

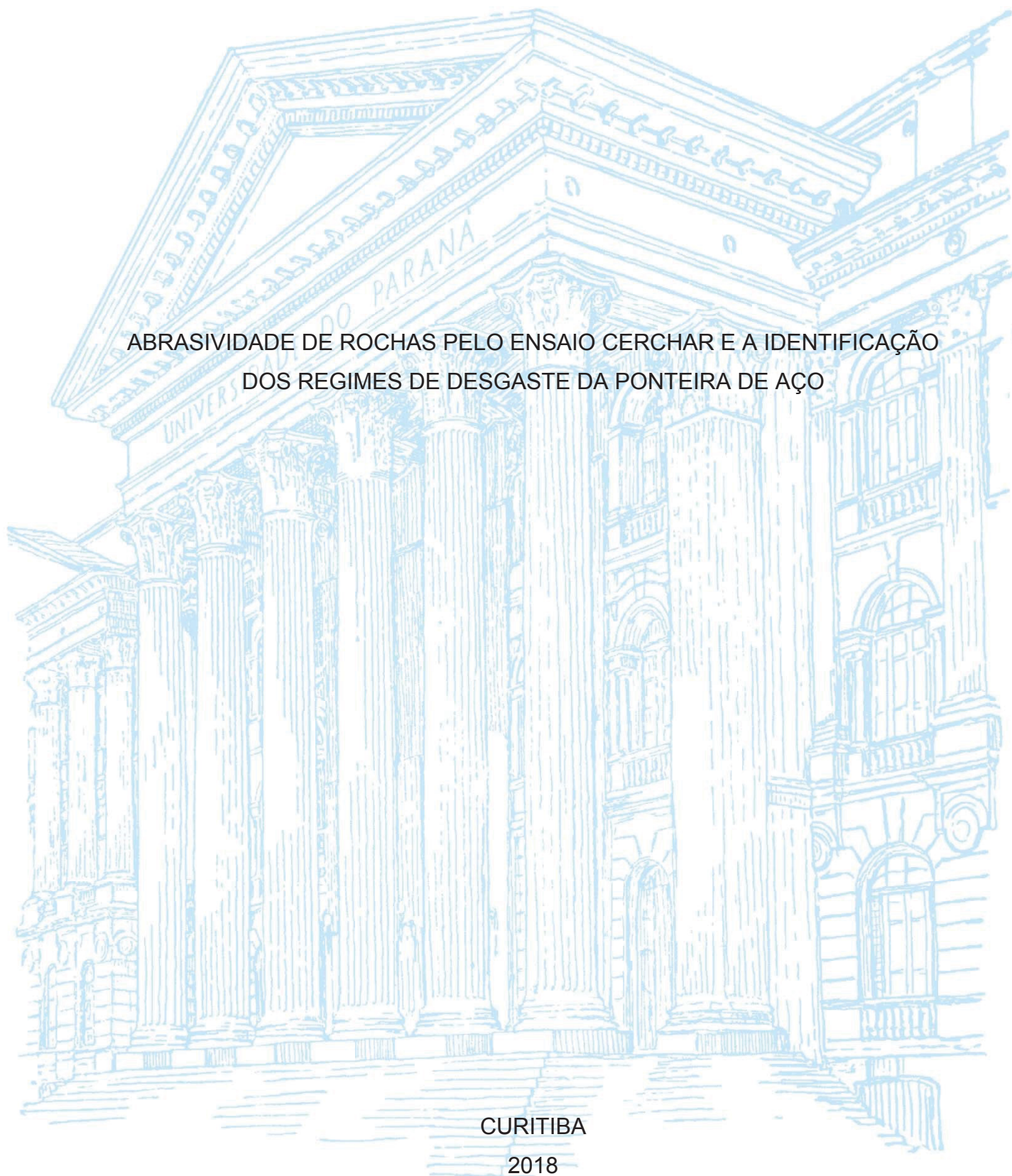
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA REIS PIAZZETTA

ABRASIVIDADE DE ROCHAS PELO ENSAIO CERCHAR E A IDENTIFICAÇÃO
DOS REGIMES DE DESGASTE DA PONTEIRA DE AÇO

CURITIBA

2018



GABRIELA REIS PIAZZETTA

ABRASIVIDADE DE ROCHAS PELO ENSAIO CERCHAR E A IDENTIFICAÇÃO
DOS REGIMES DE DESGASTE DA PONTEIRA DE AÇO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia Exploratória.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro

Coorientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

Coorientadora: Dra. Isabella F. R. Figueira

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

P584a

Piazzetta, Gabriela Reis

Abrasividade de rochas pelo ensaio cerchar e a identificação dos regimes de desgaste da ponteira de aço / Gabriela Reis Piazzetta. – Curitiba, 2018.
80 p. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2018.

Orientador: Leonardo Evangelista Lagoeiro.

Coorientadores: Giuseppe Pintaúde, Isabella F. R. Figueira.

1. Abrasividade de rochas. 2. Ensaio de abrasividade Cerchar. 3. Mecanismos de desgaste.
4. Desgaste abrasivo. 5. Desgaste de ferramentas de perfuração. I. Universidade Federal do Paraná.
II. Lagoeiro, Leonardo Evangelista. III. Pintaúde, Giuseppe. IV. Figueira, Isabella F. R. V. Título.

CDD: 552.5

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



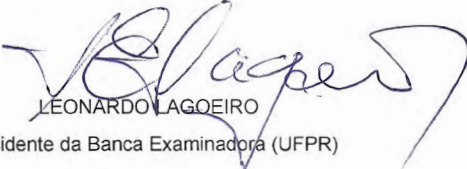
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA

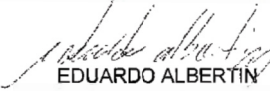
TERMO DE APROVAÇÃO

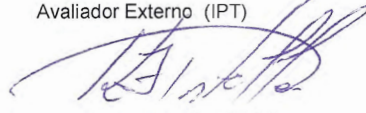
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **GABRIELA REIS PIAZZETTA** intitulada: **ABRASIVIDADE DE ROCHAS PELO ENSAIO CERCHAR E A IDENTIFICAÇÃO DOS REGIMES DE DESGASTE DA PONTEIRA DE AÇO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Abril de 2018.


LEONARDO LAGOEIRO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


EDUARDO ALBERTIN
Avaliador Externo (IPT)


KLEBER FRANKE PORTELLA
Avaliador Externo (UFPR)

Dedico às dúvidas, as resolvidas e as que permanecem, e nos fazem seguir em frente na busca constante por aprendizado e conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelos subsídios para a importação, constantes da Lei 8010/90, L.I. 16/0893749-0. Aos Institutos Lactec e a ANEEL, pelo financiamento e infra-estrutura para a condução deste projeto de pesquisa oferecidos através do Termo de Cooperação nº6000.0099630.15.3.

Ao programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, especialmente ao meu orientador Dr. Leonardo E. Lagoeiro e a geóloga Daiane Munch por todo o apoio intelectual.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde por abrir as portas de um novo mundo chamado tribologia, por todas as discussões e tempo dedicado ao ensino e a pesquisa necessários a este trabalho.

Aos pesquisadores do Laboratório de Análise de Materiais e Estruturas (LAME) dos Institutos Lactec, Dra. Isabella F. R. Figueira, Dr. Luis Alkimin de Lacerda, Dra. Mariana P. Bragança, Dr. Kleber F. Portella, Dra. Amanda Jarek, Ms. Betina L. Medeiros, Ms. José Henrique F. Pretto, Bruno E. Ribeiro e aos técnicos Jeferson L. Bronholo, Dalvinei Jennrich, Débora de Moraes, Evandro M. Silva, Rafael Arneck, Ricardo G. de Oliveira e Bruna G. Dias pelo apoio na execução dos ensaios.

Aos técnicos do Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Paraná, Dr. Deonir Augustini e Érico S. Szameitat pela disponibilidade.

A Dra. Ane Rovani do Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio na realização dos ensaios.

A minha família e aos meus amigos pelas distrações, pois foram elas que deram me deram energia e força para seguir em frente.

"I never lose. I either win or I learn."

Nelson Mandela

*"In the mind's eye, fractal is a way
of seeing infinity."*

James Gleick, 1987

RESUMO

O desgaste excessivo das ferramentas de perfuração pode representar um custo adicional expressivo em projetos de escavação em rocha. Para diminuir o risco do aumento de custos durante a execução da obra, a previsão do desgaste das ferramentas de perfuração é uma parte essencial na fase de investigação geológica-geotécnica do projeto. Atualmente, o estudo para esta previsão do desgaste é feito com base na resistência à compressão uniaxial da rocha. Um dos problemas na utilização deste parâmetro é que ele é classificado como macroscópico, mas o desgaste das ferramentas de perfuração ocorre em escala microscópica, e, portanto, a caracterização das rochas nesta escala é substancial para a determinação e a quantificação dos parâmetros que possuem maior influência na sua abrasividade. O parâmetro mais associado ao desgaste que ocorre nas escavações e perfurações é a abrasividade, que é definido como a capacidade da rocha ou do solo de remover o material metálico da superfície das brocas e dos discos de corte. Um dos métodos mais aceitos e utilizados na determinação da abrasividade é o ensaio Cerchar. O ensaio consiste em uma ponteira de aço cônica que risca a superfície da amostra de rocha, sob a aplicação de uma força normal e constante de 70 N e por uma distância de 10 mm. Ao seu término, se define o índice de abrasividade Cerchar (CAI) ou o potencial abrasivo da rocha que é uma função do diâmetro desgastado da ponteira de análise. Este estudo avaliou a abrasividade da rocha sob dois aspectos. O primeiro enfoque foi direcionado a realização de uma revisão dos parâmetros deste ensaio, onde se verificou a influência destes nos resultados utilizando uma comparação interlaboratorial. Dois parâmetros foram avaliados em detalhe: a influência da superfície da amostra e a constituição microestrutural, utilizando FEG-SEM/EBSD. Os resultados de CAI foram agrupados por tipo de rocha e foram avaliados estatisticamente com os dados de resistência à compressão uniaxial. O segundo enfoque foi dado a identificação dos mecanismos de desgaste atuantes na ponteira de aço utilizada no teste e a classificação destes mecanismos nos regimes de desgaste: moderado, transicional e severo. Esta segunda abordagem teve como objetivo melhorar a aplicação prática dos resultados de abrasividade Cerchar na escolha das ferramentas de perfuração.

Palavras-chave: Abrasividade de rochas, Ensaio de abrasividade Cerchar, Mecanismos de desgaste, Desgaste abrasivo, Desgaste de ferramentas de perfuração

ABSTRACT

The excessive wear of drilling tools could represent an additional cost in rock excavation projects. To avoid the risk of increasing costs during the construction, the prediction of the wear of drilling tools is a fundamental part of the geological-geotechnical investigation phase. Currently, the study to predict the wear is made using the uniaxial compressive strength of the rock. One issue regarding the use of rock strength is that it is classified as a macroscopic test and the wear of tools occur on a microscopic scale. Therefore, the rock characterization in this scale is substantial for the determination and quantification of what parameters influence the rock abrasivity. Abrasivity is the most correlated rock parameter to determine the wear of tools; it is defined as the wear or loss of material caused by the interaction between rock and drilling tools. Cerchar is considered, by many authors, an internationally recognised laboratory test to access rock abrasivity. This test method consists of scratching a steel stylus with a cone-shaped pin against the rock surface, with an applied normal force of 70 N and for a 10 mm distance. The rock abrasiveness is determined by the Cerchar Abrasiveness Index (CAI), which is the measurement of the wear diameter on the stylus multiplied by 10. This study evaluated the rock abrasivity under two aspects. First, this study provides a review of this test parameters and verifies the influence of them on the results utilizing an interlaboratory comparison. Two parameters were evaluated in detail: the impact of the sample surface and the microstructural formation, which was analyzed using FEG-SEM/EBSD. The abrasivity results were grouped by type of rocks and were statistically evaluated together with the uniaxial compressive strength data. The second approach was the identification of the wear mechanisms acting in the steel stylus used to perform the test and the classification of these mechanisms in the wear regimes: mild, transitional and severe. This second approach had the objective to improve the practical application of the Cerchar results in the drillings choice.

Key-words: Rock abrasivity, Cerchar Abrasiveness test, wear mechanisms, Abrasion wear, Wear of drilling tools

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR.....	19
FIGURA 2: EQUIPAMENTOS DO ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR.	20
FIGURA 3: IMAGENS DAS PONTEIRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR.....	21
FIGURA 4: GRÁFICO DEMOSTRANDO A RELAÇÃO INVERSAMENTE PROPORCIONAL ENTRE O CAI E A DUREZA DO AÇO (HRC).....	23
FIGURA 5: GRÁFICO DEMOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE O CAI E O PESO APLICADO.....	24
FIGURA 6 EXEMPLOS DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA.....	25
FIGURA 7: GRÁFICOS DEMOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO E RELAÇÃO DOS VALORES DE CAI _s E CAI _{FB}	26
FIGURA 8: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA DO ENSAIO E O CAI.....	27
FIGURA 9: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA DO ENSAIO E O CAI.....	27
FIGURA 10: ILUSTRAÇÃO DEMOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE DE DESGASTE	29
FIGURA 11: FOTOGRAFIA DA PONTEIRA DE AÇO COM FORMAÇÃO DO BURR	29
FIGURA 12: ESQUEMA DEMOSTRANDO POSSÍVEIS RESULTADOS DA SUPERFÍCIE DE ABRASÃO FORMADA NA PONTEIRA E FORMAS CORRETAS DE MEDIÇÃO.....	30
FIGURA 13 A) FOTOGRAFIA DO EQUIPAMENTO CERCHAR RAA-100 INSTALADO NO LABORATÓRIO, B) MICROSCÓPIO RAA-AOM DE IDENTIFICAÇÃO DO DESGASTE DAS PONTEIRAS, C) RETIFICA DE PONTEIRAS GCTS STS-100.	31
FIGURA 14 PROCEDIMENTOS PARA A INSTALAÇÃO DA PONTEIRA	32
FIGURA 15 PROCEDIMENTOS PARA COLOCAÇÃO DA AMOSTRA	32
FIGURA 16 COLOCAÇÃO DA AMOSTRA, IDENTIFICAÇÃO DA RÉGUA E DO MICRÔMETRO GRADUADO.....	33
FIGURA 17 POSIÇÃO INICIAL DA PONTEIRA NO TESTE.....	33
FIGURA 18 DESLOCAMENTO VERTICAL DA PONTEIRA DA POSIÇÃO INICIAL (FIGURA 17) PARA A POSIÇÃO DE REALIZAÇÃO DO TESTE.....	34
FIGURA 19 A MICROSCÓPIO RAA-AOM, B DETALHE DO ENCAIXE DA PONTEIRA NO SUPORTE.....	35
FIGURA 20 SEQUÊNCIA DE IMAGENS DE COLOCAÇÃO DA PONTEIRA NO MICROSCÓPIO PARA REALIZAÇÃO DA LEITURA DO DESGASTE	35
FIGURA 21 IMAGEM CAPTURADA DA TELA MOSTRANDO O INÍCIO DO SOFTWARE.....	36

FIGURA 22 MEDIDA DO DESGASTE DA PONTEIRA SENDO REALIZADO PELO SOFTWARE COM A UTILIZAÇÃO DE LINHAS GUIA.....	36
FIGURA 23 CAPTURA DE IMAGEM DO DOCUMENTO PDF DO RELATÓRIO DO SOFTWARE.....	37
FIGURA 24 RETIFICA DE PONTEIRAS STS-100 E LOCALIZAÇÃO DAS PORTAS DE ALINHAMENTO E AFIAÇÃO, DO ÂNGULO DE AFIAÇÃO, SUPORTE DA PONTEIRA E PONTEIRA.	37
FIGURA 25 RELATÓRIO DE MEDIDA DAS PONTEIRAS	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	PROCEDIMENTO DO ENSAIO	18
2.2	EQUIPAMENTO	19
2.3	PONTEIRA DE AÇO	20
2.4	FORÇA APLICADA	23
2.5	SUPERFÍCIE DA AMOSTRA	24
2.6	DISTÂNCIA, VELOCIDADE E QUANTIDADE DE TESTES	26
2.7	MEDIDA DO DESGASTE DA PONTEIRA.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR	30
3.1.1	Equipamentos.....	31
3.1.2	Ponteira	31
3.1.3	Colocação da amostra.....	32
3.1.4	Realização do teste	32
3.1.5	Medida do desgaste da ponteira	34
3.1.6	Resultados.....	36
3.1.7	Pós teste.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	ARTIGO 1.....	40
1	INTRODUÇÃO	41
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL DO CAI DE 28 AMOSTRAS DE ROCHAS (ÍGNEAS, METAMÓRFICAS E SEDIMENTARES)	52
4.2	ANÁLISE DOS DADOS DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS ROCHAS EM SUAS SUPERFÍCIES SERRADA E DE FRATURA NATURAL	54
4.3	MICROESTRUTURA E FASES MINERAIS DAS ROCHAS POR FEG- SEM/EDS/EBSD	56
4.4	AMPLITUDE DOS RESULTADOS DO CAI NAS AMOSTRAS DE ROCHA NATURAIS E SERRADAS	56
4.5	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO AXIAL E DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS ROCHAS	57
5	CONCLUSÕES	60
	AGRADECIMENTOS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	62
	ANEXO 1 - DADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE CAI EM SUPERFÍCIE SERRADA (CAIS) E EM SUPERFÍCIE NATURAL (CAIFB).....	65
	ANEXO 2 - DADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE CAI EM SUPERFÍCIE SERRADA (CAIS) E NATURAL (CAIFB)	66
	ANEXO 3 - DADOS DA CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL E CERCHAR	67
4.2	ARTIGO 2.....	68

1	INTRODUCTION	68
2	MATERIALS AND METHODS	70
2.1	STEEL CHARACTERISATION	70
2.2	WEAR TEST – CERCHAR ABRASIVENESS TEST (GCTS RAA-100).....	71
2.2.1	Wear coefficient	71
2.3	ROCK CHARACTERIZATION	71
3	RESULTS	72
3.1	STEEL PIN WEAR MECHANISMS	72
3.1.1	Severe wear	72
3.1.2	Mild wear	73
3.1.3	Transition	74
4	DISCUSSION	76
5	CONCLUSIONS	77
	ACKNOWLEDGEMENTS	78
	REFERENCES	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O desgaste excessivo das ferramentas de perfuração em projetos de escavação mecanizada em rocha é um problema antigo e desafiador. Com o crescimento no número de projetos que envolvem escavação em rocha, principalmente nas perfurações HDD (Horizontal Directional Drilling) na expansão da rede dutoviária realizada pela Petrobras nos anos de 2012 e 2013, a previsão do consumo das ferramentas de perfuração passou a ser uma parte essencial na fase de investigação geológico-geotécnica do projeto.

As brocas tricônicas e discos de corte utilizados nas escavações em rocha em HDD e TBM (Tunnel Boring Machine) respectivamente são, em sua maioria, importadas. Portanto, para atender ao orçamento e aos prazos do projeto, a previsão do número de brocas deve ser realizada com precisão, pois além dos custos de importação, a paralização da obra para solicitação de novas brocas durante a perfuração também gera custos adicionais.

A partir da demanda pela melhora na previsão do consumo dessas ferramentas, afim de evitar disputas judiciais por aditivos nos projetos, se idealizou o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de novas alternativas de ensaios de abrasividade em rochas” (Termo de Cooperação nº6000.0099630.15.3), no qual esta inserido este trabalho. O objetivo do projeto é aperfeiçoar o subsídio para a previsão do desgaste das brocas em perfurações HDD, que até então era feito com base no código IADC (International Association of Drilling Contractors) que considera unicamente a resistência à compressão uniaxial da rocha.

O parâmetro mais associado ao desgaste das ferramentas utilizadas na perfuração é a abrasividade. Esta propriedade é definida como a capacidade que o solo ou a rocha apresentam de remover material da superfície metálica das brocas ou discos de corte resultando no desgaste das mesmas.

Existem diversos métodos de investigação e quantificação da abrasividade, que variam conforme a escala analisada e a disponibilidade de recursos do projeto. Estes métodos podem ser classificados como ensaios em escala real, ensaios em modelo reduzido, ensaios de laboratório e a aplicação de índices geotécnicos. Devido a praticidade, ao baixo custo e a aplicabilidade a qualquer tipo de projeto, um dos ensaios mais utilizados para a determinação da abrasividade é o ensaio Cerchar.

O procedimento deste ensaio é normatizado pela ASTM D7625 (2010) e

consiste em uma ponteira de aço, com dureza 55 HRC e com uma ponta cônica afiada a 90°, que risca paralelamente a superfície horizontal da amostra por uma distância de 10 mm e sob uma força aplicada constante de 70 N. O desgaste abrasivo é quantificado através do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI), obtido pela medida do diâmetro (unidade de 0.01 mm) desgastado da ponteira multiplicado por 10. As rochas são classificadas de acordo com o CAI de muito pouco abrasivas (CAI 0,3 a 0,5) a quartzíticas (CAI 6,0 a 7,0).

A maior dificuldade no estudo do desgaste das ferramentas está na aplicação dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório, no campo, pois o processo de perfuração envolve diversas variáveis, que nem sempre são viáveis de serem reproduzidas e consideradas nos ensaios.

Uma das maneiras de fazer a transferibilidade dos resultados dos ensaios de desgaste para os projetos de escavação é através da identificação dos mecanismos de desgaste atuantes na interação entre o abrasivo, que neste caso é a rocha, e o metal.

Para abranger tanto o estudo do ensaio de abrasividade Cerchar quanto a utilização deste ensaio como suporte na previsão do desgaste de ferramentas em projetos de perfuração, este trabalho contempla dois conjuntos de resultados que são complementares e que estão apresentados na forma de dois artigos acadêmicos.

O primeiro artigo se refere ao estudo dos parâmetros de realização do ensaio de abrasividade Cerchar e a análise da influência destes nos resultados do CAI, para 28 amostras de rocha (ígneas, metamórficas e sedimentares) analisadas em três laboratórios brasileiros por meio de uma comparação interlaboratorial. A partir desta comparação, dois parâmetros foram estudados em detalhe: a condição da superfície da amostra e caracterização microestrutural. Os resultados de todas as análises Cerchar foram agrupadas por tipo de rocha e um intervalo de valores de CAI foi estabelecido para cada um. Por fim, foram apresentados os resultados da avaliação estatística entre os dados de abrasividade e de resistência à compressão uniaxial da rocha, para validar a eficiência do ensaio de abrasividade Cerchar.

A partir dos resultados preliminares da avaliação estatística, que demonstraram uma baixa correlação entre as variáveis analisadas (resistência à compressão uniaxial, teor de quartzo, abrasão los angeles) e o Cerchar, se decidiu mudar o enfoque da investigação. O ensaio Cerchar foi definido como um sistema tribológico, a rocha passou a ser o abrasivo (contra-corpo) e a ponteira de aço o corpo.

Nesta nova configuração, o segundo artigo apresenta uma proposta de classificação do desgaste que ocorre na ponteira de aço, a partir da identificação dos mecanismos de desgaste e os respectivos regimes (moderado, transicional e severo), em substituição aos limites numéricos arbitrários propostos na classificação de abrasividade da ASTM D7625 (2010). O objetivo desta nova abordagem é melhorar a utilização prática dos resultados de abrasividade, aproximando os resultados do ensaio de laboratório Cerchar dos projetos reais.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento deste projeto se justifica, primeiramente, pela necessidade do estudo da abrasividade de rochas, e da disseminação e utilização destes estudos nos projetos de escavação mecanizada. O assunto abordado neste projeto é pouco desenvolvido no Brasil, como confirmado através da revisão bibliográfica, principalmente se comparado com países como a França, Alemanha, Arábia Saudita e Estados Unidos. Nestes países, a realização de ensaios de abrasividade e a utilização destes ensaios na previsão do consumo de ferramentas em projetos de perfuração é amplamente difundido.

A parametrização dos ensaios de abrasividade Cerchar, como sendo um dos ensaios mais aceitos na determinação da abrasividade de rochas, se faz necessária previamente a disseminação comercial deste ensaio no Brasil, já que este ensaio ainda se mantém restrita a três laboratórios. É necessário que haja uma verificação dos parâmetros fornecidos pela norma ASTM D7625 (American Society for Testing and Materials), para que estes se adequem aos tipos de rocha encontradas no país, que em sua maioria apresentam elevado grau de alteração.

Justifica-se pela necessidade de entender os processos de desgaste atuantes no ensaio de abrasividade Cerchar visando melhorar a transferibilidade entre laboratório e projetos de escavação em rocha e conseqüentemente o suporte para a previsão do desgaste das ferramentas na fase de investigação destes projetos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é o estudo da abrasividade das rochas pela utilização do ensaio de abrasividade Cerchar aplicado a previsão do consumo de brocas e discos de corte em projetos de escavação em rocha.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral consiste em analisar e estabelecer parâmetros para a realização dos ensaios de abrasividade Cerchar e analisar os mecanismos de desgaste atuantes na interação entre o metal e a rocha.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Determinação e quantificação da abrasividade da rocha
- b) Identificação dos mecanismos de desgaste na ponteira
- c) Melhorar a transferibilidade entre o ensaio de laboratório Cerchar e a previsão de consumo de ferramentas de perfuração

2 REVISÃO DE LITERATURA

Desde 1896 com o teste de Rosiwal (Fowel & Abu Bakar 2007), diversos métodos foram criados para medir a abrasividade de uma rocha. West (1981) classificou estes métodos como petrológicos ou mecânicos. Entre os métodos que utilizam a composição petrográfica estão: a escala de dureza de Moh's, dureza de Rosiwal (Rosiwal 1896), conteúdo de sílica, valor de Schimazek's F (Schimazek & Knatz 1970), porcentagem de quartzo, porcentagem de quartzo equivalente e o tamanho dos grãos. Os métodos mecânicos incluem testes laboratoriais como o teste de abrasividade Cerchar (Cerchar 1986), teste LCPC (Fowel & Abu Bakar 2007), o teste modificado do martelo de Schmidt (Janach & Merminod, 1982) e o método desenvolvido pela NTNU - Norwegian University of Science and Technology of Trondheim (Nilsen et al. 2006).

Entre os testes laboratoriais, o ensaio de abrasividade Cerchar tem sido amplamente e internacionalmente aceito na determinação da abrasividade da rocha e é considerado como um indicador confiável deste parâmetro por diversos autores. (Suana & Peters, 1982; Atkinson, 1986; West, 1986; Kasling & Thuro, 2010; Fowel & Abu Bakar, 2007, Rostami et al, 2014, Alber et al, 2014).

O ensaio de abrasividade Cerchar foi desenvolvido pelo Centre d'Études et Recherches des Charbonages de France - CERCHAR para determinar a abrasividade das rochas devido ao interesse da indústria de carvão da França em meados de 1970. (Cerchar 1986, Atkinson 1986; West 1989; Yarali et al. 2008). West (1989) com a intenção de aplicar o teste Cerchar à indústria de carvão da Inglaterra e com o início da importância da determinação da abrasividade na indústria de perfuração de túneis, produziu um modelo com design modificado do teste Francês.

Rostami et al. (2005) incluíram o aparato desenvolvido pela Colorado School of Mines - CSM como a segunda geração do teste. Porém, outros pesquisadores (Alameen & Waller 1993) mostraram propostas de modificações no equipamento original de ensaio. Tanto a proposta de criação quanto a de modificação dos equipamentos e dos parâmetros de ensaio deflagrou a geração de uma grande diversidade de modelos do teste, com variação dos resultados de uma mesma amostra em laboratórios diferentes (Rostami et al. 2014), as quais são geradas principalmente por modificações na dureza da ponteira utilizada, tipo da medida da ponteira e precisão dos instrumentos de medição e do operador. A imprecisão dos resultados gerada pela

ramificação desordenada do teste e dos parâmetros do Cerchar na década de 90 produziu custos adicionais e atrasos em obras de túneis na Europa, América do Norte e Austrália, como relatado por Kasling & Thuro (2010).

Deste então, trabalhos vêm sendo conduzidos (Yarali et al. 2008, Kasling & Thuro 2010; Albert et al. 2014, Rostami et al. 2014; Majeed & Abu Bakar 2015) com o objetivo de determinar e quantificar os fatores que interferem no teste de abrasividade Cerchar, sejam eles inerentes às características da rocha ou à rotina de realização dos ensaios.

2.1 PROCEDIMENTO DO ENSAIO

O procedimento do ensaio de abrasividade Cerchar consiste em uma ponteira de aço, com uma ponta cônica afiada a 90°, a qual risca paralelamente a superfície de uma amostra por uma distância de 10 mm sob uma força constante de 70 N (FIGURA 1). O potencial abrasivo da rocha é quantificado através do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI), obtido pela medida do diâmetro (intervalo def 0.01 mm) da ponteira desgastada, multiplicada por 10. Este ensaio é normatizado pela ASTM D7625 (2010), segundo a qual cinco testes devem ser realizados em cada amostra de rocha para atingir um valor médio. A face da rocha amostrada deve ser uma superfície natural de fratura, que pode ser obtida pela quebra da amostra por um martelo. No caso de rochas heterogêneas, em que esta superfície não seja alcançada através da quebra e seja necessário o uso de uma serra diamantada, o valor de CAI deve ser corrigido.

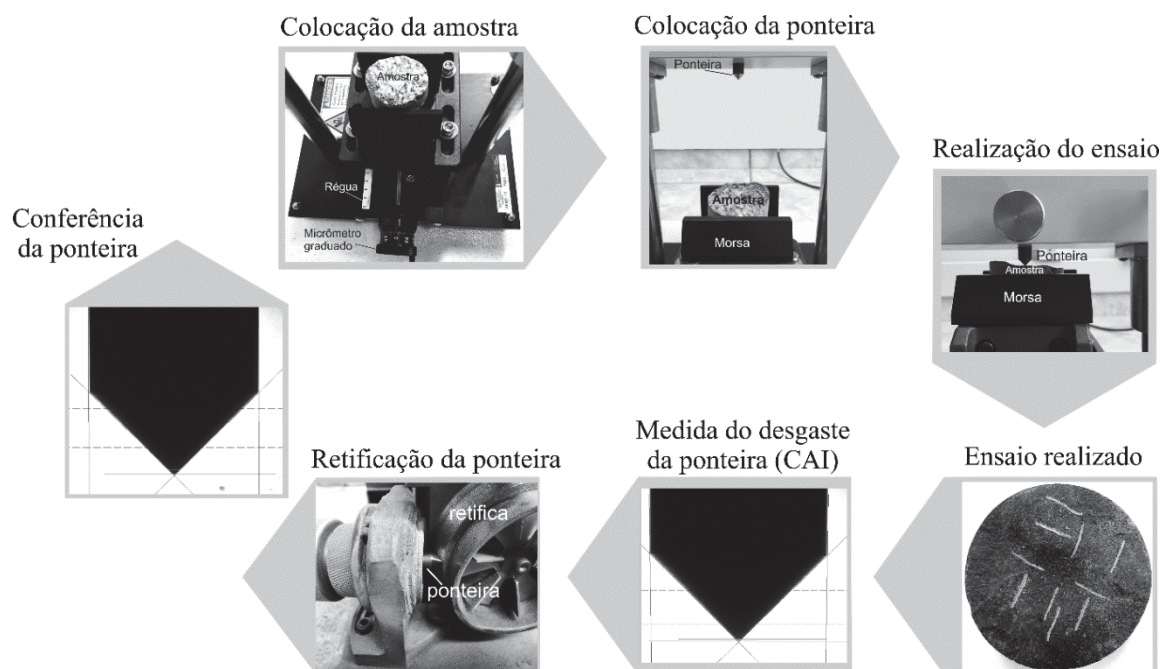


FIGURA 1: FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR.
FONTE: O AUTOR (2017)

Após a medida do diâmetro da superfície desgastada da ponteira de aço, e conversão para o CAI, a rocha é classificada de acordo com o valor obtido em rocha muito pouco abrasiva até quartzítica (muito abrasivas), segundo a Tabela 1.

TABELA 1: CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS SEGUNDO O ÍNDICE DE ABRASIVIDADE CERCHAR (CAI)

CLASSIFICAÇÃO	VALOR MÉDIO DE CAI HRC 55 (ASTM 2010)	VALOR MÉDIO DE CAI HRC 40 (ASTM 2010)	VALOR MÉDIO DE CAI (Alber et al. 2014)
Muito pouco abrasiva	0.30-0.50	0.32-0.66	0.10-0.40
Pouco abrasiva	0.50-1.00	0.66-1.51	0.50-1.90
Abrasividade média	1.00-2.00	1.51-3.22	2.00-2.90
Muito abrasiva	2.00-4.00	3.22-6.62	3.00-3.90
Extremamente abrasiva	4.00-6.00	6.62-10.03	>5
Quartzítica	6.00-7.00	N/A	N/A

FONTE: ASTM D7625 (2010); ALBER ET AL. (2014).

2.2 EQUIPAMENTO

Dois modelos de equipamentos podem ser utilizados na realização do ensaio Cerchar, o equipamento Cerchar original (FIGURA 2 A) e o modificado por West (1989) (FIGURA 2 B). Ambos apresentam semelhanças e diferenças descritas e confrontadas por diversos autores (Kasling & Thuro 2010, Rostami et al. 2014, Alber et al. 2014, Majeed & Abu Bakar 2015). Os dois modelos são descritos na norma ASTM D7625 (2010), nas sugestões da ISRM (*International Society of Rock*

Mechanics) (Alber et al. 2014) e nos trabalhos originais de West (1989) e CERCHAR (1986).

Os equipamentos utilizam um grampo rígido para prender e imobilizar a amostra de rocha, sendo que West (1989) sugere que a amostra (FIGURA 2 A5 e B4) tenha um tamanho de aproximadamente 30 mm³, para que seja adequadamente presa na morsa, enquanto a norma ASTM D7625 (2010) sugere um diâmetro ou comprimento mínimo de 50 mm. No Cerchar original a ponteira é movimentada manualmente, enquanto que a amostra de rocha é imóvel. Já no modelo de West, a amostra de rocha se move sob a ponteira estática, com o auxílio de uma manivela. Cada giro da manivela move a amostra um milímetro, os 10 giros necessários para completar 10 mm, devem ser completados em até um minuto (West 1989). A velocidade do teste varia para os dois modelos e é de 10 mm/s para o aparato original Cerchar e de 1 mm/s para o modelo de West (1989). (ASTM D7625 2010).

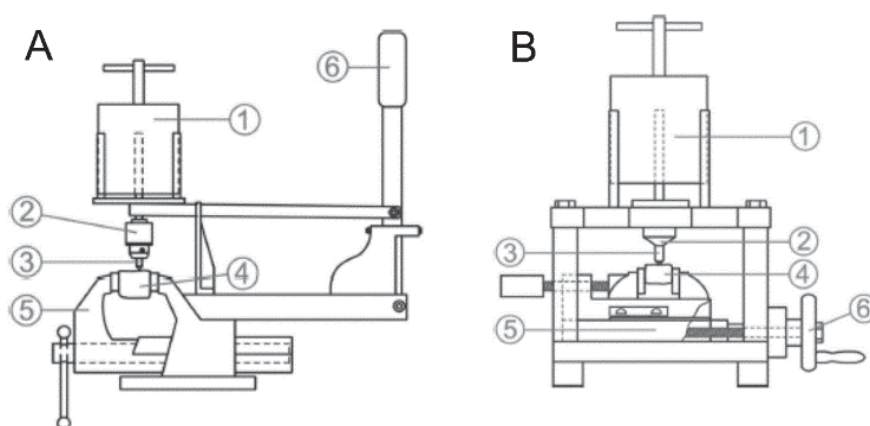


FIGURA 2: EQUIPAMENTO DO ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR **(A)** MODELO CERCHAR ORIGINAL DESENVOLVIDO PELO LABORATÓRIO CERCHAR (1986): (1) PESO APLICADO (2) SUPORTE DA PONTEIRA (3) PONTEIRA DE AÇO (4) AMOSTRA DE ROCHA (5) GRAMPO (6) ALAVANCA MANUAL **(B)** MODELO ADAPTADO DE WEST (1989): (1) PESO APLICADO (2) SUPORTE DA PONTEIRA (3) PONTEIRA DE AÇO (4) AMOSTRA DE ROCHA (5) SUPORTE MÓVEL (6) MANIVELA. FONTE: ROSTAMI ET AL. (2014).

Aydin et al. (2016) testaram 13 amostras em ambos os equipamentos, Cerchar original e modificado por West, e concluíram que o equipamento não possui influência no teste. Os resultados de CAI no Cerchar original foram ligeiramente maiores, mas a diferença foi de cerca de 1%.

2.3 PONTEIRA DE AÇO

A abrasividade é determinada pela diferença relativa de dureza entre a

ponteira de aço e a amostra de rocha. Portanto, as características da ponteira são muito importantes para manter a correlação entre ensaios em laboratórios distintos.

De acordo com a norma francesa NF P 94-430-1 (Michalakopoulos et al. 2006), a ponteira deve ser confeccionada em aço, com uma ponta cônica afiada com um ângulo de $90^\circ (\pm 3^\circ)$ e com 1 mm de comprimento, o restante da ponteira de ser maior que 15 mm (FIGURA 3). Segundo a recomendação ISRM (Alber et al. 2014), o diâmetro da ponteira deve ser de no mínimo 6 mm e a porção visível durante o teste deve ter no mínimo 15 mm. A ASTM D7625 (2010) sugere que a ponteira deve ser confeccionada em aço, com dureza de 55 HRC (Rockwell Hardness Scale), comprimento maior que 15 mm e diâmetro maior que 10 mm. A norma utiliza as equações de normatização propostas por Stanford & Hagan (2009) para casos em que a ponteira utilizada possuir dureza menor.

Quanto à composição e à dureza do aço utilizado, dois trabalhos podem ser consultados como referência, Michalakopoulos et al. (2006) e Stanford & Hagan (2009).



FIGURA 3: IMAGENS DAS PONTEIRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR. FONTE: O AUTOR (2017).

O ensaio Cerchar original recomenda o uso de aço com resistência à tração de 2000 MPa, mas nenhuma observação é feita quanto à dureza do aço. West (1989) recomenda uma ponteira feita com aço EN24 e resistência a tração de 2000 MPa, porém com tratamento térmico para 40 HRC. AFNOR (2000; citado por Michalakopoulos et al. 2006) recomenda que o aço tenha dureza entre 54 e 56 HRC. A ISRM (Alber et al. 2014) recomenda a dureza de $55(\pm 1)$ HRC. As recomendações de cada autor quanto à dureza e resistência do aço utilizado na confecção da ponteira estão resumidas na Tabela 2.

TABELA 2: RECOMENDAÇÕES DA RESISTÊNCIA, DUREZA E TIPO DO AÇO A SER USADO NA CONFECÇÃO DAS PONTEIRAS DE ACORDO COM OS DIVERSOS AUTORES

REFERÊNCIA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	DUREZA	TIPO DO AÇO
Suana e Peters (1981)	2000	HRC 54-56	-
Atkinson et al. (1984)	-	HRC 56	EN24-25
CERCHAR (1986)	2000	-	-
West (1989)	2000	HRC 40	EN24
Atkinson (1993)	2000	HRC 54-56	-
Al-Ameen e Waller (1994)	-	HRC 56	EN24
AFNOR (2000)	-	HRC 54-56	-
Plinninger et al. (2003)	2000	HRC 55	115CrV4
ASTM D7625 (2010)	-	HRC 55 +-1	-
Alber et al (2014)	-	HRC 55 +-1	-

Michalakopoulos et al. (2006) analisaram 68 amostras de seis tipos diferentes de rochas e realizaram testes utilizando aços com dureza 40 HRC e 55 HRC, o primeiro especificado no teste original e o segundo a partir da recomendação de West (1989). As principais variações composicionais entre estas duas durezas do aço são as porcentagens de Cromo (Cr), Níquel (Ni), Molibdênio (Mo) e Carbono (C), como especificado na Tabela 3. O resultado deste estudo comprovou uma correlação linear entre CAI_{55} e CAI_{40} descrita pela Equação (1), com forte relação estatística e um nível de confiança de 99%.

TABELA 3: COMPARAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO DAS PONTEIRAS FEITAS COM AÇO DE DUREZA HRC₅₅ E HRC₄₄

TIPO DA PONTEIRA	CAI_{55}	CAI_{40}
HRC	55	40
C %	0.60	0.40
Ni %	-	1.80
Cr %	4.50	0.80
Mn %	0.80	0.70
Mo %	0.50	0.25
Si %	0.35	-
V %	0.20	-

FONTE: MICHALAKOPOULOS ET AL. (2006)

$$CAI_{55} = 0.110914 + 0.587356CAI_{40} \quad (1)$$

CAI_{55} : Aço dureza 55 HRC
 CAI_{44} : Aço dureza 44 HRC

Stanford & Hagan (2009) testaram sete tipos de aço com a mesma dureza e nove níveis de dureza (15 a 60 HRC) de um mesmo tipo de aço em uma amostra de arenito denominado Mt. White Sandstone. Segundo estes autores os diferentes tipos de aço não produziram nenhum efeito no CAI e há uma correlação linear entre os

valores de CAI e a dureza do aço, onde o CAI é inversamente proporcional à dureza do aço. Esta relação pode ser expressa por meio de um modelo matemático, como demonstrado pelo gráfico da FIGURA 4.

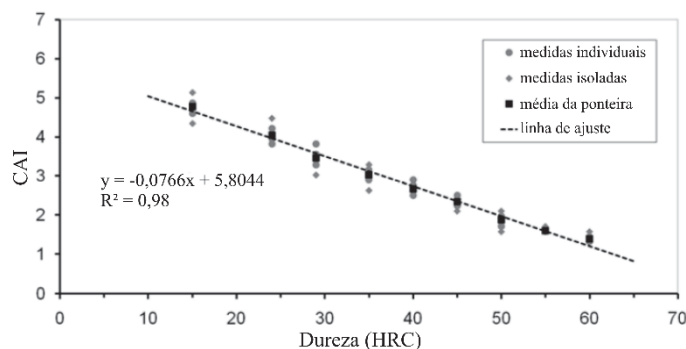


FIGURA 4: GRÁFICO DEMOSTRANDO A RELAÇÃO INVERSAMENTE PROPORCIONAL ENTRE O CAI E A DUREZA DO AÇO (HRC). FONTE: TRADUZIDO DE STANFORD & HAGAN (2009).

Uma análise dos autores Stanford & Hagan (2009) sugere ser possível variar a dureza do aço, utilizando menores durezas para rochas menos abrasivas e aço com dureza maior para rochas extremamente abrasivas, melhorando assim os resultados do teste Cerchar obtidos com rochas muito friáveis ou muito abrasivas, que são problemáticos nos intervalos extremos. Outra recomendação deste trabalho é a realização de sete repetições do teste, desconsiderando o menor e maior valor para CAI.

2.4 FORÇA APLICADA

Cerchar (1986), West (1989), ASTM (D7625, 2010) e Alber et al. (2014) sugerem que a força atuante na ponteira seja igual a 70 N, e deve incluir qualquer outro componente que possa contribuir na aplicação de força sobre a amostra durante o ensaio.

Rostami et al. (2014) ao investigarem a influência da força aplicada no ensaio de abrasividade encontraram uma correlação linear entre a força e a perda de material da ponteira (FIGURA 5). O desgaste é proporcional a força aplicada, assim qualquer força poderia ser usada, desde que mantivesse a correlação com os índices de abrasividade.

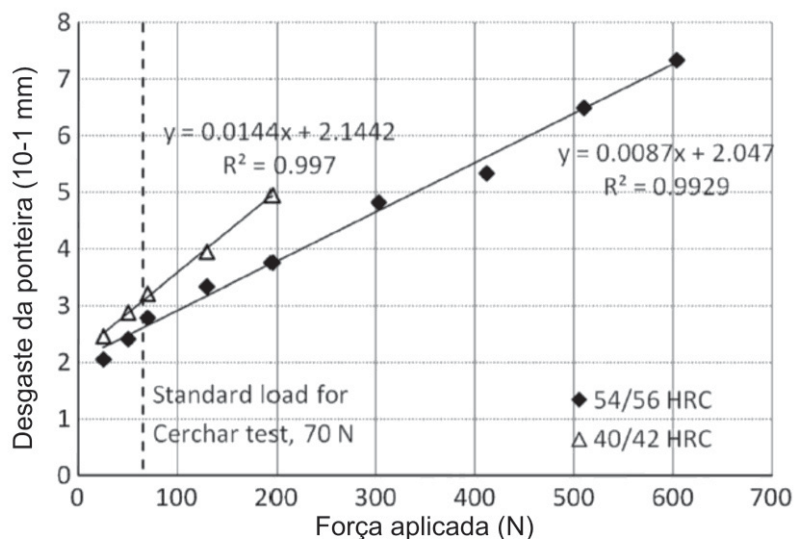


FIGURA 5: GRÁFICO DEMOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE O CAI E A FORÇA APLICADA.
 FONTE: TRADUZIDO DE ROSTAMI ET AL. (2014)

2.5 SUPERFÍCIE DA AMOSTRA

Quanto a superfície da amostra, Cerchar (1986), West (1989), ASTM D7625 (2010), Alber et al. (2014) recomendam que o teste seja realizado em uma fratura “fresca” natural da rocha, preferencialmente preservada, presente na amostra de campo, ou que pode ser obtida pela quebra com o martelo (Cerchar 1986, West 1989, ASTM D7625 2010, Alber et al. 2014) (Figura 6 A). Em casos onde a rocha é heterogênea como por exemplo, os conglomerados e xistos, é aceitável realizar o teste em uma superfície cortada em serra diamantada (Figura 6 B). Trabalhos mais recentes (Yarali & Duro 2016, Aydin et al. 2016) sugerem a utilização de superfícies serradas, por apresentarem uma menor dispersão dos dados.

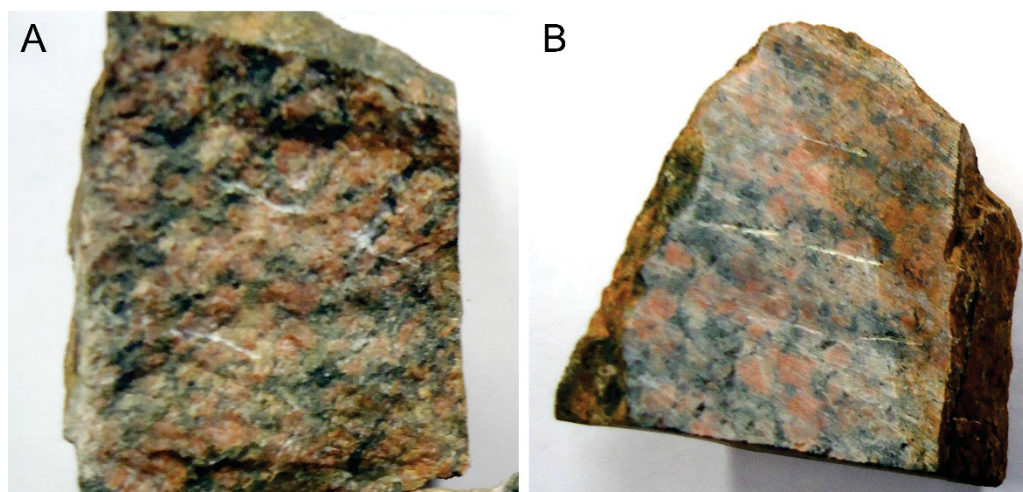


FIGURA 6 EXEMPLOS DA CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA EM (A) UMA SUPERFÍCIE DE FRATURA NATURAL OBTIDA COM A QUEBRA DO MARTELO E EM (B) UMA SUPERFÍCIE SERRADA EM SERRA DIAMANTADA. FONTE: O AUTOR (2018)

O efeito da condição da superfície da amostra é uma variável importante no teste de abrasividade. Alguns trabalhos desenvolvidos visam à correlação e quantificação da influência da superfície da amostra no CAI. Plinninger et al. (2003) observaram uma correlação entre os valores obtidos em superfícies cortadas (CAI_s – *sawn surface*) e fraturadas (CAI_{fb} – *freshly broken*), com valores de CAI 0,5 maiores em amostras com superfícies de fratura natural (CAI_{fb}), como demonstra a FIGURA 7 A. No mesmo trabalho, os autores observaram que a influência da rugosidade da superfície aumenta em rochas com alta abrasividade, enquanto em rochas pouco abrasivas os resultados obtidos nos dois tipos de superfície são semelhantes.

Plinninger & Thuro (2004) relatam que uma correlação entre CAI_{fb} e CAI_s seria difícil, devido à grande dispersão dos valores de amostras com alto CAI. A norma ASTM utiliza a equação de correlação de Plinninger et al. (2003) Equação (2) cuja representação gráfica está indicada na FIGURA 7 A. Fowel & Abu Bakar (2007) apresentaram a Equação (3). Majeed & Abu Bakar (2015) demonstram uma correlação linear entre CAI_{fb} e CAI_s segundo a Equação (4), demonstrada no gráfico da FIGURA 7 B, e confirmaram as equações de correlação publicadas anteriormente. (Al-Ameen & Waller 1994, Plinninger et al. 2003, Fowel & Abu Bakar 2007, ASTM-D7625 2010, Kasling & Thuro 2010). Yarali & Duro (2016) também encontraram uma correlação linear entre CAI_{fb} e CAI_s , aonde o CAI em superfícies rugosas é cerca de 18% maior que em superfícies serradas.

$$CAI_{fb} = 0.99 \times CAI_s + 0.48 \quad (2)$$

$$CAI_{fb} = 1.05 \times CAI_s + 0.18 \quad (3)$$

$$CAI_{fb} = 1.14 \times CAI_s - 0.029 \quad (4)$$

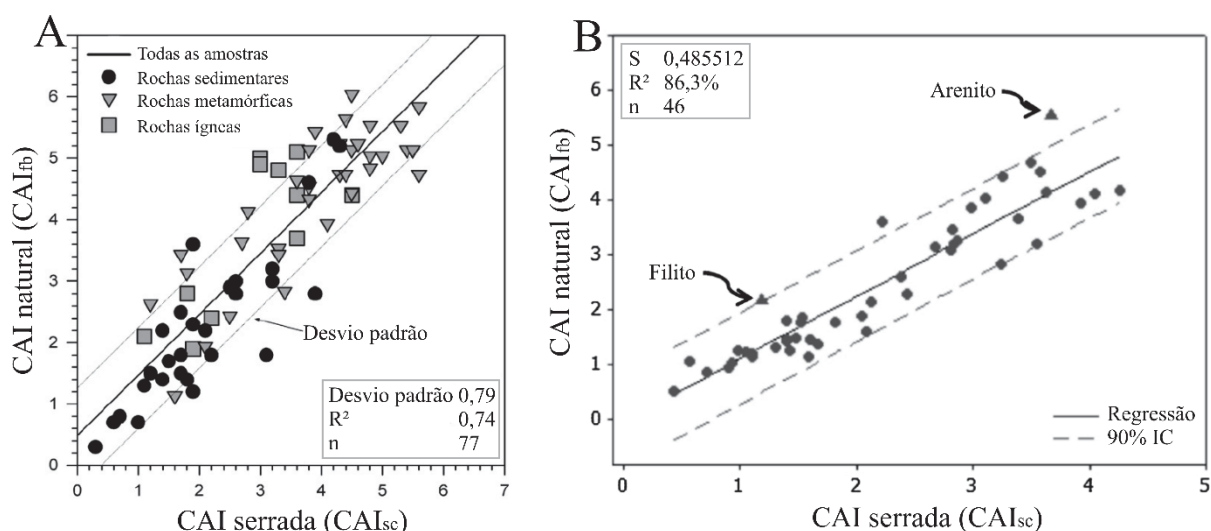


FIGURA 7: GRÁFICOS DEMONSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO E RELAÇÃO DOS VALORES DE CAI_s E CAI_{fb} PARA (A) PLINNINGER ET AL. (2003) E (B) MAJEED & ABU BAKAR (2015).

2.6 DISTÂNCIA, VELOCIDADE E QUANTIDADE DE TESTES

A distância do teste é parametrizada em 10 mm pela ASTM D7626 (2010) e sugerida por West (1989), Plinninger et al. (2003), Alber et al. (2014) e Cerchar (1986). Sendo que, 70% do desgaste da ponteira ocorre no primeiro milímetro 85% do valor de CAI é atingido após dois milímetros do risco e 15% nos últimos oito milímetros do teste (FIGURA 8) (Al-Ameen & Waller 1994). Variações do valor de CAI são insignificantes se a distância do teste for mantida em $10 \pm 0,5$ mm. (ASTM D7626 2010). Em um estudo mais recente realizado por Yarali & Duru (2016), os autores indicam que 60 a 70% do desgaste é obtido nos primeiros 2 mm, este valor continua a crescer até estabilizar próximo dos 16 mm (FIGURA 9). Por isso, os autores sugerem que a distância do ensaio passe a ser de 15 mm. O desgaste inicial é maior na fase inicial do ensaio, onde a área contato entre a ponteira e a rocha é pequena, resultando em uma pressão elevada, conforme a área de contato aumenta com o desgaste da ponteira a força aplicada é distribuída e a pressão diminui, resultando em uma taxa de desgaste menor.

West (1986) sugere que o teste seja realizado em um minuto. Plinninger et al. (2003) sugerem uma velocidade de 10 mm/s no aparelho Cerchar original e de 1 mm/s no aparelho modificado de West. Esta recomendação é mantida nas normas ASTM D7626 (2010) e ISRM (Alber et al. 2014). Rostami et al. (2014) analisaram a influência da velocidade no teste nos valores de CAI e concluíram que não há uma correlação perceptível e, portanto, a velocidade do teste não influencia os resultados.

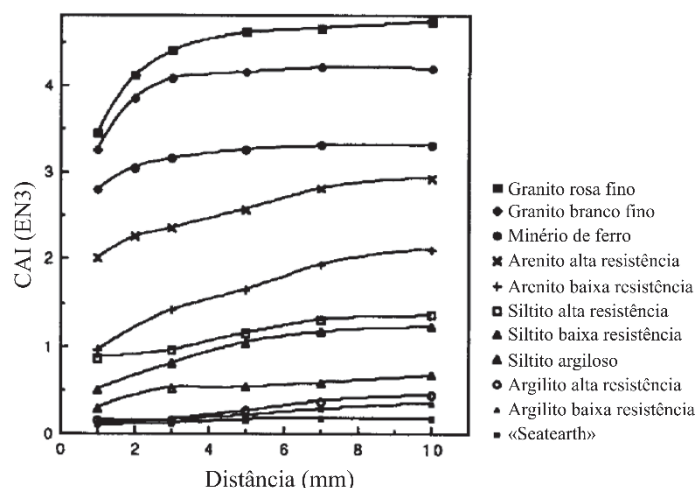


FIGURA 8: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA DO ENSAIO E O CAI. FONTE: AL-AMEEN & WALLER (1994)

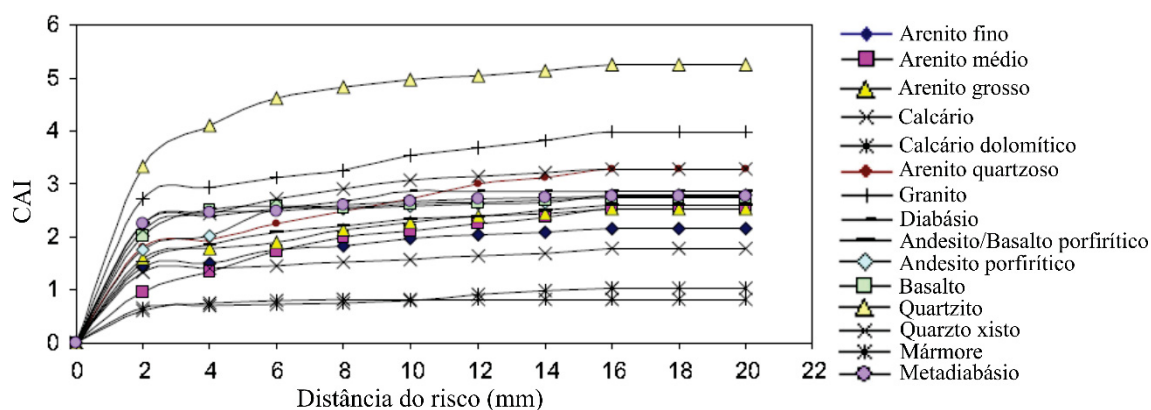


FIGURA 9: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA DO ENSAIO E O CAI. FONTE: YARALI & DURO (2016)

Cerchar (1986) considera entre dois e três testes suficientes em rocha homogênea de granulação fina, e cinco testes ou mais em rochas com grãos maiores que um milímetro. Plinninger et al. (2003) e Alber et al. (2014) sugerem cinco testes para cada amostra, visando definir uma média representativa. Segundo a ASTM D7625 (2010) se não houver estruturas com direção preferencial na rocha, devem ser realizadas cinco repetições, sendo três testes paralelos em uma direção e dois testes

perpendiculares aos primeiros.

2.7 MEDIDA DO DESGASTE DA PONTEIRA

Para realizar a medida da superfície desgastada da ponteira, a norma ASTM D7625 (2010) recomenda um microscópio com aumento mínimo de 30X, com uma régua graduada de 0.01 mm com leitura de 0.001 mm. Plinninger et al. (2003) sugere um microscópio de luz refletida, com uso de um aumento de 50X, onde o erro seria de até 0.02 mm, correspondente a 0.2 CAI; aumentos maiores que estes parecem não ser úteis, enquanto aumentos de 10X podem produzir erros significativos de até 0.1 mm (1 CAI). Alber et al. (2014) propõem um microscópio com aumento de 25X, com a leitura em régua graduada de 0.01 mm e erro possível de ± 0.005 mm. O valor de CAI será correspondente a média aritmética das medidas realizadas na amostra (Cerchar 1986, ASTM D7625 2010, Alber et al. 2014).

Embora pareça simples, a medida do desgaste da ponteira vem gerando discussões no meio acadêmico desde a criação do teste Cerchar. Inicialmente CERCHAR (1986) e West (1989) realizavam esta medida através da vista da extremidade da ponteira, conforme ilustrado na FIGURA 10 B, porém não previam nenhum detalhamento deste procedimento. Plinninger et al. (2003) não especificam se a leitura é realizada a partir da análise do topo ou da lateral da ponteira. A norma ASTM D7625 (2010) realiza a medida na face lateral da ponteira (FIGURA 10 A). Alber et al. (2014) expõem que a medida pode ser realizada em ambas perspectivas, porém recomenda a utilização da vista lateral. Os autores salientam que esta técnica possui grande dependência da sensibilidade do técnico, principalmente em rochas mais abrasivas, onde a superfície de desgaste não é uniforme, devido a lascas ou fragmentos do aço, denominados *burr*, que ficam parcialmente presos a esta superfície (FIGURA 11). O *burr*, metal deformado preso à superfície de desgaste (FIGURA 11), é a principal causa de erro na medida do CAI através da medida do topo da ponteira, pois pode gerar a supervalorização do diâmetro da superfície de abrasão, como demonstrado na (FIGURA 11 A).

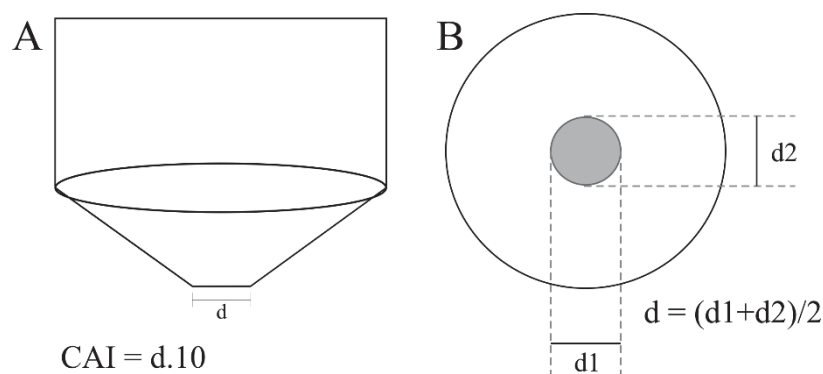


FIGURA 10: ILUSTRAÇÃO DEMOSTRANDO A CORRELAÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE DE DESGASTE (A) VISTA DA LATERAL COM DIÂMETRO INDICADO (d) E EM (B) AS MEDIDAS DOS DIÂMETROS (d_1 E d_2) EM VISTA DO TOPO DA PONTEIRA. FONTE: O AUTOR (2017)

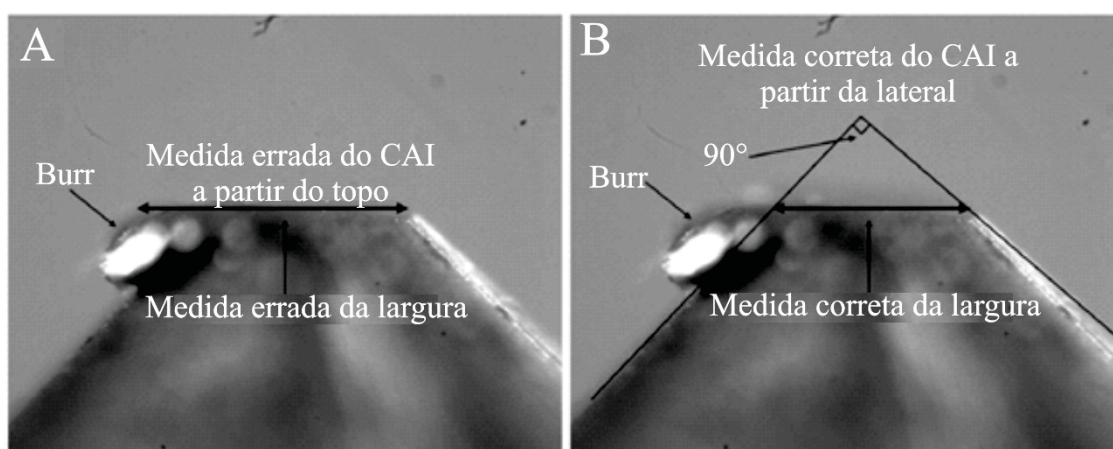


FIGURA 11: FOTOGRAFIA DA PONTEIRA DE AÇO COM FORMAÇÃO DO BURR, (A) DEMONSTRAÇÃO DA MEDIDA ERRADA DO CAI GERADA PELA PRESENÇA DO BURR E (B) DEMONSTRAÇÃO DA MEDIDA CORRETA, COM PROLONGAMENTO DAS FACES DA PONTEIRA FORMANDO O ÂNGULO DE 90° E MEDIDA CORRETA DO DIÂMETRO DA SUPERFÍCIE DESGASTADA. FONTE: TRADUZIDO DE ROSTAMI ET AL. (2014).

Majeed & Abu Bakar (2015) indicam que a técnica da medida através da lateral da ponteira foi desenvolvida pela NTNU na Noruega em 2000. A técnica consiste na re-determinação do ângulo inicial de 90° da ponteira após o teste, para a correta demarcação do início e fim da superfície de abrasão (FIGURA 11 B). Quando dimensionada através do topo, são realizadas duas medidas, perpendiculares entre si, do diâmetro da superfície desgastada da ponteira (d_1 e d_2), como indicado na FIGURA 12 B o valor de CAI deriva da média aritmética simples entre os dois valores. (CERCHAR, 1986; West, 1989).

Se a medida for realizada pela vista lateral da ponteira, são realizadas quatro determinações de " d " (FIGURA 12 A), cada uma a 90° da outra, e o valor de CAI será a média aritmética das quatro medidas (FIGURA 12 A). (Alber et al. 2014). Caso a superfície de abrasão formada na ponteira seja irregular, Alber et al. (2014) sugere

que dois diâmetros sejam determinados (d_1 e d_2), como demonstrado e a média aritmética entre eles seja utilizada (FIGURA 12 B). Caso a superfície de desgaste se apresente muito irregular (FIGURA 12 C), a ponteira deve ser descartada e novo teste deve ser realizado.

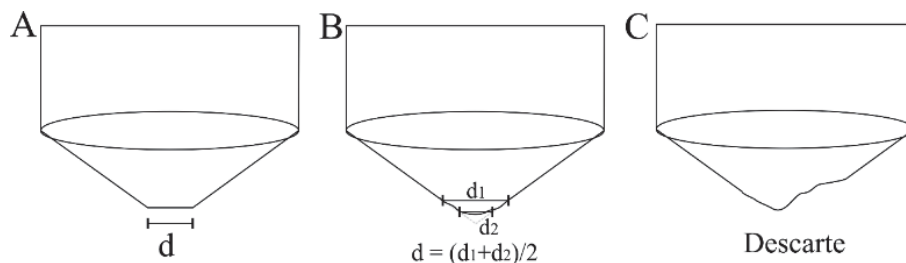


FIGURA 12: ESQUEMA DEMOSTRANDO POSSÍVEIS RESULTADOS DA SUPERFÍCIE DE ABRASÃO FORMADA NA PONTEIRA E FORMAS CORRETAS DE MEDIÇÃO: (A) DESGASTE HOMOGÊNEO, MEDIDA DO DIÂMETRO DA SUPERFÍCIE DE FORMA DIRETA, (B) DESGASTE IRREGULAR, MEDIDA DOS DOIS DIÂMETROS (d_1 E d_2) SENDO QUE O DIÂMETRO CONSIDERADO SERÁ A MÉDIA ARITMÉTICA SIMPLES ENTRE ELAS, (C) DESGASTE TOTALMENTE IRREGULAR, A PONTEIRA DEVE SER DESCARTADA E NOVO TESTE REALIZADO. FONTE: O AUTOR (2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos e a descrição das amostras utilizadas no estudo estão detalhados em cada um dos dois artigos apresentados como resultados desta pesquisa. Uma ampla revisão bibliográfica foi especialmente desenvolvida nos temas que envolvem a abrasividade de rochas, com ênfase no ensaio de abrasividade Cerchar.

Além dos materiais e métodos apresentados nos artigos, o procedimento de realização do ensaio de abrasividade Cerchar foi detalhado no item 3.1.

3.1 ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR

O ensaio de abrasividade Cerchar consiste em uma ponteira de aço, com uma ponta cônica afiada a 90° , que é riscada paralelamente a superfície da amostra por uma distância de 10 mm e sob uma força constante de 70 N. O desgaste é quantificado através do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI – *Cerchar Abrasiveness Index*), obtido pela medida do diâmetro (unidade de 0.01 mm) da ponteira, após a realização do teste, multiplicado por 10.

3.1.1 Equipamentos

Os equipamentos utilizados nos ensaios de abrasividade Cerchar foram o Cerchar modelo RAA-100 – (FIGURA 13 A) da empresa *Geotechnical Consulting & Testing System* (GCTS), o microscópio ótico GCTS RAA-AOM (FIGURA 13 B) para visualização e dimensionamento do desgaste ponteiros e o retificador de ponteiros GCTS STS-100 (FIGURA 13 C).



FIGURA 13 A) FOTOGRAFIA DO EQUIPAMENTO CERCHAR RAA-100 INSTALADO NO LABORATÓRIO, B) MICROSCÓPIO RAA-AOM DE IDENTIFICAÇÃO DO DESGASTE DAS PONTEIRAS, C) RETIFICA DE PONTEIRAS GCTS STS-100. FONTE: O AUTOR (2016)

3.1.2 Ponteira

As ponteiros utilizadas no ensaio foram importadas junto com o equipamento. Estas são constituídas de aço ferramenta AISI A2, com microestrutura é composta por matriz matensítica revenida com carbeto e dureza 55 HRC. A composição química é dada em %peso por Carbono 0,994, Silício 0,331, Manganês 0,627, Molibdênio 0,979, Vanádio 0,115 e alto teor de Cromo de 4,567.

A ponteira fica localizada na porção central inferior do módulo que contém o peso aplicado e foi fixada por um parafuso central (FIGURA 14 A). Para inserir, fixar ou retirar a ponteira ao início e término de uma repetição do ensaio, o parafuso central foi girado no sentido horário (FIGURA 14 B) e anti-horário (FIGURA 14 C) respectivamente.

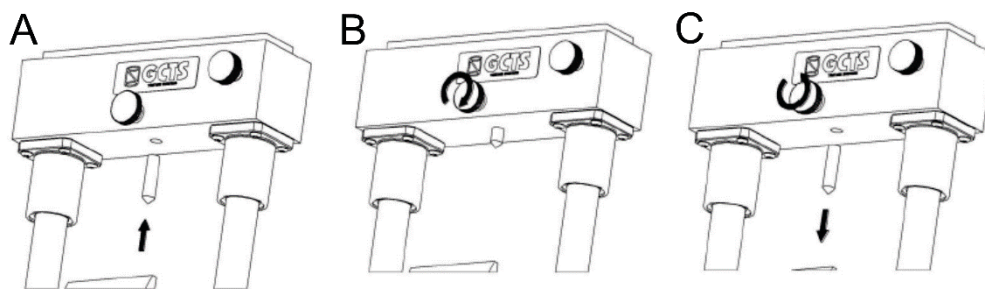


FIGURA 14 PROCEDIMENTOS PARA A INSTALAÇÃO DA PONTEIRA, A COLOCAÇÃO DA PONTEIRA, B FIXAÇÃO DA PONTEIRA, C DESTRAVAMENTO E TROCA DA PONTEIRA. FONTE: GCTS (2016).

3.1.3 Colocação da amostra

Cada amostra foi fixada por uma morsa localizada na parte inferior do equipamento (FIGURA 15 A), as dimensões máximas são de 10x10x10 cm (FIGURA 15 B). A superfície da amostra foi horizontalizada, para que a ponteira forme um ângulo de 90° com a superfície da mesma. A fixação imobilizou a amostra impedindo qualquer movimentação (FIGURA 15 C), em casos onde houve movimentação devido ao fraturamento lateral do testemunho de rocha o ensaio deve ser descartado e reiniciado.

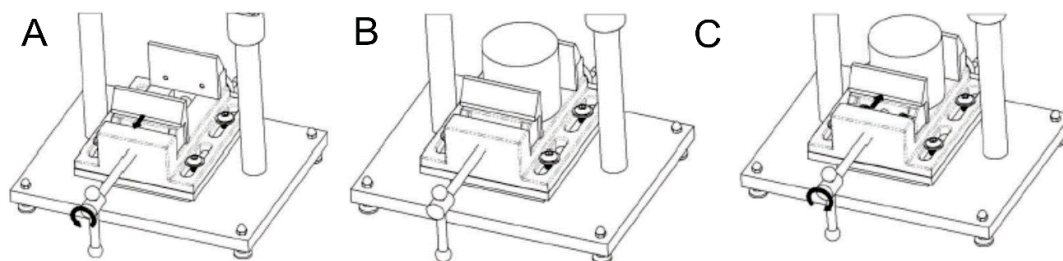


FIGURA 15 PROCEDIMENTOS PARA COLOCAÇÃO DA AMOSTRA, A ABERTURA DA MORSA, B COLOCAÇÃO DA AMOSTRA EM FORMA DE TESTEMUNHO DE ROCHA, C FIXAÇÃO DA AMOSTRA. FONTE: GCTS (2016).

3.1.4 Realização do teste

Para a realização do ensaio, o equipamento foi colocado na configuração inicial, ou seja, a posição da amostra correspondia ao início da régua graduada localizada abaixo da morsa (FIGURA 16). Isto permitiu que cinco repetições fossem realizadas em sequência, sem a necessidade de mover a amostra. O teste iniciou com o deslocamento vertical do módulo que contém o peso e a ponteira até que o mesmo fosse encostado na amostra (FIGURA 17 e FIGURA 18). A movimentação da amostra foi feita pelo micrômetro graduado localizado na lateral do equipamento (FIGURA 16). Cada giro do micrômetro corresponde a 1 mm, sendo necessários dez giros (10 mm) para cada repetição do ensaio.

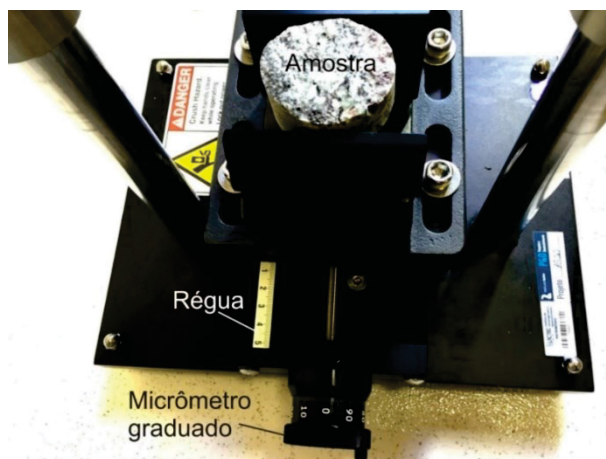


FIGURA 16 COLOCAÇÃO DA AMOSTRA, IDENTIFICAÇÃO DA RÉGUA E DO MICRÔMETRO GRADUADO. FONTE: O AUTOR (2016)

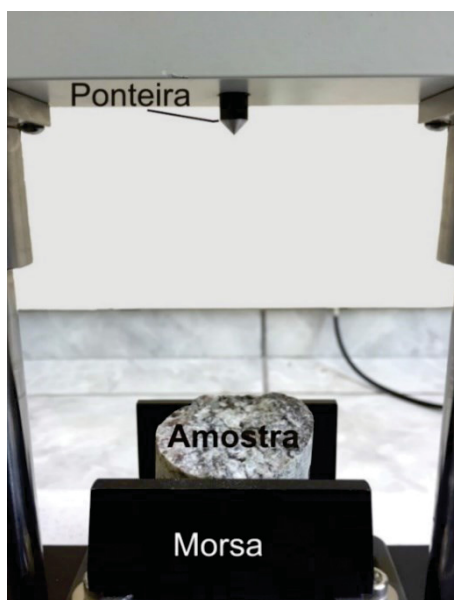


FIGURA 17 POSIÇÃO INICIAL DA PONTEIRA NO TESTE. A BASE CONTENDO O PESO A SER APLICADO E A PONTEIRA ESTÃO TRAVADAS NA POSIÇÃO INICIAL. FONTE: O AUTOR (2016)



FIGURA 18 DESLOCAMENTO VERTICAL DA PONTEIRA DA POSIÇÃO INICIAL (FIGURA 17) PARA A POSIÇÃO DE REALIZAÇÃO DO TESTE, A PONTEIRA ENCONSTA PERPENDICULARMENTE NA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA. FONTE: O AUTOR (2016)

Após o deslocamento de um centímetro a plataforma da ponteira foi erguida e travada na posição inicial (FIGURA 17) para que fosse realizada a troca da ponteira conforme demonstrado na (FIGURA 14). A nova ponteira foi verificada no microscópio antes da utilização.

Segundo a norma ASTM D7625 (2010), o procedimento do teste deve ser repetido por cinco vezes no caso de rochas isotrópicas ou 10 vezes no caso de rochas estruturadas, com cinco repetições paralelas a estrutura e cinco perpendiculares a mesma.

3.1.5 Medida do desgaste da ponteira

A medida do desgaste da ponteira é realizada utilizando o microscópio ótico RAA-AOM e o software GCTS Cerchar V3.6. O encaixe da ponteira no suporte do microscópio é magnético, mas a fixação do suporte no microscópio é manual através de parafuso do mesmo (FIGURA 19). A FIGURA 20 mostra a sequência de encaixe da ponteira no microscópio.

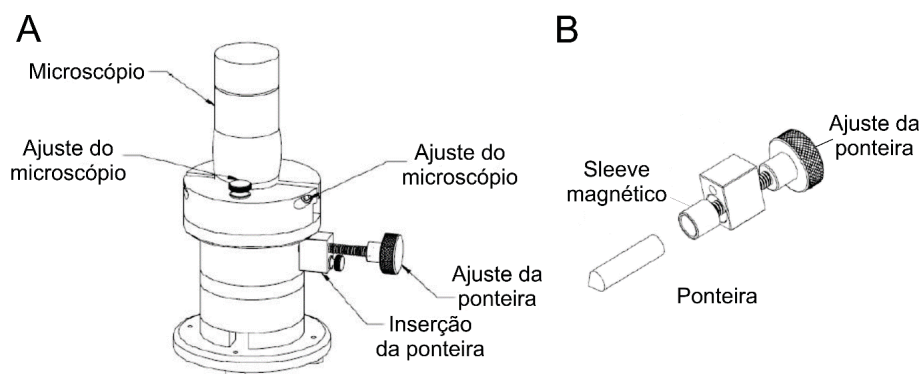


FIGURA 19 A MICROSCÓPIO RAA-AOM, B DETALHE DO ENCAIXE DA PONTEIRA NO SUPORTE.
FONTE: TRADUZIDO DE GCTS (2016)



FIGURA 20 SEQUÊNCIA DE IMAGENS DE COLOCAÇÃO DA PONTEIRA NO MICROSCÓPIO
PARA REALIZAÇÃO DA LEITURA DO DESGASTE. FONTE: O AUTOR (2016)

O software utilizou uma imagem em tempo real da câmera do microscópio para realizar a medida do desgaste. Para que haja a identificação das superfícies da ponta cônica, a ponteira foi centralizada na tela de captura. A FIGURA 21 mostra a tela inicial do software onde são inseridos os dados de identificação da amostra e do projeto.

Para cada ponteira foram realizadas duas medidas, sendo a segunda medida a 90° da primeira. Esta rotação foi feita manualmente no parafuso de ajuste da ponteira após a confirmação do software da leitura da primeira medida (FIGURA 22).

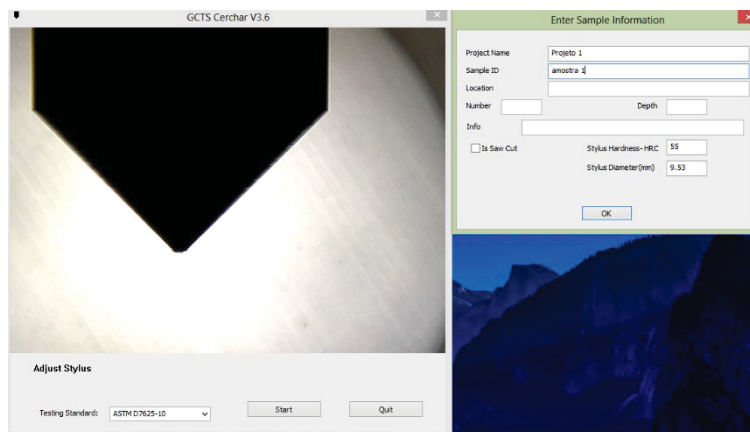


FIGURA 21 IMAGEM CAPTURADA DA TELA MOSTRANDO O INÍCIO DO SOFTWARE. A PONTEIRA APARECE NA TELA DE VISUALIZAÇÃO (À ESQUERDA), A IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO, NÚMERO DA AMOSTRA, LOCALIZAÇÃO, PROFUNDIDADE, CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE (FRESHLY BROKEN OU SAW CUT), A DUREZA DO AÇO DA PONTEIRA E AS DIMENSÕES DA PONTEIRA SÃO REQUERIDOS NA CAIXA DE DIÁLOGO (À DIREITA). FONTE: O AUTOR (2016)

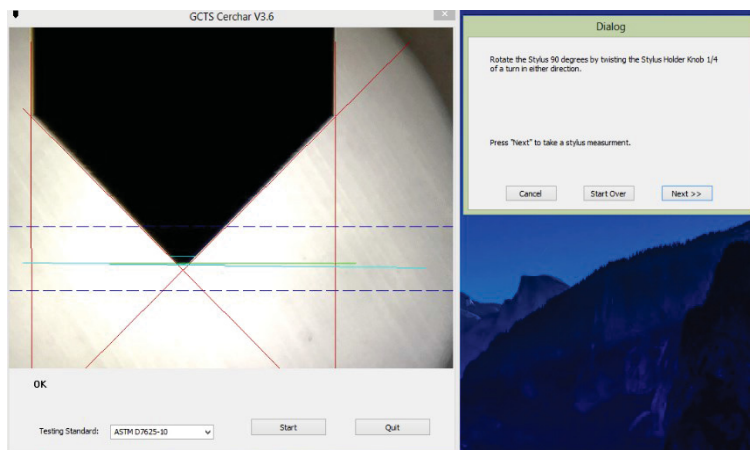


FIGURA 22 MEDIDA DO DESGASTE DA PONTEIRA SENDO REALIZADO PELO SOFTWARE COM A UTILIZAÇÃO DE LINHAS GUIA. NA CAIXA DE DIÁLOGO, A INSTRUÇÃO DADA PARA RODAR A PONTEIRA 90°, OU ¼ DE VOLTA PARA A REALIZAÇÃO DA SEGUNDA MEDIDA. FONTE: O AUTOR (2016)

3.1.6 Resultados

Após a conclusão da medida das 5 ponteiros utilizadas no ensaio, o software produziu um relatório automático que indicou as duas medidas realizadas em cada ponteira e o valor de CAI, que foi calculado pela média aritmética simples dos resultados (FIGURA 23).

Stylus 1	3.8	3.9
Stylus 2	2.5	2.9
Stylus 3	4.7	4.3
Stylus 4	4.1	5.1
Stylus 5	4.7	5.1
Average =	4.1	

CAI= 4.1

FIGURA 23 CAPTURA DE IMAGEM DO DOCUMENTO PDF DO RELATÓRIO DO SOFTWARE, INDICAÇÃO DA MEDIDA DAS PONTEIRAS (STYLUS 1-5), MÉDIA (AVERAGE) E VALOR DE CAI. FONTE: O AUTOR (2016)

3.1.7 Pós teste

Outro equipamento necessário para a realização do ensaio de abrasividade Cerchar foi uma retifica de ponteiros, STS-100 *Stylus Tip Sharpenes* (FIGURA 24). Este equipamento garante que o ângulo de afiação da ponteira seja de 90°.

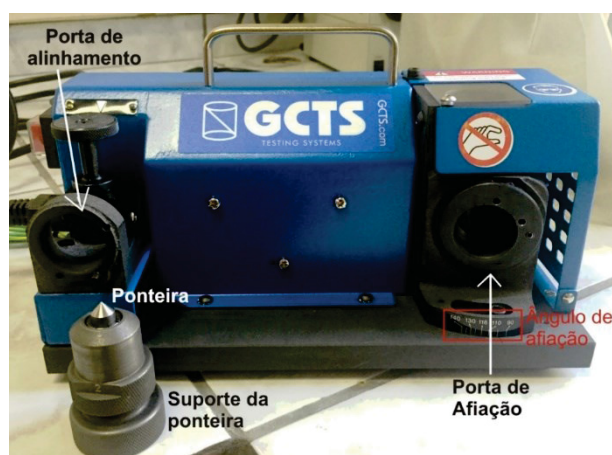


FIGURA 24 RETIFICA DE PONTEIRAS STS-100 E LOCALIZAÇÃO DAS PORTAS DE ALINHAMENTO E AFIÇÃO, DO ÂNGULO DE AFIÇÃO, SUPORTE DA PONTEIRA E PONTEIRA. FONTE: O AUTOR (2016)

Após as etapas de rebolo as ponteiros foram verificadas no microscópio RAA-AOM. O método de verificação foi o mesmo utilizado para a medida do CAI. Foram verificadas cinco ponteiros de cada vez e ambas as medidas devem ser iguais a 0.0 (FIGURA 25) indicando que a ponteira está na condição inicial.



Stylus 1	0.0	0.0
Stylus 2	0.0	0.0
Stylus 3	0.0	0.0
Stylus 4	0.0	0.0
Stylus 5	0.0	0.0
Average =	0.0	

CAI= 0.0

FIGURA 25 RELATÓRIO DE MEDIDA DAS PONTEIRAS APÓS APONTAR 5 PONTEIRAS. FONTE: O AUTOR (2016)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho estão apresentados na forma de dois artigos acadêmicos que foram submetidos para as revistas:

1. Cerâmica – Revista oficial da Associação Brasileira de Cerâmica - ABCeram
Editora: Scielo
Qualis CAPES: B1
2. Wear – An international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear.
Editora: Elsevier
CiteScore: 3.00
Impact Factor: 2.531
Qualis CAPES: A1

4.1 ARTIGO 1

Investigação da abrasividade de rochas pelo método Cerchar como princípio de avaliação do desgaste abrasivo de ferramentas perfuração em projetos de escavação

Investigation of rocks abrasiveness by the Cerchar method as a principle of evaluation of the abrasive wear of drilling tools in excavation projects

G. R. Piazzetta^a, D. Munch, G. Pintaúde^b, K. F. Portella^c, A. C. F. Portella^d, I. F. R. Figueira^c, L. E. Lagoeiro^a

^a Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: grpiazzetta@gmail.com;

^b Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

^c Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - LACTEC, Centro Politécnico UFPR, 81.531-980, Curitiba, Paraná, Brasil. portella@lactec.org.br

^d Universidade Federal do Tocantins, Departamento de Ciências Exatas, Campus Universitário de Gurupi, Gurupi, Tocantins, Brazil. portella@uft.edu.br

RESUMO

O desgaste excessivo das ferramentas de perfuração pode representar um custo adicional expressivo em projetos de escavação em rocha. Para reduzir este risco, a fase de investigação geológico-geotécnica deve incluir estudos para subsidiar a previsão de consumo dessas ferramentas. A abrasividade é o parâmetro mais associado a este desgaste, pois é definida como o potencial que a rocha possui de progressivamente remover material da superfície de ferramentas metálicas (brocas e discos de corte). Um dos métodos mais aceitos e utilizados na determinação da abrasividade é o ensaio Cerchar. Este estudo realizou uma revisão dos parâmetros deste ensaio e verificou a influência deles nos resultados utilizando uma comparação interlaboratorial. Dois parâmetros foram avaliados em detalhe: a influência da superfície da amostra e a constituição microestrutural, utilizando FEG-SEM/EBSD. Os resultados de abrasividade foram agrupados por tipo de rocha e foram avaliados estatisticamente com os dados de resistência à compressão uniaxial.

Palavras-chave: Abrasividade Cerchar, EBSD, Rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, Resistência à compressão uniaxial

ABSTRACT

The excessive wear of drilling tools can represent surcharges to rock excavation projects. To avoid this risk, studies to predict the wear of these tools should be included in the geological-geotechnical phase of the project. The abrasivity is the parameter which is most correlated to wear because it is defined as the capability of rocks to progressively remove material from metallic surfaces (drills and disc-cutters). One of the most accepted and utilized methods to determine abrasivity is the Cerchar test. This study provides a review of this test parameters and verifies the influence of them on the results utilizing an interlaboratory comparison. Two parameters were evaluated in detail: the impact of the sample surface and the microstructural formation, which was analyzed using FEG-SEM/EBSD. The abrasivity results were grouped by type of rocks and were statistically evaluated together with the uniaxial compressive strength data.

Keywords: *Cerchar abrasiveness; EBSD; igneous, metamorphic and sedimentary rocks; uniaxial compressive strength.*

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento no número de projetos que envolvem a escavação em rocha com a utilização de tuneladoras (TBM – Tunnel Boring Machine) e furos direcionais (HDD – Horizontal Directional Drilling) a previsão do desgaste das ferramentas de perfuração é uma parte essencial na fase de investigação do projeto, pois pode representar um custo expressivo. Atualmente, o estudo para a previsão do desgaste é feito com base na resistência à compressão uniaxial da rocha. Um dos problemas na utilização da resistência à compressão uniaxial é que este ensaio é classificado como macroscópico, mas o desgaste das ferramentas de perfuração ocorre em escala microscópica [1], e, portanto, a caracterização das rochas nesta escala é substancial para a determinação e a quantificação dos parâmetros que possuem maior influência na sua abrasividade. O parâmetro mais associado ao desgaste que ocorre nas escavações e perfurações é a abrasividade que é definido como a capacidade da rocha ou do solo de remover o material metálico da superfície das brocas e dos discos de corte [2]. Desde 1896, com o teste de Rosiwal [3], diversos métodos foram criados para medir a abrasividade de rochas. West [4], classificou estes métodos como petrológicos e mecânicos. No primeiro caso, se utilizam das informações da composição petrográfica, tais como: as escalas de dureza de Moh's e de Rosiwal [5], o conteúdo de sílica, o valor de Schimazek's F [6], as porcentagens de quartzo e quartzo equivalente e o tamanho dos grãos. Dentre os métodos mecânicos foram considerados o ensaio de abrasividade Cerchar [7], o martelo modificado de Schmidt [8], o da "Norwegian University of Science and Technology of Trondheim", NTDU [9] e o do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC [10]. Entre todos os métodos para a determinação da abrasividade o ensaio de abrasividade Cerchar vem sendo o mais amplamente e internacionalmente aceito devido à praticidade e o baixo custo e é considerado como um indicador confiável do potencial abrasivo das rochas, por diversos autores [11,12,13,14,10,15,16]. O ensaio foi desenvolvido pelo Centre d'Études et Recherches des Charbonages de France, Cerchar, para determinar a abrasividade das rochas devido ao interesse da indústria de carvão da França em meados de 1970 [7]. O ensaio consiste, basicamente, em se realizar um

risco na superfície da amostra de rocha com uma ponteira de aço cônica, sob a aplicação de uma força normal e constante de 70 N e por uma distância de 10 mm. Ao seu término, se define o índice de abrasividade Cerchar (CAI) ou o potencial abrasivo da rocha que é uma função do diâmetro desgastado da ponteira de análise [2].

Embora este teste seja amplamente utilizado, existem dois tipos de problemas relacionados a variações e divergências de resultados do CAI. O primeiro está relacionado aos parâmetros de realização do ensaio, como: i) o tipo do equipamento utilizado; ii) a composição do aço e da dureza da ponteira; iii) a condição da superfície da amostra; iv) o tamanho do risco; v) a força aplicada; vi) a velocidade do teste [1,10,11,12,13,15,16,20,21]. A segunda fonte de variação está relacionada ao tipo de rocha analisada, por isso vários autores tentam estabelecer correlações estatísticas entre o Cerchar e os parâmetros físicos e mecânicos das rochas.

O presente trabalho apresenta uma revisão dos parâmetros de realização do ensaio de abrasividade Cerchar. Também, verificou-se a influência destes parâmetros nos resultados 28 amostras de rocha (ígneas, metamórficas e sedimentares) analisadas em 3 laboratórios localizados no Brasil (LAB 01, LAB 02 e LAB 03) por meio de uma comparação interlaboratorial. A partir desta comparação, dois parâmetros foram investigados em detalhe: a influência da condição da superfície da amostra, que é intrínseco ao ensaio, e da caracterização microestrutural da rocha, utilizando o FEG-SEM/EBSD/EDS. Esta caracterização foi introduzida como uma nova ferramenta para avaliar a influência da anisotropia na abrasividade. Os resultados de CAI foram agrupados por tipo de amostra e uma faixa de valores foi estabelecida para cada tipo de rocha. Por fim, foram apresentados os resultados da avaliação estatística entre os dados de abrasividade e de resistência à compressão uniaxial da rocha, para validar a eficiência do ensaio de abrasividade Cerchar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O ensaio de abrasividade Cerchar está normatizado pela ASTM D7625 [2]. Dois modelos de equipamento estão aceitos para a realização do ensaio, o Cerchar original e o criado por West [4], para atender as demandas da indústria de carvão da Inglaterra. Os equipamentos possuem semelhanças e diferenças descritas e

confrontadas por diversos autores [14,15,16,21]. Ambos utilizam grampos rígidos para prender e imobilizar a amostra de rocha, que deve ter um diâmetro ou comprimento mínimo de 50 mm [2]. No Cerchar original a ponteira é movimentada manualmente, enquanto a amostra de rocha permanece imóvel. Já, no modelo de West [4] a amostra de rocha é movida sob a ponteira estática, sendo em ambos os casos a sua movimentação feita com o auxílio de uma manivela. Cada giro da manivela move a amostra um milímetro, sendo necessário, portanto, 10 giros para completar os 10 mm de ensaio. Aydin et al. [22], testaram 13 amostras nos dois equipamentos, concluindo por não haver influência significativa dos mesmos no ensaio. Os resultados de CAI no Cerchar original foram ligeiramente maiores, mas a diferença estatística foi de cerca de 1%, ou seja, inferior à variação existente entre as repetições.

A influência da ponteira de aço. A abrasividade é determinada pela diferença relativa de dureza entre a ponteira de aço e a amostra de rocha [23]. Portanto, as características da ponteira são uma das mais importantes para manter a correlação entre a realização de ensaios entre laboratórios distintos.

De acordo com a norma francesa NF P 94-430-1 [24], a ponteira deve ser confeccionada em aço, com uma ponta cônica afiada com um ângulo de $(90 \pm 3)^\circ$, com 1 mm de comprimento e o seu restante ser maior do que 15 mm. Segundo a recomendação ISRM [16], o diâmetro da ponteira deve ser de no mínimo 6 mm e a porção visível durante o ensaio ter no mínimo 15 mm, conforme modelo representativo ilustrado na FIGURA 1. Na ASTM D7625 2 está recomendado que a ponteira deve ser confeccionada em aço, com dureza de 55 HRC (Rockwell C Hardness Scale), com comprimento maior do que 15 mm e um diâmetro maior do que 10 mm. Na norma ASTM, são utilizadas as equações propostas por Stanford & Hagan [23], para os casos em que a ponteira utilizada possua uma dureza menor que a especificada. Michalakopoulos et al. [24], analisaram 68 amostras de seis tipos diferentes de rochas e realizaram ensaios utilizando aços com dureza entre 40 e 55 HRC, o primeiro especificado no ensaio original e, o segundo, a partir da recomendação de West [4]. O resultado deste estudo comprovou uma correlação linear entre CAI_{55} e CAI_{40} descrita como $(CAI_{55} = 0,110914 + 0,587356CAI_{40})$, com forte relação estatística e um grau de confiança de 99%. Stanford & Hagan, [23], testaram sete tipos de aço com a mesma dureza e nove graus diferenciados de dureza (15 a 60 HRC) de um mesmo tipo de aço. Segundo estes autores, os diferentes tipos de aço não produziram nenhum efeito no CAI e houve uma correlação linear entre os valores de CAI e a

dureza do aço, onde o CAI foi inversamente proporcional à dureza do aço, segundo a relação ($CAI = -0,0766HRC + 5,8044$), com $R^2 = 0,98$.

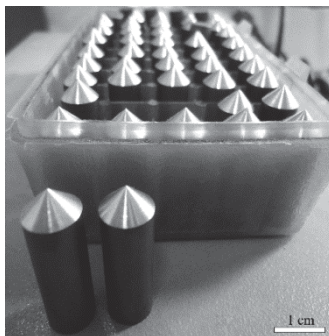


FIGURA 1. FOTO ILUSTRATIVA DAS PONTEIRAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR, SEGUNDO AS RECOMENDAÇÕES DA NORMA ASTM D7625 [2].

[FIGURE 1. ILLUSTRATIVE PHOTO OF THE TIPS USED IN THE CERCHAR ABRASIVE TESTS, ACCORDING TO THE RECOMMENDATIONS OF ASTM D7625 [2].]

No ensaio Cerchar original foi recomendado o uso de aço com resistência à tração de 2000 MPa, mas nenhuma observação foi feita quanto a sua dureza. West [4], sugeriu uma ponteira feita com aço DIN 36CrNiMo4 e com uma resistência à tração de 2000 MPa, porém com tratamento térmico para, 40 HRC. Em AFNOR 2000, apud Michalakopoulos et al. [24], houve a indicação de que o aço tivesse dureza entre 54-56 HRC. Pela ISRM [16], este deve ser confeccionado com uma dureza (55 ± 1) HRC. Outras recomendações quanto à dureza e à resistência do aço utilizado na confecção da ponteira estão resumidas na TABELA 1.

TABELA 1. RECOMENDAÇÕES DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO, DUREZA E DA CLASSE DO AÇO PARA USO NA CONFEÇÃO DAS PONTEIRAS DO ENSAIO CERCHAR, 1986 E DE WEST, 1989, DE ACORDO COM DADOS DA LITERATURA.

[TABLE 1. RECOMMENDATIONS OF THE STRENGTH, HARDNESS AND TYPE OF STEEL FOR USE IN MAKING THE TEST TIPS CERCHAR, 1986 AND WEST, 1989, ACCORDING TO LITERATURE DATA.]

Referência	Resistência à tração (MPa)	Dureza (HRC)	Classe DIN do aço
Suana e Peters [11]	2000	54-56	-
Atkinson et al. [12]	2000	54-56	36CrNiMo4
Cerchar [7]	2000	-	-
West [13]	2000	40	36CrNiMo4
Al-Ameen e Waller [25]	-	56	36CrNiMo4
AFNOR [24]	-	54-56	-
Plinninger et al. [1]	2000	55	115CrV4
ASTM D7625 [2]	-	55 ± 1	-
Alber et al. [16]	-	55 ± 1	-

Na análise dos autores Stanford & Hagan [23], inferiu-se ser possível variar a dureza do aço, utilizando valores menores para rochas menos abrasivas e maiores

para rochas extremamente abrasivas, melhorando assim os resultados do ensaio Cerchar em intervalos extremos. Outra recomendação deste trabalho foi a realização de sete repetições do ensaio, desconsiderando o menor e o maior valor para CAI.

Quanto à força normal atuante sobre a ponteira durante o ensaio, em Cerchar [7], West [4], ASTM D7625 [2] e Alber et al. [16], recomendaram o valor equivalente a 70 N. Para Rostami et al. [15], foi encontrada uma correlação linear entre a força aplicada e a perda de material da ponteira, segundo as correlações: i) “desgaste da ponteira 40-42 HRC (10^{-1}) mm = 0,0144 x força aplicada - 2,144”, com $R^2 = 0,997$; e ii) “desgaste da ponteira 54-56 HRC (10^{-1}) mm = 0,0087 x força aplicada - 2,047”, com $R^2 = 0,9929$.

Quanto à superfície da amostra, em Cerchar [7], West [4], ASTM D7625 [2] e Alber et al. [16], foram recomendados os ensaios em uma fratura “fresca” natural da rocha (“CAI_{fb} – freshly broken”), preferencialmente preservada da amostragem em campo, ou obtida pela sua quebra com o martelo. Em casos onde fosse obtida uma rocha heterogênea como, por exemplo, os conglomerados e xistos, recomendou-se executar o ensaio em uma superfície cortada com serra diamantada (“CAI_s – sawn surface”). Em trabalhos mais recentes [22, 26] foi sugerida a utilização, em geral, de superfícies serradas (CAI_s), por apresentarem uma menor dispersão dos resultados.

O efeito da condição da superfície da amostra é uma variável importante no ensaio de abrasividade. Alguns trabalhos desenvolvidos visaram a correlação e a quantificação da influência da superfície da amostra no CAI. Plinninger et al. [1] observaram uma correlação entre os valores obtidos em superfícies serradas (CAI_s) e naturais (CAI_{fb}), com valores de CAI 0,5 maiores em amostras com superfícies de fratura natural (CAI_{fb}). No mesmo trabalho, os autores observaram que a influência da rugosidade da superfície aumentou em rochas com alta abrasividade, enquanto que, em rochas pouco abrasivas, os resultados para os dois tipos de superfície foram semelhantes.

Plinninger & Thuro [20] relataram que uma correlação entre CAI_{fb} e CAI_s seria difícil, devido à grande dispersão dos valores de amostras com alto CAI. No entanto, na norma ASTM D7625, 2010, foi recomendada a utilização da equação de correlação de Plinninger et al. [1] ($CAI_{fb} = 0,99CAI_s + 0,48$).

Fowel & Abu Bakar [10] apresentaram a relação $CAI_{fb} = 1,05CAI_s + 0,18$.

Majeed & Abu Bakar [21], 2015, obtiveram uma correlação linear entre CAI_{fb} e CAI_s expressa pela equação: $CAI_{fb} = 1,14CAI_s - 0,029$.

Yarali & Duro [26], também encontraram uma correlação linear entre CAI_{fb} e CAI_s , aonde o CAI em superfícies rugosas foi cerca de 18% maior que em superfícies serradas.

A distância do ensaio foi parametrizada em 10 mm pela ASTM D7626 [2], a mesma sugerida por West [4], Plinninger et al. [1], Alber et al. [16], e Cerchar [7]. Para esta medida, 70% do desgaste da ponteira ocorreu no primeiro milímetro [25], 85% do valor de CAI foi atingido após 2 mm do risco e 15% nos últimos 8 mm do ensaio [1]. Variações do valor de CAI foram considerados insignificantes na distância do ensaio de $(10 \pm 0,5)$ mm [2]. Em um estudo mais recente realizado por Yarali & Duru [26] concluiu-se que 60 a 70% do desgaste foram obtidos nos primeiros 2 mm, sendo que este valor aumentou até estabilizar próximo dos 16 mm. Por isso, os autores sugeriram que a distância do ensaio passasse a ser de 15 mm.

A velocidade de riscamento do ensaio foi analisada por diversos autores [2,4, 15,16]. Rostami et al. [15] concluíram por não haver uma correlação perceptível e, portanto, a velocidade do ensaio não influenciou nos resultados.

O número de repetições para cada ensaio foi considerado entre dois e três ensaios suficientes em rocha homogênea de granulação fina, e cinco ensaios ou mais em rochas com grãos maiores que um milímetro nas recomendações de Cerchar [7]. Plinninger et al. [1] e Alber et al. [16] sugeriram uma quantidade de repetições da ordem de 5 vezes em cada amostra, visando definir uma média representativa. Segundo a ASTM D7625 [2], se a rocha não apresentar estruturas com direção preferencial, devem ser realizadas 5 repetições, sendo 3 ensaios paralelos em uma direção e 2 perpendiculares aos primeiros.

A medida da superfície desgastada da ponteira foi recomendada pela norma ASTM D7625 [2], e que seu resultado seja obtido em um microscópio óptico com aumento mínimo de 30X, com uma régua graduada de 0,01 mm e com leitura de 0,001 mm. Plinninger et al. [1] sugeriram um microscópio de luz refletida, com uso de um aumento de 50X, onde o erro seria de até 0,02 mm, correspondente a 0,2 CAI. Já, para aumentos de 10X, segundo os autores, os resultados mostraram produzir erros significativos de até 0,1 mm (1 CAI). Alber et al. [16] propuseram um aumento de 25X, com a leitura em régua graduada de 0,01 mm, com um erro estatístico de $\pm 0,005$ mm. O valor de CAI é correspondente à média aritmética das medidas realizadas na amostra [2,7,16].

A medida do desgaste da ponteira vem gerando discussões no meio

acadêmico desde a criação do ensaio Cerchar, [7]. Inicialmente, nos trabalhos de Cerchar [7] e West [4], foi realizada esta medida a partir da vista do topo da ponteira, conforme ilustrado na FIGURA 2. Na norma ASTM D7625 [2] houve a recomendação da medida pela face lateral da ponteira. Alber et al. [16] expuseram que a medida a partir do topo depende da sensibilidade do técnico, principalmente, em rochas mais abrasivas, onde a superfície de desgaste não é uniforme, devido a lascas ou fragmentos do aço que ficam parcialmente presos a esta superfície, sendo estes, considerados como a principal causa de erro na medida do CAI a partir da medida do topo da ponteira, pois pode gerar a supervalorização do diâmetro da superfície de abrasão.

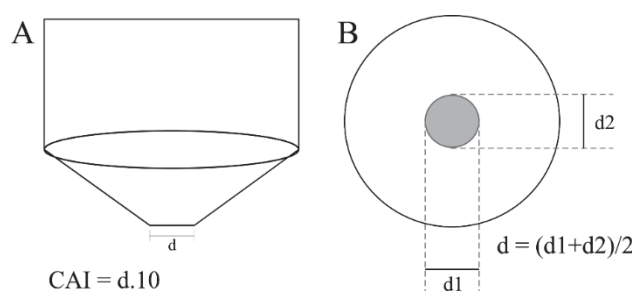


FIGURA 2. DESENHO ESQUEMÁTICO DA CORRELAÇÃO ENTRE A SUPERFÍCIE DE DESGASTE DA PONTEIRA DE AÇO UTILIZADO NO ENSAIO CERCHAR, SENDO: (A) VISTA DA LATERAL COM DIÂMETRO INDICADO (D); E, EM (B), AS MEDIDAS DOS DIÂMETROS (D1 E D2) EM VISTA DO TOPO DA PONTEIRA.

[FIGURE 2. SCHEMATIC DRAWING OF THE CORRELATION BETWEEN THE WEAR SURFACE OF THE STEEL TIP USED IN THE CERCHAR TEST, BEING: (A) SIDE VIEW WITH INDICATED DIAMETER (D); AND, IN (B), THE MEASUREMENTS OF THE DIAMETERS (D1 AND D2) IN VIEW OF THE TOP OF THE TIP.]

Majeed & Abu Bakar [21] indicaram que a técnica da medida a partir da lateral da ponteira foi desenvolvida pela NTDU na Noruega em 2000, esta consiste na re-determinação do ângulo inicial de 90° da ponteira após o ensaio, para a correta demarcação do início e do fim da superfície de abrasão. Se a medida for obtida pela vista lateral da ponteira, o valor resultante de CAI é o da média aritmética simples de 4 determinações do diâmetro desgastado, cada qual a 90° uma da outra [16]. Para uma superfície de desgaste irregular, os autores recomendaram calcular a média aritmética de pelo menos 2 diâmetros medidos e, se muito irregular, que a ponteira seja descartada e um novo ensaio seja realizado.

Textura, microestrutura e composição química da rocha. Além dos parâmetros relacionados às ferramentas de teste, outra consideração importante diz respeito à constituição das rochas por vários cristais, os quais têm uma anisotropia

intrínseca, decorrente das variações das suas propriedades físicas de acordo com as direções cristalográficas. Assim, se uma rocha tem uma distribuição homogênea de seus cristais as suas propriedades tornam-se iguais independente da direção (isotropia de um granito por exemplo). Do contrário se as mesmas apresentam cristais com orientações cristalográficas preferenciais, a anisotropia individual do cristal é transferida à rocha e a mesma comporta-se como um meio anisotrópico, como, por exemplo, um filito [17]. No que se refere a abrasividade pode-se considerar no procedimento de teste que alguns minerais podem ter direções preferenciais de dureza, como a cianita, em que se percebe que em determinada direção, como no eixo c esta é riscada com facilidade, porém na perpendicular a mesma não risca com uma lâmina de aço de dureza 7 na escala de Mohs. Portanto, na maioria dos testes macroscópicos das rochas, tem-se uma resistência média ao risco igualmente distribuída em todas as direções, se os seus cristais estiveram aleatoriamente distribuídos. Se, ao contrário, os cristais estiverem preferencialmente orientados em uma determinada direção, a rocha terá direções de dureza contrastantes. Isso é estatisticamente distribuído não apenas em uma seção delgada, mas por toda a rocha. Tais fatores intrínsecos podem causar resultados com grandes dispersões estatísticas, e cujos erros podem ser minimizados pela análise microscópica da superfície como pela difração de elétrons retroespalhados (EBSD), como a determinação da textura (orientações cristalográficas) e quantificação das microestruturas, tais como formas e distribuição de tamanhos de grãos.

Avaliação da análise interlaboratorial. Assim, como investigado, a parametrização dos ensaios de abrasividade de rochas Cerchar, mesmo sendo um dos mais aceitos pela comunidade científica, se faz importante no sentido de minimizar os efeitos de dispersão de resultados em um mesmo ou em distintos laboratórios. Como parte integrante dos resultados desta pesquisa, foram adicionalmente elaborados controles estatísticos do ensaio em 3 laboratórios distintos, para os quais foram consideradas 28 amostras de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Considerou-se, neste estudo, um valor de referência (V_{ref}), determinado a partir da média dos desvios padrão de todas as amostras, conforme mostrado na Equação A.

$$U_a = \frac{s(\bar{x})}{\sqrt{n}} \quad (A)$$

A incerteza deste valor (U_{Ref}) foi calculada conforme a Equação B.

$$U_{Ref} = KU_a \quad (B)$$

Para o índice K= 2, foi considerada uma significância dos resultados com 95% de probabilidade [27].

O cálculo do erro normalizado (E_n) foi realizado conforme as recomendações das normas ISO/IEC 17043 [28], ISO 13528 [29]. Para avaliar o desempenho de cada laboratório no ensaio Cerchar, foi calculada a estatística Erro Normalizado (E_n), alterada conforme indicado na Equação C, sendo considerados satisfatórios os desempenhos com E_n menor ou igual a 1.

$$E_n = \frac{V_{EP} - V_{Ref}}{\sqrt{U_a^2 + U_{Ref}^2}} \quad (C)$$

Sendo: V_{Ref} = Valor de referência, que corresponde ao desvio médio de todas as amostras por tipo de rocha; V_{Ep} = Valor do desvio padrão de cada unidade amostrada; U_{Ref} = Incerteza expandida do valor de referência; e U_a = Incerteza expandida do resultado da entidade participante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras. Neste estudo foram utilizadas 40 amostras provenientes de empresas de sondagem rotativa ou pedreiras nas regiões, sul, sudeste e nordeste do Brasil, deste total 28 amostras de rocha (ígneas, metamórficas e sedimentares) foram utilizadas nos ensaios interlaboratoriais. Para as amostras coletadas em forma de testemunhos de sondagem nenhum procedimento prévio foi necessário. Já, para as amostras obtidas em blocos, foi considerada a extração dos corpos de prova, em laboratório, com extratora do tipo HILTI DD 200, com serra copo diamantada, de diâmetro interno de 50 mm. A partir dos testemunhos foram preparados corpos de prova com razão altura/diâmetro de 1:1 utilizados nos ensaios de compressão uniaxial. O material excedente foi utilizado nos ensaios de abrasividade Cerchar que foram realizados em 3 laboratórios distintos (LAB 01, LAB 02 e LAB 03).

Índice de abrasividade Cerchar, CAI. As amostras foram analisadas de acordo com a norma ASTM D7625 [2]. O procedimento do ensaio consistiu na utilização de ponteiras de aço (AISI A2: C 0,994, Si 0,331, Mn 0,627, Cr 4,567, Mo 0,979; 55 HRC), com pontas cônicas 90°, com as quais foram riscadas paralelamente as superfícies das amostras de rocha por uma distância de 10 mm sob uma força

constante de 70 N e na velocidade de 10 mm/s. O potencial abrasivo da rocha foi determinado pelo CAI, obtido pela medida do diâmetro da ponteira desgastada (com precisão de 0,01 mm), multiplicado por 10. Para os ensaios interlaboratoriais a face da rocha amostrada foi a de superfície natural de fratura obtida pela sua quebra por um martelo.

O equipamento utilizado para a realização do teste de abrasividade foi o Cerchar, modelo RAA-100, "Rock Abrasivity Apparatus", marca GCTS, assim como um microscópio óptico marca GCTS, modelo RAA-AOM para a visualização e determinação do desgaste das ponteiros (medida do CAI) e um retificador das mesmas, marca GCTS, modelo STS-100.

Após a medida do diâmetro da superfície desgastada da ponteira de aço e a conversão para o CAI, a rocha foi classificada, segundo os limites mostrados na Tabela 2.

Os parâmetros de ensaio de cada laboratório estão resumidos na TABELA 3.

TABELA 2. CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS SEGUNDO O RESULTADO MÉDIO OBTIDO DE CAI.
[TABLE 2. CLASSIFICATION OF ROCKS ACCORDING TO CAI]

Classificação	Valor médio de CAI HRC ₅₅ [2]
Muito pouco abrasiva	0,30 - 0,50
Pouco abrasiva	0,50 - 1,00
Abrasividade média	1,00 - 2,00
Muito abrasiva	2,00 - 4,00
Extremamente abrasiva	4,00 - 6,00
Quartzítica	6,00 - 7,00

TABELA 3. PARÂMETROS DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR NOS 3 LABORATÓRIOS
 [TABLE 3. PARAMETERS OF THE EXECUTION OF THE ABRASIVITY TESTS CERCHAR IN THE 3 LABORATORIES]

Laboratório	Dureza da ponteira (HRC)	Diâmetro da ponteira (mm)	Equipamento	Sistema de medição do CAI
LAB 01	55 ± 1	9,53	Modificado por West (1989) Importado dos Estados Unidos	Medida lateral com leitura digital por microscópio e software próprios para medição do desgaste
LAB 02	55 ± 1	12,00	Cerchar original Importado da França	Medida lateral com determinação manual, com o uso de um microscópio adaptado e software CAD
LAB 03	55 ± 1	6,18	Cerchar original Confeccionado pelo laboratório	Medida lateral com leitura semi-automatizada com o uso de um microscópio petrográfico com adaptação e software de dimensionamento

Resistência à compressão uniaxial. Os ensaios para a determinação da resistência à compressão uniaxial em testemunhos de rocha foram realizados, segundo as diretrizes da ABNT NBR 15845 [30], em corpos de prova com relação diâmetro/altura de 1:1, conforme ilustrado na FIGURA 3. Seus resultados foram comparados com os de abrasividade Cerchar.



FIGURA 3. FOTO DE UM DOS CORPOS DE PROVA DE ROCHA PREPARADOS PARA O TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.

[FIGURE 3. PHOTO OF ONE OF THE ROCK TEST BODIES PREPARED FOR THE UNIAXIAL COMPRESSION STRENGTH TEST.]

Análise micrográfica por microscopia eletrônica de varredura com os detectores de microsonda analítica de raios X (EDS) e de difração de elétrons

retroespalhados, Oxford (EBSD). As imagens superficiais das amostras de rochas e sua composição química elementar, para a identificação das fases minerais, foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão de campo, tipo MEV-FEG, marca Tescan, modelo MIRA 3LM. Para a aquisição e o processamento de dados de EDS e de EBSD, foi utilizado um conjunto de aplicativos integrados na plataforma Oxford Aztec 3.1/Channel 5. As condições de trabalho para a obtenção e a aquisição dos dados foram: tensão de aceleração de 20 kV; a intensidade de corrente do feixe de 18A e a distância de trabalho de 15 mm. As amostras de rochas foram preparadas por corte, em equipamento marca Buehler, modelo Isomet 1000 Precision Saw, e por polimento em politriz marca Buehler, modelo Metaserv 250 Grinder Polisher, em baixa rotação, com o abrasivo de carbetto de silício na granulometria entre 600 e 1200 grit, seguido do uso de pastas de diamante nas granulometrias de 6, 3, 1 μm . O polimento químico e mecânico final da superfície dos agregados foi realizado com pasta de alumina, em equipamento politriz Buehler, modelo Minimet.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL DO CAI DE 28 AMOSTRAS DE ROCHAS (ÍGNEAS, METAMÓRFICAS E SEDIMENTARES)

Os resultados obtidos nos ensaios de abrasividade Cerchar nos três laboratórios, estão resumidos nas FIGURAS 4 e 5, os dados completos estão apresentados no Anexo 1. O estudo interlaboratorial mostrou uma boa concordância dos índices de abrasividade (CAI) realizados pelos laboratórios LAB 01 (14%) e LAB 03 (4%). No entanto, o laboratório LAB 02 apresentou muitos resultados não satisfatórios (68%).

Na análise por tipo de rocha nesta pesquisa, os ensaios relativos ao grupo das ígneas não apresentaram correlação estatística entre os laboratórios LAB 01, que foi de 8%, LAB 02 de 75% e o LAB 03, de 0%, considerado como o de melhor procedimento analítico. Para este tipo de rocha, devido à sua maior dureza, a baixa correlação de dados do LAB 02, pode ter sido resultante do material das ponteiras, como inferido por Rostami et al [15], uma vez que para a dureza mais elevada há a necessidade de um aço mais resistente e, preferencialmente, menos dúctil para se reduzir o efeito de borda na medida óptica do desgaste da ferramenta.

No geral, o LAB 02 apresentou valores superestimados em todos os grupos de rocha analisados, em comparação com os outros dois laboratórios, além de possuir dados com os maiores desvios padrão. As maiores diferenças entre as médias do CAI foram encontradas na comparação entre os LAB 02 com o LAB 01 e o LAB 03, das amostras medidas.

Pela análise dos resultados, inferiu-se que há a necessidade da observação mais criteriosa dos parâmetros experimentais para a realização do ensaio de abrasividade Cerchar, como já demonstrado no trabalho de Rostami et al [15]. Os autores elaboraram a intercomparação com 7 amostras de rochas em 6 laboratórios diferentes, obtendo-se discrepâncias atribuídas principalmente à dureza da ponteira e à condição da superfície da amostra.

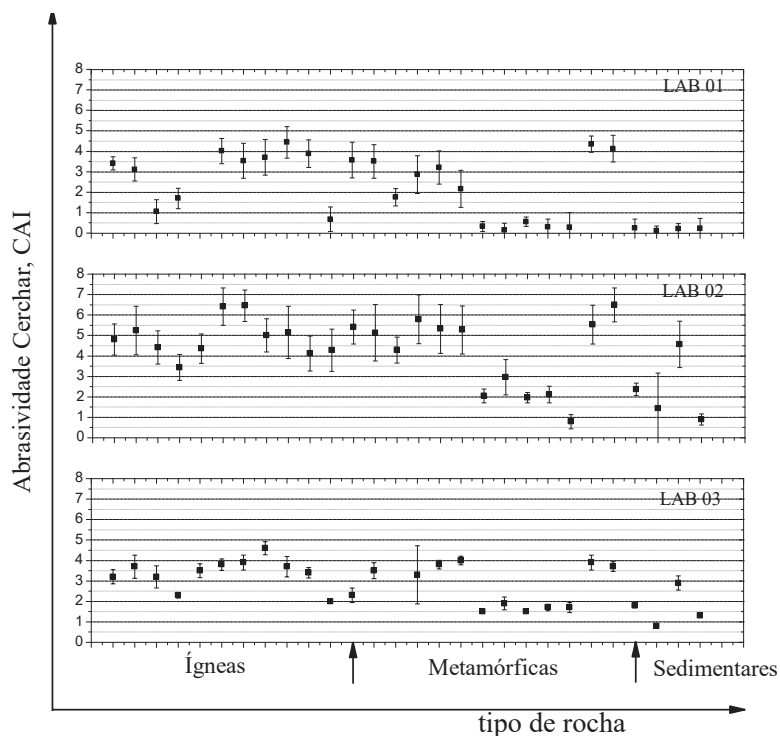


FIGURA 4. RESULTADOS GRÁFICOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR OBTIDOS EM TRÊS LABORATÓRIOS DIFERENTES, PARA AS MESMAS 28 AMOSTRAS DE ROCHA.

[FIGURE 4. GRAPHICAL RESULTS OF CERCHAR ABRASIVITY OBTAINED IN THREE DIFFERENT LABORATORIES FOR THE SAME 28 ROCK SAMPLES.]

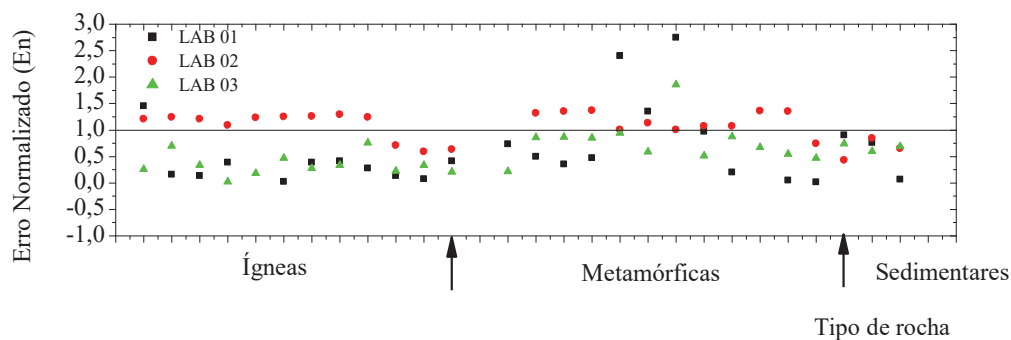


FIGURA 5. RESULTADOS GRÁFICOS DO ERRO NORMALIZADO (EN) [27] COM RELAÇÃO AO ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR DE ROCHAS ÍGNEAS, METAMÓRFICAS E SEDIMENTARES, OBTIDOS EM TRÊS LABORATÓRIOS DIFERENTES, PARA 28 AMOSTRAS DE ROCHA DE MESMA PROCEDÊNCIA.

[FIGURE 5. GRAPHICAL RESULTS OF THE NORMALIZED ERROR (EN) [27] WITH RESPECT TO THE CERCHAR ABRASIVE TEST OF IGNEOUS, METAMORPHIC AND SEDIMENTARY ROCKS, OBTAINED IN THREE DIFFERENT LABORATORIES, FOR 28 ROCK SAMPLES FROM THE SAME SOURCE.]

4.2 ANÁLISE DOS DADOS DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS ROCHAS EM SUAS SUPERFÍCIES SERRADA E DE FRATURA NATURAL

Para avaliar a influência da condição da superfície da rocha, as amostras foram analisadas nas condições de superfície natural (CAI_{fb}) e serrada (CAI_s). Na FIGURA 6, encontram-se apresentados os dados experimentais obtidos da análise Cerchar entre as duas superfícies. Os dados utilizados nesta análise são apresentados no Anexo 2. Pode-se observar pelos resultados que a análise em superfície serrada apresenta menor dispersão, aqui denotada pelo desvio padrão, como foi observado por Aydin [22]. Estes resultados foram corroborados, também, pelo coeficiente de variação (69,20% para CAI_{fb} e 62,90% para CAI_s) o que mostrou uma boa correlação entre os procedimentos (R^2 de 0,887), conforme mostrado na FIGURA 7. A equação de correlação obtida ($CAI_{fb} = 1,062CAI_s - 0,005$) se assemelha à encontrada por Plinninger et al. [1].

Pela aplicação do método estatístico do teste-F análise da variância (ANOVA), a 95% de confiança e pelos resultados dos procedimentos para as amostras em um modo natural considerou-se que estes resultados não diferiram, em superfície natural ou serrada (p -valor > 0,05).

Em termos de classificação quanto ao grau de abrasividade, 89% das amostras de rocha encontram-se entre a abrasividade média e muito abrasiva.

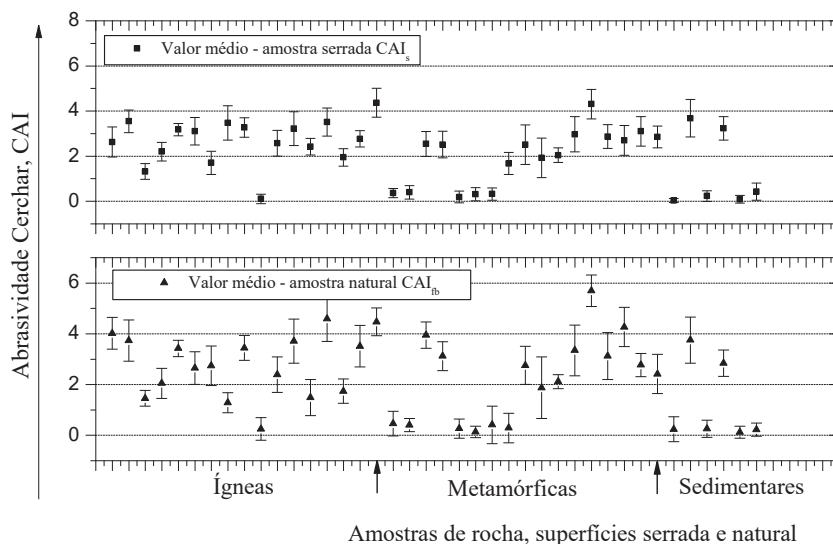


FIGURA 6. CURVAS COMPARATIVAS DOS RESULTADOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR EM FUNÇÃO DAS AMOSTRAS DE ROCHAS ANALISADAS EM SUAS SUPERFÍCIES SERRADAS (CAI_s) E NATURAIS (CAI_{fb}).

[FIGURE 6. COMPARATIVE CURVES OF THE CERCHAR ABRASIVITY RESULTS AS A FUNCTION OF THE SAMPLES OF ROCKS ANALYZED ON THEIR SAWN CUT (CAI_s) AND NATURAL (CAI_{fb}).]

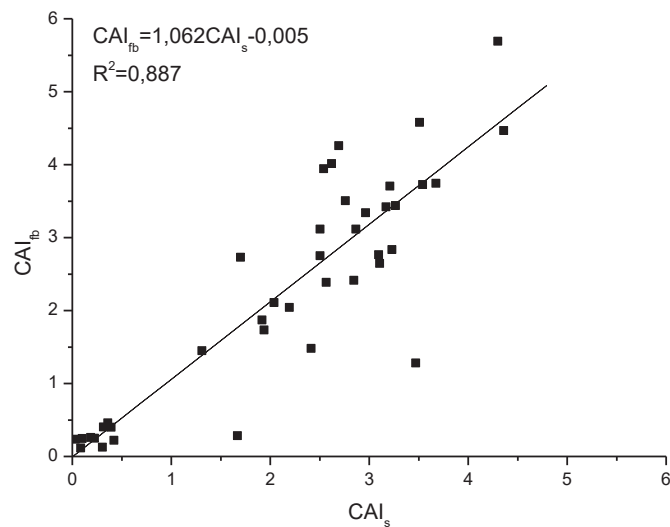


FIGURA 7. CURVA COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA CORRELAÇÃO DA ABRASIVIDADE CERCHAR EM FUNÇÃO DAS AMOSTRAS DE ROCHAS ANALISADAS EM SUAS SUPERFÍCIES SERRADAS (CAI_s) E NATURAIS (CAI_{fb})

[FIGURE 7. COMPARATIVE CURVE OF THE CORRELATION OF THE CERCHAR ABRASIVITY RESULTS AS A FUNCTION OF THE SAMPLES OF ROCKS ANALYZED ON THEIR SAWN CUT (CAI_s) AND NATURAL (CAI_{fb}).]

4.3 MICROESTRUTURA E FASES MINERAIS DAS ROCHAS POR FEG-SEM/EDS/EBSD

A microestrutura da rocha também pode ser considerada como um fator de dispersão dos resultados em abrasividade Cerchar. Esta influência se manifesta em termos do tamanho médio dos grãos sua forma e distribuição no agregado, do tipo mineral e sua orientação cristalográfica no espaço e a direção da realização do teste com a ponteira, como ilustrado na FIGURA 7, por EBSD, onde se pode ter orientação preferencial de grãos com diferentes durezas (como, por exemplo, na direção 1).

Neste caso, foi utilizada, como exemplo, uma rocha ígnea, classificada como sienito e constituída por feldspato alcalino (microclínio), quartzo, plagioclásio e biotita e minerais acessórios, como a clorita, a granada, os minerais opacos e a muscovita. A amostra apresenta microestruturas do tipo equigranular média, com feições de fluxo definida pela orientação preferencial de forma dos cristais de biotita e clorita. Esta rocha possui uma composição química média, medida na forma de óxidos de SiO₂ de 79%; Al₂O₃, de 11%; de Fe₂O₃, de 2,03%; CaO, de 1,34%; Na₂O, de 1,96%; K₂O, de 3,86%; entre outros constituintes em teores menores do que 1%, em massa (essa é uma análise de rocha total).

O quartzo possui dureza na escala de Mohs igual a 7, enquanto que o feldspato alcalino é igual a 5. Sendo estes os minerais mais comuns da amostra, o risco realizado na direção 1 apresentou um maior desgaste da ponteira, por isso um maior CAI, do que os riscos na direção 2 e 3.

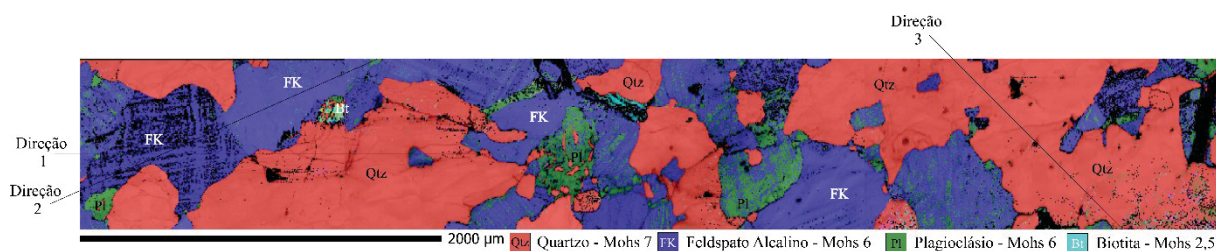


FIGURA 8. MICROGRAFIA, POR FEG-SEM – EBSD, DA SUPERFÍCIE POLIDA DE UMA ROCHA ÍGNEA CLASSIFICADA COMO SIENITO E CONSTITUÍDA POR FELDSPATO ALCALINO (MICROCLÍNIO), QUARTZO, PLAGIOCLÁSIO, BIOTITA E MINERAIS ACESSÓRIOS.

[FIGURE 8. MICROGRAPH, BY FEG-SEM-EBSD, OF THE POLISHED SURFACE OF AN IGNEOUS ROCK CLASSIFIED AS SYENITE AND CONSTITUTED BY ALKALI FELDSPAR (MICROCLINIC), QUARTZ, PLAGIOCLASE, BIOTITE AND ACCESSORY MINERALS.]

4.4 AMPLITUDE DOS RESULTADOS DO CAI NAS AMOSTRAS DE ROCHA NATURAIS E SERRADAS

Na FIGURA 9, está disponibilizado o gráfico resultantes das amplitudes do CAI_{fb}, representado pelas amostras por tipo de rocha nas superfícies de fratura ou

natural, identificadas com os respectivos intervalos de confiança a 5% de significância (entre barras). Os tipos de rocha estão agrupados de acordo com a sua classificação e foram verificadas tendências de agrupamento hierárquico entre elas.

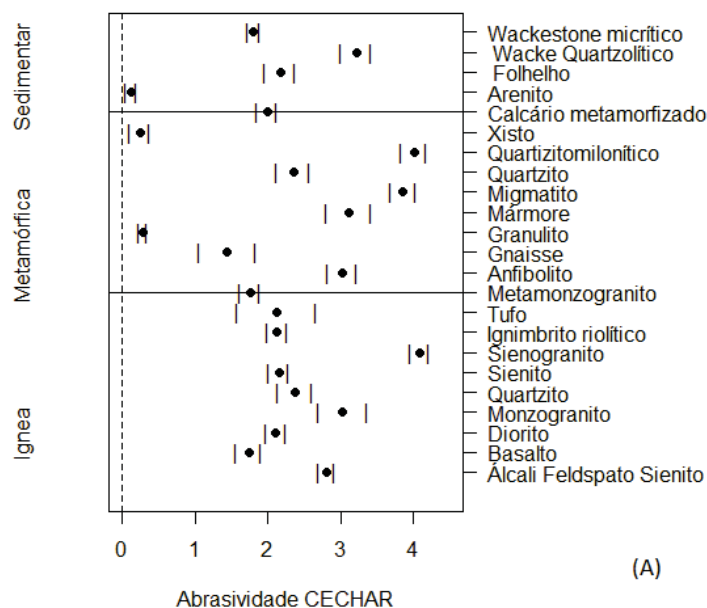


FIGURA 9. GRÁFICO RESULTANTE DAS AMPLITUDES DOS CAI_{FB} POR TIPOS DE ROCHA, NAS SUPERFÍCIE NATURAL.

[FIGURE 9. GRAPHS RESULTING FROM AMPLITUDES OF CAI_{FB} BY TYPES OF ROCK, ON NATURAL SURFACE.]

4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO AXIAL E DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS ROCHAS

Os resultados da resistência mecânica à compressão uniaxial foram comparados com os de abrasividade Cerchar dos grupos de rocha analisados a fim de se obter uma possível correlação de dados entre as duas técnicas analíticas empregadas. No entanto, pela sua análise geral, não se conseguiu inferir sobre alguma tendência estatística nas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares analisadas, como pode ser observado nos gráficos da FIGURA 10 a 12, tendo sido atribuído tal resultado à dispersão de valores em cada grupo. Os dados utilizados nesta análise estão descritos no Anexo 3.

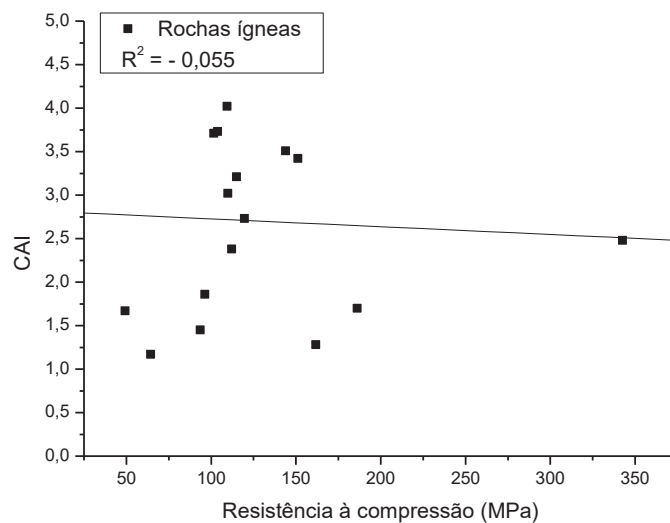


FIGURA 10. GRÁFICO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ROCHAS ÍGNEAS ANALISADAS E DOS SEUS RESPECTIVOS ÍNDICES CERCHAR.

[FIGURE 10. COMPARATIVE GRAPH OF THE AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF THE ANALYZED IGNEOUS ROCKS AND THEIR RESPECTIVE INDICES CERCHAR.]

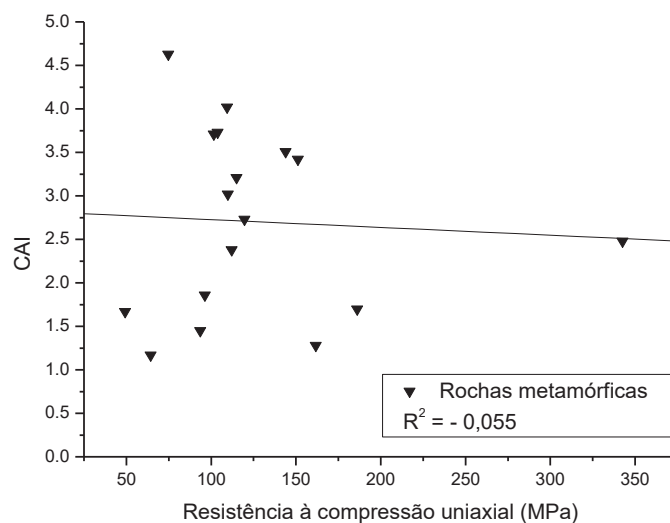


FIGURA 11. GRÁFICO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ROCHAS METAMÓRFICAS ANALISADAS E DOS SEUS RESPECTIVOS ÍNDICES CERCHAR.

[FIGURE 11. COMPARATIVE GRAPH OF THE AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF THE ANALYZED METAMORPHIC ROCKS AND THEIR RESPECTIVE CERCHAR INDICES.]

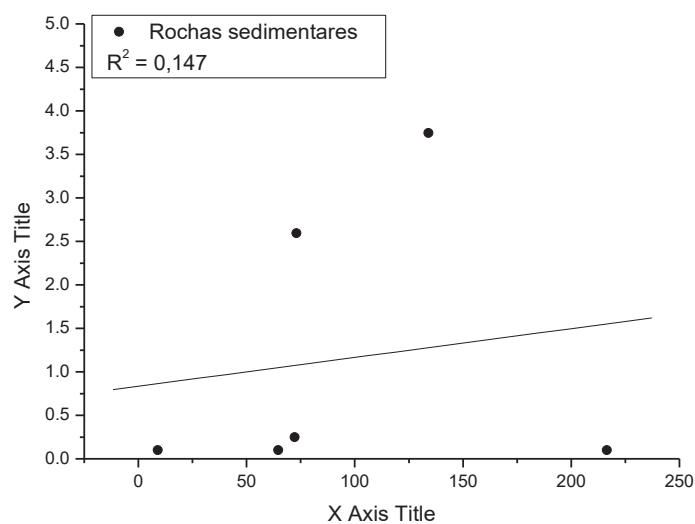


FIGURA 12. GRÁFICO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ROCHAS SEDIMENTARES ANALISADAS E DOS SEUS RESPECTIVOS ÍNDICES CERCHAR.

[FIGURE 12. COMPARATIVE GRAPH OF THE AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF THE ANALYZED SEDIMENTARY ROCKS AND THEIR RESPECTIVE CERCHAR INDICES.]

5 CONCLUSÕES

- A revisão bibliográfica dos parâmetros de realização do ensaio de abrasividade Cerchar revelou que uma série de variáveis pode influenciar o resultado do CAI.
- Da análise interlaboratorial dos resultados pode-se inferir que os erros normalizados medidos, E_n , principalmente do LAB 02 (com 75% de valores estatísticos inconsistentes) e do LAB 01, com 8%, podem ter sido consequentes tanto do aço utilizado na ferramenta de desgaste (ponteira), seus métodos de determinação ópticos e mesmo da microestrutura da rocha, em relação à sua dureza e orientação preferencial dos seus cristais.
- Pelo ensaio CAI das amostras ígneas, metamórficas e sedimentares medidas, pode-se classifica-las como de média a muito abrasiva (CAI entre 1 e 4, u. a.) em cerca de 89% dos casos, pelo que se inferiu que o E_n pode estar relacionado ao aço da ponteira e ao método de medida óptico utilizado.
- A influência da condição da superfície da amostra de rocha utilizada para o ensaio, natural (CAI_{fb}) ou serrada (CAI_s) foi estudada em detalhe. A partir do método estatístico do teste-F de análise da variância (ANOVA), a 95% de confiança dos resultados dos procedimentos para as amostras, considerou-se que estes resultados não diferiram para as duas condições (p -valor > 0,05). Existe uma boa correlação entre as variáveis com um R^2 de 0,887 e uma equação de correlação definida por $CAI_{fb} = 1,062CAI_s - 0,005$.
- Pelo tipo de rocha (ígneas, metamórficas e sedimentares) analisado em função da amplitude dos CAI na superfície natural, pode-se inferir por haver uma tendência de agrupamento hierárquico em função da classificação. Sendo assim, foi possível estabelecer intervalos de CAI de acordo com o tipo de rocha.
- Quanto aos ensaios conjuntos da resistência à compressão axial e da abrasividade Cerchar observou-se não haver uma correlação direta entre as mesmas.
- Com os resultados analíticos da aplicação da técnica FEG-SEM/EBSD/EDS concluiu-se ser um método auxiliar na avaliação do ensaio de abrasividade Cerchar. A variação dos resultados que deriva do tipo de rocha analisado pode ser compreendida a partir de uma análise prévia e de uma descrição das condições mineralógicas (ex: camadas de quartzo), estruturais (bandamento ou

foliação), tamanho dos grãos condições de microfissuramento e micro alteração, que podem ser obtidas por este método.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro firmado pelo termo de cooperação nº6000.0099630.15.9 entre a PETROBRAS e os Institutos Lactec. À COPEL, P&D 6491-0301/2013; ANEEL; CNPq, Lei 8.010/90, (FEG SEM) LI 14/4271063-7, DI 14/2190047-7; Buehler instruments DI 16/1383299-2 e LI'S 16/2286888-3, 16/2286828-0, 16/2286613-9, 16/2286943-0, 16/2286973-1, 16/2287014-4, 16/2286658-9; Ao CNPq bolsa DT, processo número 302672/2016-8; e à Universidade Federal do Paraná (Programa de Pós Graduação em Geologia).

REFERÊNCIAS

1. R. Plinninger, H. Käsling, K. Thuro, G. Spaun. "Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value." *International journal of rock mechanics and mining sciences* 40.2: 259-263 (2003).
2. ASTM D7625 Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method, ASTM International, West Conshohocken, PA (2010) DOI: 10.1520.
3. R. J. Fowell, M. Z. Abu Bakar. "A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods." 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Second half century for rock mechanics. Vol. 1. (2007).
4. G. West. "A review of rock abrasiveness testing for tunnelling." *ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics* (1981).
5. A. Rosiwal. New research findings on the hardness of minerals and rocks. *Verhandlungen der königl. Geol. Reichsanstalt*, 17 e 18:475-491 (1896).
6. J. Shimazek, H. Knatz. "The assessment of the cuttability of rocks by drag and roller bits". *Estzmetall*, 29:113-119 (1970).
7. CERCHAR. The Cerchar Abrasiveness Index. Centre d'études et Recherches de Charbonnages de France, 12S, Verneuil (1986).
8. W. Janach, A. Merminod. "Rock abrasivity test with a modified Schimidt Hammer". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 19:43-45 (1982).
9. B. Nilsen, F. Dahl, J. Holzhauser, P. Raleigh. "Abrasive testing for rock and soils". *Tunnels and Tunneling International*, 47-49 (2006).
10. R.J. Fowel, M.Z. Abu Bakar. "A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods". In: 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics (2007). ISBN: 978-0-415-45084-3.
11. M. Suana, T.J. Peters. "The Cerchar Abrasivity Index and its relation to rock mineralogy and petrography". *Journal of Rock Mechanics*, 15:1-7 (1982).
12. T. Atkinson, V.B. Cassapi, R.N. Singh. "Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery". *International Journal of mining and geological engineering*, 3:151-163 (1986).
13. G. West. "A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments". *International Journal of Mining and Geological Engineering* (1986).

14. H. Kasling, K. Thuro. "Determining rock abrasivity in the laboratory". In: Zhao, Labiouse, Dudt, Mathier (eds). *Rock Mechanics in civil and environmental engineering*. Taylor & Francis, London, p. 425-428 (2010).
15. J. Rostami, A. Ghasemi, E. A. Gharahbagh, C. Dogrouz, F. Dahl. "Study of Dominant Factors Affecting Cerchar Abrasivity Index". *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:1905-1919 (2014).
16. M. Alber, O. Yarah, F. Dahl, A. Bruland, H. Kasling, T.N. Michalakopoulos, M. Cardu, P. Hagan, H. Aydin, A. Özardlan. "ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar Abrasivity Test". *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:261-266 (2014).
17. J. C. Biondi, E.S. Marczynski. "Caracterização física e química dos filitos Açungui (PR) visando sua utilização pela indústria cerâmica". *Cerâmica*, 50(313), 21-32 (2004). <https://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132004000100004>
18. G. West. "Technical Note: Rock Abrasiveness testing for tunneling". *International Journal of Rock Mechanics, Mining science and Geomechanics Abstracts*, 26(2):151-160 (1989).
19. O. Yarali, E. Yasar, G. Bacak, P. Ranjith. "A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks". *International Journal of Coal Geology*, 74:53-66 (2008).
20. R. J. Plinninger, K. Thuro. "Wear prediction in hardrock excavation using the Cerchar Abrasiveness Index (CAI)". *EUROCK e 53rd Geomechanics Colloquium Schubert* (2004).
21. Y. Majeed, M.Z. Abu Bakar. "Statistical evaluation of CERCHAR Abrasivity Index (CAI) measurement methods and dependence on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan". *Bull Eng Geol Environ* (2015).
22. H. Aydin, O. Yarali, H. Duru. "The effects of specimen surface conditions and type of test apparatus on Cerchar Abrasivity Index". *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(2):293-298 (2016).
23. J. Stanford, P. Hagan. "An assessment of the impact of stylus metallurgy on Cerchar Abrasiveness Index". Aziz, n(ed), *Coal 2009: Coal Operators' Conference*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 348-355 (2009).
24. S.T.N. Michalakopoulos, V.G. Anagnostou, M.E. Bassanou, G.N. Panagiotou. "The influence of steel styli hardness on Cerchar Abrasiveness Index value". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43:321-327 (2006).
25. S.I. AL-Ameen, M.D. Waller. "The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index". *Engineering Geology, Nottingham*, 36:293-301 (1994).
26. O. Yarali, H. Duru. "Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60:111-120 (2016).
27. M.G. Cox. "The evaluation of key comparison data." *Metrologia* 39.6: 589 (2002).
28. ABNT NBR ISO/IEC 17043:2011 Versão Corrigida:2017, Avaliação da conformidade — Requisitos gerais para ensaios de proficiência, 46p. (2017).
29. ISO 13528:2005 Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory

comparisons (2015).

30. ABNT NBR15845-2 Rochas para revestimento - Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água (2015).

**ANEXO 1 - DADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE CAI EM SUPERFÍCIE SERRADA
(CAI_s) E EM SUPERFÍCIE NATURAL (CAI_{fb})**

TIPO DE ROCHA	CAI					
	LAB 01	Desv Pad	LAB 02	Desv Pad	LAB 03	Desv Pad
Ígnea	3,42	0,32	4,80	0,76	3,20	0,35
Ígnea	3,12	0,57	5,24	1,18	3,70	0,57
Ígnea	1,06	0,58	4,42	0,81	3,20	0,54
Ígnea	1,70	0,50	3,44	0,64	2,30	0,13
Ígnea			4,36	0,72	3,50	0,34
Ígnea	4,02	0,62	6,41	0,92	3,80	0,28
Ígnea	3,54	0,85	6,46	0,77	3,90	0,37
Ígnea	3,71	0,87	5,00	0,81	4,60	0,32
Ígnea	4,44	0,77	5,15	1,28	3,70	0,50
Ígnea vulcanoclástica	3,89	0,67	4,12	0,85	3,40	0,25
Ígnea vulcanoclástica	0,68	0,60	4,28	1,03	2,00	0,05
Ígnea vulcanoclástica	3,57	0,87	5,41	0,83	2,30	0,35
Metaígneia	3,51	0,82	5,13	1,38	3,50	0,39
Metamórfica	1,76	0,43	4,29	0,63		
Metamórfica	2,87	0,92	5,79	1,19	3,30	1,42
Metamórfica	3,22	0,81	5,32	1,20	3,80	0,21
Metamórfica	2,17	0,90	5,27	1,18	4,00	0,21
Metamórfica	0,33	0,25	2,05	0,34	1,50	0,06
Metamórfica	0,15	0,34	2,96	0,87	1,90	0,31
Metamórfica	0,56	0,23	1,96	0,25	1,50	0,07
Metamórfica	0,31	0,39	2,11	0,41	1,70	0,16
Metamórfica	0,29	0,72	0,79	0,35	1,70	0,24
Metamórfica	4,35	0,40	5,53	0,95	3,90	0,37
Metamórfica	4,13	0,65	6,50	0,83	3,70	0,24
Metasedimentar	0,25	0,45	2,37	0,31	1,80	0,11
Sedimentar	0,12	0,24	1,43	1,74	0,80	0,05
Sedimentar	0,22	0,26	4,57	1,13	2,90	0,34
Sedimentar	0,24	0,49	0,90	0,27	1,30	0,09

ANEXO 2 - DADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE CAI EM SUPERFÍCIE SERRADA (CAI_s) E NATURAL (CAI_{fb})

Amostra	Tipo de rocha	CAI _s	CAI _{fb}
1	Ígnea	2,62	4,02
2	Ígnea	3,54	3,73
3	Ígnea	1,31	1,45
4	Ígnea	2,19	2,04
5	Ígnea	3,17	3,42
6	Ígnea	3,11	2,65
7	Ígnea	1,70	2,73
8	Ígnea	3,47	1,28
9	Ígnea	3,27	3,44
10	Ígnea	0,10	0,25
11	Ígnea	2,57	2,39
12	Ígnea	3,21	3,71
13	Ígnea	2,41	1,48
14	Ígnea	3,51	4,58
15	Ígnea	1,94	1,73
16	Metaígnea	2,76	3,51
17	Metamórfica	4,36	4,47
18	Metamórfica	0,36	0,46
19	Metamórfica	0,39	0,40
20	Metamórfica	2,54	3,95
21	Metamórfica	2,51	3,12
22	Metamórfica	0,19	0,26
23	Metamórfica	0,31	0,13
24	Metamórfica	0,32	0,41
25	Metamórfica	1,67	0,29
26	Metamórfica	2,50	2,75
27	Metamórfica	1,92	1,87
28	Metamórfica	2,04	2,11
29	Metamórfica	2,97	3,34
30	Metamórfica	4,30	5,69
31	Metamórfica	2,87	3,12
32	Metamórfica	2,69	4,26
33	Metamórfica	3,10	2,77
34	Metamórfica	2,85	2,41
35	Metasedimentar	0,03	0,24
36	Sedimentar	3,68	3,75
37	Sedimentar	0,23	0,25
38	Sedimentar	3,23	2,84
39	Sedimentar	0,09	0,12
40	Sedimentar	0,42	0,22

ANEXO 3 - DADOS DA CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL E CERCHAR

AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	COMPRESSÃO (MPa)	DESVPAD	CERCHAR (CAI)	DESVPAD
1	Ígnea	109,41	25,12	4,02	0,62
2	Ígnea	103,77	12,45	3,73	0,81
3	Ígnea	93,65	22,48	1,45	0,31
4	Ígnea	96,27	16,99	1,86	0,72
5	Ígnea	151,22	19,93	3,42	0,32
6	Ígnea	112,17	14,73	2,38	0,76
7	Ígnea	119,71	10,82	2,73	0,78
8	Ígnea	161,71	13,66	1,28	0,40
9	Ígnea	115,04	14,98	3,21	0,64
10	Ígnea	109,88	14,29	3,02	0,57
11	Ígnea	49,22	21,34	1,67	0,49
12	Ígnea	342,54	21,06	2,48	0,81
13	Ígnea	101,64	17,96	3,71	0,87
14	Ígnea	64,39	18,52	1,17	0,75
15	Ígnea	74,77	10,68	4,63	0,56
16	Ígnea	186,10	19,11	1,70	0,50
17	Ígnea	143,90	23,38	3,51	0,82
18	Metamórfica	80,89	11,89	3,80	0,75
19	Metamórfica	178,71	24,91	0,46	0,21
20	Metamórfica	185,56	25,09	0,40	0,26
21	Metamórfica	81,53	17,35	3,48	0,47
22	Metamórfica	226,22	33,09	0,23	0,33
23	Metamórfica	111,84	27,25	0,24	0,34
24	Metamórfica	151,55	22,51	0,10	0,17
25	Metamórfica	162,99	23,14	0,23	0,39
26	Metamórfica	200,31	29,17	0,31	0,39
27	Metamórfica	81,96	15,37	0,29	0,72
28	Metamórfica	120,14	30,32	2,75	0,75
29	Metamórfica	120,39	27,62	1,95	1,11
30	Metamórfica	147,80	23,47	2,04	0,32
31	Metamórfica	156,98	23,16	3,27	0,82
32	Metamórfica	175,23	32,18	4,26	0,77
33	Metamórfica	162,16	17,52	2,77	0,46
34	Metamórfica	122,36	26,36	2,41	0,77
35	Sedimentar	134,05	21,75	3,745	0,91
36	Sedimentar	216,50	25,06	0,1	0,19
37	Sedimentar	64,64	17,50	0,1	0,24
38	Sedimentar	73,06	11,99	2,595	0,83
39	Sedimentar	9,03	1,45	0,1	0,12
40	Sedimentar	72,20	17,31	0,25	0,26

4.2 ARTIGO 2

Identification of abrasion regimes based on the wear mechanisms on the steel stylus used in Cerchar Abrasiveness Test

Gabriela Reis Piazzetta

Federal University of Paraná – Brazil, Postgraduate Program of Geology, Earth Science Department.

Leonardo E. Lagoeiro

Federal University of Paraná – Brazil, Postgraduate Program of Geology, Earth Science Department.

Isabella Franoso Rebutini Figueira

Lactec Institute

Melina Almeida Gonçalves Rabelo

Petrobras

Giuseppe Pintaude

Corresponding author - Federal University of Technology – Paraná, Academic Department of Mechanics. Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville - CEP 81280-340 – Curitiba, PR – Brasil. Email: giuseppepintaude@gmail.com

Abstract

The wear of tools in rock excavation is a challenging issue, because it can represent surcharges to the project. To predict these expenses, field and laboratory investigations should be conducted during the project early steps. One of the parameters need to be determined is the particle abrasivity, defined as the capability of soils and rocks to cause the abrasive wear on metallic surfaces. Cerchar abrasiveness test is a well-recognized lab test for accessing the rock abrasivity, which is then expressed by the Cerchar Abrasiveness Index (CAI), measured by the crater diameter (mm) produced in the stylus multiplied by 10. Many authors have been statistically trying to correlate CAI with rock properties, but there is no consensus on that. The main reason for this difficulty is the microstructural complexity of rocks and the consequent effect on their tribological response. In this context, this study adopted another approach, identifying the wear mechanisms acting on the Cerchar stylus (AISI A2 tool steel) worn surface using the scanning electron microscope and the corresponding CAI values for nine different rocks ($0.1 < CAI < 6$). The wear mechanisms were classified into two extremes of wear regimes: the mild and the severe, with a transition region between them. The mild regime is characterized by the polishing action of rocks and CAI values up to 1.8. In turn, the severe regime is defined by micro cutting with an extensive plastic deformation and CAI values over 3.1. The reliability of our findings is discussed in the light of a theoretical conversion of CAI values into their respective wear coefficient. This new approach can provide a better portability between the Cerchar laboratory test and the real drilling process.

Keywords: Abrasive wear; Wear testing; Wear mechanism; Geological materials; Rock drilling

1 INTRODUCTION

The wear of tools in rock excavation is an old but still challenging issue. It can be responsible for about 30% of costs of a project

[1]. This cost includes the replacement of drills and the human time to substitute them, which increases price and schedule of excavation. In this context, rock abrasivity studies are

indispensable in the investigation phase to predict these expenses.

Abrasivity is the most correlated rock parameter to determine the wear of tools in mining, drilling and tunnelling machines. This parameter is defined as the wear or loss of material caused by the interaction between two surfaces (e.g. rock and drill) [2]. Cerchar [3] is considered, by many authors, an internationally recognised laboratory test to assess rock abrasivity [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. This test method consists of scratching a steel stylus with a cone-shaped pin against the rock surface, with an applied normal force of 70 N and for a 10 mm distance. The rock abrasiveness is determined by the Cerchar Abrasiveness Index (CAI), which is the measurement of the wear diameter on the stylus multiplied by 10 [2].

Since Cerchar test was developed by the Centre d'Études et Recherches des CHARbonages de France (CERCHAR) in 1986, many studies have been conducted to evaluate what rock properties define the rock abrasivity by Cerchar test. However, none of them could establish a consistent correlation between CAI and rock properties. Plinninger et al. [11], Yarali et al. [12], Er and Tugrul [13], Moradzadeh et al. [14] e Young Ko et al. [15] published correlations between CAI and quartz content. West [6], Plinninger et al. [11], Monteiro and Rocha [16] and Moradzadeh et al. [14] studied the correspondence between CAI and Equivalent Quartz Content (EQC). Al-Ameen and Waller [17], Deliormanli [18], Er and Tugrul [13], Young Ko et al. [15] evaluate the connection between CAI and Uniaxial Compressive Strength (UCS). Other authors research rock properties such as porosity, chemical composition and weathering [19, 13]. Plinninger et al. [20] proposed the Rock Abrasivity Index (RAI) which is the product of UCS and EQC.

The coefficient of determination (R^2) for all cited correlations varies from 0 to 98% even for different research of the same parameters. This discrepancy has two main causes: the large micro, macro and regional variation of rock properties, and the several variables acting on the wear of Cerchar test stylus (mineral content, grain sizes, strength between grain boundaries, the hardness of minerals, anisotropy, etc).

Other studies correlated rock properties or index (CAI, RAI EQC) with drilling or wear rates [21, 22, 23].

Recent publications have been focusing on another approach: the identification of wear mechanisms acting on rocks and stylus [24, 25, 26, 27]. Considering that Cerchar test is a tribological system, studying the abrasive wear mechanisms can provide better portability between abrasiveness laboratory tests and the real drilling process.

The wear mechanisms are characteristic of the type of abrasive wear. According to Gates [28], the abrasive wear can be classified into mild, severe or extreme. Mild regime can be described as a low-stress abrasion, insufficient to fracture particles, it has a low wear rate, displays a smooth surface and shows the microploughing mechanism. Severe regime is characterised by high rates of loss of material and rough surfaces, where microcutting is the dominant mechanism and the formation of metallic flakes/chips. Extreme wear is characterised by microcutting or microfracture mechanisms in a very high-stress contact that may cause macroscopic deformation.

The transition between mild and severe wear is a critical definition for selecting materials in wear situations. Kruschov [29] defined this transition for metals as a dependence on the variation of wear rate and H_A/H ratio, where H_A is the abrasive hardness and H is the worn material hardness (Figure 1). In Figure 1 K_1 and K_2 are the values that define the region corresponding to the transition between the mild and severe regimes. Following Kruschov [29], these values are 0.7-1.1 for K_1 and 1.3-1.7 for K_2 . Pintaúde et al. [30] extended the variation of the wear coefficient with the H_A/H ratio, including the effect of the particle size, which promoted a change of one order of magnitude within the mild regime. Recent studies conducted by Coronado et al. [31] studied the effect of hardness for a hard second phase materials, finding a value of 1.9 for the beginning of severe wear regime.

These transition values presented behave well for metal materials systems with homogeneous abrasives (composition and size range). Rock-like materials applied as abrasives have an heterogeneous character and anisotropic microtexture and structure, which in this case, challenges hardness measurements or correlations.

The heterogeneity of rocks makes an association between the wear regime and their mechanical properties very difficult. In this sense, Pintaude [32] put the Vickers hardness values of minerals that belong to the Mohs scale in successive order. The author has found hardness ratios for Mohs minerals pairs varying from 1.11 to 4.36, meaning that there is not a constant value of hardness differential required for abrasion in this case. For this reason, practical tests, as Cerchar, can be correlated to the wear regimes instead of to the mechanical properties of rocks, which avoids misinterpretations resulting from the determination of rock properties.

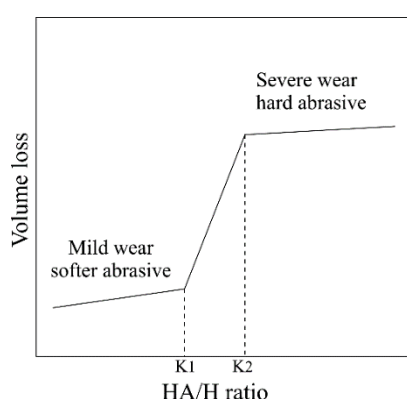


Figure 1 Relationship between wear rate and H_A/H ratio, where K_1 and K_2 are the values defining a transition between mild and severe wear [29].

Considering afore mentioned, this paper aims to applied the tribological approach to the Cerchar test by identifying the wear mechanisms of abrasion acting on the stylus for different CAI values and converting these CAI values into wear coefficients. So, using the classification of the wear mechanisms into the mild and severe wear regimes provided a correspondent CAI classification, which has a more practical meaning for drilling application than the current classification of abrasiveness provided by ASTM [2].

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 STEEL CHARACTERISATION

ASTM D7625 [2] specified a steel strength equivalent to a 2000 MPa of Ultimate Tensile Strength (UTS) and hardness of 55 (± 1) HRC. Stanford and Hagan [33] studied the impact of stylus metallurgy on Cerchar abrasiveness test and concluded that steel type of the stylus has insignificant influence on CAI if hardness remains between 50 and 55 HRC.

The Cerchar test stylus used in this study is composed of steel with typical microstructure constituted by tempered martensite and carbides (AISI A2) (Figure 2) and 55 HRC. Its chemical composition is given by a C content of 0.99% with main alloying elements of Cr, Mo e V at 4.57, 0.98 and 0.12% respectively, analyzed by the optical emission spectrometry (ASTM E415 2015). It corresponds to tool steel with high Cr content. This stylus is made of typical steel used for Cerchar stylus by equipment manufacturers and laboratories [33], and it is also comparable to the high Cr steel used in disk cutters for Tunnel Boring Machines (TBM).

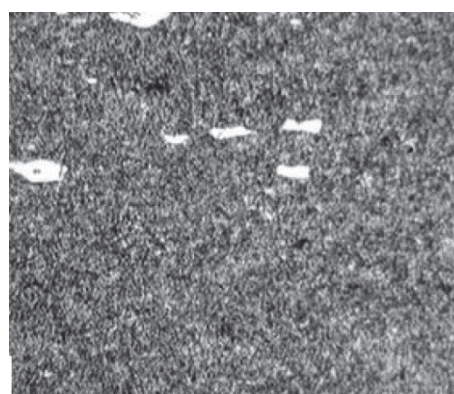


Figure 2 Steel microstructure of martensitic matrix with carbides, nital attack (2%), 400x.

The initial surface roughness of unworn stylus is characterised by micro scratch marks, resulted from the grinding process (Figure 3) and a cone-shaped pin.

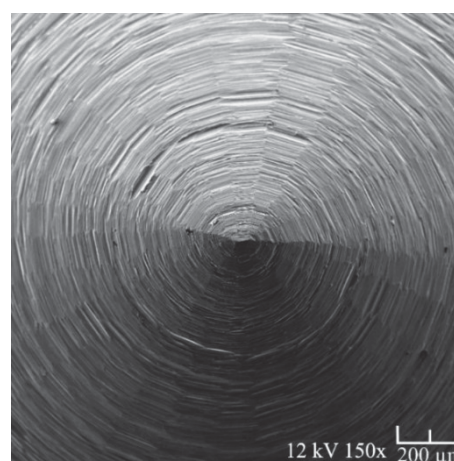


Figure 3 Typical appearance of the stylus pin with out wear and surface roughness resulted from the grinding process.

2.2 WEAR TEST – CERCHAR ABRASIVENESS TEST (GCTS RAA-100)

Cerchar abrasiveness test is a well know laboratory test to access rock abrasivity [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], and it is standardised by ASTM D7625 [2]. This test method consists of scratching a steel stylus with a cone-shaped pin against the rock surface with an applied normal force of 70 N and for a 10 mm distance. The rock abrasiveness is determined by the Cerchar Abrasiveness Index (CAI), which is the mean of measurements of the wear diameter d on the stylus multiplied by 10 (Eq. 1). Five repetitions are conducted for each rock sample. The worn diameter is measured from the lateral of the stylus, and two measurements are taken for each stylus, being the second 90° from the first. CAI ranges from 0 to approximately 7, and rocks are classified in 6 classes (for a stylus with 55 HRC): i) very low abrasiveness (CAI 0.30 to 0.50), ii) low abrasiveness (0.50–1.00), iii) medium abrasiveness (1.00–2.00), iv) high abrasiveness (2.00–4.00), v) extreme abrasiveness (4.00–6.00) and vi) quartzitic (6.00–7.00). After each test, the stylus is grinded until its initial unworn pin.

$$CAI = 10d \quad (1)$$

The test equipment included a modified by West [6] Cerchar apparatus (GCTS RAA-100), an optical microscope for digital automatized CAI measurements of the lateral of the stylus (RAA-AOM) and a steel indenter sharpening tool. Test parameters followed ASTM D7625 [2] recommendations.

After the Cerchar test and the CAI measurement, stylus worn surfaces were investigated using Field Emission Gun – Scanning Electron Microscope (FEG-SEM) Tescan MIRA 3LM SE (Secondary Electron) images, to identify the wear mechanism acting in each CAI interval.

2.2.1 Wear coefficient

The wear coefficient K establishes the correlation between the parameters of wear volume Wv (mm³) (Figure 4), normal load N (N), the sliding distance S (mm) and the hardness H (N/mm²) in Eq. 2. This coefficient can better describe the material behavior.

$$K = \frac{Wv H}{SN} \quad (2)$$

Considering the worn volume of the stylus, used in the Cerchar test, as the volume of a hemispherical cone, the diameter of the cone is the diameter of the worn surface represented by the CAI measured value (e.g. for a CAI of 1.00 de measured diameter is 0.10 mm) (Figure 3 A and B).

Therefore, CAI values can be converted to wear coefficient by the Eq. 2. Using the Wv calculated following the procedures presented in Figure 4, H is the hardness of the steel (6475 N/mm²), S is the 10 mm sliding distance, and N is the 70 N applied force.

For the ranges of CAI values (0.30 to 7.00) adopted by ASTM [2] to classify the abrasiveness, their equivalent K were calculated. The wear coefficients vary from $3.27 \cdot 10^{-5}$ (CAI 0.30) to $4.15 \cdot 10^{-1}$ (CAI 7.00).

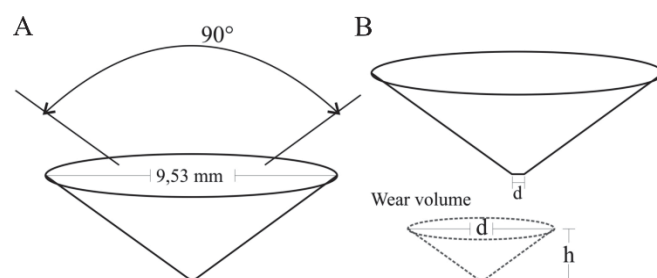


Figure 4 A) The steel stylus dimensions before the Cerchar test. B) The steel stylus after the Cerchar test, where d is the wear diameter used in the CAI formula, the wear volume represents a cone-shaped volume where the cone base diameter is equal to the wear diameter (CAI).

2.3 ROCK CHARACTERIZATION

Different types of rocks were tested to acquire stylus with a wear diameter of 0.10 CAI (0.01 mm) to 6.00 CAI (0.60 mm). The rock samples used for the worn surface analysis are displayed in Table 1.

Table 1 Type of rocks and their classifications used to acquire different CAI values (1st and 2nd measurements took on the stylus)

Type of rock	Classification	CAI	
		1st	2nd
Sedimentary	Sandstone	0.10	0.10
Metamorphic	Marble	0.30	0.30
Igneous	Basalt	1.10	1.00
Igneous	Syenogranite	1.90	1.70
Igneous	Basalt	2.10	2.00
Igneous	Alkali-Feldspar syenite	2.50	2.60
Igneous	Syenogranite	3.00	3.20

Metamorphic	Quartzite	5.50	5.70
Metamorphic	Quartzite	5.80	6.00

3 RESULTS

3.1 STEEL PIN WEAR MECHANISMS

The worn surfaces were analyzed on FEG-SEM-SE images after Cerchar tests. The wear mechanisms observed on each stylus were analysed in detail, allowing to correlate the CAI values with a regime of wear: severe, mild and transition regimes.

3.1.1 Severe wear

Following the classification provided by Gates [28], some worn surfaces exhibited the microcutting as the predominant mechanism. In these contact areas, the complete destruction of grinding marks and formation of grooves were observed (Figure 4). Most pin worn surfaces with dominant microcutting mechanism corresponded to a high CAI value with a wear diameter larger than 0.31 mm (CAI 3.10). At this point, the wear regime was classified as severe.

Some pin worn surfaces exhibit more severe regime features. The microcutting was pervasive at all the contact area (Figure 5). Figure 6 shows a detail of the well-defined grooves formed along the wear process; practically any debris (chips or fragments) was found inside them, characterising a high efficiency on removal material [34]. Besides, in Figure 7 is possible to see the displacement and accumulation of material at the end of the scratch, due to the major plastic deformation.

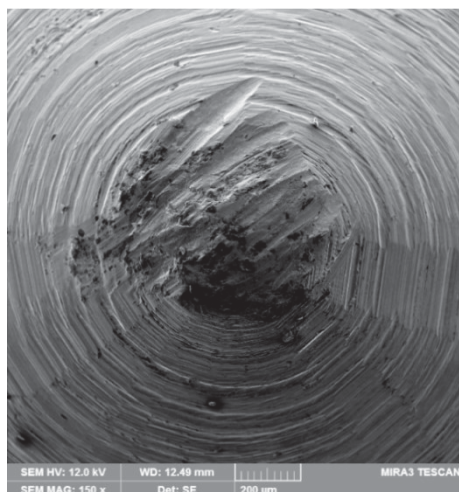


Figure 5 Detail of grooves at the worn surface for tested syenogranite with CAI 3.10

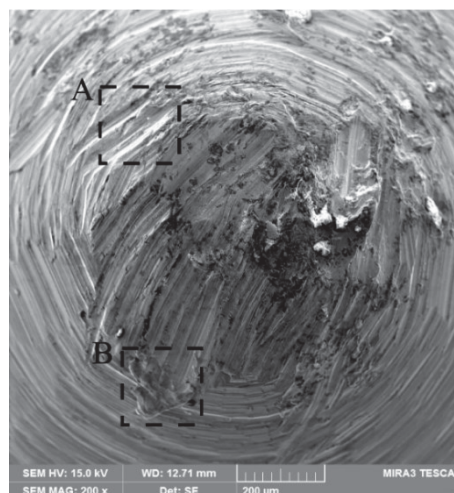


Figure 6 Pin wear surface of quartzite with CAI 5.50

Another typical feature of the microcutting mechanism according to Yingjie, Xingui and Keqiang [36] is the formation of well-defined chips, which is observed in Figure 8.

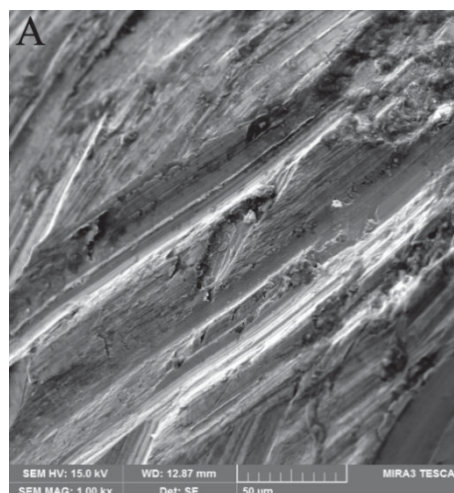


Figure 7 Detail of well-defined grooves on pin worn surface of quartzite sample with CAI 5.50

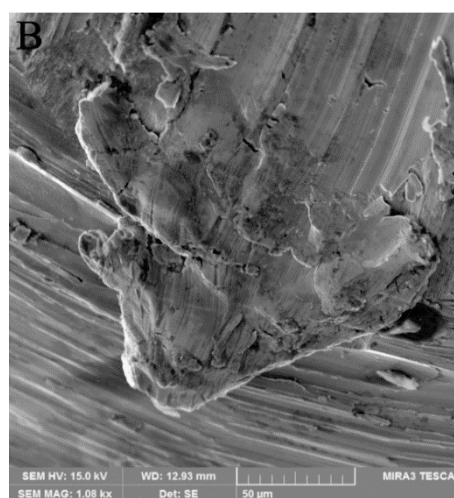


Figure 8 Detail of displacement and accumulation of material at the end of a groove and formation of microchip inside the groove of quartzite pin wear surface with CAI 5.50

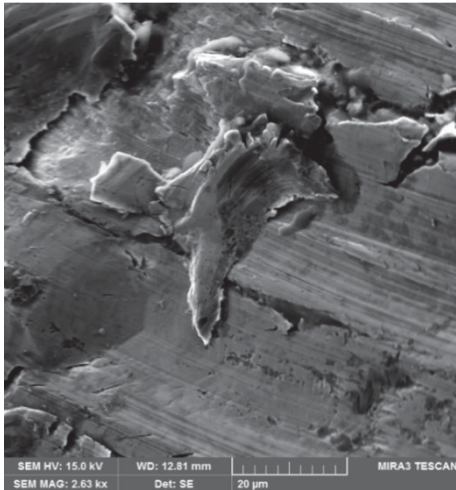


Figure 9 Detail of chip formation in stylus worn surface of the tested quartzite with CAI 5.50

The association of both the dominant microcutting with well-defined grooves, and microchip formation were only observed at very high CAI values (over CAI 5.00).

The rock response to the scratch test was analyzed by the scratch geometry, and wear mechanisms identification on the rock surface. To represent the severe regime, rock surface of very abrasive rocks with high CAI (>5.00) values presented very shallow scratches and loss of stylus steel which was adhered to the rock surface (Figure 10). This behavior is consistent with the well-defined grooves that characterise the high efficiency of removal metal material.

The outside pin surface of syenogranite (CAI 3.10) presented some indentations marks (Figure 11) that were associated with the impact of this surface on rock grains during the test due to high rock roughness. Rock fragments encrusted material can be noted at all stylus-rock interactions. These impact features were common for all wear regimes.

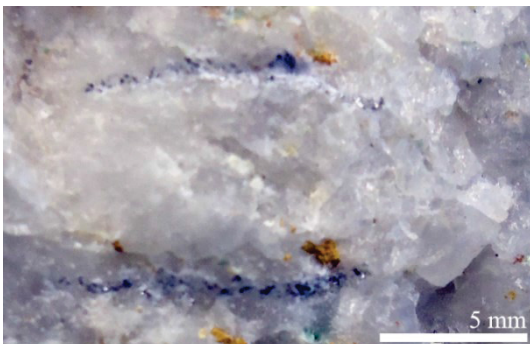


Figure 10 Scratches on quartzite surface with CAI 5.90, the metallic material of steel stylus adheres to the rock surface

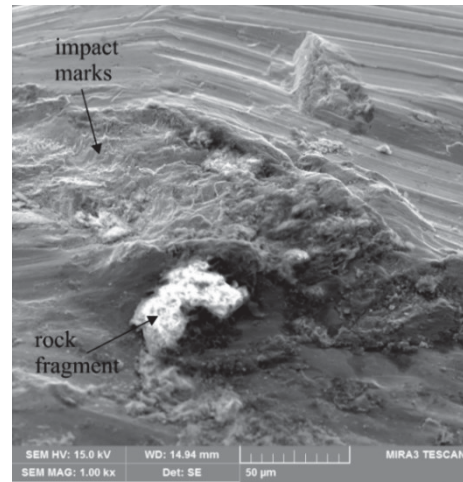


Figure 11 Impact marks of worn outside surface and encrusted rock fragments of syenogranite with CAI 3.10

3.1.2 Mild wear

In opposition to the described mechanisms for the severe wear regime, there were far fewer investigations on the mild wear regime. A description was made by Pintaude et al. [35], who identified a very polished surface of a quenched steel when it was abraded by glass paper. The same characteristic was identified in this study when the stylus steel was scratched by the marble sample. The observed mechanisms of ploughing and predominant polished surface were observed in SEM images of the pin worn surface of non-abrasive rocks with very low CAI values (0.10 to 1.80). The mechanisms polished surface and ploughing were observed in the CAI range between 0.10 and 2.00. It was noted that the polished surface is dominant on CAI 0.10 until the prevalence of ploughing on CAI 1.80 – 2.00.

Rock-pin interactions for very low CAI surfaces (CAI 0.10 - 0.50) resulted in a polished surface with flattening and accumulation of material under this surface (Figure 12).

On the rock surface of very low CAI values (0.10 – 0.50), the observed features were a deep scratch geometry with material fracture and displacement to the sides and to the end of the scratch (Figure 13). The stylus deeply penetrated into the rock (Figure 14). The fragmentation of the abrasive (rock) led to a loss of abrasive potential due to the size decrease or even its loss of angularity [35].

However, for many pin worn surfaces, the wear mechanisms changed gradually. These changes helped identify a regime of transition, which was defined as a combination of multiples mechanisms acting simultaneously.

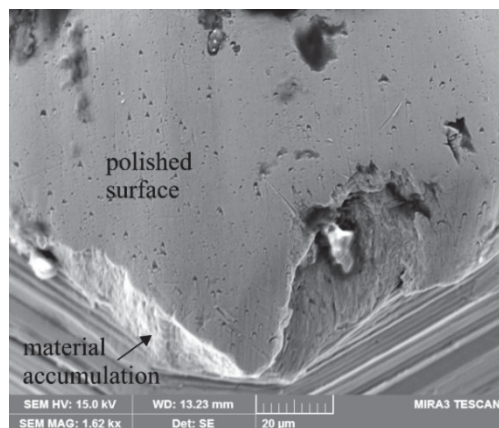


Figure 12 Worn surface for tested marble with CAI 0.30



Figure 13 Scratch on sandstone surface with CAI 0.10 display a significant amount of fractured material, deep scratch and a considerable amount of displaced rock material

The worn surface of CAI 1.00 showed a predominance of polished surface with encrusted rock material, but it was noted that features of dragged material began to appear (Figure 14). As noted before, impact marks and grooves can be observed in the outside pin surface, the wear mechanisms acting in this external area were not considered in this study due to the dependency of the rock roughness.

The worn surfaces of CAI 1.80 displayed more restricted polished surface, and local transitional features represented by micro fatigue (Figure 16). The occurrence of different wear mechanisms was associated with the beginning of a transitional regime.

3.1.3 Transition

In the previous items, the worn surfaces were associated with either mild or severe regimes, according to the dominant mechanism of material removal. The polishing and the grooving were considered as extremes of these regimes, and they were associated with the extremes of the CAI classification, very-low/low and very-high/quartzitic abrasiveness.

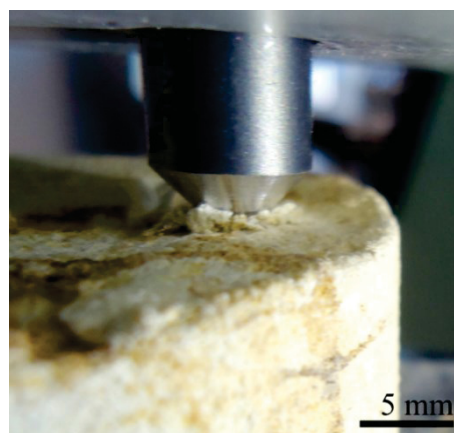


Figure 14 The process of scratching on sandstone surface with CAI 0.10 showing a deep stylus penetration and fracture of the material

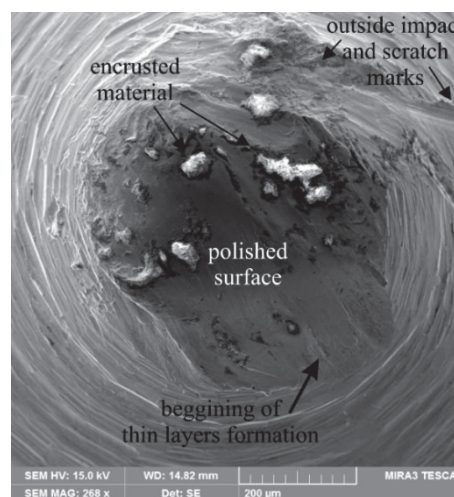


Figure 15 Worn surface for tested basalt with CAI 1.00

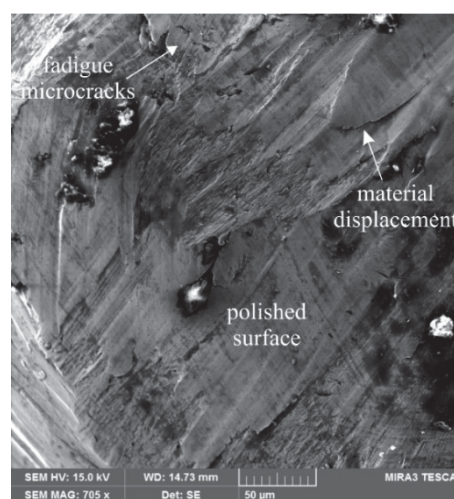


Figure 16 Detail of worn surface on syenogranite with CAI 1.80

The first example was identified on the worn surface of CAI 2.10 (Figure 17). It displayed an evolution of that observed in Figure 16, with additional occurrence of multiple wear mechanisms. In this case, the polished surfaces were restricted to small portions, together with more extensive areas with large plastic deformation. These areas were associated with the microploughing mechanism as a function of its loss of capacity to remove material.

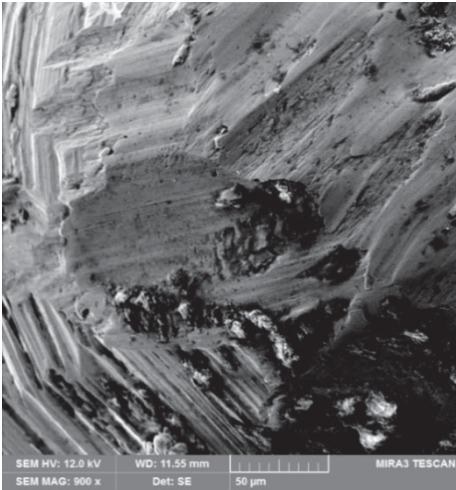


Figure 17 Worn surface for tested basalt of CAI 2.10

Another feature observed for closer values of CAI was the presence of micro fragmentation. As pointed out by Pintaude et al. [37], the occurrence and effects of this mechanism in metallic materials were relatively difficult to understand.

The micro fragmentation is well demonstrated in Figure 18. In this process, a series of thin layers were overlaid until the repetition of this process made the initiation of cracks possible, leading to the fragmentation of the deformed layers.

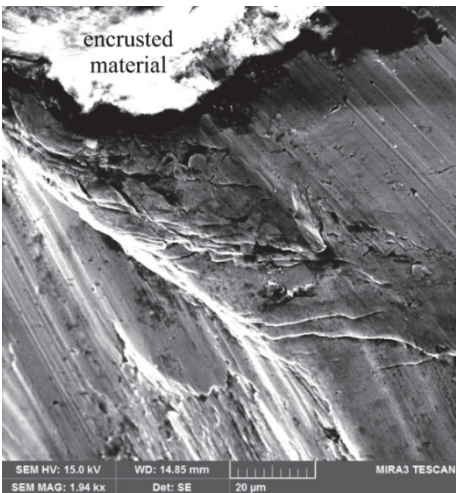


Figure 18 Detail of thin layers accumulation and the

beginning of microfragmentation formation on CAI 1.80 syenogranite surface

This kind of feature of a thin layer formation deformed up to rupture was identified by Pintaude et al. [37] for a condition where the H_A/H ratio is 1.20, a value associated with the transition regime. However, due to the very low wear rate reported for this case, they classified this occurrence as typically belongs to the mild wear. Further, the mechanisms associated with a transition regime of wear will be discussed based on the wear coefficients. Another example of high deformed layers up to the rupture is presented in Figure 18 for more abrasive rocks with CAI over 2.50. This case clearly showed that the change in the wear mechanisms was gradual as the CAI variation.

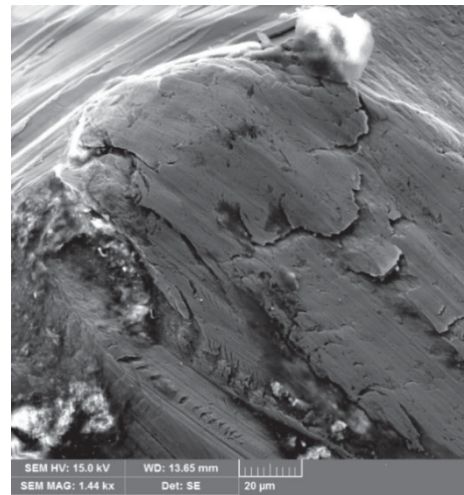


Figure 19 Detail of the fragmentation and a beginning of a debris formation on pis surface of tested alkali feldspar syenite with CAI 2.50

Medium CAI values (2.00 – 2.30) exhibited scratches with shallow depths and little material displacement (Figure 20).

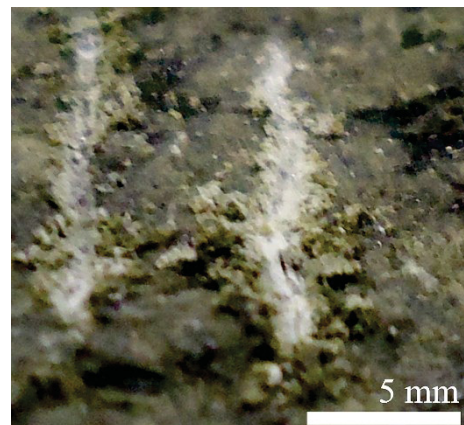


Figure 20 Rock surface response to Cerchar scratch. Syenogranite sample with CAI 1.80

4 DISCUSSION

Based on the descriptions presented in the previous items, the wear mechanisms of microcutting, polishing and microfatigue were associated with severe, mild and transition wear regimes respectively. Therefore, it was possible to indicate specific values of CAI for each of them. In other words, similar mechanisms only occurred in a limited range of CAI values, for example, the microcutting was associated with high CAI values. Thereby, a correlation between the wear regimes and CAI values can be settled (Table 2).

Table 2 Correlation between CAI and wear regimes

CAI	Wear regime	Wear mechanisms
0.1 – 1.8	Mild	Polishing, flattening and microploughing, low volume loss
1.8 – 3.1	Transitional	Microploughing and microfatigue
>3.1	Severe	Microcutting with well-defined grooves and microchip formation, high volume removal

The microcutting associated with an extensive plastic deformation was the main wear mechanism of the severe regime, identified as the predominant one for CAI over 3.10. Isolated grooves were noted on other CAI ranges. The dominance of polished surface was related to low CAI values of low abrasiveness rocks. Gradual changes between these two extremes were classified into the transitional regime.

Another correlation was noted between the wear regimes and rock surface analyses. In the severe regime, the tested rock exhibited a very shallow scratch with metal material adhered to the groove. In the mild regime, the rock surface response was a deep groove, with rock material fragmentation and its further displacement.

To analyse the variation of the wear coefficients according to the CAI values, calculated in subsection 2.2.1, both variables were plotted in the following trendline showed in Figure 21. The presented diagram (Figure 21) helps to understand the significance of the proposed values (Table 2) of this study, the ASTM classification [2] and the experimental values provided by Pintaude et al. [30].

For that purpose, this study made use of the seven limits established by ASTM [2]

abrasiveness classification, as well as the experimental values of K_1 and K_2 [30] (Figure 1), which were transformed into CAI values 1.61 and 2.25 respectively, using the trendline of Figure 21. In this study, the proposed values for the limit of mild (CAI 1.80) and the beginning of severe (CAI 3.10) regimes were based on the observation of wear mechanisms as already discussed.

The graph of Figure 20 shows a trendline of the variation of the wear coefficient with CAI. In this study, a constant value of wear coefficient was not recognised, but a very different curve slope was perceived from a CAI of 2.00. This was an interesting value, as the ASTM defined it as the transition between the medium abrasiveness region to the high one. Also, we have identified the same wear mechanisms of abrasion up to a sample of CAI 1.80. For a practical meaning, this value can be considered equivalent to 2.00. Not so far, the experimental limit for the mild regime was set at 1.5 [30].

The variation of the wear coefficient up to CAI 2.00 corresponded to $10^{-6} - 10^{-2}$. This is a wide range, corresponding to the findings of Pintaude et al. [30]. Surprisingly, one can inquire how it was possible to find similar wear mechanisms for this huge variation. The answer is related to the detection limits of the removed mass, based on the gravimetric measurement. In other words, any minimal deviation during weighting in that range of CAI values would correspond to a huge variation in the wear coefficient, not meaning a variation in the wear mechanisms. Typical low wear coefficients in abrasion are $10^{-4} - 10^{-5}$ [39]. Besides, the calculation based on Figure 4 assumed a smooth worn surface, which did not represent the reality. In the same direction, Majeed and Abu Bakar [40] indicated the use of saw-cut surface to eliminate the surface roughness effect, improving the CAI determination.

Additionally, it would be much more difficult to define a value of CAI equivalent to the beginning of severe regime because the attack angle has a significant effect on the microcutting mechanism. This was reported by Sin et al. [38] in their analytical model, which described the relation of the wear coefficient related to the pure cutting as a function of the attack angle. Due to rock high roughness and heterogeneity, the attack angle could vary in the same test [41]. Considering these issues, the beginning of severe regime was defined

based on the observation of wear mechanisms, and the proposed value of 3.1 differed from the experimental value of Pintaude et al. [30], but corresponded to the middle of ASTM high abrasiveness region.

The same wear mechanisms associated with the severe regime (K_2) were observed over CAI 3.10, which corresponds to the middle of the ASTM high abrasiveness class, even though the K value is not constant.

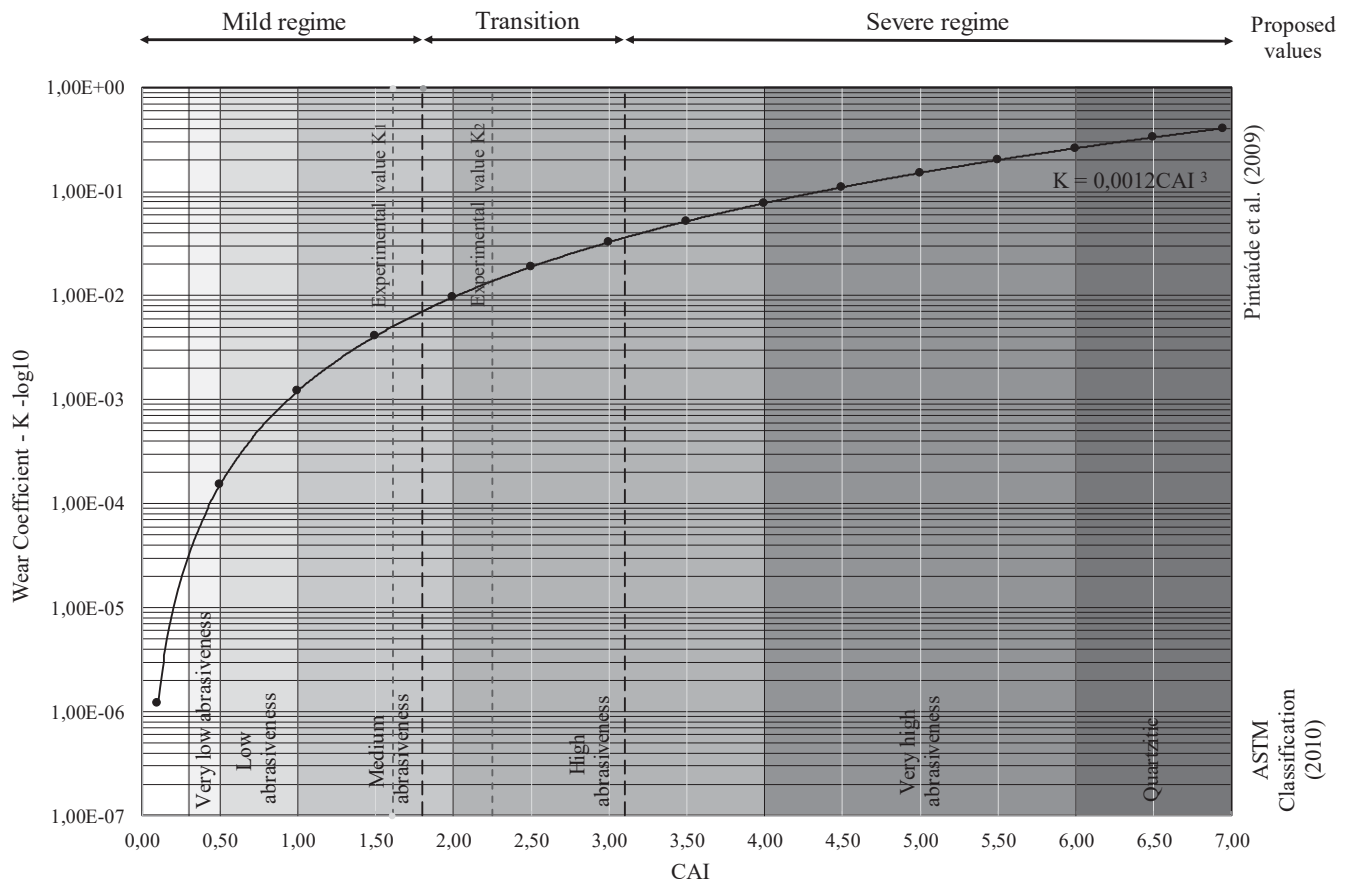


Figure 21 Graph with the trendline of the wear coefficient calculated for each CAI value and the limit lines for ASTM abrasiveness classification [2], Pintaude et. al. [30] and this study proposed values.

5 CONCLUSIONS

As many other studies have demonstrated an unclear link between the CAI values and the rock properties, the current investigation detailed the wear mechanisms observed in the stylus steel to provide more valuable information in order to transfer laboratory results to the real project demands.

Thus, the following conclusions can be pointed out:

- The CAI values and the wear coefficient could be used to define three regimes of wear: mild, transitional, and severe.
- The identified wear mechanisms belonging to specific wear regimes were independent on the tested rock, which gives a comprehensive character to the approach taken.
- The mild regime of abrasion was characterised by an intense rock fragmentation, together with a very polished surface of the studied stylus (AISI A2 – High Cr steel, HRC 55) for CAI values up to 1.80/2.00.
- The transition between mild and severe regimes was characterised by micro fatigue on CAI values between 1.80/2.00 and 3.10.
- The severe regime of abrasion was characterised by micro cutting with extensive plastic deformation of the stylus for CAI values over 3.1.
- The classification of very low (CAI 0.30-0.50) and low abrasiveness (CAI 0.50-1.00) correspond, in fact, to very similar wear mechanisms, being more useful to define for that a mild regime of abrasion with a limit value of 1.8/2.00 CAI

- The current findings can be considered as the first step for a future improvement of the ASTM classification of abrasiveness.
- A potential application of the proposed values would be to apply Cerchar tests in the prediction of disc cutter lives in TBMs projects due to the similarity of the steel used to perform Cerchar tests and the disc cutters material (AISI High Cr steel, HRC 53).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the CNPq, for the subsidies for import, contained in Law 8010/90, L.I. 16/0893749-0, to Lactec Institute, ANEEL, ANP and Petrobras for the financing and infrastructure to conduct this research project.

REFERENCES

1. Thuro, K., Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. *Geologische Rundschau* 86.2 (1997) 426-438.
2. ASTM D7625 Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method, ASTM International, West Conshohocken, PA (2010) <https://doi.org/10.1520/D7625>
3. Cerchar—Centre d'Études et des Recherches des Charbonnages de France (1986) The Cerchar abrasivity index. Verneuil
4. Suana, M., Tj Peters., The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Rock mechanics* 15.1 (1982) 1-8.
5. Atkinson, T., Cassapi, V. B., Singh, R. N., Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery. *International Journal of Mining and Geological Engineering* 4.2 (1986) 151-163.
6. West, G. A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments. *Geotechnical and Geological Engineering* 4.1 (1986) 73-78.
7. Käsling, H., Thuro, K., Determining rock abrasivity in the laboratory. *Rock mechanics in civil and environmental engineering—Proc EUROCK* (2010) 425-428.
8. Fowell, R. J., Abu Bakar, M. Z., A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Second half century for rock mechanics. Vol. 1. (2007) 155-160.
9. Rostami, J., et al. Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index. *Rock mechanics and rock engineering* 47.5 (2014) 1905-1919.
10. Alber, M., et al., ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the CERCHAR abrasivity test. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer, Cham (2013) 101-106.
11. Plinninger, R., et al., Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International journal of rock mechanics and mining sciences* 40.2 (2003) 259-263.
12. Yarali, O., et al., A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks. *International Journal of Coal Geology* 74.1 (2008) 53-66.
13. Er, S., Tuğrul, A., Estimation of Cerchar abrasivity index of granitic rocks in Turkey by geological properties using regression analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75.3 (2016) 1325-1339.
14. Moradzadeh, M., et al., Correlation of equivalent quartz content, slake durability index and Is_{50} with Cerchar abrasiveness index for different types of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 86 (2016).
15. Young Ko, T. et al., Effect of geomechanical properties on Cerchar Abrasivity Index (CAI) and its application to TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 57 (2016) 99-111.
16. Monteiro, M. D., Rocha, H. C., A abrasividade de rochas no estudo do metrô de São Paulo: ensaios, classificações, influência do grau de alteração e considerações sobre o consumo de ferramentas de corte em escavações subterrâneas. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo* (2015) 71-86.
17. Al-Ameen, S. I., Waller M. D., The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. *Engineering Geology* 36.3-4 (1994) 293-301.
18. Deliormanlı, A. H., Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones. *Construction and Building Materials* 30 (2012) 16-21.
19. Alber, M., Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunnelling and underground space technology* 23.4 (2008) 351-359.
20. Plinninger, R. J., Spaun G., Thuro, K., Predicting tool wear in drill and blast. *Tunnels and Tunneling International Magazine* (2002) 1-5.
21. Thuro, K., Spaun G., Introducing the 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill-and blast tunnelling. *ISRM International Symposium-EUROCK 96*. International Society for Rock Mechanics (1996).
22. Thuro, K., Plinninger R. J., Wear prediction in hardrock excavation using the CERCHAR Abrasive Index (CAI). *Rock Engineering—theory and practice* (2004) 599-604.
23. Thuro, K., Plinninger, R. J., Geological limits in roadheader excavation—four case studies.

- Proceedings of the 8th international association for engineering geology congress, Rotterdam (1998).
24. Beste, U., Lundvall A., Jacobson S., Micro-scratch evaluation of rock types—a means to comprehend rock drill wear. *Tribology International* 37.2 (2004) 203-210.
 25. Beste, U., and Jacobson S., A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons. *Wear* 264.11-12 (2008) 1129-1141.
 26. Petrica, M., Badisch E., Peinsitt T., Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. *Wear* 308.1-2 (2013) 86-94.
 27. Petrica, M., et al., Wear mechanisms on martensitic steels generated by different rock types in two-body conditions. *Tribology Letters* 53.3 (2014) 607-616.
 28. Gates, J. D., Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. *Wear* 214.1 (1998) 139-146.
 29. Khruschov, M. M., Principles of abrasive wear. *Wear* 28.1 (1974) 69-88.
 30. Pintaude, G., et al., Mild and severe wear of steels and cast irons in sliding abrasion. *Wear* 267.1-4 (2009) 19-25.
 31. Coronado, J. J., Rodríguez S. A., Sinatora, A., Effect of particle hardness on mild–severe wear transition of hard second phase materials. *Wear* 301.1-2 (2013) 82-88.
 32. Pintaude, G., An overview of the hardness differential required for abrasion. *Journal of Tribology* 132.3 (2010) 034502.
 33. Stanford, J., Hagan, P., An Assessment of the Impact of Stylus Metallurgy on Cerchar Abrasiveness Index, in Aziz, N (ed), *Coal: Coal Operators' Conference*, University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, (2009) 348-355.
 34. Zum Gahr, K-H., Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals. *Wear* 74.2 (1981) 353-373.
 35. Pintaude, G., Tanaka D. K., Sinatora A., The effects of abrasive particle size on the sliding friction coefficient of steel using a spiral pin-on-disk apparatus. *Wear* 255.1-6 (2003) 55-59.
 36. Yingjie, L., Xingui B., Keqiang, C., A study on the formation of wear debris during abrasion. *Tribology international* 18.2 (1985) 107-111.
 37. Pintaude, G., Albertin, E., Sinatora, A., A review on abrasive wear mechanisms of metallic materials. *Proc. Int. Conf. on Abrasion Wear Resistant Alloyed White Cast Iron For Rolling and Pulverizing Mill.* (2005).
 38. Sin, H., Saka, N., Suh, N. P., Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. *Wear* 55.1 (1979) 163-190.
 39. Zum Gahr, K-H., Wear by hard particles. *Tribology International* 31.10 (1998) 587-596.
 40. Majeed Y., Abu Bakar, M.Z., Statistical evaluation of CERCHAR Abrasivity Index (CAI) measurement methods and dependence on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan. *Bull Eng Geol Environ* 75.3 (2015) 1341-1360.
 41. Hisakado, T., H. Suda., Effects of asperity

shape and summit height distributions on friction and wear characteristics. *Wear* 225 (1999) 450-457.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial do projeto no qual este trabalho está inserido era estabelecer uma correlação estatística entre a abrasividade Cerchar e os parâmetros das rochas (compressão uniaxial, abrasão Los Angeles, teor de quartzo, composição química). Foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre o ensaio Cerchar que incluiu referências sobre a influência dos parâmetros de realização do ensaio, correlações estatísticas com outras propriedades das rochas e correlações com as taxas de consumo de ferramentas de perfuração em projetos reais.

A partir desta revisão verificou-se a dificuldade em estabelecer correlações estatísticas consistentes entre o CAI e os parâmetros físicos, químicos e mecânicos das rochas devido ao caráter heterogêneo das mesmas (variação do tamanho dos grãos, grau de alteração, coesão entre os grãos, porosidade efetiva). Portanto, boas correlações só seriam possíveis para estudos localizados e não para parametrizações generalizadas por tipo de rocha, já que a classificação por tipo de rocha considera somente um parâmetro (geralmente a composição mineralógica ou a gênese). A alternativa encontrada foi a avaliação do ensaio Cerchar como um ensaio tribológico de riscamento. Neste sistema, a rocha é o contra-corpo (abrasivo) e a ponteira de aço é o corpo. Após a realização do ensaio em diversos tipos de rocha, as ponteiras foram analisadas no MEV e foi possível identificar os mecanismos de desgaste atuantes e classificá-los nos regimes de desgaste: moderado, transicional e severo. A importância desta nova abordagem é melhorar a transferibilidade entre o ensaio de laboratório Cerchar e os processos de desgaste que atuam na escavação real.

Sendo assim, dois conjuntos de dados foram apresentados como resultados, aqueles que derivaram da análise dos parâmetros de realização do ensaio Cerchar e as correlações estatísticas iniciais, e aqueles que derivam da análise tribológica do ensaio. A partir dos resultados apresentados nos Artigos 1 e 2 foi possível concluir que:

- A revisão bibliográfica dos parâmetros de realização do ensaio de abrasividade Cerchar revelou que uma série de variáveis pode influenciar o resultado do CAI
- Da análise interlaboratorial dos resultados pode-se inferir que os erros normalizados medidos, E_n , principalmente do LAB 02 (com 75% de valores estatísticos inconsistentes) e do LAB 01, com 8%, podem ter sido consequentes tanto do aço utilizado na ferramenta de desgaste (ponteira), seus métodos de

determinação ópticos e mesmo da microestrutura da rocha, em relação à sua dureza e orientação preferencial dos seus cristais.

- Pelo ensaio CAI das amostras ígneas, metamórficas e sedimentares medidas, pode-se classifica-las como de média a muito abrasiva (CAI entre 1 e 4) em cerca de 89% dos casos.
- A influência da condição da superfície da amostra de rocha utilizada para o ensaio, natural (CAI_{fb}) ou serrada (CAIs) foi estudada em detalhe, foi encontrada uma boa correlação entre as variáveis com um R² de 0,887 e uma equação de correlação definida por $CAI_{fb} = -0,005CAIs + 1,062$.
- Pelo tipo de rocha (ígneas, metamórficas e sedimentares) analisado em função da amplitude dos CAI na superfície natural, pode-se inferir por haver uma tendência de agrupamento hierárquico em função da classificação. Sendo assim, foi possível estabelecer intervalos de CAI de acordo com o tipo de rocha.
- Quanto aos ensaios conjuntos da resistência à compressão axial e da abrasividade Cerchar observou-se não haver uma correlação direta entre as mesmas.
- Com os resultados analíticos da aplicação da técnica FEG-SEM/EBSD/EDS concluiu-se ser um método auxiliar na avaliação do ensaio de abrasividade Cerchar.
- A variação dos resultados que deriva do tipo de rocha analisado pode ser compreendida a partir de uma análise prévia e de uma descrição das condições mineralógicas (ex: camadas de quartzo), estruturais (bandamento ou foliação), tamanho dos grãos condições de microfissuramento e micro alteração, que podem ser obtidas por este método.
- Uma correlação entre os valores de CAI e os coeficientes de desgaste pode ser utilizada para definir tres regimes de desgaste: moderado, transicional e severo.
- Os mecanismos de desgaste identificados pertencem aos regimes de desgaste específicos e são independentes da rocha, o que dá um carácter abrangente à abordagem adotada.
- O regime de abrasão moderado foi caracterizado por uma intensa fragmentação da rocha, junto com a formação de uma superfície bastante polida da ponteira estudada (AISI A2 – Aço Alto Cr, HRC 55) para valores de CAI de até 1,80/2,00.

- A transição entre os regimes moderado e severo foi caracterizado por micro fadiga em valores de CAI entre 1,80/2,00 e 3,10.
- O regime de desgaste abrasivo severo foi caracterizado por micro corte com deformação plástica abrangente do aço da ponteira para valores de CAI superiores a 3,10.
- A classificação em muito baixa (CAI 0.30-0.50) e baixa abrasividade (CAI 0.50-1.00) corresponde, de fato, a mecanismos de desgaste muito semelhante, sendo mais útil definir o regime de abrasão moderado com um limite de CAI 1,80/2,00.
- Os resultados atuais podem ser considerados como o primeiro passo para uma melhoria futura da classificação ASTM de abrasividade.
- Uma aplicação potencial dos limites propostos seria a aplicação do ensaio de abrasividade Cerchar na previsão da vida útil dos discos de corte nos projetos que utilizam tuneladoras, devido à semelhança do aço usado para realizar os ensaios Cerchar e o material dos discos (aço AISI Alto Cr, HRC 53).

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Como o ensaio de abrasividade Cerchar tem como objetivo avaliar o potencial de desgaste da rocha na interação com a broca, o material da ponteira de aço utilizada no ensaio deveria ser semelhante ao material da broca a ser empregada, para que a avaliação dos mecanismos e dos regimes de desgaste pudesse ser aplicada em um numero maior de projetos.
- Estudar o efeito da rugosidade da rocha no ângulo de ataque e no mecanismo de micro corte.
- Estudar a relação entre o tamanho do grão de quartzo e o potencial de remoção de material por microcorte.
- Estudar a energia necessária para mover a ponteira em cada regime de desgaste, talvez associando o coeficiente de atrito.

REFERÊNCIAS

As referências utilizadas nos artigos estão citadas ao final de cada um.

AL-Ameen S.I. & Waller M.D. 1992. Dynamic Impact Abrasion Index for Rocks. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics abstracts*, 29(6):555-560.

AL-Ameen S.I. & Waller M.D. 1993. The continuous abrasion test for the assessment of rock abrasivity. *Geotechnical Testing Journal*, 16(4):525-533.

AL-Ameen S.I. & Waller M.D. 1994. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. *Engineering Geology, Nottingham*, 36:293-301.

Alber M., Yarah O., Dahl F., Bruland A., Kasling H., Michalakopoulos T.N., Cardu M., Hagan P., Aydin H., Özardlan A. 2014. ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar Abrasivity Test. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:261-266.

ASTM D7625 - Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the Cerchar method. 2010. Designation: D7625-10, p 1-6.

Atkinson T., Cassapi V.B., Singh R.N. 1986. Assessment of abrasive wear resistance potential in rock excavation machinery. *International Journal of mining and geological engineering*, 3:151-163.

Aydin H., Yaralı O., Duru, H. 2016. The effects of specimen surface conditions and type of test apparatus on Cerchar Abrasivity Index. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(2):293-298.

Cerchar. 1986. The Cerchar Abrasiveness Index. Centre d'études et Recherches de Charbonnages de France, 12S, Verneuil.

Fowel R.J., Abu Bakar M.Z. 2007. A review of the Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods. In: 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics. ISBN: 978-0-415-45084-3.

GCTS. Operating Instructions for Cerchar RAA-100, RAA-AOM and STS-100, 2016. Manual de instruções.

IADC Drilling Manual. 2007. 11th Ed. - Redesigned.

Janach W., Merminod A. 1982. Rock abrasivity test with a modified Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 19:43-45.

Kasling, H., Thuro K. 2010. Determining rock abrasivity in the laboratory. In: Zhao, Labiouse, Dudt, Mathier (eds). *Rock Mechanics in civil and environmental engineering*. Taylor & Francis, London, p. 425-428.

Majeed Y., Abu Bakar M.Z. 2015. Statistical evaluation of CERCHAR Abrasivity Index (CAI) measurement methods and dependence on petrographic and mechanical properties of selected rocks of Pakistan. *Bull Eng Geol Environ*.

- Michalakopoulos S.T.N., Anagnostou V.G., Bassanou M.E., Panagiotou G.N. 2006. The influence of steel styli hardness on Cerchar Abrasiveness Index value. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43:321-327.
- Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P. 2006. Abrasivity testing for rock and soils. *Tunnels and Tunneling International*, 47-49.
- 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 & Mining Sciences*, 40:259-263.
- Plinninger R.J., Thuro K. 2004. Wear prediction in hardrock excavation using the Cerchar Abrasiveness Index (CAI). *EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium Schubert*.
- Rosiwal A. 1896. New research findings on the hardness of minerals and rocks. *Verhandlungen der königl. Geol. Reichsanstalt*, (17&18):475-491.
- Rostami J., Ozdemir L., Bruland A., Dahl F. 2005. Review of issues related to Cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. *Proceedings of the Eurock 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium*, 599-604.
- Rostami J., Ghasemi A., Gharahbagh E.A., Dogrouz C., Dahl F. 2014. Study of Dominant Factors Affecting Cerchar Abrasivity Index. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:1905-1919.
- Shimazek J., Knatz H. 1970. The assessment of the cuttability of rocks by drag and roller bits. *Estzmetall*, 29:113-119.
- Stanford J., Hagan P. 2009. An assessment of the impact of stylus metallurgy on Cerchar Abrasiveness Index. Aziz, n(ed), *Coal 2009: Coal Operators' Conference*, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 348-355.
- Suana M., Peters T.J. 1982. The Cerchar Abrasivity Index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Journal of Rock Mechanics*, 15:1-7.
- West G. 1981. A review of rock abrasiveness testing for tunnelling. *Proceedings of the International Symposium on weak rock*, Tokyo, 21-24:585-594.
- West G. 1986. A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measures sediments. *International Journal of Mining and Geological Engineering*.
- West G. 1989. Technical Note: Rock Abrasiveness testing for tunneling. *International Journal of Rock Mechanics, Mining science and Geomechanics Abstracts*, 26(2):151-160.
- Yarali O., Yasar E., Bacak G., Ranjith P. 2008. A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks. *International Journal of Coal Geology*, 74:53-66.
- Yarali O., Duru H. 2016. Investigation into effect of scratch length and surface condition on Cerchar abrasivity index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60:111-120.