). Technical note: rock abrasiveness testing for tunneling. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract**, v.26, n.2, p.151-160.

ZUM-GAHR, K.H. **Microstructure and wear of materials.** Siegen: Institute of Materials Technology, University of Siegen, Federal Republic of Germany, 1987.

APÊNDICE

Leitura digital do diâmetro das ponteiros, realizada no Microscópio Óptico, marca Olympus BX60M.

	Rocha	Corpo-de-prova	Comprimento de Diâmetro
1	Bege Bahia	BB_CP1_2.jpg	1.145.172
2		BB_CP1_2.jpg	1.136.964
3		BB_CP2_1.jpg	1.471.243
4		BB_CP2_1.jpg	1.110.526
5		BB_CP2_2.jpg	1.456.579
6		BB_CP2_2.jpg	1.355.810
7		BB_CP3_1.jpg	1.453.843
8		BB_CP3_1.jpg	1.464.282
9		BB_CP4_2.jpg	1.178.010
10		BB_CP4_2.jpg	1.247.025
11	Branco Mantiqueira	BM_CP1_2.jpg	1.634.211
12		BM_CP1_2.jpg	1.469.614
13		BM_CP2_1.jpg	1.563.158
14		BM_CP2_1.jpg	1.446.991
15		BM_CP2_2.jpg	1.653.947
16		BM_CP2_2.jpg	1.590.789
17		BM_CP3_1.jpg	1.539.474
18		BM_CP3_1.jpg	1.472.797
19	Arenito Paralelo	A_CP1_1.jpg	1.993.738
20		A_CP1_1.jpg	1.989.474
21		A_CP1_2h.jpg	2.033.140
22		A_CP1_2v.jpg	2.036.842
23		A_CP2_1h.jpg	2.115.793
24		A_CP2_1v.jpg	2.119.829
25		A_CP2_2.jpg	1.890.789
26		A_CP2_2.jpg	1.835.526
27		A_CP3_1h.jpg	2.131.612
28		A_CP3_1v.jpg	2.009.307
29		A_CP3_2.jpg	2.123.699
30		A_CP3_2.jpg	1.926.316
31	Arenito Perpendicular	AP_CP1_2.jpg	2.009.211
32		AP_CP1_2.jpg	1.857.237
33		AP_CP2_2h.jpg	2.188.819
34		AP_CP2_2v.jpg	2.017.105
35		AP_CP3_2h.jpg	2.155.263
36		AP_CP3_2v.jpg	2.028.947
37		AP_CP4_1.jpg	1.973.684
38		AP_CP4_1.jpg	1.902.632
39		AP_CP4_2.jpg	1.989.474
40		AP_CP4_2.jpg	1.796.053

	Rocha	Corpo-de-prova	Comprimento de Diâmetro
41	Cinza Mauá	CM_CP1_1.jpg	1.906.583
42		CM_CP1_1.jpg	1.760.526
43		CM_CP1_2.jpg	1.938.158
44		CM_CP1_2.jpg	1.845.399
45		CM_CP2_1.jpg	2.048.684
46		CM_CP2_1.jpg	1.798.044
47		CM_CP2_2.jpg	1.756.579
48		CM_CP2_2.jpg	1.717.872
49		CM_CP3_1.jpg	1.993.671
50		CM_CP3_1.jpg	1.839.195
51	Capão Bonito	CB_CP1_1.jpg	1.985.526
52		CB_CP1_1.jpg	1.819.775
53		CB_CP1_2.jpg	1.894.737
54		CB_CP1_2.jpg	1.776.316
55		CB_CP2_1.jpg	1.693.462
56		CB_CP2_1.jpg	1.606.598
57		CB_CP2_2.jpg	1.903.221
58		CB_CP2_2.jpg	1.767.231
59		CB_CP3_1.jpg	1.827.649
60		CB_CP3_1.jpg	1.732.895
61	Basalto	CB_CP3_2.jpg	1.819.737
62		CB_CP3_2.jpg	1.748.969
63		B_CP1_1.jpg	1.667.659
64		B_CP1_1.jpg	1.591.749
65		B_CP1_2.jpg	1.713.176
66		B_CP1_2.jpg	1.634.006
67		B_CP2_1.jpg	1.657.895
68		B_CP2_1.jpg	1.515.852
69		B_CP2_2.jpg	1.812.569
70		B_CP2_2.jpg	1.752.849
71	Gabro	B_CP3_1.jpg	1.586.842
72		B_CP3_1.jpg	1.507.895
73		G_CP2_1.jpg	1.685.526
74		G_CP2_1.jpg	1.638.163
75		G_CP2_2.jpg	1.851.467
76		G_CP2_2.jpg	1.697.368
77		G_CP3_1.jpg	1.776.320
78		G_CP3_1.jpg	1.646.057
79		G_CP3_2.jpg	1.859.215
80		G_CP3_2.jpg	1.677.748
81		G_CP4_1.jpg	1.681.579
82		G_CP4_1.jpg	1.537.505
83		G_CP4_2.jpg	1.744.737
84		G_CP4_2.jpg	1.658.571

Legenda: BB – Bege Bahia
 BM – Branco Mantiqueira
 A – Arenito paralelo
 AP – Arenito perpendicular
 CM – Cinza Mauá
 CB – Capão Bonito
 B – Basalto
 G – Gabro