

# A ABRASIVIDADE DE ROCHAS NOS ESTUDOS DO METRÔ DE SÃO PAULO: ensaios, classificações, influência do grau de alteração e considerações sobre o consumo de ferramentas de corte em escavações subterrâneas

ROCK ABRASIVITY IN SÃO PAULO SUBWAY STUDIES:  
TESTS, CLASSIFICATIONS, INFLUENCE OF WEATHERING AND CONSIDERATIONS  
ABOUT THE TOOL WEAR PREDICTION IN UNDERGROUND EXCAVATIONS

MARCELO DENSER MONTEIRO

*Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ, São Paulo, SP, Brasil  
E-mail: mdmonteiro@metrosp.com.br*

HUGO CÁSSIO ROCHA

*Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ, São Paulo, SP, Brasil  
E-mail: hcrocha@metrosp.com.br*

## RESUMO ABSTRACT

Alguns dos aspectos mais importantes no estudo de escavações subterrâneas em rochas são os efeitos da abrasividade que solos e rochas exercem sobre ferramentas de corte. O consumo destas ferramentas é um fator que deve ser adequadamente avaliado, pois pode provocar aumento de custos e atrasos em cronogramas. Este artigo apresenta a evolução dos estudos do Metrô de São Paulo relacionados às propriedades abrasivas das rochas na Região Metropolitana de São Paulo por meio da realização de ensaios de petrografia em rocha, resistência à compressão uniaxial e abrasividade CERCHAR, com a aplicação destes em alguns métodos de classificação internacionalmente utilizados, tais como o conteúdo de quartzo-equivalente (eQc), o índice de abrasividade CERCHAR (CAI) e o índice de abrasividade de rochas (RAI). O artigo apresenta também uma importante discussão sobre a influência do grau de alteração sobre os resultados destes ensaios. Foi observado que os valores dos parâmetros de abrasividade decrescem bastante com o aumento do grau de alteração. Apenas aspectos mineralógicos não são suficientes para avaliar a abrasividade de maneira adequada,

Some of the most important aspects in the study of underground excavations in rocks are the effects of abrasiveness that soils and rocks carry on cutting tools. The use of these tools is a factor that should be properly assessed because it may increase costs and delays in schedules. This paper presents the evolution of the São Paulo Metro's studies related to abrasive properties of rocks in the Metropolitan Region of São Paulo through the realization of petrography on rock, uniaxial compressive strength test and abrasivity CERCHAR test, with the application of these in some methods of characterization internationally used, such as quartz-equivalent content, the CERCHAR abrasiveness index (CAI) and the rock abrasivity index (RAI). The paper also presents an important discussion about the influence of the degree of weathering on the results of these tests. The value of the abrasivity parameters decrease with the increased of the weathering of samples. Only mineralogical aspects are not sufficient to evaluate the abrasiveness properly and is required

sendo necessária uma abordagem em função das condições geomecânicas. Por fim são feitas estimativas de consumo de ferramentas de corte para as rochas avaliadas em função dos índices CERCHAR e RAI. O Granito Cantareira apresentou maior consumo de ferramentas em relação às rochas graníticas e gnáissicas do Complexo Embu.

**Palavras-chave** – Abrasividade de rochas, CERCHAR, conteúdo de quartzo-equivalente, consumo de ferramentas, propriedades mecânicas das rochas.

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta a evolução dos estudos das propriedades relacionadas à abrasividade das rochas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), realizados por colaboradores da área de geotecnia do Metrô de São Paulo, no âmbito das etapas de investigação geológico-geotécnica para os projetos Básico e Executivo de suas linhas. Os primeiros resultados da experiência recente do Metrô de São Paulo em seus estudos de abrasividade de rochas estão publicados e compartilhados com a comunidade técnico-científica por meio dos trabalhos de Monteiro et al. (2011) e Monteiro et al. (2012), apresentados respectivamente em congressos da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) e do Comitê Brasileiro de Túneis (CBT).

O estudo dos parâmetros relacionados à abrasividade é de fundamental importância na execução de obras em maciços rochosos, tanto para escavações *drilling & blasting* (a fogo), como mecanizadas com tuneladoras (em inglês *tunnel boring machine* – TBM) ou fresadoras. A abrasividade é uma propriedade diretamente associada às características intrínsecas das rochas (mineralogia, textura, estruturação, alteração, entre outros) que pode configurar-se como um parâmetro de fator de risco geológico associado aos custos e prazos de execução de uma obra.

ASTM (2012) menciona que os crescentes avanços tecnológicos dos métodos de escavação subterrânea, em particular o uso de tuneladoras, são imperativos quanto à necessidade do conhecimento das propriedades abrasivas das rochas. Equipamentos de escavação mecanizada, como tuneladoras, são dimensionados para escavar materiais específicos.

an approach on the geomechanical conditions. Finally tool wear rates are estimated are made according to the RAI and CERCHAR index. The Cantareira Granite showed higher wear rate of tools than the granite and gneiss of the Embu Complex.

**Keywords** – Rock abrasiveness, CERCHAR, equivalent quartz-content, tool wear rate, mechanical properties of rocks

Impactos negativos associados à danificação de cabeças de corte de máquinas tuneladoras são observados em centenas de escavações de túneis por todo o planeta. Um prognóstico adequado da abrasividade de solos e rochas em projeto é de grande importância para projetistas, executoras e contratantes de obras (Nilsen et al. 2007).

A abrasividade é um parâmetro inserido no contexto do estudo das rochas de dureza extremamente elevada, integrante da matriz de probabilidade de riscos geológicos de Pastore (2009). A não utilização de ferramentas adequadas para a sua definição pode dificultar a identificação no modelo geológico/geomecânico conceitual das rochas que podem oferecer grande resistência às ferramentas de corte, levando ao aumento do consumo das mesmas durante uma obra, aumentando seus custos e gerando eventuais reivindicações, uma vez que o risco geológico, em geral, fica como responsabilidade do dono da obra. Isto ocorre pois a abrasividade das rochas é um dos fatores que governam a performance de ferramentas de corte (por exemplo de discos de corte de tuneladoras). A necessidade de substituição destas ferramentas em função do seu desgaste provoca custos que devem ser previstos e quantificados corretamente na fase de projeto e orçamento.

Neste contexto ganha importância a afirmação de Pietro (2012), que menciona que a abrasividade de solos e rochas pode resultar em significativos atrasos à obra em três casos: quando o projetista deixa de utilizar os ensaios de abrasividade em seus programas de investigação, quando a executora não tem conhecimento sobre os efeitos da abrasividade sobre os seus equipamentos de escavação e quando o contratante da obra não acompanha (ou exige o acompanhamento) da

elaboração e cumprimento de um cronograma de substituição de ferramentas de corte, o tempo necessário para estas substituições, os custos envolvidos e a documentação necessária. Soma-se à afirmação acima a certeza de que estas ocorrências provocam oneração dos custos, que podem impactar significativamente um empreendimento.

## 2 ABRASIVIDADE DE ROCHAS E TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

O termo abrasividade descreve o potencial de uma rocha ou solo causar desgaste em uma ferramenta (Plinninger 2010). Este desgaste ocorre quando uma superfície dura ou rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza em uma superfície mais macia e provoca uma série de ranhuras nelas. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas geralmente soltas (Rabinowicz 1965, apud Ribeiro 2010).

A abrasividade implica no consumo de materiais diversos que são postos em atrito contra materiais geológicos e, por esta razão, está diretamente relacionada à durabilidade destes.

### 2.1 Tipos de Desgaste de Ferramentas

Existem dois tipos de desgaste (ou consumo) de ferramentas de corte. Estes são o desgaste primário e o desgaste secundário. De acordo com Herrenknecht & Frenzel (2005) e Prieto (2012), o desgaste primário se refere ao consumo esperado (e quantificado) da superfície de ferramentas de corte tais como brocas *button bits*, discos de corte, escarificadores, etc., que são empregados em uma escavação e requerem substituição rotineira em intervalos apropriados.

Na prática podemos assumir que o desgaste primário é o desgaste que as ferramentas corte sofrem no contato direto com o maciço rochoso. Este é o tipo de desgaste que mais é abordado em estudos voltado ao consumo destas ferramentas. A forma de ação do desgaste primário em brocas do tipo *button bits* é demonstrada no trabalho de Maidl (1997). Os estudos de consumo de discos de corte em tuneladoras costumam ficar restritos à abordagem do desgaste primário.

Ainda segundo Herrenknecht & Frenzel (2005), o desgaste secundário é um consumo não

planejado e ocorre quando o desgaste primário nas ferramentas de corte é excessivo, levando ao desgaste das estruturas projetadas para fixar e suportar peças internas do equipamento. O desgaste secundário não costuma ser contabilizado ou tratado e, muitas vezes, acaba não sendo previsto. Uma outra ocorrência de desgaste secundário é a que ocorre entre o material geológico cortado e as ferramentas de transporte dentro de tuneladoras, incluindo o parafuso sem fim.

A não previsão do desgaste secundário é um fator preocupante para dimensionamento de máquinas tuneladoras. O trabalho de Nilsen et al. (2007) relata sérios problemas associados à ocorrência do desgaste secundário nas obras dos túneis Weser e Elbe (Alemanha), MTA (Singapura) e na linha S do metrô de Porto (Portugal).

Em tuneladoras do tipo *slurry*, o desgaste secundário pode ocorrer quando a parte de trás da cabeça de corte gira junto com o escudo frontal, isso faz com que o material escavado caia no fundo da câmara de escavação e este fica em atrito com o interior da cabeça de corte, desgastando as suas peças. Em tuneladoras do tipo EPB (*earth pressure balance*) o desgaste secundário pode ocorrer quando a câmara de escavação está preenchida de material escavado e pressurizada. Conforme a pressão dentro da câmara aumenta, o desgaste secundário aumenta junto (Nilsen et al. 2007).

## 3 ENSAIOS E PARÂMETROS RELACIONADOS À ABRASIVIDADE

Historicamente os estudos de abrasividade eram restritos à mineralogia e se baseavam apenas na quantidade de quartzo presente nas amostras, tendo em vista a escala de dureza Mohs. Pouco tempo depois foi desenvolvida a escala de dureza Rosiwal, que subsidiou o desenvolvimento do conteúdo de quartzo-equivalente (eQc). Posteriormente foi desenvolvido o conteúdo de minerais abrasivos (AMC), que utiliza a dureza Mohs, o quartzo-equivalente e a dureza Vickers (VHNR, do inglês *Vickers hardness number of rock*).

Plinninger (2010) menciona que o uso destes índices baseados apenas na mineralogia da rocha revelou que estes são ineficientes ao não considerarem outras características importantes das rochas, como a granulometria e a resistência mecânica. Este cenário proporcionou o desenvolvimento e

aplicação de outros ensaios e índices para melhor avaliar as propriedades abrasivas de rochas e solos.

Além dos ensaios supracitados, ganharam utilização em estudos de abrasividade a resistência à compressão uniaxial (RCU), o trabalho destruidor específico, o ensaio com martelo de Schmidt, o ensaio de carga pontual, o desgaste abrasivo Amsler, o ensaio de abrasão Los Angeles (para agregados) e a dureza Knoop, cada um com suas limitações para estudos aplicados ao consumo de ferramentas de corte em escavações subterrâneas.

Segundo Thuro & Plinninger (2003), inicialmente apenas ganharam notoriedade internacional para a aplicação supracitada o índice de abrasividade CERCHAR - CAI e o *drilling rate index* - DRI (índice de taxa de perfuração, em português). Mais recentemente foi desenvolvido o índice de abrasividade de rochas (RAI), que utiliza a resistência à compressão uniaxial (RCU) e o quartzo-equivalente. Este índice apresentou boa qualidade em suas aplicações para consumo de ferramentas em obras subterrâneas e passou a ser também bastante utilizado pela comunidade técnica europeia.

Neste trabalho são abordados os dois índices mais utilizados em escavações subterrâneas, o conteúdo de quartzo-equivalente e o índice de abrasividade CERCHAR, além do índice de abrasividade de rochas (RAI) - recentemente introduzido e com boa aplicação, bem como as relações entre estes.

### 3.1 Conteúdo de Quartzo-equivalente (eQc)

É um índice desenvolvido para indicar a potencialidade abrasiva das rochas a partir da presença de minerais abrasivos. O quartzo-equivalente é obtido a partir de análise petrográfica realizada em lâminas provenientes de amostras de rocha. Com o uso de microscópio petrográfico é determinada a porcentagem dos minerais na lâmina. O valor obtido é multiplicado pela abrasividade Rosiwal, calculada a partir da perda de volume de um mineral quando submetido ao atrito com o mineral coríndon (dureza Mohs 9).

Segundo Thuro (1997), o desgaste de uma ferramenta é resultado de uma assembleia mineral com dureza maior que do que o aço (dureza Mohs em torno de 5,5), em especial devido ao quartzo (dureza Mohs 7). O conteúdo de quartzo-equivalente é utilizado por fabricantes de equipamentos

de escavação, engenheiros e geólogos de engenharia em fase de investigação, para identificar problemas de consumo de ferramentas e, em uma análise de 42 amostras provenientes de 8 túneis, determinou a vida útil de bits em função do quartzo-equivalente, para alguns tipos de rochas.

### 3.2 Índice de Abrasividade CERCHAR (CAI).

O índice de abrasividade CERCHAR é obtido a partir do ensaio homônimo, desenvolvido na década de 70 pelo *Centre d'Etudes et Recherches des Charbonnages de France* - CERCHAR.

O ensaio consiste na fixação de uma amostra de rocha sobre a qual é deslizada uma ponteira de material com dureza conhecida. A ponteira está submetida a um peso de 7 kg, o qual fornece uma carga de 70 N. A superfície da amostra onde é aplicado o atrito da ponteira é obtida naturalmente por meio de fraturas frescas planas ou então artificialmente, neste caso, com uso de serra diamantada.

Existem duas variedades de equipamento, a configuração original (CERCHAR 1986) e a configuração de West (1989), a maior diferença entre os equipamentos diz respeito à velocidade de ensaio. O equipamento original opera a uma velocidade de 10 mm/s, ao passo que o equipamento de West opera a 1 mm/s. (ASTM 2012).

O atrito da ponteira com a superfície de ensaio proporciona um sulco de 10 mm na amostra de rocha. Com o atrito há o desgaste da ponteira, que representa o Índice de Abrasividade CERCHAR (CAI) obtido pela fórmula abaixo e que confere a classificação apontada na tabela 1.

$$CAI = 10 \times \frac{d}{c} \quad (3)$$

onde d é o diâmetro da área plana na ponteira formada pelo desgaste (mm) e c é fator de correção unitário (mm).

**Tabela 1** - Classificação dos resultados de CERCHAR a partir de Bieniawski et al. (2009).

Índice de Abrasividade CERCHAR	Classificação
> 4,00	Extremamente abrasiva
2,00 - 4,00	Muito abrasiva
1,00 - 2,00	Abrasividade média
< 1,00	Pouco abrasiva

ASTM (2012) é o documento normativo para este ensaio, ele apresenta as diretrizes e rotinas necessárias, indicando a velocidade de execução, orientação do sulco, quantidade de sulcos, etc.

Os trabalhos de West (1989) e Bieniawski et al. (2009) apontam correlação direta entre o CERCHAR e o conteúdo de quartzo-equivalente (eQc), indicando que a maior concentração de minerais de dureza elevada (principalmente quartzo, piroxênio, feldspatos e opacos) seria o fator preponderante para a abrasividade de uma rocha. Em oposição, Kasling (2000) não encontrou correlação clara entre estes.

A grande variedade de resultados do ensaio CERCHAR fez com que o mesmo fosse objeto de vários estudos com o intuito de avaliar a razão destas variações. Neste sentido, os trabalhos de Plinninger et al. (2003), Thuro & Plinninger (2003), Plinninger et al. (2004) e Kasling & Thuro (2010) indicaram que muitos fatores podem ter influência no resultado do CAI.

Os fatores geológicos apontados como responsáveis pela variabilidade nos resultados estão relacionados à anisotropia da rocha, como a orientação de planos de fraqueza a partir da foliação, espaçamento entre descontinuidades e aspectos texturais. Fatores operacionais também foram apontados como responsáveis, com destaque para a precisão da leitura do desgaste da ponteira, cuja pequena alteração pode influenciar significativamente no resultado. Plinninger et al. (2004) avaliou alguns fatores relacionados à realização do ensaio. Dentre estes o tipo de superfície de ensaio foi amplamente avaliado. O ensaio deve ser realizado em fraturas frescas produzidas por impacto de martelo. No caso de dificuldade de obter superfícies adequadas, o uso de serra diamantada é permitido, desde que aplicado um fator de correção.

Plinninger et al. (2004) afirma que o CERCHAR tem boa aplicabilidade como um indicativo para a abrasividade de rochas, no entanto, não o recomenda para a realização de cálculos mais precisos para a quantificação do consumo de ferramentas de corte, em razão do mesmo não considerar aspectos operacionais, logísticos e geológicos. Em contrapartida, o ensaio é amplamente recomendado para o cálculo da vida útil de ferramentas de corte e considerado como

representativo para a determinação da abrasividade por Bieniawski et al. (2009) e Nilsen et al. (2006). Ribeiro (2010) menciona que desde a sua aplicação nos estudos de West (1989), o ensaio passou a ser progressivamente adotado pela indústria de escavações subterrâneas.

Uma consideração importante sobre este parâmetro é proveniente do estudo de Ruehl & Alber (2006), que adaptou o equipamento com uma célula de confinamento triaxial para a amostra. Ao realizar o ensaio nas mesmas amostras sob 4 pressões de confinamento diferentes, observou que o índice CERCHAR aumenta com o aumento da pressão confinante.

### 3.3 Índice de Abrasividade de Rochas (RAI)

O índice de abrasividade de rochas (RAI) representa uma modificação ao conteúdo de quartzo-equivalente (eQc) e é aplicável não apenas para rochas sãs, mas também para rochas alteradas. O RAI é calculado pela multiplicação da resistência à compressão simples (RCU) pelo conteúdo de quartzo-equivalente (eQc), sendo definido como um índice que combina a presença de minerais abrasivos com propriedades mecânicas da rocha (Plinninger 2010).

O RAI se destaca pela praticidade em sua obtenção, uma vez que dados de petrografia e ensaios RCU costumam estar disponíveis em boas campanhas de investigação geológico-geotécnica. Mesmo assim, Plinninger (2010) menciona que na ausência destes parâmetros, o eQc pode ser substituído pela difratometria de raios-X e o RCU pelo ensaio de carga pontual (*point load test*).

A escala de classificação para o RAI (adotado de maneira adimensional) é apresentada na Tabela 02. Vale notar que não existem limites superior e inferior. Ainda segundo Plinninger (2010), os valores mais altos de RAI registrados foram em quartzitos na África do Sul (RAI de 360) e na Alemanha (RAI em torno de 200), mas a sua experiência indica que valores de até 400 são admitidos como plausíveis para este parâmetro. Os valores mais baixos são atribuídos a rochas muito alteradas, com baixa resistência mecânica.

O RAI tem sido utilizado com sucesso na Alemanha, contribuindo significativamente para avaliação das propriedades abrasivas de rochas e na previsão de consumo de ferramentas de corte.

**Tabela 2** – Classificação dos resultados de RAI a partir de Plinninger (2010).

Índice de Abrasividade de Rochas - RAI	Classificação
> 120	Extremamente abrasiva
60 - 120	Muito abrasiva
30 - 60	Abrasiva
10 - 30	Pouco abrasiva
< 10	Não abrasiva

#### 4 AMOSTRAS ENSAIADAS

Este estudo está inserido no escopo de atividades voltadas à caracterização geotécnica das rochas do embasamento da RMSP nos estudos do Metrô de São Paulo. As amostras foram coletadas em áreas onde o traçado previsto das escavações interage com as rochas do embasamento.

O Complexo Embu é a unidade geológica de maior ocorrência no embasamento da RMSP e possui uma grande variedade litológica. As suas rochas interagem com escavações nas obras da Linha 2 – Verde (região da Marginal Tietê até o município de Guarulhos), Linha 4 – Amarela (amostras do trecho entre Faria Lima e Butantã), Linha 5 – Lilás (trecho entre Borba Gato e avenida dos Bandeirantes) e Linha 6 – Laranja (região do Pacaembu). São rochas gnáissicas que foram submetidas a intensos estágios de metamorfismo,

levando a condições localizadas de fusão, sendo observados processos de migmatização e intrusão de corpos graníticos. Neste estudo suas amostras são granitos, gnaisses, anfibolitos e uma amostra de milonito (figura 1).

O Granito Cantareira é uma unidade do embasamento que será escavada nas obras da Linha 6 – Laranja (Brasilândia – São Joaquim), suas rochas apresentam granulação fina a média, textura porfirítica, com composição granodiorítica a granítica, tendo biotita granito como litotipo predominante (figura 2), nas áreas próximas à falha do Taxaquara há o desenvolvimento de uma foliação milonítica com fusão e recristalização de minerais. Estas rochas são marcadas por elevados valores de resistência à compressão uniaxial.

Apesar de não serem de uma unidade do embasamento, amostras de arenito arcóseo hidrotermalizado da Formação Resende foram inseridas neste estudo em função da sua frequente ocorrência nas obras do Metrô-SP. As amostras são oriundas da região de Anália Franco (Linha 2), Marginal Tietê (Linha 2) e Vila Clementino (Linha 5). São arenitos com forte cimentação que confere elevada dificuldade de escavação em relação ao restante do pacote sedimentar (figura 2). Estas rochas estão situadas junto a zonas de falhamentos, de onde recebem o aporte dos fluidos hidrotermais.



**Figura 1** – Amostras do Complexo Embu. Granitos (A) e Gnaisses (B). Fonte: Metrô-SP.

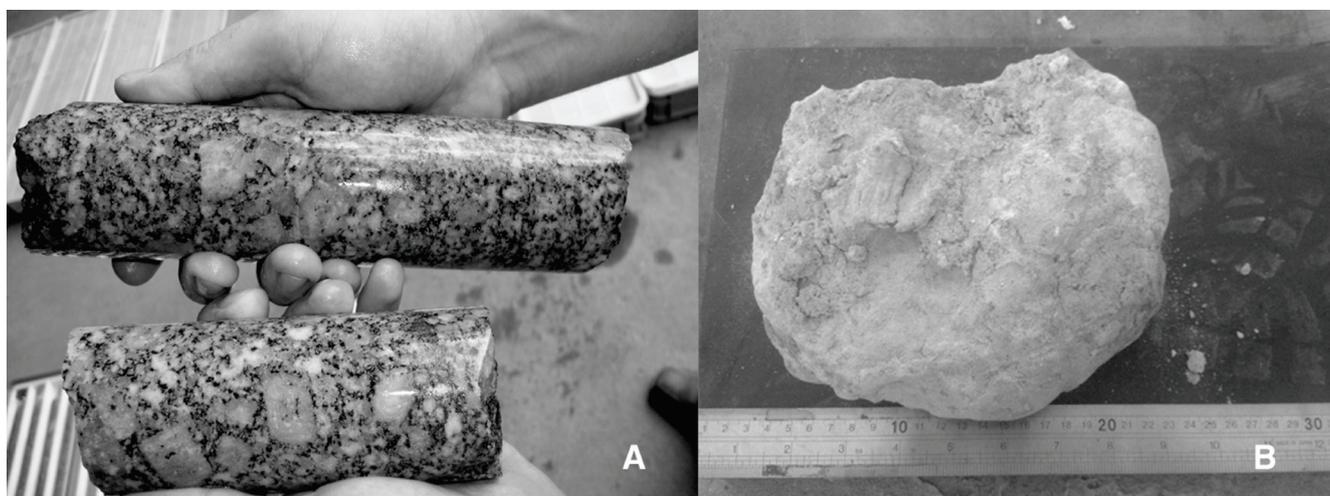


Figura 2 - Amostras do Granito Cantareira (A) e Arenito Arcóseo da Formação Resende hidrotermalizada (B). Fonte: Metrô-SP.

## 5 RESULTADOS, CORRELAÇÕES E IMPLICAÇÕES PARA ESCAVAÇÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros avaliados (quartzo-equivalente - eQc, o índice de abrasividade CERCHAR - CAI e o índice de abrasividade de rochas - RAI), as correlações entre estes parâmetros, a influência do grau de alteração e a aplicação destes na previsão do consumo de ferramentas de corte em obras de escavação subterrânea em maciços rochosos.

### 5.1 Resultados de Quartzo-equivalente - eQc

As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, a distribuição dos valores de conteúdo de quartzo-equivalente (eQc) calculados para os diferentes litotipos a partir do resultado da análise petrográfica e os valores médios para cada unidade.

As unidades graníticas apresentam-se predominantemente dentro da mesma faixa de ocorrência, entre 40% e 50%. Estas unidades apresentam um perfil mineralógico principal representado por quartzo (20 - 25%), feldspatos (30 - 40 % para o Cantareira e 40 - 50% para o Complexo Embu) e biotita (10 - 20%). Na mineralogia secundária e acessória estão zircão, titanita, apatita, epidoto, turmalina, clorita, sericita, muscovita e minerais opacos.

Algumas amostras destes granitos apresentaram valores de quartzo-equivalente discrepantes do perfil médio, estes são creditados a variações pontuais, como a amostra 6175B com 8% de

turmalina, contribuindo para um eQc de 59,30% (Granito Cantareira) e a amostra 5719 com 6% de hornblenda e cerca de 35% de quartzo, resultando em eQc de 53,33%. No outro extremo, contagens de 20% de biotita (amostra 6115) e a combinação de 20% de quartzo com elevadas quantidades de biotita, muscovita e clorita (amostra 5653A) proporcionaram valores de eQc de 43,80% e 40,90%.

Os gnaisses do Complexo Embu estão em faixa similar a dos granitos, entretanto, com faixa de ocorrência predominante de até 60%. O perfil mineralógico destas rochas é mais diversificado, apresentando ampla variedade nos quantitativos da mineralogia principal (quartzo, feldspatos, anfibólios e biotita). Apesar desta grande variabilidade, o litotipo alcança valores médios superiores às unidades graníticas. Ocorrências discrepantes também são observadas nesta unidade; a amostra 5595B possui 15% de granada, mineral de elevada ponderação para a abrasividade, contribuindo para eQc de 58,69%. Para a amostra 5207A, a baixa quantidade de quartzo (20%) e 28% de biotita contribuíram para o valor de eQc de 40,07%.

Ainda assim, observando os valores médios das três unidades, nota-se que estão muito próximas. O Granito Cantareira tem valor médio de 47,96%, os granitos do Complexo Embu possuem 46,94% e os gnaisses do Complexo Embu possuem 52,90%.

Para os demais litotipos de ocorrência mais restrita, registra-se eQc de 99,57% na amostra do veio de quartzo (5595). Este é o maior valor entre todas as amostras analisadas neste estudo e é

condizente com o esperado para uma amostra com 99,5% quartzo e 0,5% de minerais opacos. Valores altos de eQc também são registrados (e eram esperados) nos arenitos arcóseos hidrotermalizados da Formação Resende, com valores de 63,18% a 77,00%. Estes altos valores ocorrem em função de quantidades de quartzo + feldspatos superiores a 80%.

As amostras de anfibolito do Complexo Embu possuem valores baixos de eQc em razão da reduzida quantidade de quartzo (abaixo de 6%), combinada com maior quantidade de anfibólio (entre 50 e 60%). Para esta unidade, o valor médio de eQc é de 27,70%, o mais baixo de todas unidades analisadas.

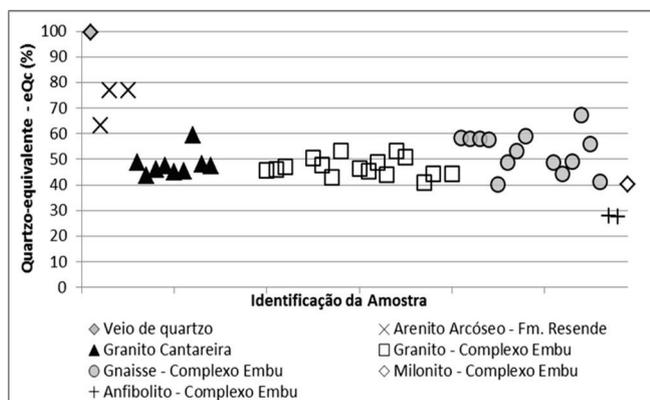


Figura 3 – Resultados de conteúdo de quartzo-equivalente (eQc) a partir da petrografia para as unidades analisadas.

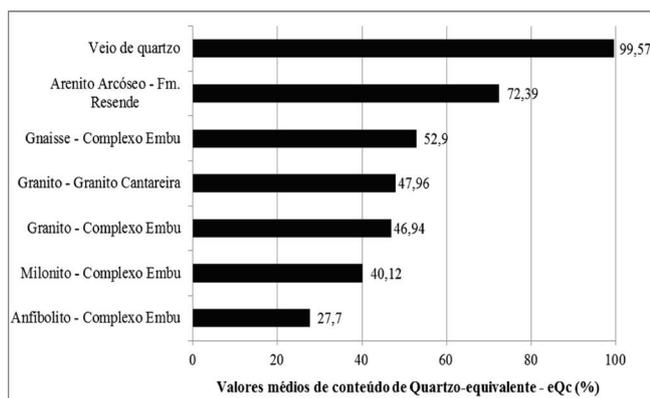


Figura 4 – Valores médios de quartzo-equivalente para cada unidade analisada.

## 5.2 Resultados do índice de abrasividade CERCHAR - CAI

A figura 5 apresenta a distribuição dos resultados de CAI frente às unidades analisadas. A

unidade com os maiores valores de CERCHAR é a dos granitos do Complexo Embu, que possuem maior frequência de resultados entre 4 e 6 (extremamente abrasivos). O Granito Cantareira, com menor quantidade de amostras, apresenta resultados concentrados em faixas relativamente próximas (faixas 4 a 5), indicando compatibilidade entre as amostras graníticas. Apesar de ampla ocorrência entre quase todas as faixas de resultados, os gnaisses do Complexo Embu apresentam maior frequência de resultados entre as faixas 2 e 4 (muito abrasivo).

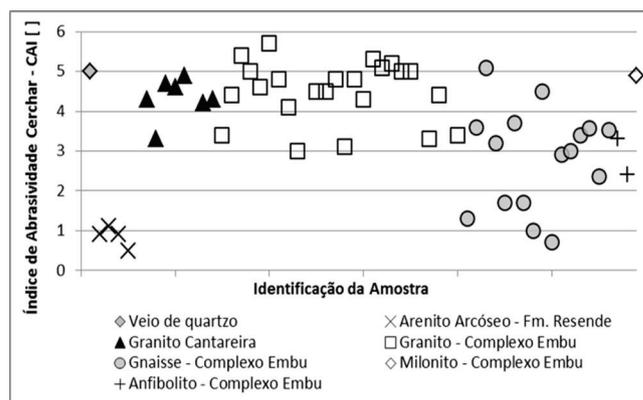


Figura 5 – Distribuição de resultados de CERCHAR frente às unidades analisadas.

Com relação aos demais litotipos estudados, é possível observar que os arenitos arcóseos hidrotermalizados apresentam valores mais baixos (faixas 0 a 1), sendo considerados predominantemente como pouco abrasivos. As amostras de anfibolito do Complexo Embu tiveram resultados nas faixas 2 e 3 (abrasividade média a muito abrasivos) e a amostra de milonito apresentou alta abrasividade, com valor de 4,9.

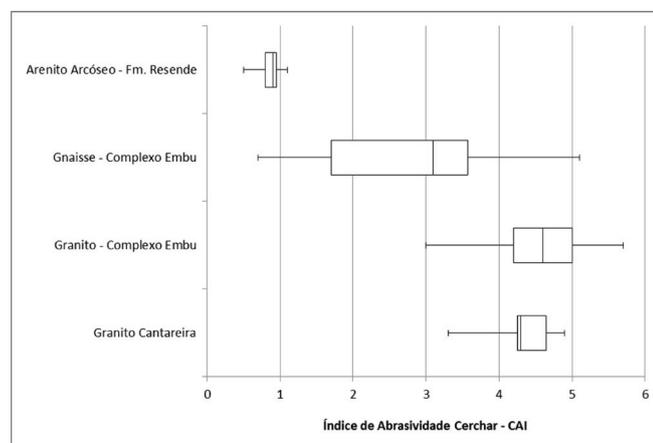
A distribuição dos valores de CAI para as unidades com maior amostragem é apresentada na figura 6. O gráfico mostra a grande faixa de abrangência dos valores para os gnaisses do Complexo Embu. Grande parte dos resultados está abaixo da média do litotipo, mas os altos valores de algumas amostras (por exemplo, amostra 5673, com CAI 5,1) sustentam a média do litotipo em 3,1.

Para as unidades graníticas, no Cantareira é evidente a maior quantidade de resultados acima da sua média. Dentro desta unidade o baixo valor de 3,3 obtido para a amostra 6116 representa exceção ao seu comportamento padrão. O Complexo

Embu possui amostras com maiores valores de CERCHAR. A amostra 5622, situada na região do bairro Ponte Grande - município de Guarulhos, apresentou valor de 5,7. Esta é a amostra com o maior valor de CERCHAR registrado nos estudos do Metrô-SP.

De maneira geral, as duas unidades graníticas possuem perfis de resultados de abrasividade CERCHAR dentro de faixas de resultados semelhantes, sendo que o Complexo Embu possui maiores valores entre as duas unidades.

Na contramão estão os arenitos hidrotermalizados da Formação Resende. Apesar da pequena quantidade de amostras ensaiadas, nos 3 diferentes pontos de amostragem (bairros de Anália Franco, Tiquatira - junto à falha de Taxaquara e Vila Clementino) os resultados variaram de 0,5 a 1,1. Ressalta-se que estas são amostras com valores de conteúdo de quartzo-equivalente (eQc) elevados.



**Figura 6** – Gráfico de distribuição estatística para as unidades com mais amostras ensaiadas.

A figura 6 também mostra que os valores para as unidades graníticas estão de acordo com os valores típicos de CAI apontados para estas rochas no estudo de Plinninger et al. (2003). Por outro lado, os valores obtidos para os gnaisses e para os arenitos de cimentação silicática possuem perfil estatístico diferente do esperado no trabalho supracitado.

Com relação ao comportamento de CAI frente à profundidade, as amostras 5631A, 5631B, 5631C e 5631D, foram coletadas a partir do mesmo ponto de sondagem, nas profundidades de 5,5 m, 15,0 m, 27,0 m e 44,5m. Esta amostragem em série

resultou em valores de 4,3, 5,3, 5,1 e 5,2, indicando ausência de tendência de resultados apenas com a variação de profundidade (no caso de baixas profundidades) para este tipo de análise é necessário o acompanhamento de outros fatores que serão aqui discutidos.

O veio de quartzo analisado não atingiu valores superiores a 6,0, como teoricamente era esperado, ficando inclusive abaixo de outras rochas com menor quantidade de quartzo. Ainda assim o resultado (5,0) é classificado como extremamente abrasivo. Neste caso a superfície de ensaio proporcionada pela estrutura da amostra pode ter contribuído para a diferença observada entre o esperado e o medido em laboratório.

### 5.3 Resultados do Índice de Abrasividade de Rochas - RAI

A figura 7 apresenta a distribuição dos valores de RAI frente às unidades geológicas avaliadas. Em função da ausência de dados de RCU, as amostras de arenito arcóseo hidrotermalizado, milonito e o veio de quartzo não tiveram o seu índice RAI calculado.

Os resultados mostram dois grupos de comportamento distintos. O Granito Cantareira apresentou grande discrepância das demais unidades em função de registrar os valores mais altos de RAI. De forma geral, seus resultados estão concentrados entre 45 e 70, com duas ocorrências ainda mais altas, amostras 6189B e 6189A, que obtiveram valores de 85,72 e 73,48 respectivamente. Estes altos valores são atribuídos aos resultados de RCU, que exerceram significativa ponderação para estas amostras (amostra 6189B tem RCU de 182,22 MPa).

O segundo grupo é o das rochas do Complexo Embu; tanto os granitos como os gnaisses tiveram resultados disseminados entre as faixas de 10 a 60, com os litotipos graníticos apresentando resultados ligeiramente maiores. A média para as rochas graníticas é de 38,43 e a das rochas gnáissicas é de 32,49.

Em comparação com os valores típicos de RAI preconizados por Plinninger (2010), os granitos do Complexo Embu se encaixam perfeitamente nas faixas de valores esperados. Os gnaisses do Complexo Embu também possuem uma resposta dentro da faixa esperada para esta rocha, porém

com valores mais baixos. A grande surpresa é efetivamente o Granito Cantareira, que apresentou valores muito superiores aos típicos registrados.

Uma vez que, de maneira geral, os três litotipos possuem a mesma faixa de ocorrência de quartzo-equivalente, fica evidente a grande ponderação que a RCU exerce neste índice.

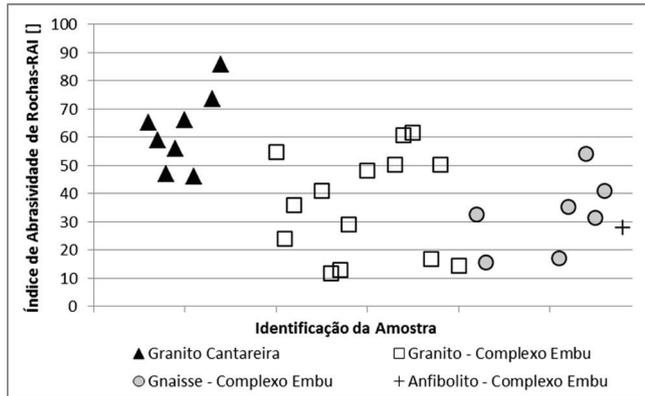


Figura 7 - Distribuição de resultados de RAI frente às unidades analisadas.

#### 5.4 Relação entre Quartzo-equivalente e CERCHAR

Entre todas as amostras utilizadas neste estudo, 44 possuem resultados de quartzo-equivalente e CERCHAR, sendo 24 de rochas ígneas, 17 de rochas metamórficas e 3 de rochas sedimentares; com isso foi possível o confronto destes parâmetros (figura 8).

O confronto entre os resultados de eQc e CERCHAR obtido nas mesmas amostras permitiu identificar a falta de correlação entre estes parâmetros, o que indica que a mineralogia abrasiva não é o único fator que influencia o ensaio CERCHAR. As amostras de arenito arcóseo possuem elevados valores de quartzo-equivalente, entretanto, baixos valores de CERCHAR. Casos similares também ocorrem nos demais litotipos.

Estes resultados são concordantes com a evolução deste estudo. Trabalhos anteriores iniciais com as amostras da Região Metropolitana de São Paulo (Monteiro et al., 2011 e Monteiro et al., 2012) já indicavam a falta de correlação entre estes dois parâmetros e isso é totalmente concordante com as observações de trabalhos de referência no continente europeu, tais como Kasling (2000) e Plinninger et al. (2004). Desta forma assume-se

a premissa de que apenas a presença de grandes quantidades de quartzo e outros minerais abrasivos não implica necessariamente na capacidade de consumir significativamente ferramentas de corte.

Não foram confirmadas as observações de West (1989) e Bieniawski et al. (2009) quanto à alta correlação estatística entre os dois parâmetros.

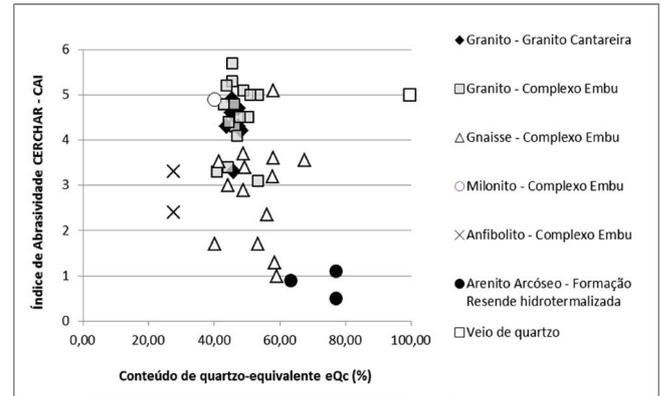


Figura 8 - Confronto entre quartzo-equivalente e CERCHAR.

#### 5.5 Relação entre CERCHAR e RAI

O confronto entre o índice de abrasividade CERCHAR e o índice de abrasividade de rochas (RAI) apresenta maior compatibilidade. Ao todo, 29 amostras permitiram calcular tanto o CERCHAR como o CAI, com 21 amostras de rochas ígneas e 8 amostras de rochas metamórficas. A figura 9 apresenta a relação entre estes parâmetros.

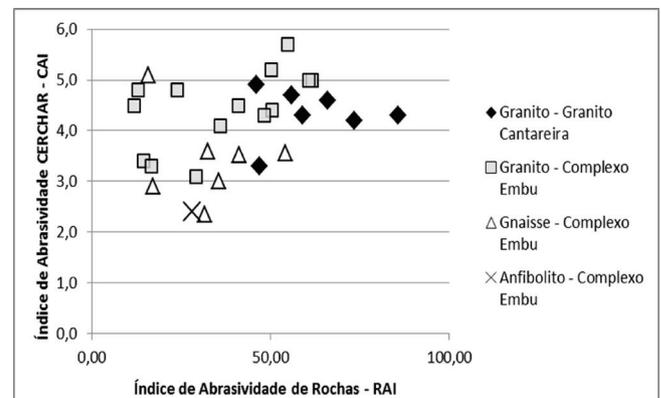


Figura 9 - Confronto entre os resultados de CERCHAR e RAI.

Foi obtida uma correlação positiva moderada entre estes parâmetros. A tendência de correlação logarítmica observada é concordante com a assumida por Plinninger (2010). Com isso, há uma indicação de que a introdução de um parâmetro

de resistência da rocha (este é o RCU dentro do cálculo de RAI) permite um ajuste junto aos dados de conteúdo de quartzo-equivalente, aproximando-se assim da abrasividade CERCHAR. Isto reforça a premissa de que apenas o conteúdo de quartzo-equivalente não pode ser utilizado para analisar as propriedades abrasivas de uma rocha, pensando no desgaste primário.

Merece atenção o fato de que 4 amostras (5638, 5637A, 5682 e 5673) apresentaram resultados divergentes entre CERCHAR e RAI, ou seja, tiveram elevado resultado em um parâmetro, contrastando com baixo resultado em outro. Estas amostras serão avaliadas com o intuito de melhor compreender o significado destas ocorrências. Ressalta-se que amostras com comportamento similar também foram observadas nos estudos de Plininger (2010).

## 5.6 A Influência do Grau de Alteração

Os estudos de Monteiro et al. (2011) e Monteiro et al. (2012) sugerem que uma das razões para a falta de compatibilidade para os parâmetros eQc e CERCHAR seria a ação do intemperismo, agente da dinâmica externa do planeta, que provoca a alteração das rochas, reduzindo a sua resistência mecânica, porém pouco influenciando o conteúdo de quartzo-equivalente. Esta baixa influência no quartzo-equivalente se deve ao fato de que o quartzo, mineral de elevada dureza mais abundante nas rochas neste contexto geológico, é significativamente resistente à alteração intempérica.

Com o intuito de validar esta premissa, foi feita a separação dos resultados de abrasividade CERCHAR e de RAI, de acordo com o grau de alteração das amostras. Os resultados são apresentados na figura 10.

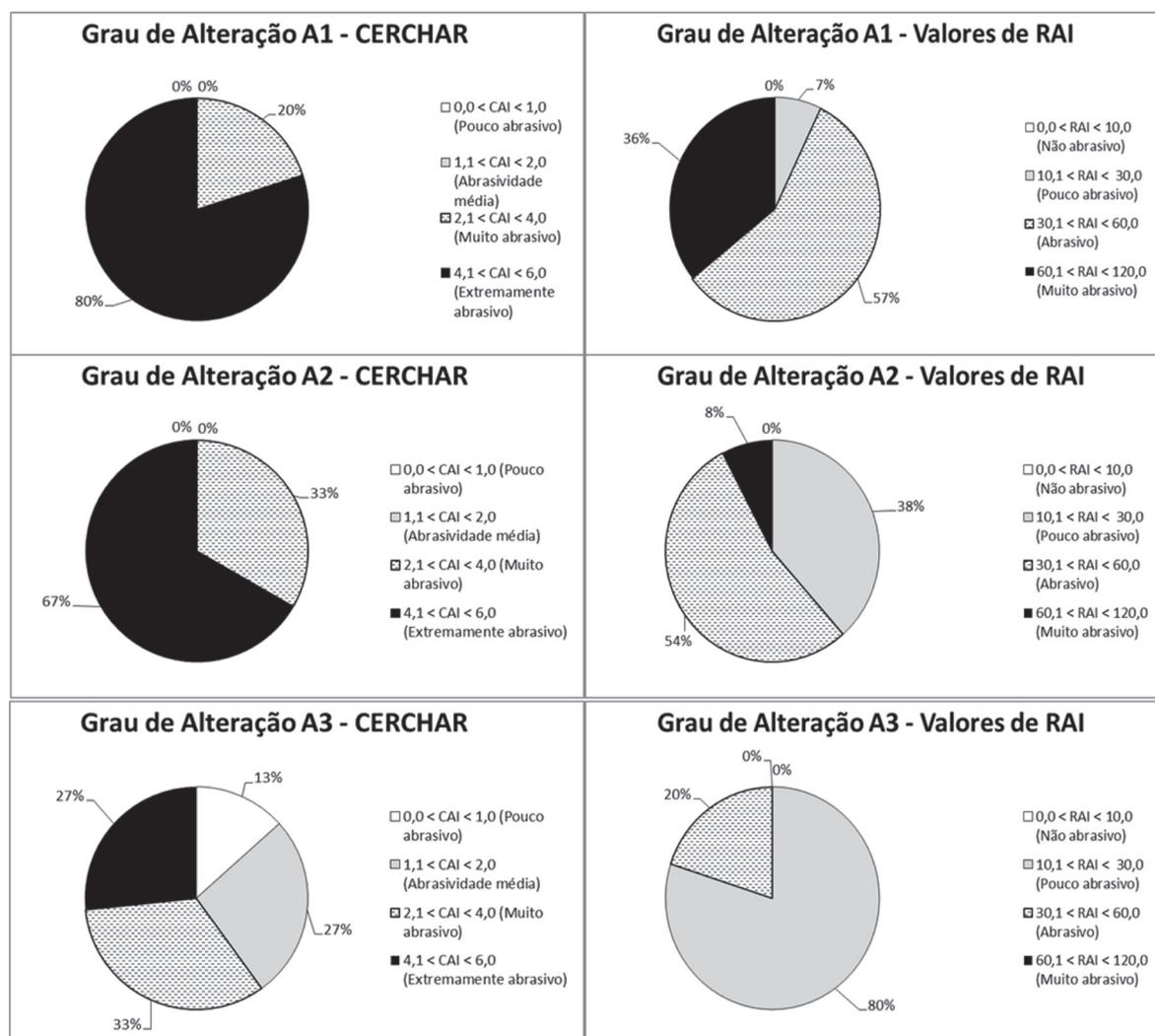


Figura 10 - Distribuição dos valores de CERCHAR e RAI para diferentes graus de alteração.

Para o índice de abrasividade CERCHAR, rochas com grau de alteração A1 (condições geomecânicas de litotipo são) apresentaram 80% de resultados tidos como extremamente abrasivos (faixas 4 a 6) e 20% como muito abrasivos (faixas 2 a 4). Neste grau de alteração não são observados resultados pouco abrasivos (faixas 0 a 1) ou de abrasividade média (faixas 1 a 2).

Ao avaliar os resultados das rochas com grau de alteração A2 (rocha pouco alterada), observa-se que a porcentagem de rochas extremamente abrasivas cai para 67%, enquanto as rochas muito abrasivas aumentam para 33%.

Nas rochas com grau de alteração A3 (rocha medianamente alterada), a mudança é ainda mais significativa, as rochas extremamente abrasivas caem para 27%, há a manutenção das rochas muito abrasivas em 33% e aparecem os resultados pouco abrasivos e de abrasividade média que, juntos, totalizam 40% dos resultados.

Para o índice de abrasividade de rochas (RAI) ocorre comportamento bastante similar. Com as rochas em grau de alteração A1 registrou-se 36% de resultados muito abrasivos (RAI entre 60 e 120), 57% de rochas abrasivas (RAI entre 30 e 60) e 7% de rochas pouco abrasivas (RAI entre 10 e 30).

Passando para o grau de alteração A2, o percentual de rochas muito abrasivas caiu para 8%, as rochas abrasivas caem para 54% e o percentual de rochas pouco abrasivas sobe para 38%.

Com o grau de alteração A3 não são mais registrados resultados de rochas muito abrasivas, as rochas abrasivas caem para 20% e o percentual de rochas pouco abrasivas sobe vertiginosamente para 80% dos resultados.

Avaliando a média de resultados de CERCHAR e RAI para os diferentes graus de alteração, há a consolidação dos dados acima apresentados. Para o CERCHAR há uma pequena redução na média entre os graus A1 e A2, com significativa queda para o grau A3. Nos resultados de RAI há uma queda significativa ao longo dos três graus de alteração (Figura 11).

Estes resultados são contundentes e sacramentam a concepção de que a ação do intemperismo, por meio da alteração das rochas, é um fator incisivo e preponderante na perda das condições abrasivas. O grau de alteração também explica a razão pela falta de similaridade no comportamento

e<sub>Qc</sub> versus CERCHAR em estudos realizados em São Paulo, frente a estudos realizados com rochas do continente europeu.

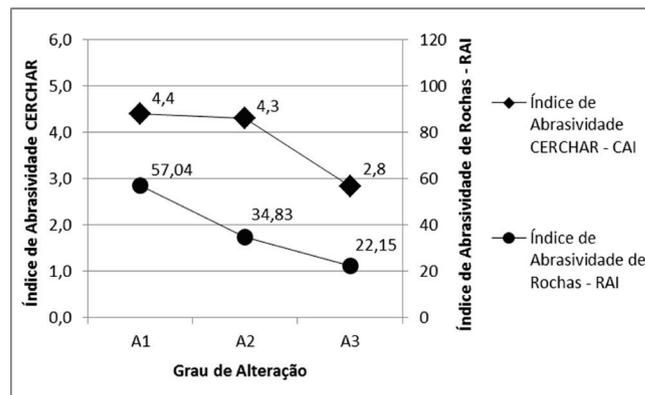


Figura 11 - Evolução dos valores médios de CERCHAR e RAI em função do grau de alteração.

## 5.7 Previsão de Consumo de Ferramentas de Corte

A aplicação do conteúdo de quartzo-equivalente para estimativa de consumo de ferramentas de corte é defendida por Thuro (1997), no entanto a análise dos resultados indica que o quartzo-equivalente, como indicativo de consumo para desgastes primários, aplica-se preferencialmente para rochas sãs, mas deve ser considerado como indicativo para o desgaste secundário de peças de transporte (com destaque para o parafuso sem fim) e peças internas de câmaras de escavação e cabeça de corte de máquinas tuneladoras.

Por outro lado, o índice de abrasividade CERCHAR - CAI e o índice de abrasividade de rochas - RAI são defendidos, respectivamente, por Maidl et al. (2001) e Plinninger (2010) como parâmetros de boa correlação para estimativa da vida útil de ferramentas de corte em escavações.

Os valores médios de CERCHAR dos três principais litotipos avaliados foram plotados no gráfico de vida útil de discos de corte de Maidl et al. (2001). Neste gráfico são utilizados os parâmetros de CERCHAR combinados com RCU. Os resultados são apresentados na figura 12.

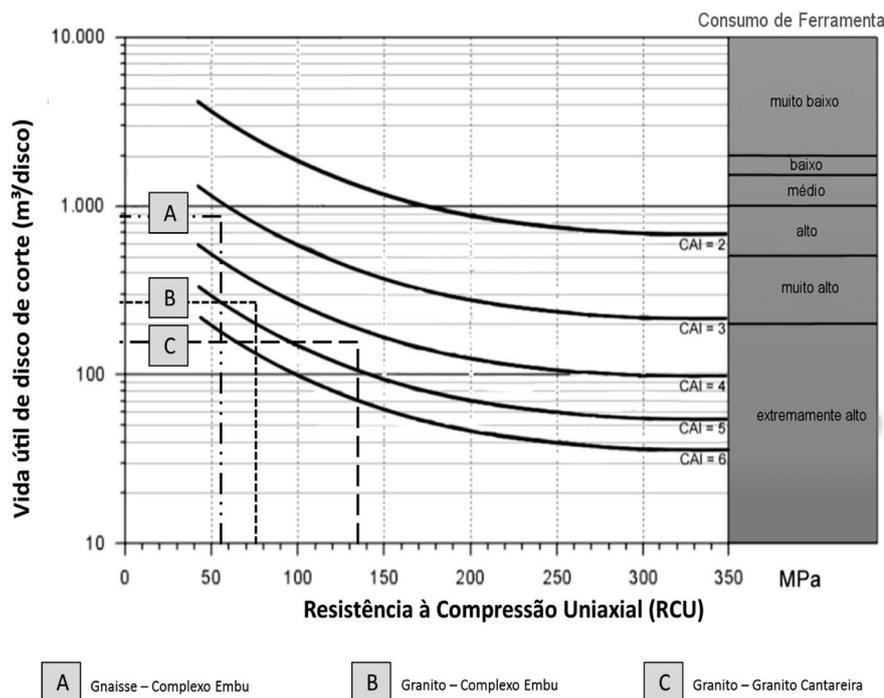


Figura 12 – Estimativa de vida útil de discos de corte em função de CERCHAR e RCU.

Para o Granito Cantareira foram considerados RCU médio de 133,59 MPa e CERCHAR médio de 4,3, resultando em uma vida útil de, aproximadamente, 180  $m^3/disco$  de corte. Esta vida útil implica em um consumo de ferramentas de corte, para desgaste primário, classificado como extremamente alto. Para os granitos do Complexo Embu foram considerados RCU médio de 76,88 MPa e CERCHAR médio de 4,6, resultando em uma vida útil de, aproximadamente, 290  $m^3/disco$  de corte. Esta vida útil implica em um consumo de ferramentas de corte, para desgaste primário, classificado como muito alto. Para os gnaisses do Complexo Embu foram considerados RCU médio de 56,25 MPa e CERCHAR médio de 3,1, resultando em uma vida útil de, aproximadamente, 900  $m^3/disco$  de corte. Esta vida útil implica em um consumo de ferramentas de corte, para desgaste primário, classificado como alto.

A vida útil de discos de cortes para os granitos do Complexo Embu é aproximadamente 1,5 vezes maior do que para o Granito Cantareira. Em função dos menores valores de RCU e CERCHAR, a vida útil de discos de corte para os gnaisses do Complexo Embu é 3 vezes maior do

que o granito do Complexo Embu e 5 vezes maior do que o Granito Cantareira.

Para avaliar a estimativa de consumo de ferramenta por meio do RAI, os dados das amostras estudadas foram plotados no gráfico de vida útil de brocas *button bits* de 45 mm de Plinninger (2010). Os resultados são apresentados na figura 13.

Para o Granito Cantareira foi considerado o RAI médio de 62,14, resultando em vida útil de 600 m/bit, esta considerada uma vida útil baixa. Para os granitos do Complexo Embu foi considerado RAI médio de 38,43, resultando em vida útil de 910 m/bit, esta também considerada uma vida útil baixa. Para os gnaisses do Complexo Embu foi considerado RAI médio de 32,49, resultando em vida útil de aproximadamente 1040 m/bit, esta uma vida útil moderada.

Com base nos valores supracitados é possível afirmar que, para brocas do tipo *button bits* de 45 mm, a vida útil nos gnaisses do Complexo Embu é, aproximadamente, 1,7 vezes maior do que no Granito Cantareira. Entre as unidades graníticas, o Complexo Embu tem vida útil 1,5 vezes maior do que o Cantareira.

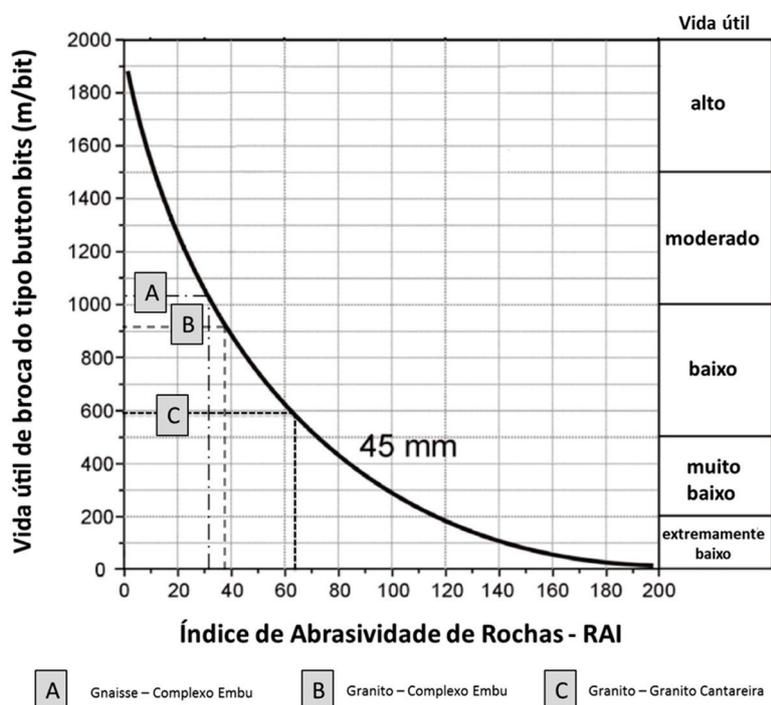


Figura 13 – Estimativa de vida útil de brocas *button bits* de 45 mm em função de RAI.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo aplicou alguns dos índices de avaliação de abrasividade mais utilizados pela engenharia de túneis para amostras de rochas da Região Metropolitana de São Paulo. Foram avaliados o conteúdo de quartzo-equivalente (eQc), o índice de abrasividade CERCHAR (CAI) e o índice de abrasividade de rochas (RAI).

As amostras são provenientes, em sua grande maioria, do Complexo Embu (litotipos granítico e gnáissico) e do Granito Cantareira. Adicionalmente foram avaliadas algumas amostras de arenitos arcóseos hidrotermalizados da Formação Resende e amostras de milonito, anfibolitos e de um veio de quartzo.

Com relação aos índices avaliados, o quartzo-equivalente evidenciou que os três litotipos principais encontram-se aproximadamente no mesmo intervalo de resultado, o que condiz com o esperado para todos os litotipos avaliados. Para o CERCHAR foi observada compatibilidade entre as amostras graníticas e uma grande dispersão de valores para os gnaisses. Por outro lado, o RAI indicou compatibilidade entre os dois litotipos do Complexo Embu, com valores menores do que

os do Granito Cantareira; isso é explicado pelos maiores valores de RCU obtidos no Cantareira.

Não foi encontrada correlação entre o quartzo-equivalente e o CERCHAR e foi encontrada correlação moderada entre o CERCHAR e o RAI, o que indica que apenas a presença de minerais abrasivos não implica necessariamente em um comportamento abrasivo da rocha (tendo em vista o desgaste primário). A resistência mecânica da rocha tem um papel fundamental; neste contexto ganha importância a ação da alteração intempélica sobre as rochas, que diminui suas condições geomecânicas, mas pouco altera o conteúdo de quartzo-equivalente. Os valores de CERCHAR e RAI diminuem conforme aumenta o grau de alteração das rochas, evidenciando que a avaliação da alteração é fundamental para o estudo da abrasividade.

Com base nos valores médios dos índices CERCHAR e RAI, foram feitas estimativas de vida útil de brocas e discos de corte para os três litotipos com mais amostras ensaiadas. Ambas as estimativas indicam que o Granito Cantareira é a unidade mais abrasiva e que provoca um consumo de ferramentas extremamente alto em escavações. Também ambas estimativas indicam que os gnaisses do Complexo Embu são menos abrasivos

do que as demais rochas. Ressalta-se que a foliação potencializa a ação do intemperismo nestes gnaisses.

O desmonte de rocha em um processo de escavação começa com o atrito da ferramenta de corte contra o maciço rochoso visando o desprendimento de um fragmento de rocha (*chip*). Para as ferramentas este é o desgaste primário e tanto o CERCHAR como o RAI avaliam adequadamente a ação da abrasividade neste processo. Após o fragmento ser liberado do maciço, este permanece sob condições de atrito livre com a ferramenta de corte e, posteriormente, com a parte interna da câmara de escavação e com o sistema de transporte de material escavado. Este é o desgaste secundário e o quartzo-equivalente passa a ser o seu melhor indicador nesta etapa do processo. Com base nestas considerações, recomenda-se a utilização conjunta dos métodos CERCHAR + quartzo-equivalente ou RAI + quartzo-equivalente para a previsão do consumo de ferramentas de corte.

### Agradecimentos

*Os autores agradecem à Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô-SP) por apoiar e autorizar a publicação deste estudo, ao engenheiro Francisco Carlos Pelegate Dias (Metrô-SP) pelo apoio nas figuras e no tratamento das bases SIG, às geólogas Fabrícia Massoni Cicotti e Fernanda Maciel Canile (Metrô-SP) pelas discussões, à consultora geóloga Dra. Maria Heloísa Barros de Oliveira Frasca pelas sugestões e discussões e à geógrafa Dra. Kátia Canil (UFABC) pelo incentivo.*

### REFERÊNCIAS

- ASTM - American Society for Testing and Materials. 2012. Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. Designation D7625-10, 6 p.
- Bieniawski R., Celada B., Tardaguila I. 2009. Selección de tuneladoras para macizos rocosos com frentes estables. *Ingeopres*, 181:16–22.
- CERCHAR - Centre D'Etudes et Recherches de Charbonnages de France. 1986. The CERCHAR Abrasiveness Index, 12p.
- Herrenknecht M. & Frenzel C. 2005. Long tunnels in hard rock – a preliminary review. *Bauingenieur*, 80:343-349.
- Kasling H. 2000. Der Cerchar-Abrasivitätstest: aussagekraft und verbesserungsmöglichkeiten eines indextests zur bestimmung der gesteinsabrasivität. TU Munich, Munich, 47p.
- Kasling H. & Thuro K. 2010. Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory. In: *11º IAEG Congress, Geologically Active, Proceedings*, p. 1973–1980.
- Maidl, B. 1997. Tunnelbau im Sprengvortrieb. New York. Berlin, 327 p.
- Maidl B., Schmid L., Ritz W., Herrenknecht M. 2001. Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein. Ernst & Sohn, 350 p.
- Monteiro M.D., Rocha H.C., Massoni F. 2012. Parâmetros relacionados à abrasividade das rochas do embasamento nos estudos do Projeto Básico da extensão da Linha 5 do Metrô de São Paulo. In: *III Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Anais, São Paulo, 8 p.*
- Monteiro M.D., Rocha H.C., Massoni F., Ribeiro Neto, F. 2011. Considerações sobre a abrasividade das rochas do embasamento nos estudos da Linha 6 do Metrô de São Paulo. In: *XIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Anais, São Paulo, 10 p.*
- Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P. 2007. New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling. In: *Rapid Excavations and Tunneling Conference, Proceeding*, p. 104-116.
- Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P. 2006. Abrasivity testing for rock and soils. *Tunnels & Tunnelling International*, 47–49.
- Pastore E. 2009. Risco geológico em obras civis. *Revista Engenharia*, 592:110-115.
- Pietro L.A. 2012. The CERCHAR abrasivity index's applicability to dredging rock. In: *XXXII Western Dredging Association, San Antonio, Proceedings*, p. 212-219.

Plinninger R.J. 2010. Hardrock abrasivity investigation using the Rock Abrasivity Index (RAI). *Geologically Alive*, London, p. 3445-3452.

Plinninger R.J., Kasling H., Thuro K. 2004. Wear prediction in hard rock excavation using the CERCHAR abrasiveness index (CAI). *Rock Engineering: theory and practice*. Gluckauf. p. 599-604.

Plinninger R.J., Kasling H., Thuro K., Spaun G. 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40:259-263.

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

Ribeiro V. 2010. *Abrasividade pendular e resistência mecânica das rochas. Dissertação de Mestrado*. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 54p.

Ruehl S. & Alber M. 2006. Initial stress conditions influencing the CERCHAR abrasiveness index. In: *International Association of Engineering Geology Congress, Proceedings, Nottingham*, 5 p.

Thuro K. 1997. Prediction of drillability in hard rock tunneling by drilling and blasting. *Tunnels for People*. Rotterdam. p. 103-108.

Thuro K. & Plinninger R.J. 2003. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavability. In: *International Society of Rock Mechanics, Technology roadmap for rock mechanics*. South African Institute of Mining and Metallurgy. p. 1227-1234.

West G. 1989. Technical note: rock abrasiveness for tunnelling. In: *International Symposium on Weak Rock, Proceedings, Rotterdam*, p. 585-594.