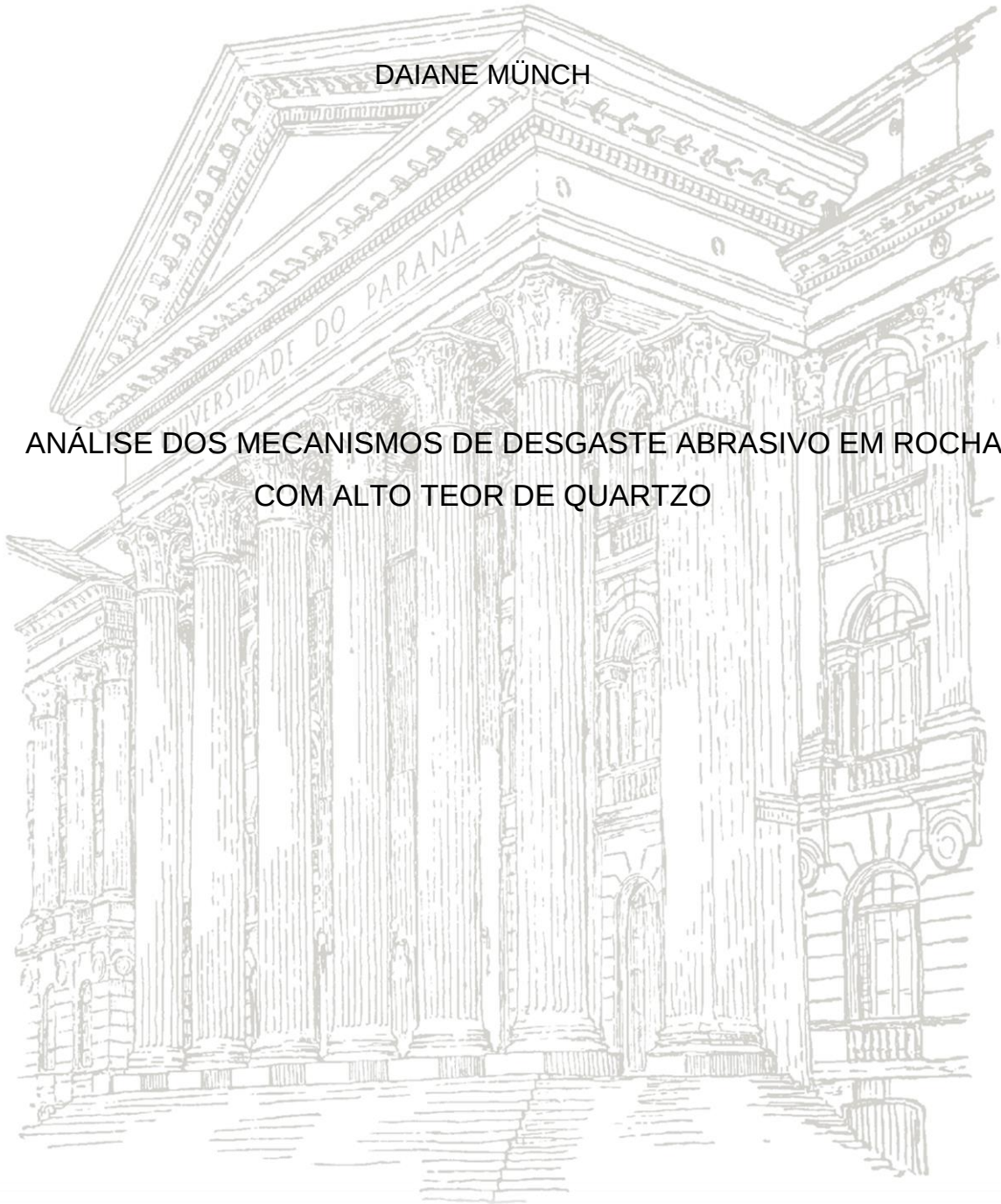


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

DAIANE MUNCH

ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO EM ROCHAS
COM ALTO TEOR DE QUARTZO



CURITIBA

2017

DAIANE MÜNCH

ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO EM ROCHAS
COM ALTO TEOR DE QUARTZO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Lagoeiro

Coorientadora: Dra. Isabella Françoso Rebutini
Figueira

CURITIBA

2017

Aos meus pais e minhas irmãs.

AGRADECIMENTOS

À geóloga Gabriela Reis Piazzetta, por todo o auxílio e contribuição no desenvolvimento deste trabalho, pelo constante apoio, entusiasmo e incentivo dedicados ao trabalho.

Ao Prof. Dr. Leonardo Lagoeiro pela orientação e oportunidade, agradeço toda a contribuição e incentivo no trabalho. À Dra. Isabella Françoso Rebutini Figueira pela coorientação e apoio durante o trabalho.

À Petrobras e aos Institutos Lactec pelo apoio financeiro e de equipamentos disponibilizados, os quais foram essenciais para a realização do trabalho. Aos laboratórios: Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) pela disponibilização de infraestrutura para o estágio também pela possibilidade de análise nos equipamentos de microscopia; ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) pela utilização do MEV e do software Alicona; ao Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) pela realização de ensaio de riscamento; E ao Laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR) pela confecção das secções delgadas.

Ao Bruno Ribeiro, Bruna Gomes, Msc. Deonir Augustini e Dr. Ane Rovani por todo o auxílio na preparação e realização das análises de MEV e de riscamento.

A todos os meus colegas de turma e principalmente à Paula, Luiza, Laisa, Andreína e Sérgio, pelas discussões e companheirismo.

À minha família pela compreensão da minha ausência em diversos momentos especiais neste último ano, assim como pelo carinho e suporte.

RESUMO

Em projetos de escavação em rocha, a determinação de parâmetros geológico-geotécnicos é essencial na estimativa do consumo das ferramentas. A abrasividade é um índice que influencia diretamente nas previsões de custos e prazos na execução do projeto, pois resulta da interação entre as ferramentas de perfuração e a rocha, gerando o desgaste do metal. A abrasividade é um parâmetro que é dependente das propriedades estruturais, texturais e físico-mecânicas das rochas. Assim, a compreensão dos mecanismos de desgaste procede de propriedades básicas da rocha, como aspectos composicionais, texturais e também mecânicos de resposta à deformação. Esse desgaste pode ser determinado a partir de ensaios laboratoriais, os quais utilizam ferramentas de corte simplificadas que simulam as condições de interação entre o metal e a rocha. Com o objetivo de entender os diferentes mecanismos de desgaste, foram realizados dois ensaios de riscamento seguindo a norma do teste de abrasividade Cerchar. O ensaio Cerchar foi realizado com a aplicação de uma carga constante (70N) sob a ponteira, e o segundo teste realizado a partir da aplicação de uma carga variável (0-70N). Para o estudo, foram analisadas as respostas de deformação em rochas com alto conteúdo de quartzo classificadas como arenito, quartzo grauvaca, grauvaca e quartzito. Os tipos de rocha mostraram características microestruturais e de deformação mecânica significativamente distintas a depender do parâmetro analisado. No geral as rochas sedimentares mostraram boa correlação entre o índice de abrasividade Cerchar (CAI) e o teor de quartzo equivalente (EQC), assim como com relação à resposta da aplicação de uma carga transicional e com o volume desgastado. Já o quartzito não mostra relação entre CAI e EQC, mas exibe conformidade com relação à resposta de deformação do risco e na aplicação da carga variável.

Palavras chave: Abrasão, desgaste, rochas, perfuração.

ABSTRACT

In rock excavation projects, it is essential to determine the geological-geotechnical parameters to evaluate tool consumption. Abrasive wear is the result of the interaction between drilling tools and rock, which directly influence costs predictions and deadlines during the execution of the project. Abrasiveness is a parameter dependent on structural, textural and physic-mechanical properties of rocks. It is necessary to understand how the wear mechanisms are linked with the responses of composition, texture and mechanical deformation properties. The wear can be determined from laboratory tests, which use simplified cutting tools to simulate conditions of interaction between the metal and rock. In order to understand the different wear mechanisms, two scratch tests were performed following a standard of Cerchar abrasiveness test. The first test was performed with a constant load (70N) under the steel pin, and the second test was performed by the use of a variable load (0-70N). For this study, it was assessed the deformation responses in rocks with high quartz content, classified as sandstone, quartz wacke, wacke and quartzite. These rock types, depending on the rock type and proprieties, showed different microstructural and mechanical deformation characteristics. The sedimentary rocks showed a good correlation between the Cerchar abrasive index (CAI) and the equivalent quartz content (EQC), as well as with respect to the response of the application of a transitional load and with the wear volume. The quartzite did not show a correlation between CAI and EQC, only exhibited conformity to scratch response and to the application of a transitional load with wear mechanism.

Keywords: Abrasion, wear, rocks, drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação dos elementos que compõem um sistema tribológico.....	12
Figura 2: Parâmetros de amplitude na caracterização da rugosidade.....	13
Figura 2: Equipamento Cerchar do modelo adaptado de West (1989).....	16
Figura 3: Caracterização do teste de riscamento.	17
Figura 4: Amostras selecionadas para o trabalho	20
Figura 5: Fluxograma esquemático das análises realizadas e respectivos produtos. ...	21
Figura 6: Amostra de arenito após embutimento e corte.....	21
Figura 7: Microscópio de luz transmitida da marca Axio Scope Zeiss	22
Figura 8: Equipamentos do ensaio Cerchar:	23
Figura 9: Sistema do teste do micro tribômetro de modelo UMT da Buker.	24
Figura 10: Exemplos de produtos da análise no software MeX Alicona na amostra de grauvaca.....	25
Figura 11: Equipamento MEV tipo FEG (Field Emission Gun) modelo Mira3 LM da marca Tescan situado no LAME/LACTEC.....	25
Figure 1: Macro-images of selected samples for this work.....	29
Figure 2: A- Martensitic matrix with steel carbide microstructure in 400X (Retrieved from test report Spectro Scan); B- Surface roughness of steel.....	31
Figure 3: Petrographic images of samples	32
Figure 4: Grain size distribution of rock samples by SEM-EBSD analysis.....	33
Figure 5: RGB maps from Euler angles and grain boundaries	34
Figure 6: Burnishing scratch response for quartzite at constant load (70N).	36
Figure 7: Transition from plastic deformation to out-of-track cracking in sandstone at 70N.....	36
Figure 8: Develop an extensive out-of-track cracking.....	37
Figure 9: The quartz wacke sample shows a first behavior of friction load at an increasing normal load.	38
Figure 10: The sandstone sample and their respective behavior of friction load at an increasing normal.	39
Figure 11: The third behavior of friction load an increasing normal load at wacke sample.....	39
Figure 12: Graphic of wear volume under two conditions of load.	40

LISTA DE TABELAS

Table 1: Summary of a mineralogical and chemical composition of rocks and steel pin respectively.....	28
Table 2: The microstructure of samples and steel pin.	31
Table 3: Summary of scratches tests results from constant load (70N) and transition load (0-70N).....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

Au – Ouro

EBSD – Electron Backscatter Diffraction

CAI – Cerchar Abrasiveness Index

CERCHAR – Centre d'Études et Recherches des Charbonnages de France

CME – Centro de Microscopia Eletrônica

EQC – Equivalent Quartz Content

GCTS – Geotechnical Consulting & Testing Systems

HRC – Hardness Rockwell c-scale

IHI – Indentation hardness Index

ISRM – International Society for Rock Mechanics

LAME – Laboratório de Análise de Materiais e Estruturas

LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas

LASC – Laboratório de Superfícies e Contato

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

mm - Milímetros

mm³ - Milímetros cúbicos

N – Newton

nm - Nanômetros

SCRM – Subcomission on the Systematics of Metamorphic Rocks

SE – Secondary Electron

SEM – Scanning Electron Microscope

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

wt% - Mass fraction

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. JUSTIFICATIVA	11
1.2. OBJETIVOS	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 MICRODUREZA	14
2.2 TEOR EQUIVALENTE DE QUARTZO (EQC).....	15
2.3 ENSAIOS DE RISCAMENTO	15
2.3.1 ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR	15
2.3.2 ENSAIO DE RISCAMENTO – <i>Scratch hardness test</i>	17
2.4 MEV SE E EBSD	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	21
3.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	22
3.4 ENSAIOS DE RISCAMENTO	22
3.4.1 ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR	22
3.4.2 ENSAIO DE RISCAMENTO	23
3.5 MEV SE E EBSD	24
4. RESULTADOS	26
1. INTRODUCTION.....	27
2. MATERIALS AND METHODS	28
2.1 STEEL AND ROCK TYPES	28
2.2 MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION.....	29
2.3 THE WEAR EXPERIMENTS.....	30
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	31
3.1 MICROSTRUCTURE OF STEEL AND ROCKS.....	31
3.2 SCRATCH RESPONSE	35

3.3 ABRASIVE TEST CORRELATION	37
3.4 COMPARISON OF WEAR VOLUME	40
4. CONCLUSIONS.....	40
ACKNOWLEDGEMENTS	41
REFERENCES.....	42
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	43
REFERÊNCIAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

Em projetos de escavação e perfuração em rocha constata-se uma interação entre a rocha e o metal, para a qual é gerada a desintegração da rocha e consequentemente o consumo do metal (Plinninger et al. 2002, Ribeiro 2010). Esse tipo de desgaste é definido como abrasividade, que é dependente das propriedades estruturais, texturais e físico-mecânicas das rochas.

A abrasividade é o parâmetro descrito como efeito abrasivo de uma rocha em uma superfície de metal produzindo seu desgaste, assim, é uma propriedade que influencia na vida útil e eficiência das ferramentas de corte (Thuro & Plinninger 1998, Ribeiro et al. 2013). O estudo dos parâmetros de abrasividade das rochas é importante em projetos geotécnicos que envolvem escavação mecanizada, devido aos problemas técnico-econômicos condizentes ao excessivo desgaste das ferramentas de corte durante as obras, resultando em baixa produção, atrasos na obra e até a elevada perda financeira.

De todas as adversidades que ocorrem na indústria da escavação, 50% delas estão relacionadas ao desgaste abrasivo, sendo que na fase de projeto costuma-se prever 25% de perda de tempo e dinheiro durante a perfuração, enquanto que na etapa de escavação costuma-se gastar 35% (Thuro 1997, Stachowiak et al. 2013, Petrica et al. 2013). Propriedades como, composição, fragilidade e porosidade do maciço têm grande impacto na caracterização do desgaste, mas também os processos que envolvem perfuração, transporte e manuseio de rocha resultam em desgaste do equipamento (Beste et al. 2004).

A abrasividade é o parâmetro que melhor se correlaciona com o desgaste, e pode ser determinada a partir de ensaios laboratoriais, os quais utilizam ferramentas de corte simplificadas que simulam as condições de interação entre o metal e a rocha. No trabalho foram realizados ensaios de riscamento, que abrange o ensaio de abrasividade Cerchar, o qual analisa o desgaste considerando o potencial abrasivo da rocha a partir da aplicação de uma força normal constante, e outro teste de risco, com princípio semelhante, que mostra a energia necessária para que ocorra desgaste na amostra.

O problema na avaliação dos parâmetros é a necessidade de reduzir um sistema de propriedades rochosas, como composição, dureza, para um único índice quantitativo na determinação da abrasividade. As rochas compõem uma classe de material heterogênea, com características que dependem além da sua composição, do tamanho dos cristais, da ligação entre eles, do grau de alteração e orientação cristalográfica.

Neste estudo, foi realizada a análise do desgaste que ocorre entre a rocha e o metal, com ênfase na deformação mecânica, utilizando um conjunto de amostras constituídas, de forma majoritária por quartzo, o qual corresponde a um potencial agente abrasivo devido a dureza semelhante ou mesmo superior ao metal utilizado em obras de escavação. A utilização de um parâmetro composicional praticamente invariável facilita a definição das demais propriedades atuantes no desgaste das rochas.

Este trabalho está inserido no projeto P&D “Desenvolvimento de novas alternativas de ensaios de abrasividade em rochas” dos Institutos Lactec em parceria com a Petrobras, o qual tem como objetivo a aplicação dos estudos de abrasividade em obras de perfurações em rocha, com destaque para perfurações horizontais em rodovias e drenagens. O conjunto de amostras e dados é proveniente deste projeto, assim como os respectivos ensaios e análises realizadas. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) está organizado na forma tradicional, porém, o item resultados é apresentado em forma de artigo científico, intitulado: “Analysis of abrasive wear mechanisms in high-quartz rocks into scratch tests”.

1.1. JUSTIFICATIVA

O trabalho justifica-se pela necessidade do conhecimento e quantificação da influência de parâmetros, além da composição mineralógica, que atuam no desgaste abrasivo. Características texturais e estruturais, além do tamanho dos cristais, a orientação cristalográfica, aliadas às propriedades de deformação mecânica, servem como suporte na previsão do desgaste. Na deformação mecânica, o intuito é observar como a rugosidade da amostra e as características geométricas dos ensaios de riscamento, profundidade e o volume desgastado a partir destes ensaios, relacionam-se ao litotipo e, conseqüentemente, à resistência na deformação.

1.2. OBJETIVOS

O trabalho tem por objetivo geral o estudo dos parâmetros de abrasividade de rochas através de ensaios laboratoriais de riscamento e a sua correlação com as propriedades que influenciam na deformação mecânica das amostras com conteúdo elevado em quartzo.

Os objetivos específicos são:

- A quantificação da abrasividade das rochas e análise da variação do índice entre litotipos com composição semelhante;
- Quantificar a composição, porcentagem e tamanho dos cristais;
- Determinar a orientação cristalográfica das amostras;
- Determinar a carga de transição (crítica) e o coeficiente de atrito;
- Determinar o volume desgastado da rocha correlacionando com a geometria dos sulcos obtidos pelos ensaios de riscamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desgaste abrasivo é um processo que ocorre entre superfícies abrasivas e superfícies de materiais sólidos e pode ser classificado em: 1- desgaste abrasivo entre dois corpos e 2- desgaste abrasivo entre três corpos de acordo com o tipo de contato que existe entre o material e o abrasivo. Essa interação entre superfícies ou objetos sólidos corresponde a um sistema tribológico (Figura 1), associado então ao fenômeno do desgaste (Trezona et al. 1999, Badisch et al. 2010, Petrica et al. 2013).

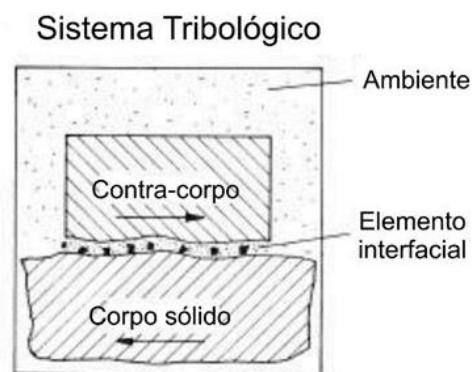


Figura 1: Representação dos elementos que compõem um sistema tribológico. Modificado de Zum Gahr (1987).

A Tribologia é a ciência e tecnologia que estuda superfícies em movimento relativo e que interagem entre si, como a fricção, a lubrificação, o desgaste, o atrito e a erosão (ASTM – G40 2015). A mesma estuda os efeitos de interação entre essas superfícies em movimento relativo para prever e explicar o desgaste destes sistemas (Radi et al. 2007).

Para que se caracterizem as superfícies que estão em contato dentro do sistema tribológico é necessário realizar a especificação dos parâmetros de rugosidade da amostra. A avaliação da rugosidade de superfícies é importante para a medição de características com variações verticais na superfície (Gadelmawla et al. 2002). Os parâmetros podem ser calculados nas formas bidimensionais por meio de análise de perfis (linhas), e tridimensionais, a partir da área de uma superfície.

Como parâmetros de amplitude importantes para a caracterização da rugosidade de rochas têm-se a rugosidade média da raiz quadrada (S_q), assimetria (Skewness - S_{sk}) e a curtose (Kurtosis - S_{ku}). A rugosidade média representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície descrevendo a rugosidade da superfície por métodos estatísticos. A assimetria diz respeito à distribuição de picos e vales da rugosidade, sendo que quando a distribuição é simétrica a assimetria é zero, quando predominam vales a assimetria é positiva e quando predominam picos a assimetria é negativa. A curtose pode ser representada por uma distribuição *leptokurtic* ($S_{ku} > 3$), na qual predominam os picos em relação aos vales, e *platykurtic* ($S_{ku} < 3$) com o predomínio vale em relação aos picos (Gadelmawla et al. 2002).

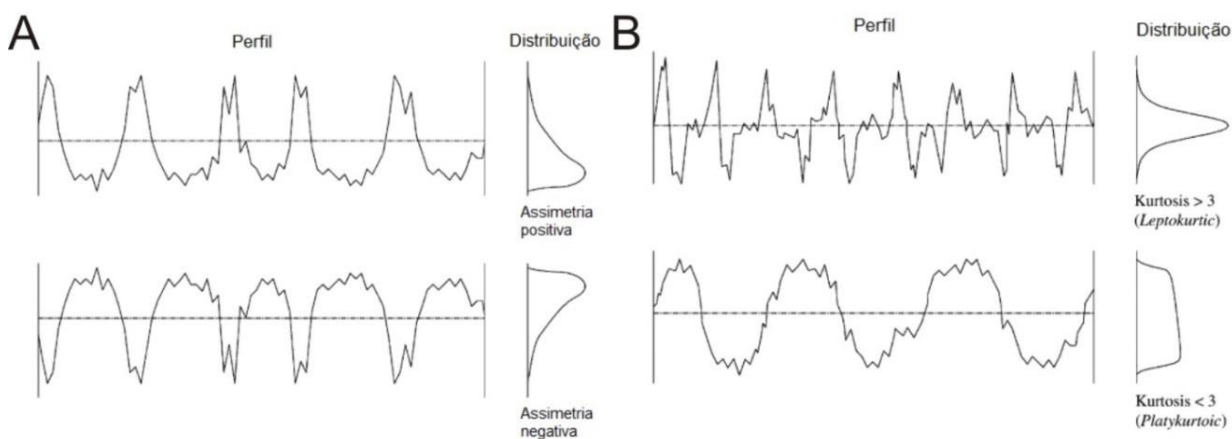


Figura 2: Parâmetros de amplitude na caracterização da rugosidade: A- Distribuição da assimetria; B- Distribuição da curtose.

Para as características estruturais e físico-mecânicas, diversos autores consideram como propriedades básicas na caracterização da abrasividade: o tamanho e a forma do grão, a dureza dos constituintes minerais, a porosidade, a força de ligação entre os grãos, o teor de quartzo, a isotropia e o teor de umidade da rocha (Beste et al. 2004, Oparin & Tanaino 2015, Woldman et al. 2012, Petrica et al. 2013). Já o modo em que a composição afeta o desgaste é ainda pouco compreendido (Petrica et al. 2013).

Segundo Moradizadeh (2016) a abrasividade das rochas é função do conteúdo mineral abrasivo, sendo que a quantidade de quartzo tem o efeito dominante. Outros autores (West 1989, Bieniawski et al. 2009, Thuro & Plinninger 2003) também defendem que a mineralogia, principalmente o quartzo, é responsável pelo principal desgaste de ferramentas. Porém Kasling (2000) e Monteiro & Rocha (2015) ressaltam que a mineralogia abrasiva não é o fator preponderante para a definição do parâmetro de desgaste.

Parâmetros geotécnicos como a determinação da dureza e do conteúdo de quartzo (*Equivalent Quartz Content – EQC*) auxiliam na caracterização da influência mineralógica no desgaste em um sistema de perfuração.

2.1 MICRODUREZA

A dureza é uma propriedade fundamental do material, onde os ensaios laboratoriais buscam a caracterização mecânica da superfície, por meio da indicação de um valor representativo da resistência da superfície à deformação. Os ensaios de microdureza (Vickers e Knoop) são determinados pela norma da American Society for Testing and Materials (ASTM – E384 2011). Os testes utilizam uma ponteira de diamante com geometria de uma base piramidal alongada, a qual a partir da diagonal maior, área e carga aplicada, determina a dureza do material (Chandler 1999). A diferença entre os indentadores é dado pela geometria da base, sendo que o indentador Vickers tem base piramidal rômica enquanto que o Knoop tem base piramidal alongada (ASTM – E384 2011).

A Sociedade Internacional da Mecânica das Rochas (ISRM) sugere um teste de indentação baseado em uma ponta cônica (60°) com 5 mm de raio, subesférica, a qual produz o índice de indentação da dureza (IHI) (Beste & Jacobson 2003). A

dureza é obtida dividindo a carga máxima pela profundidade máxima de penetração do indentador.

2.2 TEOR EQUIVALENTE DE QUARTZO (EQC)

O método EQC compreende a normatização da dureza de todos os minerais que compõem a rocha em referência ao valor de dureza do quartzo na escala de Rosiwal (Thuro 1997). A importância da utilização do EQC na previsão do consumo de ferramentas decorre, segundo Thuro (1997), do desgaste abrasivo depender de um conteúdo mineralógico com dureza superior à dureza do aço. Para isso, a quantificação modal em porcentagem de cada mineral é multiplicada pela dureza Rosiwal, segundo a equação 1:

$$(1): EQC = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_f$$

Onde:

EQC= Teor equivalente de quartzo

Σ = Somatório

A_i = Porcentagem mineral

R_f = Dureza Rosiwal

n = Número de minerais

2.3 ENSAIOS DE RISCAMENTO

O desgaste abrasivo pode ser determinado por métodos laboratoriais que simulam condições de perfuração a partir da utilização de ferramentas de corte simplificadas. Desse modo podem ser realizados ensaios de riscamento, os quais consistem na produção de um risco na superfície de uma amostra de rocha através da movimentação de uma ponteira de aço, tornando possível a quantificação do desgaste. O ensaio de abrasividade Cerchar analisa o desgaste da ferramenta a partir do potencial abrasivo da rocha, e o teste de riscamento mostra a energia necessária para ocorra o desgaste da amostra.

2.3.1 ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR

Dentre os métodos mecânicos de medição da abrasividade em laboratório, pode-se citar o ensaio de abrasividade Cerchar, o qual tem sido internacionalmente aceito como indicador confiável desse parâmetro (West 1989, Rostami et al. 2014,

Alber et al. 2014). O teste de abrasividade Cerchar foi introduzido pelo *Centre d'Etudes et Recherches des Charbonages* (CERCHAR) para determinar a abrasividade das rochas devido à demanda das minas de carvão na década de 70 na França (CERCHAR 1986, West 1989).

O ensaio é parametrizado pela norma ASTM – D7625 (2010) e o procedimento consiste em uma ponteira de aço com geometria e dureza definidas e ponta cônica afiada em 90°, a qual risca a superfície da amostra de rocha por uma distância de 10 mm com a aplicação de uma força normal constante de 70N. O desgaste abrasivo é quantificado pelo índice de abrasividade Cerchar (CAI), o qual é calculado a partir da medida do diâmetro resultante do desgaste (d) da ponteira, multiplicado por 10, por um fator de correção c (c= 1 mm) (ASTM – D7625 2010).

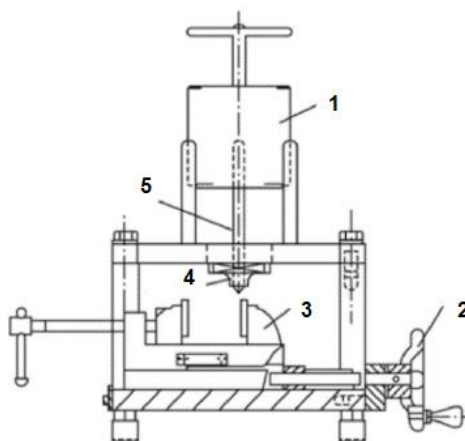


Figura 3: Equipamento Cerchar do modelo adaptado de West (1989): 1- Peso (70N); 2- Manivela; 3- Suporte de amostra; 4- Ponteira de aço; 5- Suporte da ponteira. Adaptado de ASTM - D7625 (2010).

De acordo com a norma (ASTM D7625 2010), o cálculo do índice CAI depende da superfície da amostra, sendo que a equação 2 é utilizada quando o teste é realizado na superfície fresca da rocha, e quando a superfície é serrada deve ser realizada a normatização segundo a equação 3.

$$(2): CAI = 10 \frac{d}{c}$$

$$(3): CAI_s = 0.99 CAI + 0.48$$

Sendo que:

d = diâmetro do desgaste
c= 1 mm

Segundo Plinninger et al. (2003), 85% do valor de CAI já é obtido nos primeiros 2 mm do teste, sendo que apenas 15% de mudança do índice é alcançada nos demais 8 mm. Após a medida do desgaste da ponteira de aço, considerando dureza de 55 HRC, a partir do valor de CAI a rocha pode ser classificada em: muito pouco abrasiva (CAI entre 0.30–0.50); pouco abrasiva (CAI entre 0.50–1.00); abrasividade média (CAI entre 1.00–2.00); muito abrasiva (CAI entre 2.00–4.00); extremamente abrasiva (CAI entre 4.00–6.00); a quartzíticas (CAI entre 6.00–7.00) (Stanford & Hagan 2009, ASTM D7625–10 2010, Rostami et al. 2014, Albert et al. 2014).

2.3.2 ENSAIO DE RISCAMENTO – *Scratch hardness test*

Este ensaio é normatizado pela ASTM G171-03 (2009) e consiste na produção de um risco através da movimentação de uma ponteira, com geometria e trajeto específicos, classificado a partir de uma força e velocidade (Figura 4). A largura do risco produzido é medida e utilizada no cálculo do desgaste.

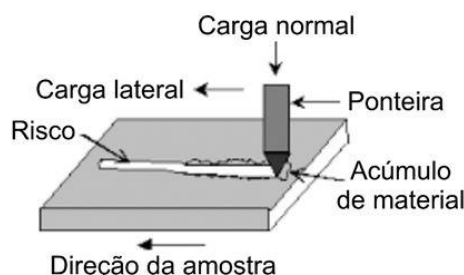


Figura 4: Caracterização do teste de riscamento. Traduzido de Kuhn & Medlin (2000).

O ensaio caracteriza a resistência de superfícies sólidas em uma deformação permanente, sob a ação de uma ponteira. É considerado um método complementar na caracterização de testes de dureza, utilizada para a análise de processos abrasivos entre dois corpos, representando duas superfícies em contato (ASTM G171-03 2009).

O teste pode ser afetado por diversos fatores, como a forma e dimensão da ponteira, a força normal aplicada, uniformidade da superfície e velocidade do risco. Realiza-se o procedimento a partir de baixas velocidades de deslocamento, devido à resistência do material à abrasão por um ponto ser sensível à taxa de deformação do processo, além da velocidade lenta minimizar aquecimentos causados por fricção (ASTM G171-03 2009).

No trabalho, o procedimento do riscamento foi realizado conforme os parâmetros utilizados no ensaio de abrasividade Cerchar, onde se utilizou a mesma ponteira (Aço AISI A2), a qual risca a superfície da amostra por 10 mm com uma velocidade de 0,17 mm/s. O diferencial é a aplicação de uma força normal variável, iniciando-se com carga zero e atingindo aproximadamente 70N no final do procedimento. A utilização das mesmas recomendações, porém com força crescente, deve-se à caracterização da resposta da rocha para diferentes intervalos de carga aplicada, sendo possível também a identificação de uma carga crítica ou transicional, a qual representa mudança no comportamento da rocha (Beste et al. 2004).

2.4 MEV SE E EBSD

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um instrumento que facilita a análise de características microestruturais dos mais diversos objetos (Nagatani et al. 1987, Dedavid et al. 2007). O equipamento utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons, o que permite a melhora de resolução, na ordem de 2 a 5 nanômetros a até resoluções menores que 1nm, proporcionando a análise em pequenos aumentos com grande profundidade de foco além da aparência tridimensional das amostras (Nagatani et al. 1987, Dedavid et al. 2007).

O princípio de funcionamento do microscópio parte da utilização de um feixe de elétrons, o qual interage com a superfície da amostra formando um sinal de imagem que é recolhido pelo detector para permitir a observação (Dedavid et al. 2007). Muitos instrumentos utilizam o filamento de tungstênio como fonte de elétrons, onde o feixe é acelerado pela alta tensão obtida entre o filamento e o ânodo (tensões entre 1 e 50 kV) (Dedavid et al. 2007). Assim o feixe interagindo com a amostra produz elétrons e fótons que são detectados e convertidos em sinal de vídeo (Dedavid et al. 2007).

A imagem captada pode apresentar diferentes características a depender dos sinais emitidos. No trabalho foram obtidas imagens a partir de sinais emitidos por elétrons secundários (*secondary electron* - SE) e pela difração de elétrons retroespalhados (*electron backscatter diffraction* - EBSD), os quais operam em uma faixa de energia maior que os elétrons secundários (Dedavid et al. 2007).

Os elétrons secundários (SE) resultam da interação de elétrons em baixa energia, formando imagens de alta resolução, sendo que o contraste da imagem é fornecido pelo relevo da amostra (Dedavid et al. 2007). O software MeX Alicona, utilizado no trabalho, a partir de imagens obtidas por SE forma imagens 3D. Isso é explicado devido a uma inclinação eucêntrica, onde a intersecção do feixe de elétrons com a amostra define um centro de inclinação, produzindo uma segunda imagem sob outro ponto de vista, gerando assim uma imagem estereoscópica (MeX Alicona). A partir dessa projeção, as imagens SE que previamente proporcionavam medidas bidimensionais, agora com a formação do 3D da amostra torna-se possível a realização de medições de perfil, rugosidade, área e volume da amostra (MeX Alicona).

Já a técnica de EBSD consiste em um feixe de elétrons de alta energia que incide na superfície da amostra, inclinada em 70° com a horizontal, sendo que essa interação gera uma população de elétrons espalhados com inúmeras trajetórias (Ferreira 2016). Esse feixe divergente de elétrons espalha-se coerentemente nos planos cristalinos sofrendo o fenômeno da interferência, a difração que obedece a lei de Bragg (refração inferior a 0.5°) (Morales et al. 2007).

Os padrões de difração são identificados através das larguras e do ângulo entre as linhas de kikuchi, e a partir da comparação com parâmetros dos sistemas cristalinos, pode se determinar a fase e a orientação cristalográfica (Mingard et al. 2009). A resolução e qualidade dos mapas e análises fornecidos pelo EBSD dependem do tamanho do passo (*step size*) escolhido, o qual está relacionado principalmente do tamanho mínimo do grão de interesse, mas também dependem do tempo de aquisição (Mingard et al. 2009).

Os dados obtidos a partir da análise podem ser representados em mapas e gráficos. Segundo Ferreira (2016) pode ser gerado: mapas de fases, os quais representam a mineralogia quantificada, com borda dos grãos avaliados; histogramas de dados microestruturais como perímetro, área, razão axial e orientação da forma dos cristais; figuras de polo e polo inverso, as quais representam as orientações cristalográficas principais, tanto pelo sistema de coordenadas da amostra para aquele, e no sistema de coordenadas do cristal para este; mapas de orientação cristalográfica em RGB a partir dos ângulos de Euler ou

da figura de polo inversa; histogramas e mapas de *misorientation*, o qual se refere ao processo de paralelismo do sistema de coordenadas de um cristal com o outro.

Assim, a partir da caracterização das propriedades microestruturais e cristalográficas fornecidas pela técnica, o EBSD torna-se uma ferramenta importante em projetos de perfurações, os quais frequentemente encontram graus variáveis de resistência mecânica e físicas a depender dos arranjos geométrico e cristalográfico dos minerais que possuem dureza e resistência mecânica variável conforme a direção cristalográfica, modificando assim, seu comportamento frente às tensões.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisadas quatro amostras de rocha, com composição quartzosa, classificadas (Tuker 2003, SCRM) em três variedades de rochas sedimentares e uma metamórfica (Figura 5). As amostras foram cortadas e embutidas em resina epóxi a fim de facilitar análises posteriores em microscopia eletrônica, além da confecção de secção delgada para a caracterização petrográfica. Foram executadas quatro análises (Figura 6), para as quais seus produtos corroboraram na caracterização das propriedades do desgaste.

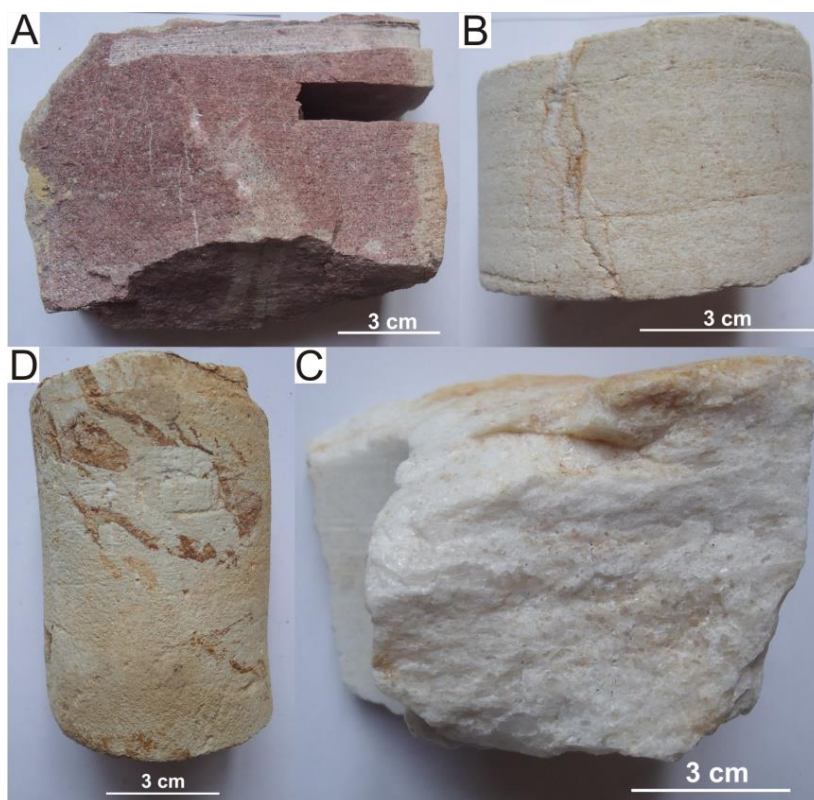


Figura 5: Amostras selecionadas para o trabalho: A- Arenito; B- Quartzito; C- Grauvaca; D- Quartzito.

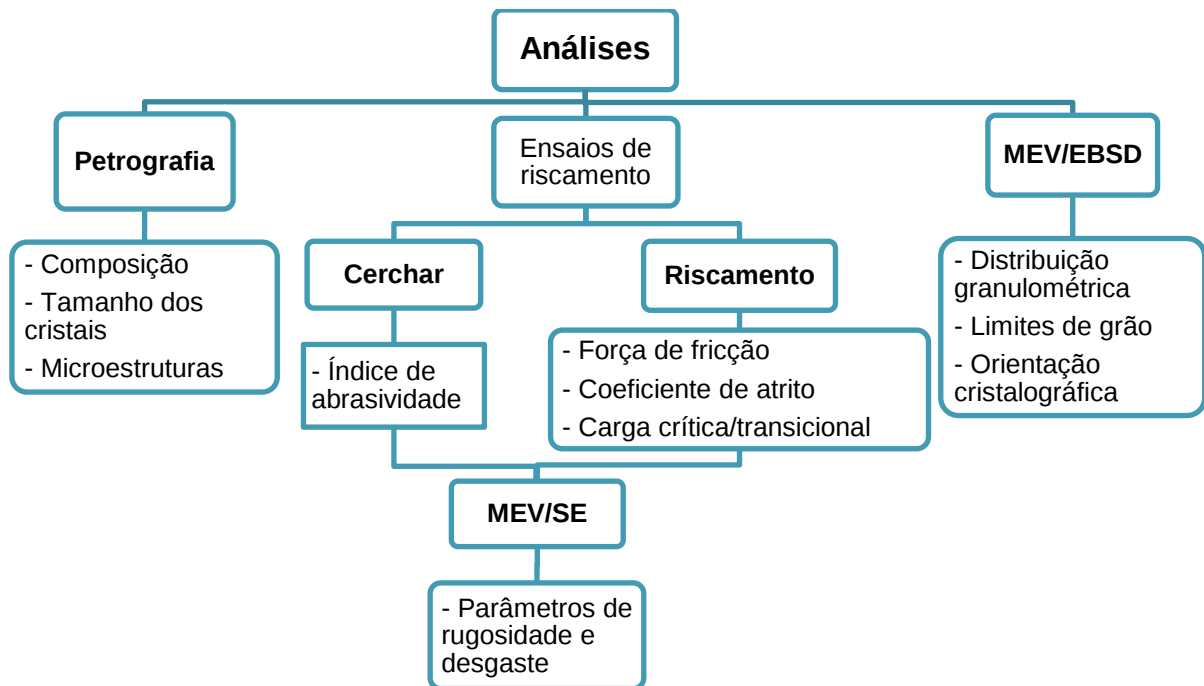


Figura 6: Fluxograma esquemático das análises realizadas e os respectivos produtos.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras, para as análises de desgaste abrasivo e microscopia eletrônica, foram inicialmente preparadas na forma de pastilhas, serradas a partir das amostras, as quais secaram em estufa com temperatura de 70°C por no mínimo 12 horas. Posteriormente, foram embutidas com resina epóxi em porta amostra de 30 mm de diâmetro. Para que a superfície fosse exposta, após o embutimento, a amostra foi cortada em uma cortadeira ISOMET 1000 da Buehler, tendo como resultado final embutimentos de tamanho 2 x 2 cm com área de amostra exposta, como mostra a Figura 7.

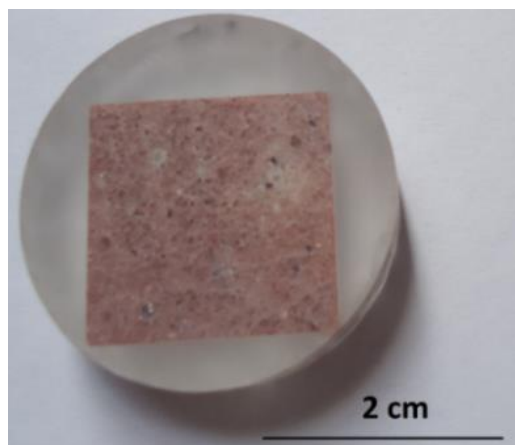


Figura 7: Amostra de arenito após embutimento e corte.

3.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Para o ensaio petrográfico, as seções delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR). A análise foi realizada a partir do microscópio de luz transmitida Axio Scope da Zeiss, com câmera e software Zen 2.3 lite de aquisição de imagem integrado (Figura 8). Foi realizada a caracterização microscópica, que permitiu a identificação da composição mineralógica com proporção modal; o tamanho dos cristais; a forma de contato entre os cristais; fraturas e microfissuras; além da textura e estrutura da rocha.



Figura 8: Microscópio de luz transmitida da marca Axio Scope Zeiss e software de aquisição de imagem Zen 2.3 lite.

3.4 ENSAIOS DE RISCAMENTO

Foram realizados dois ensaios laboratoriais para a caracterização do desgaste, um deles é o ensaio de abrasividade Cerchar, o qual utiliza a aplicação de uma força constante (70N) para a produção do risco, e o ensaio de riscamento, a partir do qual foi possível realizar um teste com força crescente (0 – 70N) durante o ensaio.

3.4.1 ENSAIO DE ABRASIVIDADE CERCHAR

O equipamento utilizado para o ensaio é do modelo RAA-100 da empresa *Geotechnical Consulting & Testing System* (GCTS) (Figura 9- A). A análise é realizada por meio de uma ponteira de aço (Figura 9- B), a qual é afiada com 90°, que risca paralelamente a superfície da amostra em uma distância de 10 mm sob uma carga constante de 70N. O desgaste é quantificado a partir da medida do diâmetro da ponteira após o teste, visualizado no microscópio GCTS RAA-AOM (Figura 9- C), o qual a partir do software GCTS Cerchar V3.6 (Figura 9- D) determina o Índice de Abrasividade Cerchar (CAI). A análise foi realizada segundo a norma

ASTM D7625-10 (2010), utilizando os equipamentos que estão situados nas dependências do Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME/LACTEC).

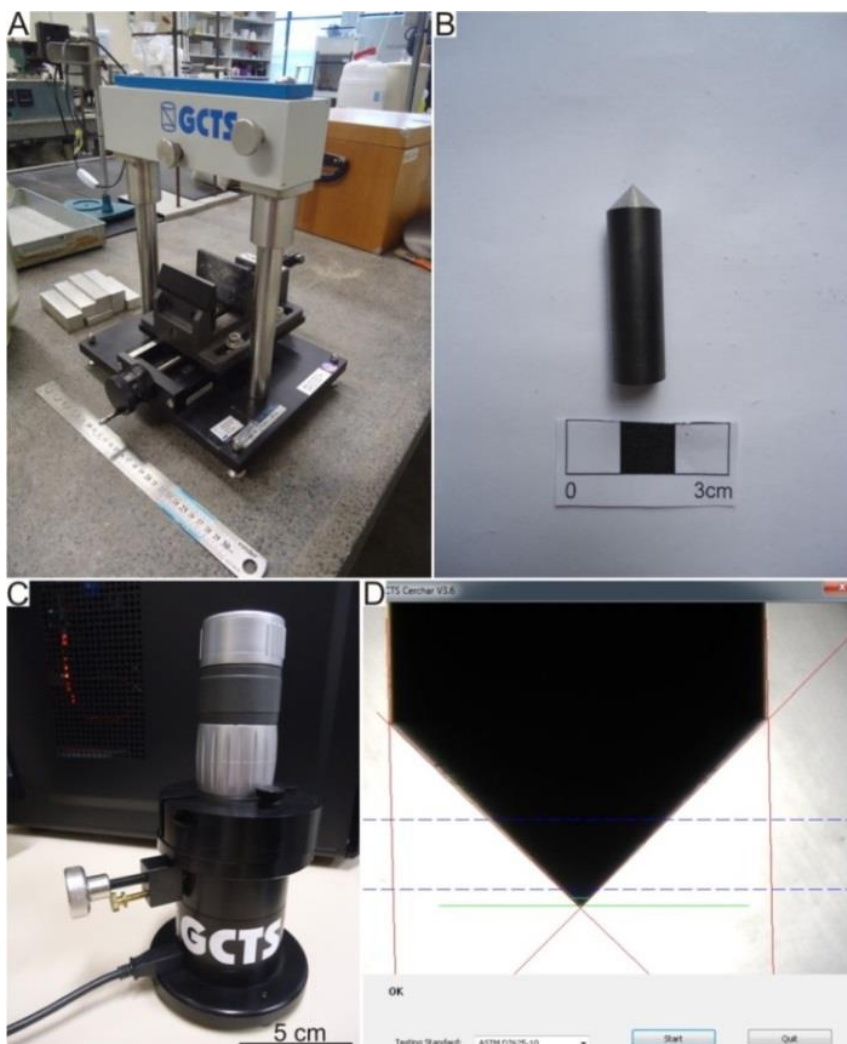


Figura 9: Equipamentos do ensaio Cerchar: A- Equipamento do teste Cerchar do modelo GCTS RAA-AOM com o suporte para a amostra (na base), para a ponteira (no topo) e manivela de movimentação da amostra; B- Ponteira de aço utilizada no teste; C- Microscópio GCTS RAA-AOM com suporte para encaixe da ponteira; D- Ponteira visualizada no microscópio a partir do Software GCTS Cerchar V3.6 normatizado (ASTM D7625-10).

3.4.2 ENSAIO DE RISCAMENTO

O ensaio foi realizado no micro tribômetro de modelo UMT (*Universal Mechanical Tester*) da marca Bruker no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Para que seja possível realizar analogia com o ensaio Cerchar, os parâmetros para este ensaio foram similares aos padrões do Cerchar. Utilizou-se uma configuração com carga variável de 1 a 70N, aplicada a uma distância de 10 mm com velocidade de 0,17 mm/s. A força variável e crescente tem como finalidade a identificação da carga crítica ou

transicional (Beste et al. 2004), que corresponde à força mínima necessária para o desgaste da amostra. Ainda, obtêm-se a força de fricção (F_x), a força aplicada (F_z) e o coeficiente de atrito (COF), que é calculado a partir da razão entre as duas forças.



Figura 10: Sistema do teste do micro tribômetro de modelo UMT da Buker. Retirado de Buker UMT Manual User.

3.5 MEV SE E EBSD

Foram realizadas duas análises a partir do Microscópio Eletrônico de Varredura. Sendo que no Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR (CEM) foram obtidas imagens a partir do detector de elétrons secundários (SE) e no LAME foram obtidas as imagens com o detector de elétrons retroespalhados (EBSD). As imagens de SE foram tratadas no software Mex Alicona 5.1 a fim de se gerar modelos 3D, para auxílio na análise geométrica do sulco produzido nos ensaios de riscamento, e a técnica de EBSD forneceu dados de mapa de fases, granulometria e diagrama de orientação cristalográfica.

No preparo das amostras para MEV-SE, foi realizada a metalização com ouro (Au - 90 nm) da superfície, já com os sulcos produzidos com os ensaios de riscamento. Para a criação do modelo foram produzidas três imagens de MEV-SE com ângulos de 0° (horizontal), 5° e -5° de inclinação e a partir da sobreposição entre elas gerou-se um modelo 3D da imagem do risco (Figura 11- A). A imagem forneceu informações sobre os parâmetros de rugosidade e de resposta do risco. Também foi obtido o volume de rocha desgastado (Figura 11- C e D) a partir de uma superfície de referência, a qual é definida pela altura máxima de pico a vale dentre os três perfis gerados.

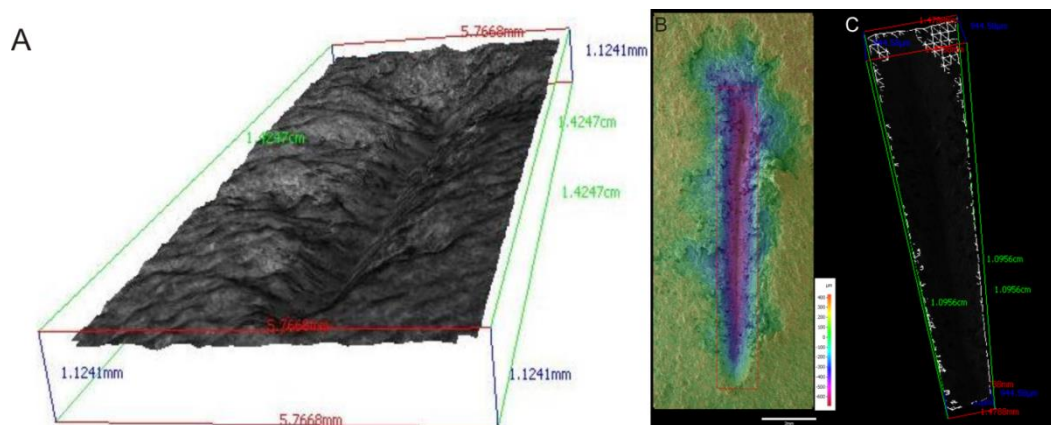


Figura 11: Exemplos de produtos da análise no software MeX Alicona na amostra de grauvaca: A- Modelo 3D gerado a partir da projeção estereográfica das imagens; B- Imagem de risco e a delimitação da área para o volume; C- Volume (em preto) calculado a baixo de uma superfície de referência.

Já no microscópio pertencente ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) as amostras foram analisadas no detector de difração de elétrons retroespalhados (EBSD) para a determinação da composição mineralógica, tamanho dos cristais e orientação cristalográfica da amostra. O modelo de microscópio situado no LAME é do tipo FEG (*Field Emission Gun*) modelo Mira3 LM da marca Tescan (Figura 12). O software de processamento dos dados do MEV/EBSD é o *HKL Channel 5 Project Manager* com as interfaces Tango e Mambo.



Figura 12: Equipamento MEV tipo FEG (Field Emission Gun) modelo Mira3 LM da marca Tescan situado no LAME/LACTEC.

A preparação das amostras decorreu após a realização dos demais ensaios, pois as amostras necessitam estar o mais planas quanto possível, sendo necessário o polimento da superfície por uma série de abrasivos com decrescente granulometria a fim de diminuir deformações e imperfeições (Morales et al. 2007).

Assim as amostras, que já estavam embutidas e com superfície exposta, foram polidas manualmente em placa de vidro com o abrasivo carbeto de silício de granulação de 600 a 1000 μm . Após essa etapa, as amostras foram polidas em pasta de diamante com granulometria decrescente de 9 a até 0,25 μm na politriz MetaServ 250, além de polimento em pasta de alumina de 0,05 μm (Morales et al. 2007).

Para as amostras de quartzito e arenito também foi necessária à realização de polimento na sílica por duas horas. Já para as amostras de quartzo grauvaca e grauvaca foi preciso que o polimento completo fosse feito, em razão da alta friabilidade das amostras. Assim, foi realizado polimento com os abrasivos de 9 até 0,25 μm , com um polimento final em sílica por duas horas novamente. Após a preparação das amostras, as mesmas foram aterradas com uma fita de carbono para que ocorra o fluxo de elétrons na amostra e para que a análise possa ser processada.

4. RESULTADOS

Os resultados foram organizados na forma de artigo científico, o qual será submetido ao periódico *Wear*.

Analysis of abrasive wear mechanisms in high-quartz rocks into scratch tests

ABSTRACT

In rock excavation projects, it is essential to determine the geological-geotechnical parameters to evaluate tool consumption. Abrasive wear is the result of the interaction between drilling tools and rock, which directly influence costs predictions and deadlines during the execution of the project. Abrasiveness is a parameter dependent on structural, textural and physic-mechanical properties of rocks. It is necessary to understand how the wear mechanisms are linked with the responses of composition, texture and mechanical deformation properties. The wear can be determined from laboratory tests, which use simplified cutting tools to simulate conditions of interaction between the metal and rock. In order to understand the different wear mechanisms, two scratch tests were performed following a standard of Cerchar abrasiveness test. The first test was performed with a constant load (70N) under the steel pin, and the second test was performed by the use of a variable load (0-70N). For this study, it was assessed the deformation responses in rocks with high quartz content, classified as sandstone, quartz wacke, wacke and quartzite. These rock types, depending on the rock type and proprieties, showed different

microstructural and mechanical deformation characteristics. The sedimentary rocks showed a good correlation between the Cerchar abrasive index (CAI) and the equivalent quartz content (EQC), as well as with respect to the response of the application of a transitional load and with the wear volume. The quartzite did not show a correlation between CAI and EQC, only exhibited conformity to scratch response and to the application of a transitional load with wear mechanism.

Keywords: Abrasion, wear, rocks, mining.

1. INTRODUCTION

Rock excavation requires drilling and blasting methods that can verify rock and metal interaction between the excavated material and the drill bits. This process develops the rock breakdown and the metal wear (Plinninger et al. 2002). The wear of the bits' metal is mostly described as abrasive and is dependent of structure, texture and physic-mechanical properties of the excavated rock.

Abrasivity is a rock property which influences the lifetime and efficiency of cutting tools (Thuro & Plinninger 1998). The determination of this parameter is essential in projects of drilling and cutting due to the technic-economics problems of excessive wear of tools. In rock drilling, among all the adversities, 50% has relation with abrasive wear. The difference between the projected costs and the real excavation expenses can reach an extra 15% of total project costs (Thuro 1997, Wan et al. 2002, Zhang 2011, Stachowiak et al. 2013, Petrica et al. 2013). The issues can include low excavation rate, tool replacement, schedule delays, and economic loss.

Abrasive wear is a process that causes removal or displacement of material during the relative movement between two surfaces, 2-body condition, or two surfaces and an abrasive, 3-body condition (Buttery & Archard 1971, Trezona et al. 1999, Badisch et al. 2010, Petrica et al. 2013). The amount of removed material is a combination of structural and physical-mechanical properties of the solid bodies in contact. The main rock properties related to abrasion are abrasivity, grain size, hardness, porosity, grain boundary, quartz content, isotropy, strength between grains, and humidity (Beste et al. 2004, Oparin & Tanaino 2015, Woldman et al. 2012, Petrica et al. 2013).

Abrasivity is the best parameter to correlate with wear and can be determined from laboratory tests, which use simplified cutting tools that simulate conditions of interaction between metal and rock. The Cerchar test is a well-known laboratory test

to access rock abrasivity. The test consists of scratching a steel stylus conical pin against the rock surface under a normal load of 70N and for a distance of 10mm. The abrasivity is determined by the wear diameter of the stylus, but much other information can be extracted from scratch tests like Cerchar. The scratch analysis can evaluate the wear mechanism of the rock sample, which is used in the portability between laboratory tests and the real process of rock excavation.

The purpose of this article is to characterize the wear behavior in 2-body conditions with high quartz content samples and observe different responses for a constant load (70N) and an increased normal load (0-70N). Specifically, rock samples and steel was investigated at microscale response to scratching.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 STEEL AND ROCK TYPES

Carbide steel (AISI A2) was used for wear characterization under 2-body abrasive conditions over the scratch tests. The stylus' steel has a C-content of 0.99% with the main alloying elements of Si, Mn, Cr, Mo, and V, with compositions identified by optical emission spectrometry, as represented in Table 1. The steel hardness Rockwell C (HRC) is 55 ± 1 , as it is specified on Cerchar test standard (ASTM D7625-10 2010) and Vicker's hardness to 660 (HV).

Table 1: Summary of a mineralogical and chemical composition of rocks and steel pin respectively.

Sample	Composition (wt%)					
	Quartz	Feldspar	Clay minerals	Others		
Sandstone	90	5	-	5		
Quartz wacke	85	-	10	5		
Wacke	70	-	20	10		
Quartzite	100	-	-	-		
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Steel pin	0.99	0.33	0.62	4.56	0.97	0.11

In this study, four rock types have been investigated; they are classified into three varieties of sedimentary rocks (sandstones varieties) and one metamorphic (quartzite) (Figure 13). The rock samples exhibit quartz as the main component (over 70%), with feldspar and clay minerals representing the subordinate constituents composing cementation and immature texture respectively. The mineralogical

composition of the samples investigated by petrographic characterization is listed in Table 1.

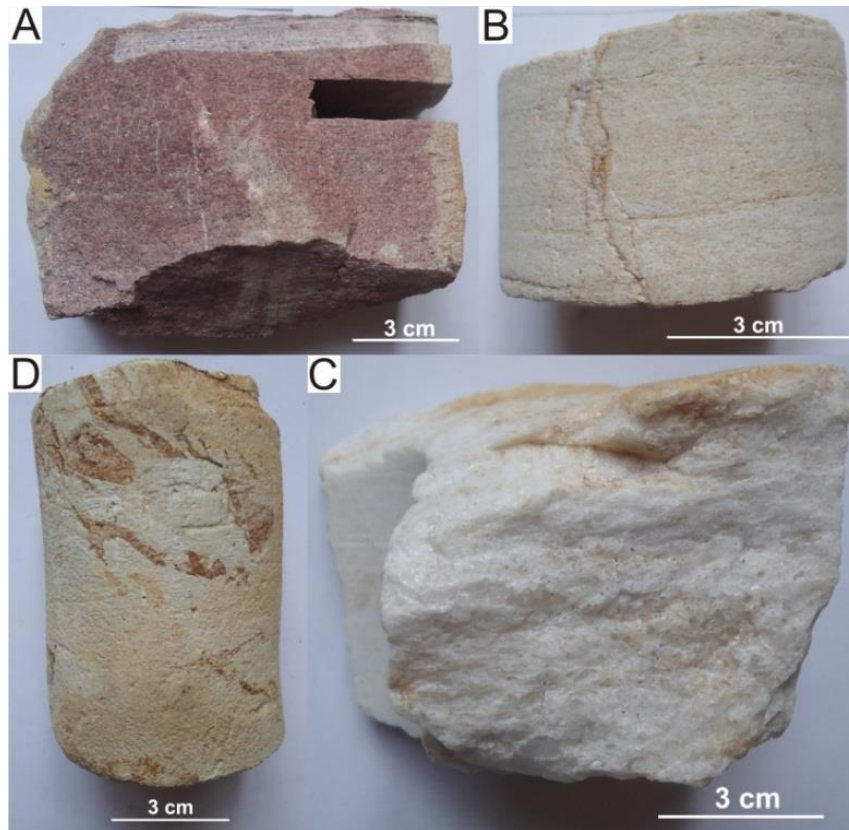


Figure 13: Macro-images of selected samples for this work: A- Sandstone; B- Quartz wacke; C- Wacke; D- Quartzite.

2.2 MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION

The samples for the scratch tests and SEM (scanning electron microscope) analysis were prepared in three steps. First, they were cut by a Buehler ISOMET 1000 saw into tablets of 2 x 2 mm dimension. Then, they were embedded in an epoxy resin. The excess of resin was removed by a grinding magnet disc of the 600 μ m. To prevent the sample from charging, they were coating with a thin layer of gold and then polishing down to a colloidal for EBSD analyses. After the scratches analysis, samples were gold metalized to the analysis by secondary electrons at SEM. Lastly, rocks were ultra-polished for electron backscatter diffraction (EBSD) analysis.

For the microstructure characterization, it was prepared a thin section, from the counterpart of the tablet, which was analyzed by a light microscope for the petrographic characterization, including the determination of the mineralogy

composition, grain size range, grain boundaries features, microcracking, texture and structure of the rocks.

Equivalent quartz content (EQC) was calculated from the mineralogy percentage obtained with petrographic analysis and represents the entire mineral content referring to the hardness of quartz. Each mineral amount observed in the thin section was multiplied by its relative Rosiwal abrasiveness (Thuro 1997). The microhardness data were obtained from Beste & Jacobson (2003).

The SEM images of the scratches were mounted into 3D models by Alicona MeX software. These models enable the scratches geometry analysis and characterization of the surface roughness. Also at SEM, the EBSD was used to provide the investigation of phase maps, grain size distribution and crystallographic orientations to evaluate the degree of anisotropy of samples.

2.3 THE WEAR EXPERIMENTS

The wear tests were performed according to the Cerchar abrasiveness test standard (ASTM D7625-10, 2010), which simulates a 2-body impact/abrasion contact. Two trials were executed. The first scratch was conducted on the Cerchar equipment with a constant load of 70N. In the second round, the scratch was produced with a linearly increasing normal load from 1 to 70N at the tribometer equipment (Universal Mechanical Tester - UMT).

The Cerchar method consists of scratching a steel stylus with a cone-shaped pin against the rock surface with an applied normal force of 70N and for a 10mm distance. The wear is quantified from the measured diameter of the resulted wear for steel pin which determined the Cerchar abrasiveness index (CAI). The rock abrasiveness is determined by the CAI, which is the measurement of the wear diameter on the stylus multiplied by 10. The CAI ranges from zero to approximately seven, and rocks are classified from very low abrasiveness to quartzitic (Stanford & Hagan 2009, ASTM D7625–10 2010, Rostami et al. 2014, Albert et al. 2014).

The second experiment was carried out on a micro-tribometer (UMT), with the same parameters of Cerchar test (stylus, rock surface and distance). In contrast, the scratch was made with a linearly increasing normal load from 1 to 70N and with a controlled speed of 0,17mm/s. This equipment also allowed the record of friction load

(Fx), applied load along the scratch (Fz) and friction coefficient (COF), which is calculated by the ratio between friction and applied load. From this arrange, it was possible to analyze the rock response to different load intervals. In some samples, a critical load (transition load to Beste et al. 2004) can be identified in the Fx graph, it represents changes in rock behavior.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 MICROSTRUCTURE OF STEEL AND ROCKS

Steel used in the wear tests shows typical martensitic covered by carbide microstructure with a non-metallic inclusion of very fine globular oxides (Figure 2- A). The table 2 displays the steel characteristics, such as the measured hardness of 600 HV and the surface roughness parameters (Figure 2-B). Both are consequences of the sharpening process. Sq parameter, which represents the standard deviation of the distribution of surface height, was about 2.94; the stylus pin roughness also exhibits a negative skewness (Ssk) and a leptokurtic distribution of kurtosis (Sku).

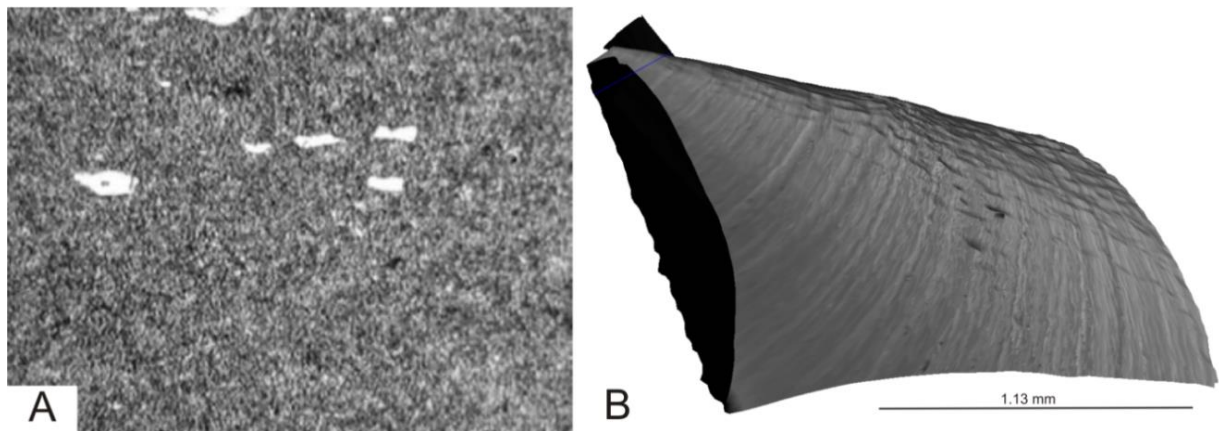


Figure 14: A- Martensitic matrix with steel carbide microstructure in 400X (Retrieved from test report Spectro Scan); B- Surface roughness of steel.

Table 2: The microstructure of samples and steel pin.

Samples	Grain size (mm)	EQC	Hardness (HV)	Surface roughness parameters (0.8 x 0.8mm)		
				Sq	Ssk	Sku
Sandstone	0.05 - 1.0	94.59	150 - 1200	5.24	0.12	5.03
Quartz wacke	0.05 - 4.0	89.53	150 - 1200	4.40	0.40	5.39
Wacke	0.01 - 0.8	72.16	150 - 1200	6.92	0.37	6.52
Quartzite	0.05 - 8.0	100	1200	4.40	0.26	5.33
Steel AISI A2	-	-	660	2.94	-1.83	11.30

Four rock samples were analyzed, three from sedimentary rocks (Tucker 2003) and one from metamorphic rock (SCRM), all of which with high-quartz content. The sandstone is very fine to medium-grained, compact and homogeneous. The crystals show round shape with curved grain boundaries. Microcracks are limited or absent in some regions of the samples (Figure 3- A). Quartz wacke was a friable homogenous rock, very fine to medium-grained. The grains have irregular shapes with curved to irregular grain boundaries and an incipient microcracking (Figure 3- B). The wacke is friable and has quartz content (70%) lower than the other samples. It is fine to very fine-grained, of granular shape, with a curve to sharp grain boundaries and an incipient microcracking (Figure 3- C). The quartzite is very-fine to medium-grained, compact and homogeneous. Grain shapes are irregular with interdigitated boundaries mantled by recrystallized grains of very small sizes typical of recrystallization by bulging mechanisms. One observed an irregular and interdigitated grain boundaries and an incipient intergranular microcracking (Figure 3- D).

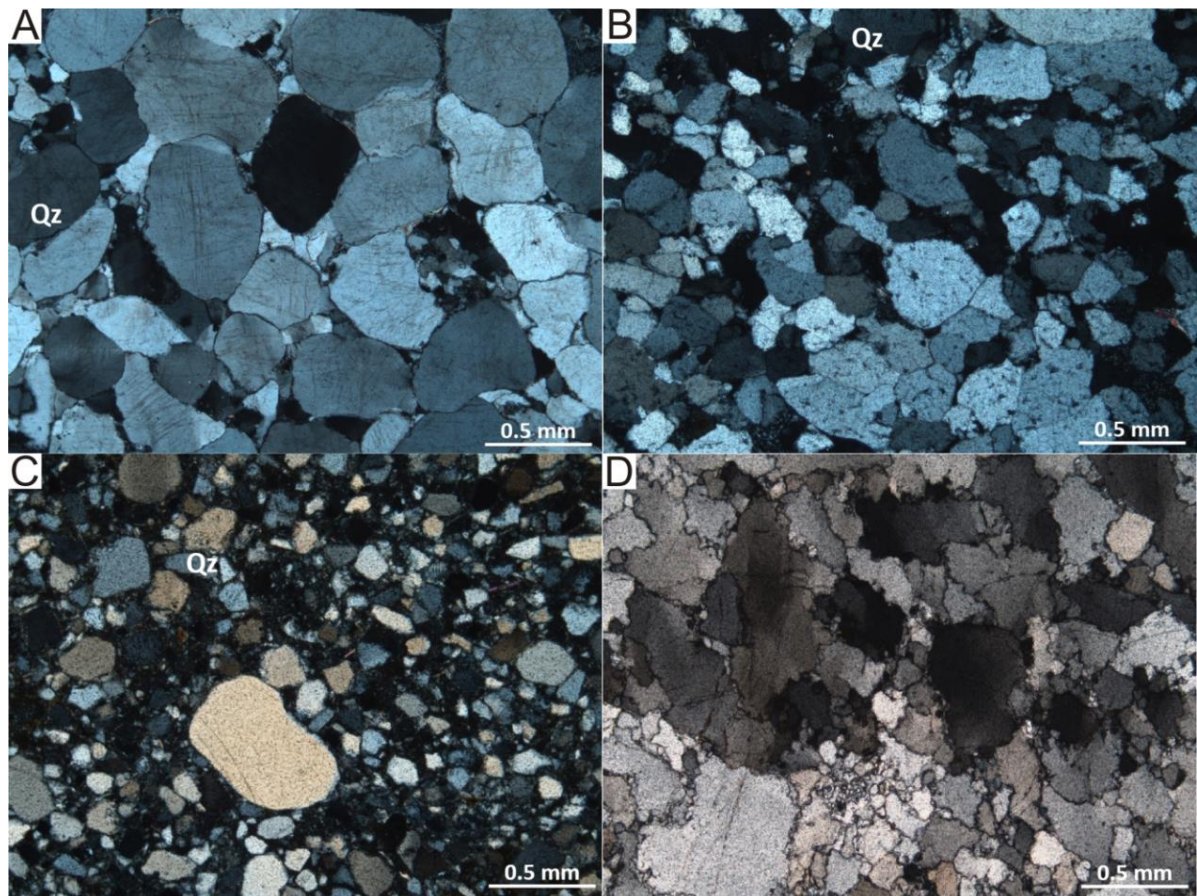


Figure 15: Petrographic images of samples: A- Sandstone; B- Quartz wacke; C- Wacke; D- Quartzite.

From the SEM analysis with an electron backscatter diffraction (EBSD) detector, it was possible to investigate the grain size distribution, grain boundaries and crystallographic orientation of the samples. The minimum grain size was set to $< 0.1 \text{ mm}^2$ (step size from SEM), as shown in Figure 4. Wacke is the sample with the highest amount of grains detected (> 2000) and exhibits a concentration around 0.001 mm^2 . Quartzite has the majority composition between 0.005 and $> 0.05 \text{ mm}^2$ and the others samples show a regular concentration between 0.001 and 0.05 mm^2 of grain size.

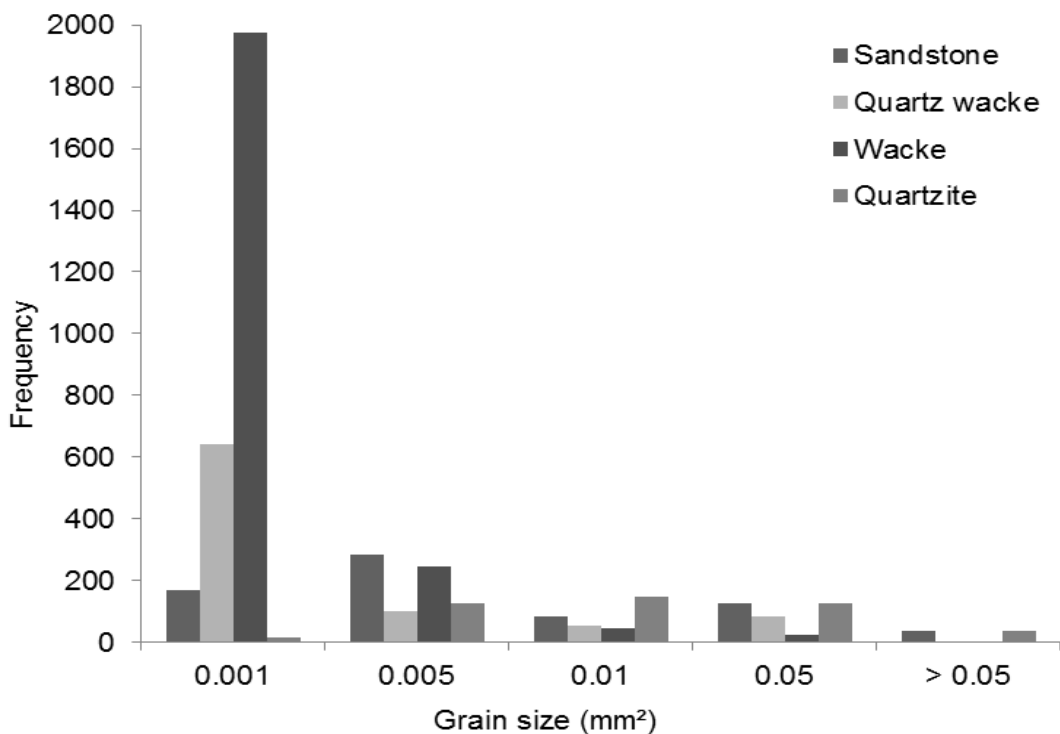


Figure 16: Grain size distribution of rock samples by SEM-EBSD analysis.

Grain boundaries were set for grains with misorientation angles larger than 10° (the average angle for quartz crystals). One maximum observed for grain misorientation is close to 60° and might represent a type of twinning commonly found in quartz crystals. The sedimentary samples, mostly sandstone and quartz wacke, have grains with a considerable number of internal boundaries (Figure 17- A, B). This aspect represents an increase of grain/rock fragility because they create preferential planes of fracture. In contrast, the grain boundary analysis revealed a low development into quartz crystals in a quartzite sample (Figure 17- D).

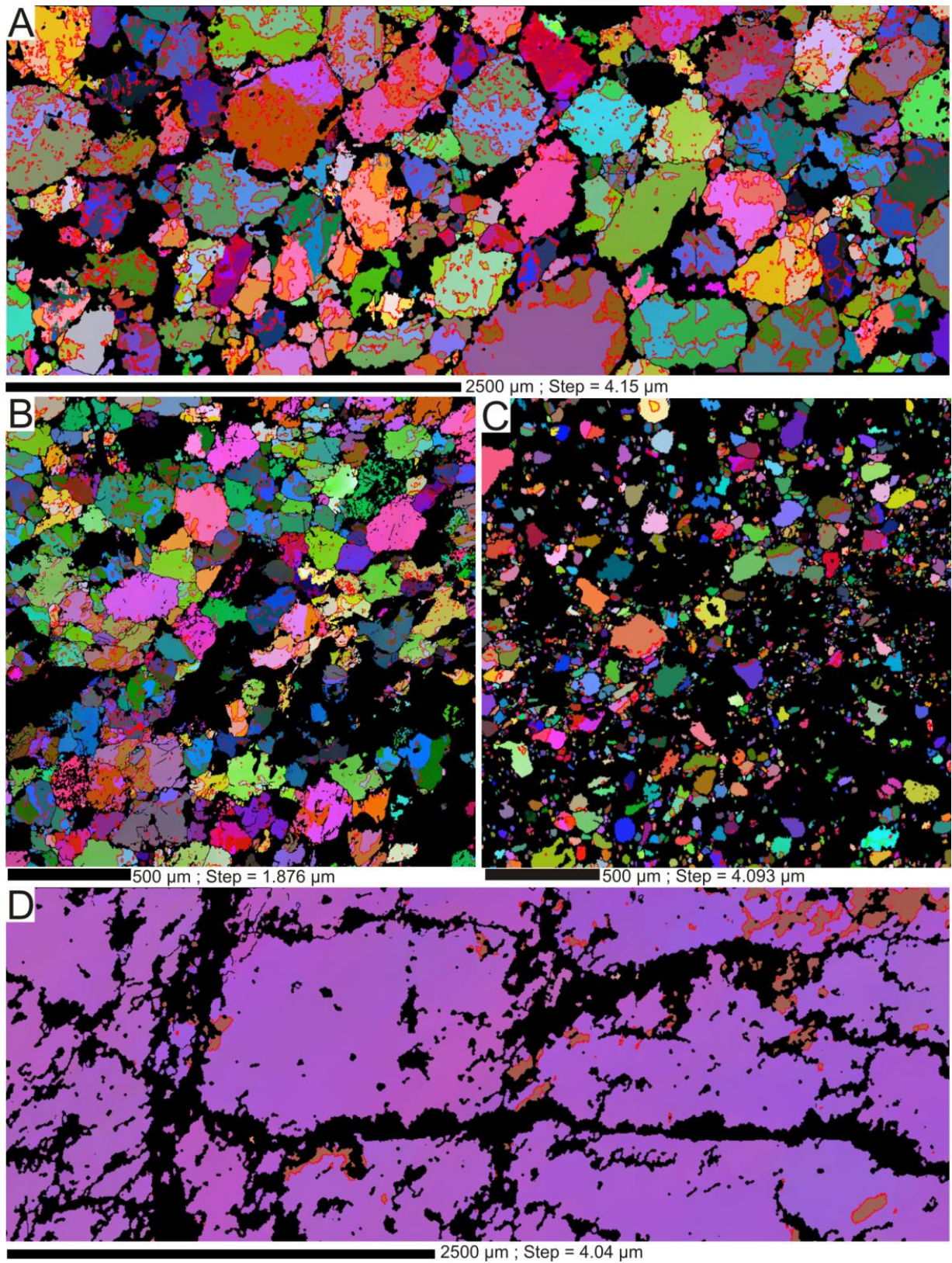


Figure 17: RGB maps from Euler angles and grain boundaries: A- Sandstone; B- Quartz wacke; C- Wacke; D- Quartzite.

The crystallographic orientation was analyzed by RGB maps from the Euler angles. As seen in Figure 17 (A-D), distinct colors represent different crystallographic orientations. The quartzite is the only sample with a preferred crystallographic orientation (Figure 17- D), which means it is possibly connected to a deformation context that resulted in the reorientation of crystals. Other samples did not show any preferred orientation, which may be related with the absence of strain during diagenesis of these sedimentary rocks.

The EQC is above 70%, with higher values in quartzite (100%) and lower in quartz wacke (89%) and wake (72%). This variation results from the percentage of secondary mineralogy composed by feldspar and clay minerals. Beste & Jacobson (2003) analyzed the hardness response of sandstone and quartz. Sandstone shows a precise hardness level in grains of about 1200 HV, whereas between the grains hardness is mostly 250 HV. This result was applied to sedimentary rock samples in this work to represent rocks with quartz grains and cement. The authors also characterized samples of quartz, which exhibit hardness near 1200HV. This data was used for the quartzite sample.

Surface roughness measurements represent the rock response to the cutting method (diamond blade). The roughness parameters remained very similar for all the samples. All of them show a standard deviation of the distribution of surface height between 4-6, positive skewness and leptokurtic distribution.

3.2 SCRATCH RESPONSE

According to Beste et al. (2004), scratches (70N and 0-70N) can be classified into different types of scratch response classes. Quartzite has a homogeneous distribution of mineralogy, grain size and a preferred crystallographic orientation. During both tests, at constant and increasing load (70N and 0-70N), it was observed a burnishing scratch response, characterized the formation of scratch by plastic deformation, involving smooth scratch bottom, as shown in Figure 18 .This mechanism could involve a removal of small particles, but the low mechanical deformation was dominant.

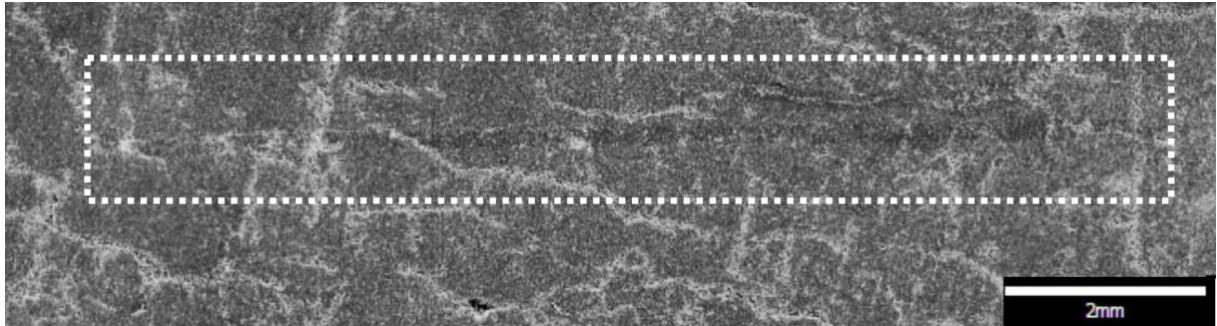


Figure 18: Burnishing scratch response for quartzite at constant load (70N).

In the sandstone, it's possible to observe a different scratch response between the quartz grain and the cement, which was described by Beste et al. (2004). In the cement, secondary components like feldspar and clay minerals are present. In this case, in both loads, was observed a different response among scratch properties. At constant load (70N), it might be also detected a transition from plastic deformation to out-of-track cracking at the final of scratch, as shown in Figure 19. At increasing load, the cement shows a scatter by out-of-crack cracking and the quartz grains, whit a burnishing or in-track cracking response with low loss of material.

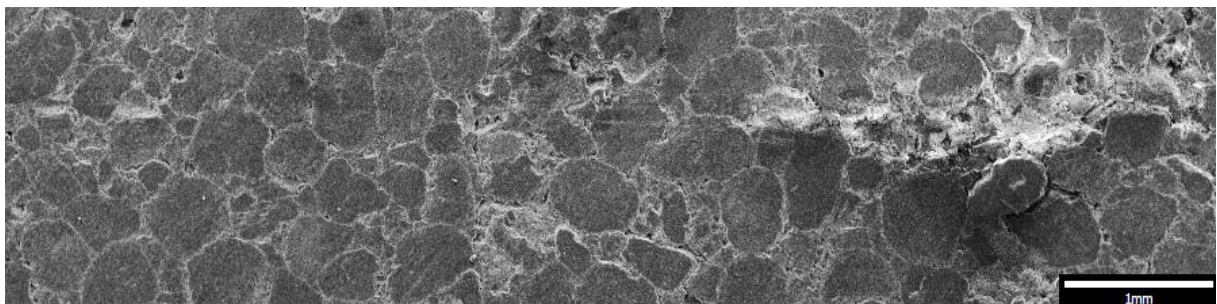


Figure 19: Transition from plastic deformation to out-of-track cracking in sandstone at 70N.

Quartz wacke and wacke samples exhibit scratches with cracks more extensive from the track, leading to large-scale material removal. For these samples, which are friable and have a high percentage of secondary elements, the material removal is higher and proportional to the applied load. The cracks are perpendicular to the scratching direction with the almost plastic response. At quartz wacke, under constant load (70N), the scratch exhibits an irregular trajectory. It is possibly influenced by the composition and discontinuities, such as grain boundary that develops a large out-of-track cracking. Wacke almost has an out-of-track cracking with a continuous and proportional removal of material to the loads applied.

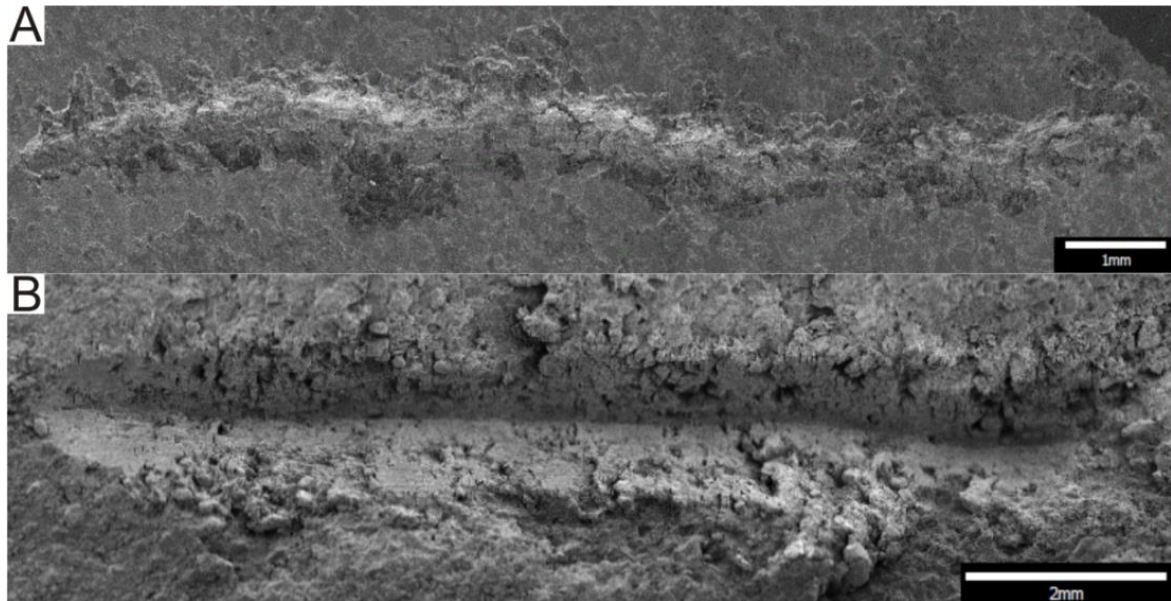


Figure 20: Develop an extensive out-of-track cracking. A- Irregular trajectory of scratch in quartz wacke; B- High amount of volume wear in wacke.

3.3 ABRASIVE TEST CORRELATION

The summary of scratches tests, with Cerchar abrasiveness index at saw cut (CAIs) and the UMT, performed at wear behavior under 2-body conditions, are in Table 3. It was shown that for under the application of constant force (70N), in Cerchar test, sandstone represents the higher CAI, being characterized as extreme abrasiveness and responsible for the elevated wear on the steel pin, this result also be observed by Petrica et al. (2013). Quartz wacke shows a high abrasiveness and quartzite is considering medium abrasiveness. Wacke is the one with the lowest fall value of CAI, representing the less wear of the steel pin, therefore, low abrasiveness.

Table 3: Summary of scratches tests results from constant load (70N) and transition load (0-70N).

Sample	CAIs (70N)	Classification (ASTM D7625- 2010)	Friction response	Transition load (N)	EQC
Sandstone	4,54	Extreme abrasiveness	0 - 1.6	> 70	94,59
Quartz wacke	2,36	High abrasiveness	0 - 1.7	~ 10	89,53
Wacke	0,68	Low abrasiveness	0.6 - 1.6	~ 10	72,16
Quartzite	1,57	Medium abrasiveness	0 - 1.1	> 70	100

At table 3, it is possible to view the friction response and the transition load comparable a Beste et al. (2004). Quartz wacke and wake exhibit a transition load nearby 10N, from burnishing or plastic deformation to a large out-of-track cracking. If it is not possible to notice this modification, as it is for Sandstone and quartzite samples, the wear transition load that is over than 70N. In order to understand the

results of transition load, at UMT equipment, samples can be separated into three different responses for the friction load.

The first graphic (Figure 21) shows the normal load (F_z), which increases from zero to approximately 70N, and the friction load exhibit a normal comportment up to less than 10N. As the charge goes from 10N, the variation in F_x is observed with the development of many peaks and valleys increasing their amplitudes until the final load (Figure 21). For this behavior, it is possible to associate the quartz wacke sample, which coefficient of friction is between 0 and 1.7. This develops instability of the necessary friction to wear, possibly classified in an irregular increasing friction load.

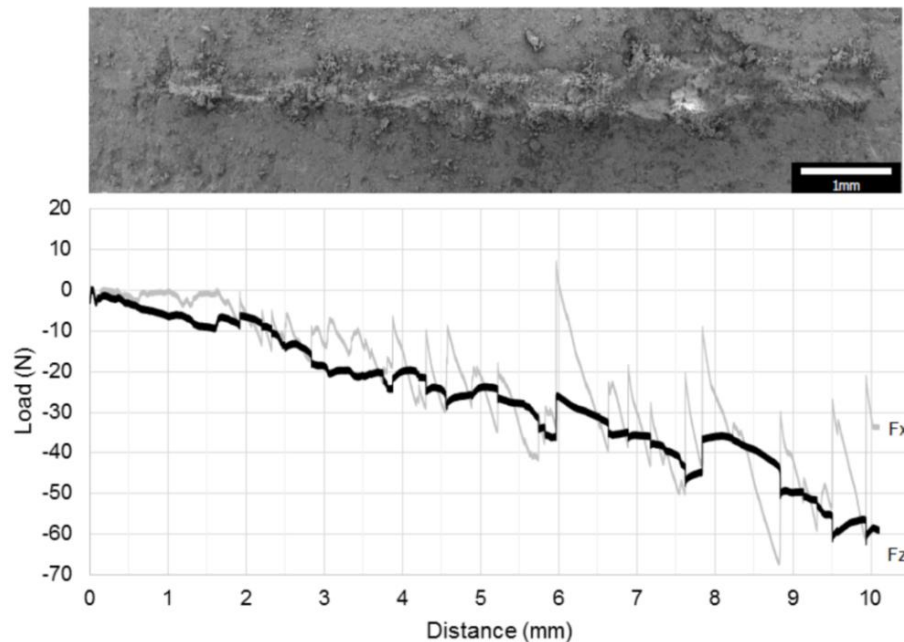


Figure 21: The quartz wacke sample shows a first behavior of friction load at an increasing normal load.

The second result is shown in Figure 22, where it is possible to observe two distinct behaviors of the friction load. The most part of the trajectory of steel pin shows a low friction load, between 0 to 10N, needed to the formation of a scratch. In contrast, in the three intervals, it is possible to notice a growth of friction load (until 25N), which represents the stage that shows greater resistant to the scratch. This performance can be applied to sandstone and quartzite samples, which coefficient of friction between 0 and 1.6. This behavior can be classified into slight changes of friction load caused by different micro scratch response with increasing normal load.

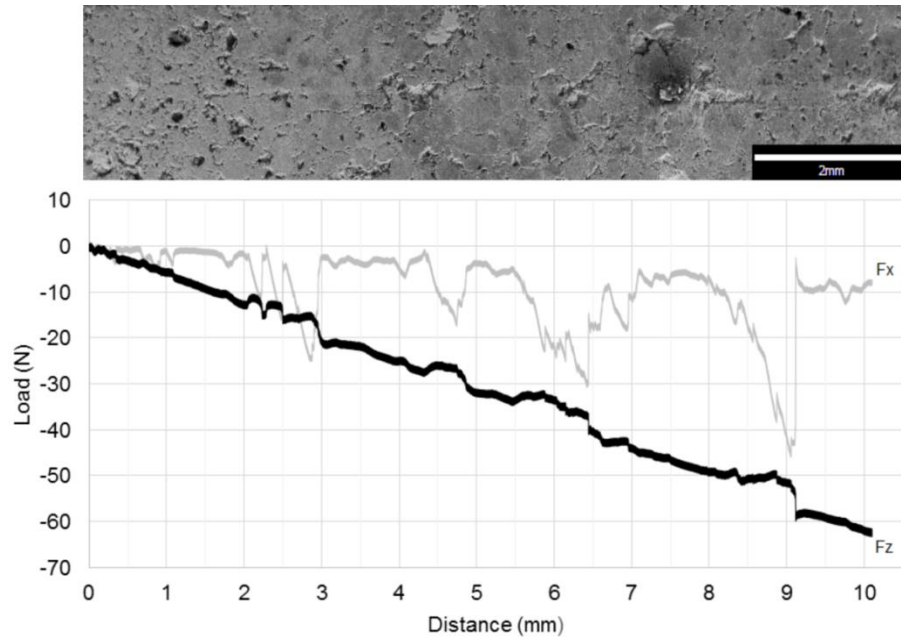


Figure 22: The sandstone sample and their respective behavior of friction load at an increasing normal.

The third behavior demonstrates an ascending friction load as there is an increment on the normal load. In this case, the friction load is dominantly higher than the normal load (Figure 231). This occurs as a result of the difficulty for steel pin slide in the sample as the wear load and volume increase. The wacke sample exhibits this behavior, with coefficient of 0.6 to 1.6, which may be classified as a proportional increment of friction and normal load, but with higher friction load.

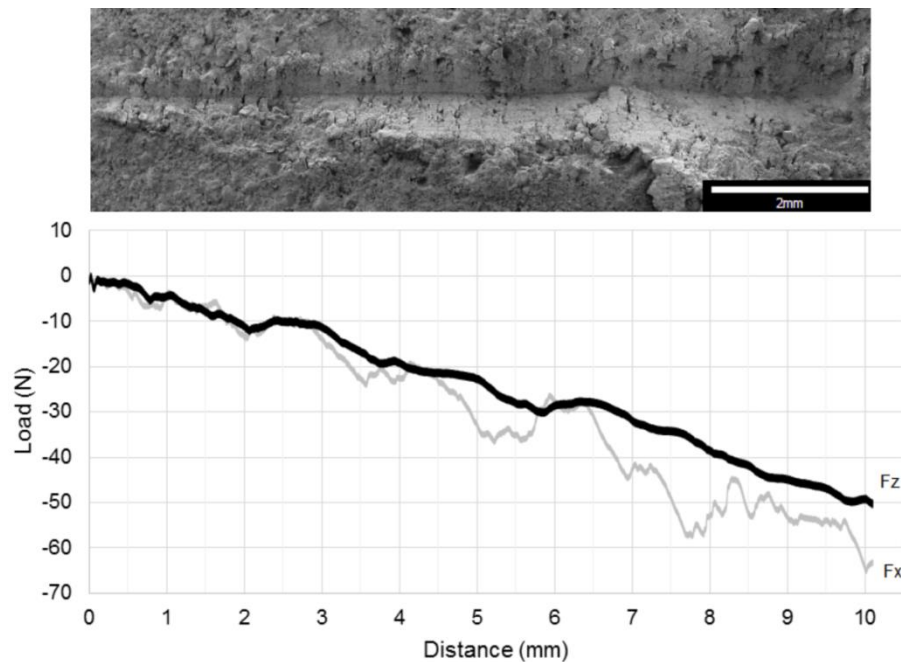


Figure 23: The third behavior of friction load an increasing normal load at wacke sample.

3.4 COMPARISON OF WEAR VOLUME

The wear volume was calculated for the Cerchar scratch test, with the application of a constant load (70N), and for the UMT test in an increasing load (0-70N), which can be observed in Figure 11. From the graph, one can see that the quartzite sample had a low wear rate. It is possibly related to a high cohesion and recrystallization of minerals that help steel slippage and cause low wear to the steel. In comparison, sandstone also had a low wear rate but showed the highest abrasive wear. Wacke and quartz wacke are the samples with the largest volume of wear, indicating that the wear volume is related to the increase of matrix in the samples and the degree of rock friability. These samples, however, showed no significant abrasive behavior.

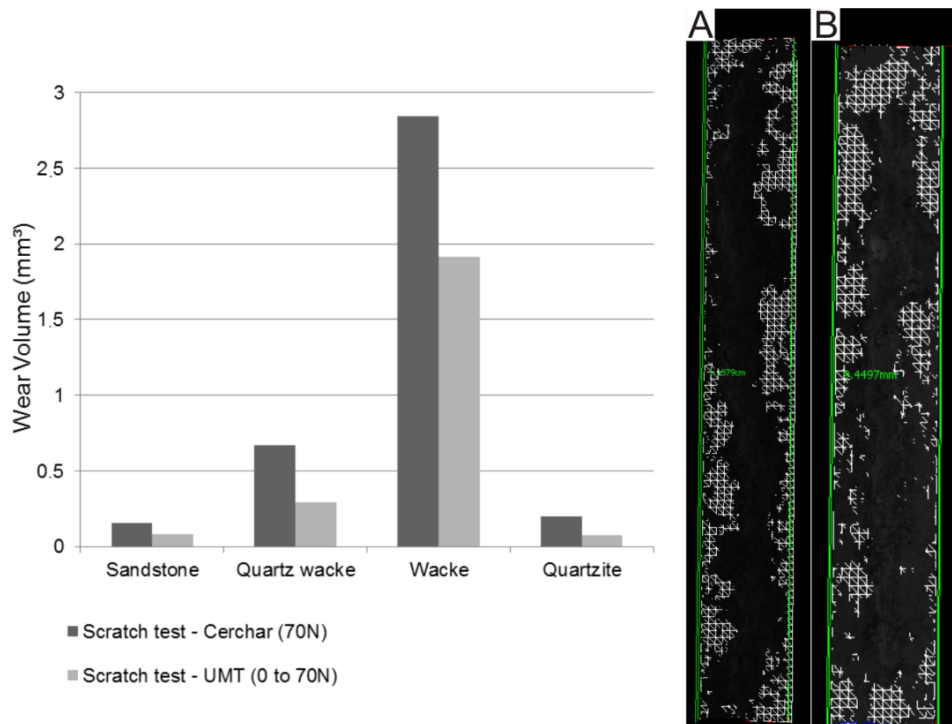


Figure 24: Graphic of wear volume under two conditions of load. A- Example of wear volume at 70N to quartz wacke; B-Illustration of wear volume at 0-70N for quartz wacke.

4. CONCLUSIONS

If constant mineralogy composition is considered, other parameters show an important influence on wear mechanism. Definition, description of microstructures parameters and the deformation response at 2-body conditions made it possible to characterize the following influences:

- The quartzite sample showed a preferential crystallographic orientation and low internal boundaries. This microstructural characteristic may be associated with low abrasive wear (CAI) observed, even with a high EQC value. These properties may have helped the steel pin displacement, reducing the abrasive potential of the sample.
- For homogeneous and cohesive samples, there is a correlation between the scratch response and the abrasive wear, similar to the results obtained by Beste et al. (2004). The quartzite showed a predominance of the plastic response to the burnishing and had low abrasive wear. The sandstone has an in-track cracking response and an out-of-track cracking exhibiting the highest abrasive wear.
- In the sedimentary rocks, it was possible to observe the correlation between EQC and CAI. The wacke sample is low abrasive, as well as low EQC and shows irregular and sparse grains boundary. Already the sandstone is extremely abrasive, has the highest EQC and also curved and large contacts between the grains.
- The transition load in the quartz wacke and wacke samples showed changes in the scratch response close to 10N; however, the quartzite and sandstone samples did not show changes of scratch behavior, so the transition of critical load is greater than 70N.
- The proportion of wear volume showed correlation with the abrasiveness only with the sedimentary rocks. The sandstone with high CAI has a low wear volume, while the wacke sample has a lower CAI and high of wear volume.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was developed during the “Desenvolvimento de novas alternativas de ensaios de abrasividade em rochas” project via Institutos Lactec with financial support from Petrobras. The author is thankful for laboratory support from Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), Laboratório de Superfícies e Contato (LASC), Centro de Microscopia Eletrônica (CME) and Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR).

REFERENCES

- 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 - Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. 2010. Designation: **D7625-10**, p 1-6.
- Badisch E., Katsich C., Winkelmann H., Franek F., Roy M. 2010. Tribology International Wear behaviour of hardfaced Fe-Cr-C alloy and austenitic steel under 2-body and 3-body conditions at elevated temperature. *Tribology International*, **43(7)**: 1234–1244.
- Beste U., Jacobson S. 2003. Micro scale hardness distribution of rock types related to rock drill wear. *Wear*, **254**: 1147–1154.
- Beste U., Lundvall A., Jacobson S. 2004. Micro-scratch evaluation of rock types—a means to comprehend rock drill wear. *Tribology International*, **37(2)**:203-210.
- Buttery T.C., Archard J.F. 1971. Some microscopical investigations of grinding and abrasive wear. *Journal of Microscopy*, **94(1)**:13-24.
- Oparin V.N., Tanaino A.S. 2015. A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **7**: 250-255.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. 1972. Sand and sandstone. Berlin: Springer-Verlag, 62p.
- Petrica M., Badisch E., Peinsitt T. 2013. Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. *Wear*, **308(1–2)**: 86–94.
- Plinninger R.J., Spaun G., Thuro K. 2002. Prediction and Classification of tool wear in drill and blast tunnelling. In Engineering geology for developing countries. Proceedings of the Ninth IAEG Congress, Durban, South Africa p-2226-36.
- Rostami J., Ghasemi A., Gharahbagh E.A., Dogruoz C., Dahl F. 2014. Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index. *Rock mechanics and rock engineering*, **47(5)**: 1905-1919.
- Sanford J. Hagan P. 2009. An Assessment of the impact of stylus metallurgy on the CERCHAR Abrasiveness Index value. Coal operator's conference, University of Wollongong, **(12-13)**: 347-355.
- Stachowiak G., Batchelor, A. W. 2013. *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.

Thuro K. 1997. Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. *Geol Rundsch* **86**: 426-438.

Trezona R.I., Allsopp D.N., Hutchings I.M. 1999. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, **225**: 205-214.

Tucker M. E. 2003. *Sedimentary rocks in the field*. John Wiley & Sons, 234 p.

Wan Z.C., Sha M.Y., Zhou Y.L. 2002. Study on disc cutters for hard rock application of TB880E TBM in Qinling Tunnel. *Modern Tunn Technol*, **39(6)**:1-12

Woldman M., Heide E.V.D., Schipper D.J., Tinga T., Masen M.A. 2012. Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behaviour. *Wear*, **294–295**: 419–426.

Zhang H. 2011. Mechanical Analysis of TBM disc Cutter Damage Mechanism and Its Application. *Modern Tunneling Technology*, **1**: 1-13.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando-se a composição mineralógica constante, outros parâmetros passam a mostrar influência nos mecanismos de desgaste. A definição e descrição dos parâmetros de microestruturas e de deformação em condições de abrasão entre 2-corpos torna possível a caracterização das seguintes influências:

- O quartzito possui orientação cristalográfica principal e um número baixo de limites internos de grãos. Essa característica microestrutural pode ser relacionada ao baixo desgaste abrasivo (CAI) observado, mesmo com um valor alto de EQC. Essas propriedades podem ter facilitado o deslocamento da ponteira, diminuindo o potencial abrasivo da amostra.
- Para as amostras homogêneas e com coesão há correlação entre a resposta do risco e o desgaste abrasivo, similar aos resultados obtidos por Beste et al. (2004). O quartzito mostra um predomínio da resposta plástica à polida (*burnishing*) e possui baixo desgaste abrasivo. Já o arenito possui resposta de fissuramento no risco (*in-track cracking*) e fissuramento fora do risco (*out-of-track cracking*) exibindo o maior desgaste abrasivo.
- Nas rochas sedimentares foi possível observar correlação entre EQC e CAI. A amostra de grauvaca é pouco abrasiva, e possui baixo EQC, com contatos

irregulares e tênues entre os grãos. Já o arenito é extremamente abrasivo, tem o maior EQC e também contatos curvos e volumosos entre os grãos.

- A carga de transição, nas amostras de quartzo grauvaca e grauvaca, mostraram mudanças na resposta do risco próximo à 10N; Já as amostras de quartzito e arenito não mostram mudanças de comportamento, sendo assim, a carga de transição ou crítica é maior que 70N.

- A proporção de volume desgastado mostrou correlação com a abrasividade das rochas sedimentares. O arenito com alto CAI mostrou um baixo volume desgastado, enquanto que as grauvacas têm índices CAI menor e mostram aumento do volume desgastado conforme a diminuição do CAI.

Para trabalhos futuros pretende-se realizar a determinação da dureza e a caracterização em duas dimensões do sulco produzido pelos ensaios de riscamento.

REFERÊNCIAS

- 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 - Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. 2009. Designation: **G171-03**, p1–7.
- ASTM - Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. 2010. Designation: **D7625-10**, p 1-6.
- ASTM - Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. 2011. Designation: **E384-11**, p 1-43.
- ASTM – Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. 2015. Designation: **G40-15**, p 1-9.
- Badisch E., Katsich C., Winkelmann H., Franek F., Roy M. 2010. Tribology International Wear behaviour of hardfaced Fe-Cr-C alloy and austenitic steel under 2-body and 3-body conditions at elevated temperature. *Tribology International*, **43(7)**: 1234–1244.
- Beste U., Jacobson S. 2003. Micro scale hardness distribution of rock types related to rock drill wear. *Wear*, **254**: 1147–1154.
- Beste U., Lundvall A., Jacobson S. 2004. Micro-scratch evaluation of rock types—a means to comprehend rock drill wear. *Tribology International*, **37(2)**:203-210.
- Bieniawski Z.T., Celada B., Galera J.M., Tardáguila I. 2009. Prediction of cutter wear using RME. In *ITA-ITAES World Tunnel Congress, Budapest*.
- Buttery T.C., Archard J.F. 1971. Some microscopical investigations of grinding and abrasive wear. *Journal of Microscopy*, **94(1)**:13-24.
- CERCHAR. 1986. The Cerchar Abrasiveness Index. Centre d'études et Recherches de Charbonnages de France, Verneuil.
- Chandler H. 1999. *Hardness testing*. ASM international.
- Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M., Soliman H.H. 2002. Roughness parameters. *Journal of materials processing technology*, **123(1)**:133-145.
- Dedavid B.A., Gomes C.I., Machado, G. 2007. *Microscopia Eletrônica de Varredura aplicações e preparação de amostras*. EDIPUCRS, Porto Alegre, 60p.
- Ferreira F.O. 2016. *Desenvolvimento microestrutural e de orientações cristalográficas preferenciais em agregados de hematita: Resultados obtidos a partir*

de formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero-MG e modelagem viscoplástica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 65p.

Gadelmawla E S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M., Soliman H.H. 2002. Roughness parameters. *Journal of materials processing technology*, **123(1)**:133-145.

Gordon England. Hardness test. Disponível em: <http://www.gordonengland.co.uk/>, acessado em 20 de outubro de 2017.

Kasling H. 2000. Der Cerchar-Abrasivitätstest: aussagekraft und verbesserungsmöglichkeiten eines indextests zur bestimmung der gesteinsabrasivität, TU Munich, Munich, 47p.

Kuhn H., Medlin D. 2000. ASM Handbook. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, USA, 998p.

Mingard K.P., Roebuck B., Bennett E.G., Gee M.G., Nordenstrom H., Sweetman G., Chan P. 2009. Comparison of EBSD and conventional methods of grain size measurement of hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **27(2)**: 213–223.

Monteiro M.D., Rocha H.C. 2015. 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, p. 71-86.

Moradzadeh M., Cheshomi A., Ghafoori M., Trighazali S. 2016. Correlations of equivalent quartz, Slake durability index and Is50 with Cerchar abrasiveness index for different types of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **86**: 42-47.

Morales L.F.G., Hinrichs R., Fernandes L.A.D. 2007. A técnica de difração de retro-espalhados (EBSD) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. *Revista Pesquisas em Geociências*, **34 (1)**: 19-34.

Nagatani T., Saito S, Sato M., Yamada M. 1987. Development of an ultra-high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens srsram. *Scanning Microscopy*, **1(3)**: 901-909.

Oparin V.N., Tanaino A.S. 2015. A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **7**: 250-255.

Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. 1972. Sand and sandstone. Berlin: Springer-Verlag, 62p.

Petrica M., Badisch E., Peinsitt T. 2013. Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties. *Wear*, **308(1–2)**: 86–94.

Plinninger R.J., Spaun G., Thuro K. 2002. Prediction and Classification of tool wear in drill and blast tunnelling. In *Engineering geology for developing countries. Proceedings of the Ninth IAEG Congress, Durban, South Africa* p-2226-36.

Plinninger R., Käsling H., Thuro K., Spaun G. 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, **40(2)**: 259-263.

Rostami J., Ghasemi A., Gharahbagh E.A., Dogruoz C., Dahl F. 2014. Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index. *Rock mechanics and rock engineering*, **47(5)**: 1905-1919.

Radi P.A., Santos L.V., Bonetti L.F., Trava-Airoldi V.J. 2007. Tribologia, conceitos e aplicações. 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação do ITA, *Anais XII ENCITA*, São Paulo: Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Ribeiro V. 2010. *Abrasividade Pendular e a Resistência Mecânica Das Rochas*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 54p.

Ribeiro V., Silva L.A.A., Sansone E.C. 2013. Abrasividade pendular e resistência mecânica das rochas. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, **66(3)**: 339– 345.

Rostami J., Ghasemi A., Gharahbach 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.

Sanford J. Hagan P. 2009. An Assessment of the impact of stylus metallurgy on the CERCHAR Abrasiveness Index value. Coal operators conference, University of Wollongong, **(12-13)**: 347-355.

Stachowiak G., Batchelor, A. W. 2013. *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.

Thuro K. 1997. Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. *Geol Rundsch* **86**: 426-438.

Thuro K., Plinninger R.J. 1998. Geological limits in roadheader excavation-four case studies. In: *Proceedings of the 8th international association for engineering geology congress*, Rotterdam.

Thuro K., Plinninger R.J. 2003. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. *ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 1227-1232.

Trezona R.I., Allsopp D.N., Hutchings I.M. 1999. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, **225**: 205-214.

Tucker M. E. 2003. *Sedimentary rocks in the field*. John Wiley & Sons, 234 p.

Wan Z.C., Sha M.Y., Zhou Y.L. 2002. Study on disc cutters for hard rock application of TB880E TBM in Qinling Tunnel. *Modern Tunn Technol*, **39(6)**:1-12

West G. 1989. Technical Note: Rock Abrasiveness testing for tunneling. *International Journal of Rock Mechanics, Mining science and Geomechanics Abstracts*, **26(2)**: 151-160.

Woldman M., Heide E.V.D., Schipper D.J., Tinga T., Masen M.A. 2012. Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behaviour. *Wear*, **294–295**: 419–426.

Zhang H. 2011. Mechanical Analysis of TBM disc Cutter Damage Mechanism and Its Application. *Modern Tunneling Technology*, **1**: 1-13.

Zum Gahr K. 1987. *Microstructure and Wear of Materials*. North Holland, 559 p.