

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RENAN VALTER MAGNOL

**CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DE FORMAÇÃO
FERRÍFERA BANDADA ATRAVÉS DO ENSAIO DE
ESCLEROMETRIA LINEAR**

**VITÓRIA
2018**

RENAN VALTER MAGNOL

**CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DE FORMAÇÃO
FERRÍFERA BANDADA ATRAVÉS DO ENSAIO DE
ESCLEROMETRIA LINEAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Ciência e Engenharia de Materiais: Tribologia.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo.

VITÓRIA

2018

RENAN VALTER MAGNOL

CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DE FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA ATRAVÉS DO ENSAIO DE ESCLEROMETRIA LINEAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração Ciência e Engenharia de Materiais. Subárea: Tribologia.

Aprovada em 29 de Junho de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Cherlio Scandian
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Luiz Alberto Pereira das Neves Franco
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por tudo e à Nossa Senhora Aparecida por interceder por mim.

A meu pai, Amarildo José Magnol, que sempre trabalhou duro para eu poder estudar, à minha mãe, Aparecida Maria Valter Magnol, que sempre me incentivou e me ajudou com as primeiras dificuldades na escola e à minha irmã, Micaely Valter Magnol, por me incentivar.

Também agradeço, especialmente, à minha namorada, Aline Bergamini Casotti, por me ajudar e me compreender nos momentos de *stress*.

Às minhas avós, meu avô José, minhas tias, tios e primos e a meu avô Jair, que faz muita falta.

Aos meus orientadores, Cherlio Scandian e Marcelo Camargo Severo de Macêdo, pela amizade, boa vontade, bom humor e discussões tribológicas.

Agradeço muitíssimo meus amigos da UFES, Rubson, Pâmella, Carlos, Felipe, Carol, Nathan, Bruno, Gustavo, Daniela, Letícia, Juliana, Léo, Luizinho e Babucha, pela ajuda e pelos momentos de descontração, e à Manuelle pela grande ajuda e amizade durante o mestrado.

Aos Zarros do CEFETES, pelos 13 anos de amizade e a todos os meus amigos.

Agradeço também, àqueles que concederam a utilização de equipamentos, que foram de grande importância para realização desse trabalho, Michelli Siqueira, Sandro Mauro de Carvalho, assim como aos Professores do LFS da USP, Dr. Roberto Martins, Dr. Luiz Alberto Franco e Dr. Newton Fukumasu, a todos os técnicos desse laboratório, principalmente Raphael, Rodnei e Kássio.

E, finalmente, à GEOSOL, juntamente com Marciano Quites Macedo e Antonio de Padua Vieira Chaves, pelo apoio financeiro e por acreditar no meu trabalho.

RESUMO

A sondagem mineral é geralmente executada com coroas impregnadas de diamante. Essas ferramentas podem apresentar uma vida útil insatisfatória quando trabalham em uma formação de ferrífera bandada de Carajás-Brasil conhecida como jaspilito, um material complexo composto de bandas alternadas de silicatos (jaspe) e óxidos de ferro (principalmente hematita e goethita), além de veios de quartzo. O desempenho dessas brocas está ligado à interação entre diamante e jaspilito, que é pouco compreendida. A resposta ao desgaste abrasivo deste sistema tribológico foi investigada por uma série de ensaios de esclerometria linear com indentadores de diamante Rockwell C, Vickers e Knoop em função da carga normal (0,2-90 N). O efeito da distância entre riscos paralelos (variando de 5 vezes a largura até superposição total), velocidade de riscamento (0,01-1 mm / s) e condições ambientais (seco, água destilada e fluido de perfuração de bentonita) no comportamento, quanto ao desgaste e atrito, foram estudados com indentador Vickers. Desgaste severo por chipping e alto atrito (até $\mu = 0,45$) foram dominantes em todas as cargas com indentador Vickers, em velocidades mais baixas, em todos os graus de superposição e em condições lubrificadas. Mecanismos de desgaste moderados (*burnishing*, *ploughing* e *scale-like cracking*) e menor atrito (tão baixo quanto $\mu = 0,06$) foram observados em ensaios com penetrador Rockwell e Knoop, em altas velocidades e em óxidos de ferro. Além disso, o grau de superposição não teve efeito sobre o atrito e os mecanismos de desgaste, embora tenha influenciado a taxa de desgaste.

Palavras chave: Formações ferríferas bandadas. Jaspilito. Ensaio de esclerometria linear. Mecanismos de desgaste.

ABSTRACT

Rotary drilling is usually done with diamond-impregnated drill bits. These tools may present an unsatisfactory lifespan when working on a banded iron formation of Carajás-Brazil known as jaspilite, a complex material composed of alternated bands of silicates (jasper) and iron oxides (mostly hematite and goethite), besides quartz veins. The performance of these bits is linked to the interaction between diamond and jaspilite, which is poorly understood. The abrasive wear response of this tribosystem was investigated by a series of single-point scratch tests using Rockwell C, Vickers and Knoop diamond indenters as function of normal load (0.2-90 N). The effect of the distance between parallel scratches (ranging from 5 times the scratch width to total superimposition), scratching speed (0.01-1 mm/s) and environmental conditions (dry, distilled water and bentonite drilling fluid) on wear and friction behavior were studied with Vickers indenter. Severe wear by chipping and high friction (up to $\mu = 0.45$) was dominant in all loads with Vickers indenter, at lower speeds, in all degrees of superimposition and lubricated conditions. Mild wear mechanisms (burnishing, ploughing and scale-like cracking) and lower friction (as low as $\mu = 0.06$) were observed in tests with Rockwell and Knoop indenter, at high speeds and in iron oxides. Furthermore, the degree of superimposition had no effect on friction and wear mechanisms, although influenced wear rate.

Key words: Banded iron formations. Jaspilite. scratch test. wear mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Fotografia de testemunho de sondagem de jaspilito da Serra Norte de Carajás. Fonte: (PRADO *et al.*, 2016). Nota: Editado pelo autor.....27
- Figura 2 - Coeficiente de atrito em função do ângulo de ataque (α). Fonte: (CHALLEN e OXLEY, 1979). Nota: Editado pelo autor.31
- Figura 3 – Taxa de desgaste em função do ângulo de ataque (α). Fonte: (CHALLEN e OXLEY, 1979). Nota: Editado pelo autor.....31
- Figura 4 - Esquema representando a nucleação de trincas medianas e laterais, podendo culminar em chipping. Fonte: (LAWN e SWAIN, 1975). Nota: Editado pelo autor.33
- Figura 5 - Esquema representando o mecanismo de trincamento em materiais frágeis, sob carga pontual, em movimento relativo. Fonte: (SWAIN, 1979). Nota: Editado pelo autor.34
- Figura 6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de resposta moderada ao riscamento em forma de *burnishing* para a magnetita a 6 N. Fonte: (BESTE, LUNDEVALL E JACOBSON, 2004). Nota: a seta indica o sentido do risco.36
- Figura 7 - Deformação plástica macroscópica na alumina. Fonte: (BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988). Nota: a seta indica o sentido do risco, editado pelo autor.37
- Figura 8 - *Scale-like cracking* na alumina. Fonte: (BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988). Nota: a seta indica o sentido do risco, editado pelo autor.37
- Figura 9 – *In-track cracking* no Leptinito. Fonte: (BESTE, LUNDEVALL E JACOBSON, 2004). Nota: a seta indica o sentido do risco.....38
- Figura 10 - Sulcamento plástico e chipping na hematita. Fonte: (BESTE, LUNDEVALL E JACOBSON, 2004). Nota: a seta indica o sentido do risco.38

Figura 11 - Variação da taxa de desgaste de diferentes materiais em condições ambientais distintas com a carga normal. Fonte: (DESA e BAHADUR, 1999). Nota: Editado pelo autor.	39
Figura 12 – Gráfico apresentando a proporcionalidade entre carga normal e o quadrado da largura para diversos indentadores sobre o vidro comum. Fonte: (LI, SHAPIRO e LI, 1998). Nota: Editado pelo autor.....	40
Figura 13 - Variação da razão entre forças, tangencial e normal, com a carga normal para diferentes indentadores. Fonte: (LI, SHAPIRO e LI, 1998). Nota: Editado pelo autor.	40
Figura 14 - Representação esquemática dos ensaios variando a distância entre riscos. Fonte: (SILVA JÚNIOR E MELLO, 2009) Nota: Editado pelo autor.	41
Figura 15 – Ensaio variando o grau de superposição sob carga de 2 N. (A) Deformação plástica no grau de superposição de 0%. (B) Ausência de deformação plástica no grau de superposição de 98%. FONTE: (SALOTO, 2010). Nota: Editado pelo autor.	42
Figura 16 - Ensaio variando o grau de superposição sob carga de 5,7 N. (A) Grau de superposição de 0%. (B) Grau de superposição de 98%. FONTE: (SALOTO, 2010). Nota: Editado pelo autor.....	43
Figura 17 - Largura e profundidade do risco em função da carga normal. Fonte: (LI, SHAPIRO e LI, 1998). Nota: Editado pelo autor.....	44
Figura 18 - Desenho esquemático da unidade de esclerometria retilínea. Fonte: (CETR, 2009). Nota: Editado pelo autor.....	47
Figura 19 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) apresentando o desgaste da ponta de um dos indentadores Vickers. Fonte: autor.	48
Figura 20 - Representação esquemática da metodologia de análise dos dados do CETR para o coeficiente de atrito aparente em cada banda (jaspe e óxidos de ferro). Fonte: autor.....	52

Figura 21 - Imagem em 3D obtida através do analisador tridimensional de superfícies de dois riscos realizados com indentador Vickers e com carga normal de 5 N. Fonte: autor.....	53
Figura 22 - Perfil médio juntamente com a média da área da seção transversal do risco da esquerda da figura anterior. Fonte: autor.....	54
Figura 23 – Amostra de jaspilito como recebida, em forma de testemunho de sondagem. Fonte: autor.	55
Figura 24 - Amostra de jaspilito após o polimento apresentando a sua estrutura bandada. Fonte: autor.	56
Figura 25 - Micrografia óptica do jaspilito apresentando o jaspe (a) e os microconstituintes do veio ferrífero, claro (b) e escuro (c). Fonte: autor.	57
Figura 26 – Mapas de composição química via espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS) de uma região do jaspilito. (A) Oxigênio, (B) Ferro, (C) Silício, (D) Microscopia ótica e (E) MEV. Fonte: autor.	58
Figura 27 - Micrografia estereoscópica - Diamantes empregados em coroas diamantadas (esquerda) e indentador de diamante Vickers (direita). Fonte: autor. ...	60
Figura 28 – (A) <i>Burnishing</i> na banda ferrífera do jaspilito, 10 N. (B) ampliação de (A). Nota: as regiões mais escuras são microlamelas de jaspe e a seta branca indica o sentido do risco. Fonte: autor.....	61
Figura 29 – Imagem apresentando sulcamento plástico com preenchimento de vazios em risco sobre o veio férreo com indentador Rockwell, sob carga normal de 30 N. Nota: A região entre as linhas pretas representa a trilha de desgaste. Fonte: autor.....	62
Figura 30 – Imagem gerada pelo analisador tridimensional de superfícies do risco da figura anterior. Fonte: autor.....	62
Figura 31 - Parte inicial do risco com aumento progressivo da carga (0,2N até 10 N) com indentador Vickers (desgastado) sobre o veio ferrífero. Em (A), (MEV) as regiões pretas são jaspe, as cinza escuro, goethita e as cinza claro, hematita. (B)	

micrografia óptica. Nota: a seta amarela aponta o início do risco. E a branca, o sentido. Fonte: autor.	63
Figura 32 – Sulcamento plástico, na hematita (regiões claras) e goethita (regiões escuras), no risco com indentador Knoop. (A) Parte intermediária; (B) Parte final do risco com carga crescente (0,2-8 N). Nota: a seta indica o sentido do risco. Fonte: autor.	64
Figura 33 – Imagem do risco com aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com indentador Vickers desgastado sobre o veio ferrífero apresentando o mecanismo de <i>scale-like cracking</i> na hematita e <i>chipping</i> na goethita. Fonte: autor.	65
Figura 34 – MEV do risco de 9 N com indentador Rockwell. (A) Detector secundário e (B) retroespalhado. OBS: as setas pretas indicam a aparente remoção de pequenas partículas. As amarelas, o sentido do risco. Fonte: autor.	66
Figura 35 – Imagem com aumento progressivo da carga (0,2-10 N) com indentador Vickers sobre o jaspe. A linhas brancas mostram a discrepância na linearidade da largura do risco. Fonte: autor.	67
Figura 36 – Imagem do risco com aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com indentador Vickers (desgastado) sobre o veio ferrífero apresentando o mecanismo de <i>scale-like cracking</i> na hematita <i>out-of-track cracking</i> na goethita. Fonte: autor. ...	68
Figura 37 - Imagem do risco com aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com indentador Vickers desgastado sobre o veio ferrífero apresentando o mecanismo de <i>chipping</i> ou <i>out-of-track cracking</i> na goethita e hematita. Fonte: autor.	68
Figura 38 – Imagem de risco, com carga de 81 N e indentador Rockwell, apresentando trincamento fora trilha sobre jaspe (JP) e óxidos de ferro (OF). Fonte: autor.	69
Figura 39 - MEV – Rockwell – 60 N apresentando a influência do veio de quartzo no jaspe. A micrografia indica que os grãos tem granulometrias diferentes, possivelmente, devido ao metamorfismo de contato. Nota: A linha branca separa o veio de quartzo dos outros minerais, e a linha amarela separa a zona metaformizada da não metaformizada. Fonte: autor.	70

Figura 40 - Micrografia - Rockwell - 28 N - Veio de quartzo e sua influência. Transição entre sulcamento e trincamento fora da trilha no veio de hematita e trincamento fora da trilha no quartzo. Fonte: autor.....	71
Figura 41 – MEV – Rockwell - 90 N. Comparação da extensão do dano entre o veio de quartzo e os outros minerais e fratura conchoidal no quartzo. Nota: a seta indica o sentido do risco. Fonte: autor.	72
Figura 42 – Gráfico apresentando a dispersão da taxa de desgaste com a carga normal para hematita e jaspe. Indentador Vickers e 0,05 mm/s. Fonte: autor.	76
Figura 43 – Variação da taxa de desgaste específica com a carga normal para ambos os minerais. Fonte: autor.	77
Figura 44 – Coeficiente de atrito em função da carga normal, para ambos minerais, e diferentes condições do indentador Vickers (perfeito e desgastado). Fonte: autor. ...	78
Figura 45 – MEV dos riscos no grau de superposição de -20%.OBS: carga normal de 5 N e indentador Vickers. Fonte: autor.....	79
Figura 46 - MEV dos riscos no grau de superposição de 80 e 100%. OBS: carga normal de 5 N e indentador Vickers. Fonte: autor.	79
Figura 47 - Variação da taxa de desgaste com a distância entre riscos para o jaspe em três ensaios distintos. Fonte: autor.....	80
Figura 48 – Variação da taxa de desgaste com a distância entre riscos para o veio ferrífero em três ensaios distintos. Fonte: autor.	81
Figura 49 - Imagem em 3D e perfil médio, gerados via interferometria, dos riscos com grau de superposição de -100%. Fonte: autor.....	82
Figura 50 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de -20%. Fonte: autor.....	83
Figura 51 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 0%. Fonte: autor.....	84

Figura 52 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 20%. Fonte: autor.....	85
Figura 53 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 40%. Fonte: autor.....	86
Figura 54 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 60%. Fonte: autor.....	87
Figura 55 – Coeficiente de atrito em função do grau de superposição para o veio férreo. Fonte: autor.....	88
Figura 56- Coeficiente de atrito em função do grau de superposição para o jaspe. Fonte: autor.....	88
Figura 57 – Relação entre o coeficiente de atrito do primeiro risco e a média dos riscos restantes para cada grau de superposição, no primeiro ensaio, para o veio ferrífero. Fonte: autor.	89
Figura 58 - Relação entre o coeficiente de atrito do primeiro risco e a média dos riscos restantes para cada grau de superposição, no primeiro ensaio, para a o jaspe. Fonte: autor.....	90
Figura 59 – Micrografia no modo “campo claro” dos ensaios variando a velocidade sobre carga normal de 0,5 N. Fonte: autor.....	91
Figura 60 - Micrografia no modo “campo claro” dos ensaios variando a velocidade sobre carga normal de 1 N. Fonte: autor.....	92
Figura 61 – Micrografia no modo “campo claro” apresentando deformação plástica no risco realizado sob carga de 0,2 N e velocidade de 1 mm/s. Fonte: autor.	92
Figura 62 - Variação da carga normal durante o ensaio com a maior velocidade (0,2 N-1mm/s). Fonte: autor.	93
Figura 63 - Variação da taxa de desgaste específica com a velocidade para diferentes cargas normais. Nota: O desvio padrão das cargas é desprezível. Fonte: autor.	94

Figura 64 - Variação do coeficiente de atrito com a velocidade para diferentes cargas normais. Fonte: autor.	95
Figura 65 – Micrografia óptica no modo “campo claro” apresentando o aumento do destacamento de material nos ensaios com água de destilada em relação aos ensaios a seco. Nota: As partes escuras do risco são mecanimos de desgaste dúcteis. Fonte: autor.....	96
Figura 66 – Micrografia óptica no modo “campo claro” apresentando o aumento do destacamento de material nos ensaios com solução de água de destilada e bentonita em relação aos ensaios a seco. Nota: As partes escuras do risco são mecanimos de desgaste dúcteis. Fonte: autor.....	97
Figura 67 – Variação da taxa de desgaste específica com as condições ambientais, para 0,2 e 1 N. Fonte: autor.	98
Figura 68 - Variação coeficiente de atrito aparente com as condições ambientais, para 0,2 e 1 N. Fonte: autor.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos mais comuns na crosta terrestre. Fonte: (THOMPSON e TURK, 1997). Nota: Transcrito pelo autor.	22
Tabela 2 - Atrito em mecanismos severos e moderados. Fonte: (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004). Nota: Transcrito pelo autor.	35
Tabela 3 – Indentadores e respectivas configurações utilizadas nos ensaios. Fonte: autor.	48
Tabela 4 – Comparação entre comprimentos de onda medidos e publicados. Nota: Os valores sublinhados e em negrito correspondem as maiores amplitudes medidas já os valores apenas sublinhados representam as segundas maiores medidas e as principais publicadas. Fonte: autor.	59
Tabela 5 – Intervalo de cargas, em Newton, de ocorrência de mecanismos para cada condição. Fonte: autor.	73
Tabela 6 - Estimativa do coeficiente de atrito aparente (μ) em cada configuração. Fonte: autor.	75

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de ataque
μ	Coefficiente de atrito aparente ou coulombiano
f	Resistência do filme interfacial
D	Distância entre riscos
K_{IC}	Fator intensidade de tensões
DS	Grau de superposição
SW	Largura do risco

LISTA DE SIGLAS

ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
JP	Jaspe
LCSM	Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais
LFS	Laboratório de fenômenos de superfície
MEV	Microscopia ou microscópio eletrônico de varredura
OF	Óxidos de ferro
TNT	Trincamento na trilha
TRICORRMAT	Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 MINERAIS E ROCHAS	22
2.1.1 Classificação dos minerais	23
2.1.1.1 Nativos.....	23
2.1.1.2 Óxidos	24
2.1.1.3 Hidróxidos.....	24
2.1.1.4 Silicatos	24
2.1.2 Classificação de rochas	25
2.1.2.1 Formações ferríferas bandadas.....	26
2.2 TRIBOLOGIA	28
2.2.1 Atrito	28
2.2.2 Desgaste	30
2.3 CARACTERIZAÇÃO DE CERÂMICOS E ROCHAS VIA ESCLEROMETRIA LINEAR	32
2.3.1 Mecanismos de desgaste	34
2.3.2 Resposta à carga normal	39
2.3.3 Resposta à distância entre riscos	40
2.3.4 Resposta à velocidade tangencial e condições ambientais	43
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	46
3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	46
3.2 ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA RETILÍNEA	46
3.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CARGAS CRÍTICAS DE TRANSIÇÃO DE MECANISMOS.....	48
3.4 ENSAIOS VARIANDO A CARGA NORMAL	49

3.5 ENSAIOS VARIANDO O GRAU DE SUPERPOSIÇÃO	49
3.6 ENSAIOS VARIANDO AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS.....	50
3.7 ENSAIOS VARIANDO A VELOCIDADE TANGENCIAL	51
3.8 METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	51
3.8.1 Avaliação dos dados do microtribômetro.....	51
3.8.2 Avaliação dos mecanismos de desgaste.....	52
3.8.3 Avaliação da taxa de desgaste	53
3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA (JASPILITO) ..	55
4.2 DIAMANTES EMPREGADOS NAS COROAS	59
4.3 MECANISMOS DE DESGASTE E CARGAS CRÍTICAS DE TRANSIÇÃO.....	60
4.3.1 Mecanismos de desgaste	60
4.3.2 Cargas críticas de transição de mecanismos.....	72
4.3.3 Atrito.....	74
4.4 ENSAIOS VARIANDO A CARGA NORMAL	75
4.4.1 Desgaste	75
4.4.2 Atrito.....	77
4.5 ENSAIOS VARIANDO A DISTÂNCIA ENTRE RISCOS.....	78
4.5.1 Mecanismos de desgaste	78
4.5.2 Desgaste	80
4.5.3 Atrito.....	87
4.6 ENSAIOS VARIANDO A VELOCIDADE	90
4.6.1 Mecanismos de desgaste.....	90
4.6.2 Desgaste	93
4.6.3 Atrito.....	94

4.7 ENSAIOS VARIANDO AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS.....	95
4.7.1 Mecanismos de desgaste	95
4.7.2 Desgaste	97
4.7.3 Atrito.....	98
5 CONCLUSÕES	100
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
7 REFERÊNCIAS.....	102

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui enorme tradição em extração mineral, tendo atualmente grande participação na produção de alguns minérios como: minério de ferro, tantalita, bauxita, amianto, grafita, dentre outros (FARIAS e COELHO, 2002). Em 2015, o valor da produção mineral brasileira foi estimado em R\$ 78,7 bilhões (INFORME MINERAL, 2015).

Antes das etapas que caracterizam a lavragem da mina, ou seja, a extração das riquezas minerais do subsolo, é necessária a realização da prospecção geológica que consiste na averiguação dos tipos e do teor de minério presentes. Uma maneira comumente utilizada para efetuar essa etapa é chamada de sondagem amostradora ou testemunhada, que é concebida através de perfuratrizes que retiram a amostra ou testemunho do solo para a posterior análise em laboratório. A parte da perfuratriz responsável pelo corte da rocha é chamada broca ou coroa diamantada (TOTTOLA, 2007).

A coroa é constituída basicamente de uma matriz metálica com diamantes dispersos. A matriz metálica tem por finalidade dar sustentação aos diamantes ao mesmo tempo em que é moderadamente desgastada para expor novos diamantes que são responsáveis pelo corte da rocha (MENAGÁZ, 2008). Esse processo de sondagem é geralmente realizado sob lubrificação. O lubrificante possui diversas finalidades, como, a retirada das partículas de rocha oriundas do processo de corte e resfriamento da ferramenta. A velocidade de corte e de avanço, também, são parâmetros de sondagem, sendo modificadas de acordo com o tipo de rocha, além da morfologia e quantidade de diamantes (TOTTOLA, 2007).

Tottola (2007), Menegáz (2008) e Gava *et al.* (2013) foram bem sucedidos na caracterização tribológica de diferentes matrizes metálicas dessa ferramenta, o que resultou em um aumento de seu desempenho em campo.

A fim de desenvolver uma nova ferramenta com desempenho superior, é necessário compreender as características do tribossistema e os mecanismos de desgaste envolvidos. Porém, os mecanismos de desgaste de ferramentas sinterizadas utilizadas em sondagem mineral são complexos e sensíveis ao tipo de rocha. Logo,

para entender os mecanismos de desgaste dessas ferramentas é fundamental compreender como a rocha (e seus diferentes tipos de minerais) responde à abrasão severa (BESTE, LUNDVALL e JACOBSON, 2004).

Foram tomados como base, para realização desse trabalho, os estudos realizados por Beste, Lundvall e Jacobson (2004), que constituíram na caracterização de diversos tipos de rocha, e seus mecanismos de desgaste, determinando as respectivas cargas críticas de transição para cada mineral via ensaios de esclerometria linear.

Nesse trabalho, uma primeira aproximação tribológica do jaspilito originário da Serra de Carajás, no estado do Pará, Brasil, foi realizada. O jaspilito é uma formação ferrífera bandada, constituída comumente de bandas de jaspe e óxidos de ferro além de veios de quartzo. Essa rocha foi selecionada devido ao baixo desempenho da coroa diamantada quando em contato com esse tipo de litologia, além da escassez literária acerca de seu comportamento tribológico.

Indentadores de diamante de diferentes morfologias foram utilizados na caracterização do jaspilito, de maneira a entender a influência desse parâmetro (ângulo de ataque e raio da ponta) no atrito e no desgaste. O efeito da carga normal e da velocidade de riscamento, também, foi estudado e a resposta tribológica da rocha avaliada. Um fluido de perfuração comumente utilizado, constituído de água mais 4% em peso de bentonita, foi utilizado como meio interveniente no contato entre diamante e rocha e, o comportamento tribológico dessa última, sob essas condições, foi comparado com ensaios realizados a seco e sob água destilada.

Buscando compreender a complexa influência da densidade de diamantes nas coroas, ensaios variando a distância entre riscos foram efetuados, baseando-se em um critério denominado “grau de superposição” proposto por Silva Júnior e Mello (2009).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MINERAIS E ROCHAS

Segundo Thompson e Turk (1997), um mineral é um sólido inorgânico de ocorrência natural com composição química definida e estrutura cristalina característica. Quando é viável a extração de metais de interesse econômico, o mineral é chamado de minério.

Rochas são agregados de minerais intimamente ligados devido a diversos fatores geológicos. Em algum nível, uma rocha sempre será heterogênea. (TEIXEIRA et al., 2003)

Os oitenta e oito elementos químicos que ocorrem naturalmente na crosta terrestre, quando combinados, formam aproximadamente três mil e quinhentos minerais diferentes. No entanto, apenas oito desses elementos representam, quando somados, a maior parte da massa da crosta terrestre (Tabela 1). O que torna boa parte desses minerais, minerais raros (THOMPSON E TURK, 1997).

Tabela 1 - Elementos mais comuns na crosta terrestre. Fonte: (THOMPSON e TURK, 1997).

Nota: Transcrito pelo autor.

Elemento	Porcentagem em peso
O	46,6
Si	27,72
Al	8,13
Fe	5
Ca	3,63
Na	2,83
K	2,59
Mg	2,09
Total	98,59

2.1.1 Classificação dos minerais

Os minerais que não possuem ânions em sua composição química são classificados como nativos. Ouro e platina são exemplos de minerais pertencentes a esse grupo. O restante dos minerais é classificado de acordo com seus respectivos ânions. Minerais com mesmo ânion têm propriedades mais próximas do que minerais com mesmo cátion, além de serem comumente formados em regiões geologicamente parecidas. Os minerais são usualmente divididos em 12 classes, são elas: elementos nativos; sulfetos; sulfossais; óxidos; haloides; carbonatos; nitratos; boratos; sulfatos e cromatos; fosfatos arseniados e vanadatos; tungstos e molibdatos; silicatos. Essas classes serão subdivididas em famílias, grupos e espécies, que podem ser constituídas de séries de minerais com mesma estrutura cristalina, porém com composições químicas diferentes (KLEIN e DUTROW, 2001).

2.1.1.1 Nativos

Com exceção dos gases atmosféricos, somente cerca de 20 elementos são encontrados em estado puro na natureza, esses elementos podem ser divididos em: metais, semimetais e ametais. O diamante pertence a esse último. Esse mineral tem uma estrutura robusta, em que cada átomo de carbono está conectado por ligações covalentes de alta energia de ligação com quatro átomos de carbono vizinhos em forma tetraédrica. Apesar das ligações serem extremamente fortes, a estrutura cristalina cúbica é pouca densa, com fator de empacotamento de apenas 34% (KLEIN e DUTROW, 2001).

2.1.1.2 Óxidos

Os minerais óxidos incluem os compostos naturais em que o oxigênio se encontra combinado com um ou mais metais. Dentro desse grupo, encontram-se minerais de grande importância econômica como os óxidos de ferro. A hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), o tipo mais comum de óxido de ferro, tem ligações predominantemente iônicas e estrutura cristalina do tipo hexagonal (KLEIN e DUTROW, 2001).

2.1.1.3 Hidróxidos

Todos os minerais deste grupo são caracterizados pela presença do radical hidroxila (OH^-) ou moléculas de H_2O . As forças de ligação dos minerais desse grupo são enfraquecidas pela presença da hidroxila, tornando-as muito mais fracas que as dos óxidos. A goethita ($\alpha\text{-FeO(OH)}$), mineral pertencente a este grupo, possui, além de ligações iônicas, fraquíssimas ligações do tipo ponte de hidrogênio e estrutura ortorrômbica (KLEIN e DUTROW, 2001).

2.1.1.4 Silicatos

Os silicatos representam a grande maioria dos minerais na crosta terrestre. A estrutura molecular de todos os silicatos é formada por quatro átomos de oxigênio em forma de um tetraedro ligados a um átomo de silício no centro. Suas ligações químicas são parte covalente, parte iônica. Quando todos os quatro oxigênios desse tetraedro são compartilhados com outro tetraedro, uma rede tridimensional estável e fortemente ligada é formada. Esses silicatos estruturados são chamados de tectossilicatos. Essa estrutura pode ser arranjada de nove maneiras distintas, dando origem a nove polimorfos. Um deles é o quartzo alfa ($\alpha\text{-SiO}_2$), que possui estrutura cristalina hexagonal. Um mineral formado por microgrãos de quartzo conhecido

como calcedônia, quando contaminado por inclusões de hematita, toma uma coloração avermelhada dando origem a um agregado de minerais conhecido como jaspe (KLEIN e DUTROW, 2001).

2.1.2 Classificação de rochas

Existem três tipos principais de rochas na crosta terrestre, distinguidas pelo seu tipo de formação, são elas: rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.

Sob certas condições, rochas do manto superior e da crosta inferior se fundem, dando origem a um líquido conhecido como magma. Uma rocha ígnea ou magmática se forma quando o magma resfria e se solidifica. Quando o magma é solidificado no interior da terra, as rochas originárias são chamadas de intrusivas. Como essas rochas não entram em contato com a atmosfera o seu resfriamento é lento, tendo assim, tempo hábil para cristalização e crescimento dos grãos. Já quando o magma se solidifica em contato com a atmosfera, o resfriamento é rápido. O tempo para o crescimento dos grãos é pequeno, sendo, às vezes, insuficiente, dando origem a rochas sem estrutura cristalina ou com granulometria muito fina. Estas rochas são chamadas de extrusivas.

Todas as rochas, principalmente quando em contato com a superfície, estão sujeitas a algum tipo de deterioração, gerando pequenos fragmentos de rochas que são transportados, principalmente pela chuva e vento, e acabam por serem depositados em camadas, chamadas de sedimentos. Uma rocha sedimentar é formada quando esses sedimentos são compactados e litificados formando uma estrutura coesa. Esse tipo de sedimentação, que é o mais comum, dá origem a rochas chamadas de sedimentares clásticas. Quando a rocha é formada por sedimentos de origem orgânica, essas são denominadas sedimentares orgânicas. Quando são formadas pela compactação de precipitados de alguma solução, são chamadas rochas sedimentares químicas. Um tipo especial de rochas sedimentares são as bioclásticas, que são compostas de sedimentos formados por organismos vivos, como conchas de moluscos.

Uma rocha metamórfica é formada quando uma litologia preexistente tem sua estrutura e minerais alterados através de fontes de calor e pressão.

Existem quatro tipos de metamorfismo. O metamorfismo de contato ocorre quando o magma entra em contato direto com a rocha. Metamorfismo de carga acontece em rochas que estão sobre grande quantidade de sedimento, gerando alteração dessas devido às altíssimas pressões. Já o metamorfismo regional ocorre em regiões próximas à movimentação de placas tectônicas. Por fim, o metamorfismo hidrotermal gerado pelo contato com a água, que é uma substância quimicamente ativa com a maioria dos minerais, se a água estiver em alta temperatura e com íons dissolvidos, a alteração hidrotermal será ainda mais rápida, alterando quimicamente a rocha e seus minerais (THOMPSON e TURK, 1997).

2.1.2.1 Formações ferríferas bandadas

A maior parte do ferro comercializado no mundo tem origem nas formações ferríferas bandadas. Essas formações são rochas sedimentares químicas, têm alta resistência à erosão e são encontradas em várias partes do planeta. (MACAMBIRA e SCHRANK, 2002).

A Província Mineral de Carajás se encontra no estado do Pará, Brasil. Nessa província, encontram-se aproximadamente 18 bilhões de toneladas de ferro, configurando-a como um dos maiores depósitos do mundo. Na parte norte dessa província, encontra-se o cinturão Itacaiúnas. Dentre as rochas que compõem esse cinturão está o jaspilito de Carajás. (DOCEGEO, 1988; MACAMBIRA e SCHRANK, 2002, ARAÚJO *et al.*, 1988)

Os jaspilitos da Serra Norte de Carajás são formações ferríferas bandadas com lamelas, da ordem de centímetros, alternadas entre óxidos ferro e jaspe vermelho, veios de quartzo são comumente encontrados (Figura 1). O teor de ferro dessa litologia varia entre 20 e 40%. Os jaspilitos não foram afetados por transformações metamórficas regionais, o que justifica a presença de quartzo microcristalino (MACAMBIRA e SCHRANK, 2002; PRADO *et al.* 2016).

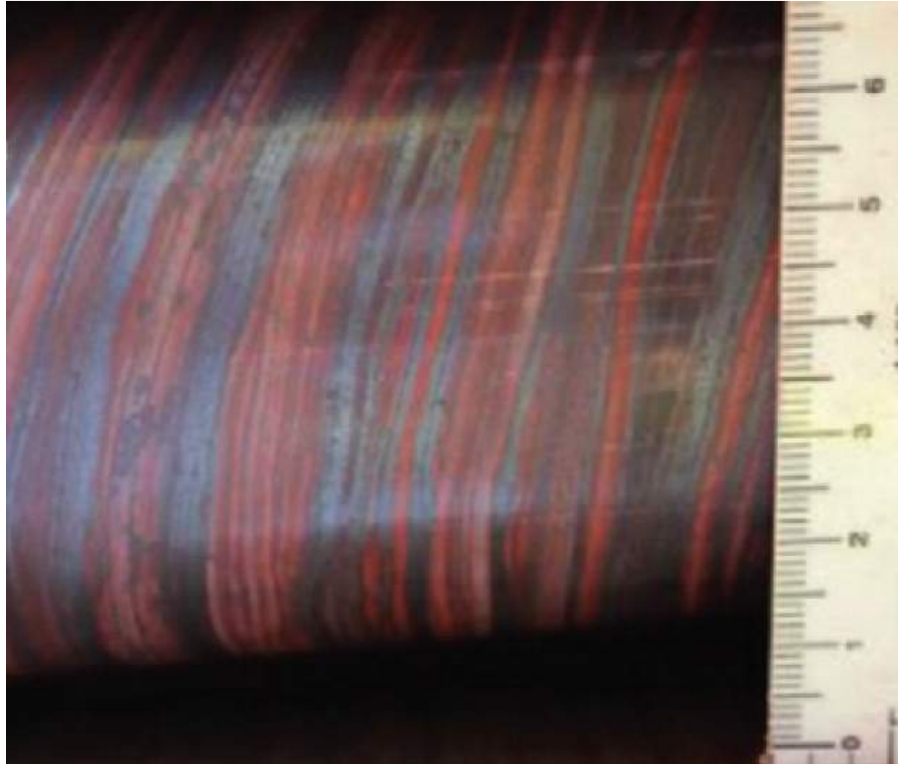


Figura 1 - Fotografia de testemunho de sondagem de jaspilito da Serra Norte de Carajás. Fonte: (PRADO *et al.*, 2016). Nota: Editado pelo autor.

Uma das principais hipóteses para gênese dos jaspilitos consiste na precipitação de ferro e silício de fontes oceânicas enriquecidas por soluções hidrotermais. Essa solução ferro e silício, quando levada a águas mais rasas, ricas em oxigênio, através de fenômenos de ressurgência oceânica, desencadearia a oxidação e precipitação do ferro. O silício seria precipitado por supersaturação de forma praticamente ininterrupta. As fontes de oxigênio seriam de origem orgânica, e uma variação da quantidade de nutrientes poderia ser responsável pela escassez de oxigênio, limitando a oxidação do ferro, esse fenômeno aconteceria de forma cíclica, conferindo ao jaspilito sua característica bandada (MACAMBIRA e SCHRANK, 2002).

Os jaspilitos da serra norte de Carajás deram origem aos minérios de ferro de alto teor (maior que 60%), através da lixiviação das bandas de sílica via processos de alteração hidrotermal. Entre os jaspilitos inalterados e os minérios existem zonas gradativas de alteração hidrotermal, quanto maior o nível de alteração, maior a quantidade de goethita e menor a de jaspe (FIGUEIREDO e SILVA *et al.*, 2013; ABREU, MACAMBIRA e CABRAL, 2016).

2.2 TRIBOLOGIA

Tribologia é definida como “[...] a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo”, e engloba o estudo do atrito, desgaste e lubrificação. (HUTCHINGS, 1992).

2.2.1 Atrito

O coeficiente de atrito coulombiano é resultado da razão entre forças, tangencial e normal, e independente da área de contato e da velocidade. Porém nem sempre essas prerrogativas são verificadas.

A força de atrito pode ser definida como a resistência ao movimento relativo e aumenta com as interações dos sólidos na área real de contato entre os mesmos (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS, 1992).

O coeficiente de atrito pode variar desde valores como 0,001 em rolamentos, sob baixas condições de carregamento, até 10 para metais extremamente limpos e polidos deslizando contra si mesmos no vácuo (HUTCHINGS, 1992).

Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas do material e, sim, características do tribossistema (ZUM GAHR, 1987), ou seja, o atrito depende não só das propriedades do material, mas, geralmente, dependem também de inúmeras outras características, como: temperatura, carga normal, umidade relativa, velocidade, entre outras.

A relação entre atrito e desgaste depende de como a energia aplicada ao movimento é dissipada. Existem diversas maneiras de dissipação dessa energia, dentre elas:

- Aquecimento pelo atrito;
- Formação e ruptura de junções adesivas;
- Ordenamento e desordenamento de espécies moleculares nas superfícies;

- Deformação elástica e/ou plástica;
- Geração de ondas sonoras ou vibrações;
- Fratura;
- Criação de defeitos ou transformações de fases;
- Reações químicas superficiais (triborreações);
- Perdas viscosas no meio interveniente (caso exista);
- Compressão e redistribuição de partículas de desgaste na interface. (BLAU, 2008)

Materiais cerâmicos, como os minerais e suas litologias, permitem muito menos deformação plástica do que materiais metálicos, isso se deve as diferenças entre os tipos de ligação de cada grupo, sendo ligações iônica e/ou covalentes em materiais cerâmicos e ligações metálicas nos metais (HUTCHINGS, 1992).

Briscoe e Stolarski (1993) afirmaram que o atrito em materiais frágeis, mesmo quando mecanismo vigente for sulcamento plástico, estará associado ao trincamento. No entanto, em condições moderadas de deslizamento onde não há desgaste significativo, a energia relativa ao atrito será dissipada através do cisalhamento dos filmes interfaciais compostos de umidade adsorvida e outras impurezas.

Diferenças na taxa de desgaste, quantidade de matéria removida, podem afetar o atrito. Assim como a ocorrência de fratura pode aumentá-lo devido a existência de um mecanismo adicional para dissipação da energia gerada pelo atrito (BLAU, 2009; HUTCHINGS, 1992).

2.2.2 Desgaste

Enquanto o atrito é uma forma de dissipação de energia, o desgaste é uma forma de dissipação de matéria, podendo ou não, essa última, ser perdida (ZUM GAHR, 1987).

Superfícies usualmente desgastam através de dois ou mais processos simultâneos. O equilíbrio entre esses processos pode mudar continuamente, com o tempo e durante mudanças no ciclo de operação. É complicado obter-se equações que descrevam o fenômeno de desgaste em nível prático (LUDEMA, 1996).

Segundo Zum Gahr (1987) desgaste abrasivo é o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias duras em uma ou em ambas as superfícies em movimento relativo. Diferentes processos físicos podem estar envolvidos na abrasão, dependendo dos materiais a serem desgastados e das condições operacionais como o tipo de partículas abrasivas, ângulo de ataque e etc.

Challen e Oxley (1979) e Hokkirigawa e Kato (1988) descreveram matematicamente e experimentalmente, respectivamente, a influência do ângulo de ataque (α) no atrito (Figura 2) e no desgaste abrasivo (Figura 3) de materiais que apresentam plasticidade, para diferentes resistências do filme interfacial (f), onde essas resistências são definidas como a razão entre a tensão necessária para o cisalhamento do filme interfacial e a tensão necessária para ocorrência de cisalhamento do material e concluíram que e ângulos de ataque rasos induzem a deformação plástica, além de menores coeficientes de atrito.

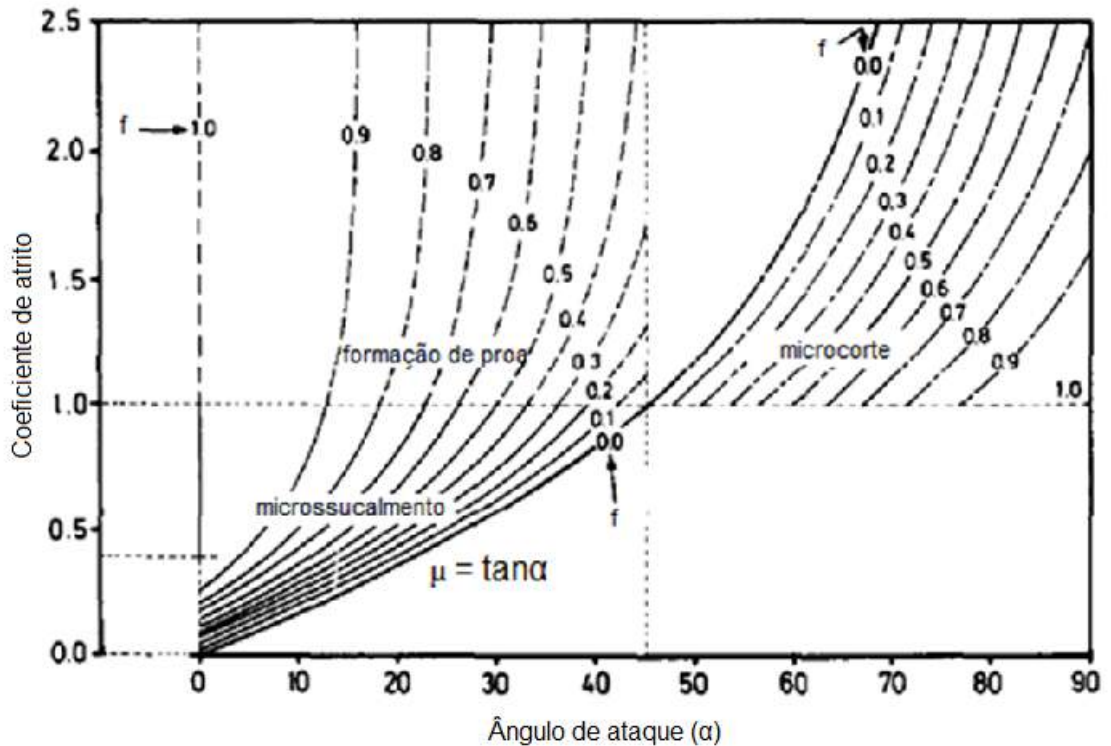


Figura 2 - Coeficiente de atrito em função do ângulo de ataque (α). Fonte: (CHALLEN e OXLEY, 1979). Nota: Editado pelo autor.

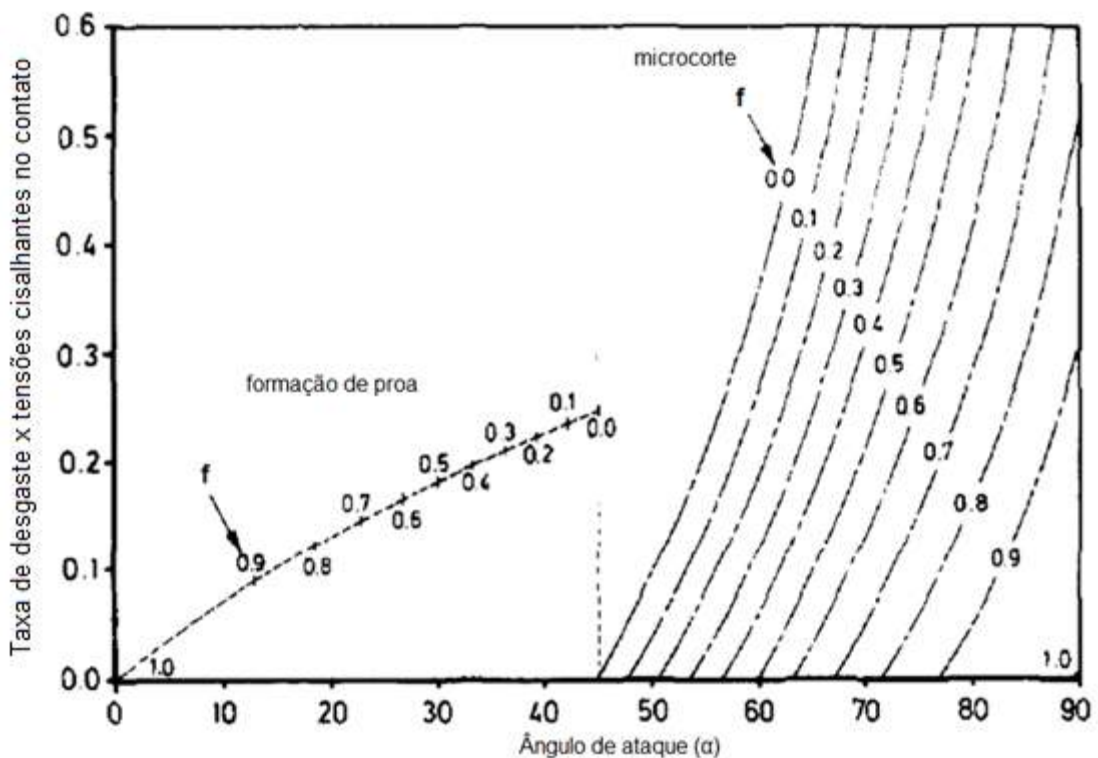


Figura 3 – Taxa de desgaste em função do ângulo de ataque (α). Fonte: (CHALLEN e OXLEY, 1979). Nota: Editado pelo autor.

Tratando-se de desgaste de materiais frágeis, o micromecanismo de desgaste chamado de microtrincamento não pode ser negligenciado. A penetração de uma

partícula dura em uma superfície frágil pode resultar no trincamento dessa superfície. A extensão da trinca depende da tenacidade à fratura do material, das condições de carregamento e do tamanho e forma da partícula. Frequentemente, materiais possuem defeitos em seu interior em forma de microtrincas preexistentes ou poros, que amplificam fortemente as tensões aplicadas externamente. As tensões resultantes podem ser de uma a duas ordens de grandeza maiores que as tensões aplicadas (ZUM GAHR, 1987).

O tamanho dos grãos pode ser um fator importante no que tange à energia crítica para a fratura de materiais cerâmicos. Microtrincas que são, inicialmente, nucleadas nas proximidades de defeitos preexistentes, como trincas, podem reduzir a energia de deformação disponível para a fratura. Porém, com o aumento do tamanho de grão, a extensão do microtrincamento pode aumentar e o crescimento dessas microtrincas pode produzir uma conexão entre as mesmas, dando origem a um macrotrincamento, reduzindo, desta maneira, a energia necessária para a fratura do material. (RICE, FREIMAN e BECHER, 1981).

Klecka e Subhash (2007) observaram maiores taxas de desgaste para maiores tamanhos de grão em ensaios de esclerometria pendular sob alumina com indentador de diamante. Esse efeito foi atribuído a possível presença de defeitos de maiores tamanhos em granulometrias maiores.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DE CERÂMICOS E ROCHAS VIA ESCLEROMETRIA LINEAR

A geometria do contato de um material frágil com um indentador pode resultar em grandes diferenças relativas à fratura. Um indentador com grande raio de ponta gera um campo elástico de tensões no contato diferente de um indentador afiado, esse último pode gerar uma singularidade no campo de tensões (LAWN e WILSHAW, 1975).

Essa singularidade, segundo Lawn e Swain (1975), (Figura 4), gera uma zona de deformação plástica abaixo do ponto de contato (4.a), que aumenta com a carga

normal até um estágio crítico de concentração de tensões onde uma trinca mediana se propaga (4.b). Essa trinca continua a crescer à medida que a carga é aumentada (4.c). Quando a carga começa a ser retirada, a trinca mediana começa a se fechar (4.d) e as tensões residuais oriundas desse processo alteram o campo de tensões induzindo, assim, a nucleação de trincas laterais (4.e). À medida que a carga normal continua a ser retirada, essas trincas se estendem ainda mais, podendo culminar em destacamento da matéria através de *chipping* (4.f).

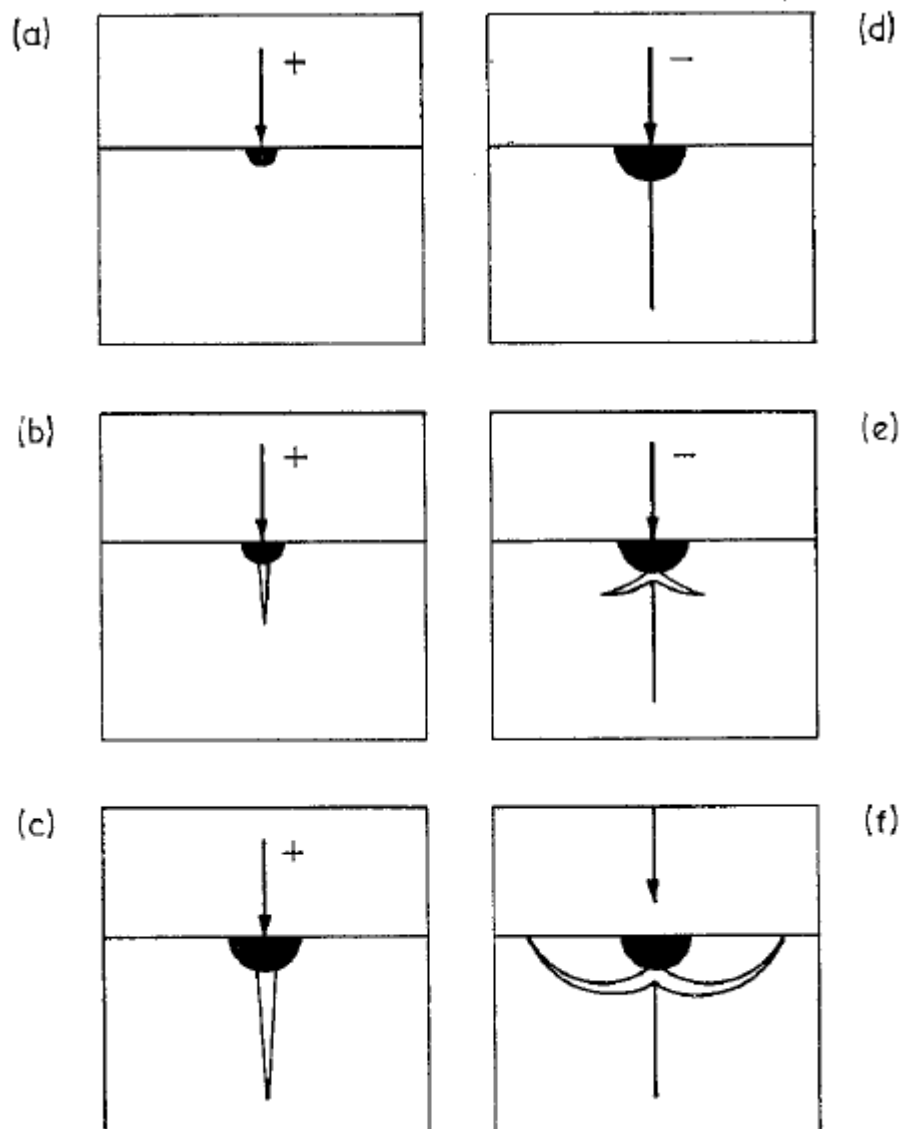


Figura 4 - Esquema representando a nucleação de trincas medianas e laterais, podendo culminar em *chipping*. Fonte: (LAWN e SWAIN, 1975). Nota: Editado pelo autor.

Swain (1979) afirmou que o mecanismo de fratura para um contato pontual em movimento relativo é similar ao de um indentador quase estático (Figura 5).

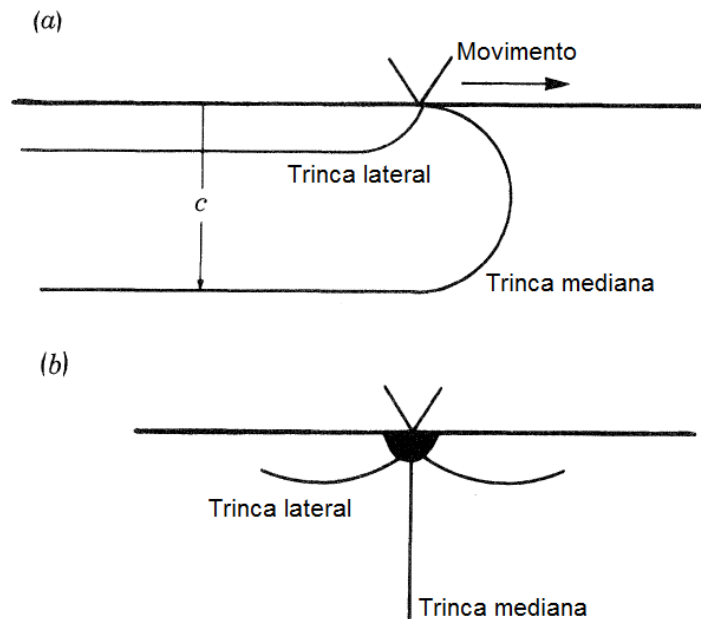


Figura 5 - Esquema representando o mecanismo de trincamento em materiais frágeis, sob carga pontual, em movimento relativo. Fonte: (SWAIN, 1979). Nota: Editado pelo autor.

Desa e Bahadur (1999) usaram a esclerometria linear para entender o comportamento de cerâmicos submetidos a processos abrasivos como retífica e polimento em meios lubrificados. Segundo esses autores, apesar da complexidade envolvida nesses processos, o ensaio de riscamento por uma única aspereza dura, em carga elevadas, poderá amplificar a extensão do dano sem sofrer influências de eventos adjacentes, facilitando, dessa maneira, a compreensão dos mecanismos de remoção de matéria envolvidos. De acordo com Hogan *et al.* (2012), o ensaio de riscamento é largamente utilizado para simular processos de corte onde o contato pontual de abrasivos é observado, incluindo os processos que envolvem movimentação de terra, como por exemplo, a perfuração e sondagem.

2.3.1 Mecanismos de desgaste

Beste, Lundvall e Jacobson (2004) buscaram compreender a resposta de diversos tipos de rochas quando em contato com um indentador, sinterizado, constituído de

carbeto de tungstênio mais 7% em peso de cobalto, em movimento relativo. Como resultado, vários mecanismos de desgaste foram notados, variando com o tipo de rocha e a carga normal aplicada. Além disso, também foi observada uma correlação entre mecanismos de desgaste e atrito, sendo maiores coeficientes de atrito para mecanismos de desgaste mais severos (Tabela 2).

Tabela 2 - Atrito em mecanismos severos e moderados. Fonte: (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004). Nota: Transcrito pelo autor.

Rocha	Atrito em mecanismos moderados	Atrito em mecanismos severos
Calcita	0,20-0,27	0,6-0,9
Micaxisto	0,40-0,50	0,4-1,0
Magnetita	0,35-0,42	0,4-0,9
Leptinito	0,40-0,45	0,4-0,7
Arenito	0,25-0,40	0,4-1,1
Hematita	0,15-0,25	0,3-0,6
Granito	0,25-0,40	0,4-1,3

Diferentes respostas ao risco, de dúcteis a frágeis, foram notadas por Bi, Tokura e Yoshikawa (1988) em ensaios de esclerometria linear sobre alumina com penetradores de diamante.

Nesses dois últimos trabalhos, os autores realizaram ensaios de riscamento de passe único, além de analisarem os mecanismos de desgaste na superfície dos materiais. Esses mecanismos são brevemente explicados nos parágrafos abaixo:

A resposta ao risco denominada *burnishing* é caracterizada por ausência de trincamento e diminuta deformação plástica, também é possível atribuir, a esse mecanismo, a remoção de pequenas partículas, como ilustra a Figura 6 (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004).

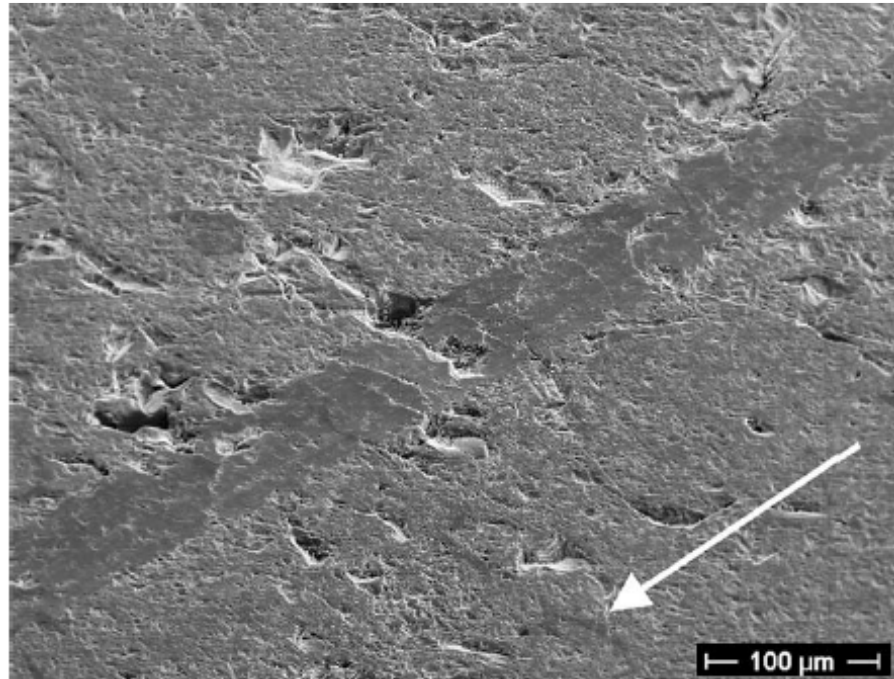


Figura 6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de resposta moderada ao riscamento em forma de *burnishing* para a magnetita a 6 N. Fonte: (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004). Nota: a seta indica o sentido do risco.

Quando a deformação plástica é mais extensiva, sendo parte dessa deformação transformada em *ridges* (deslocamento plástico de material para as bordas do risco), e o restante se adentrando nos contornos de grão, poros e espaços vazios, o fenômeno é chamado de deformação plástica macroscópica ou sulcamento plástico, Figura 7, (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004; BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988). Esse tipo de reposta também foi notado por Axén, Kahlman e Hutchings (1997).

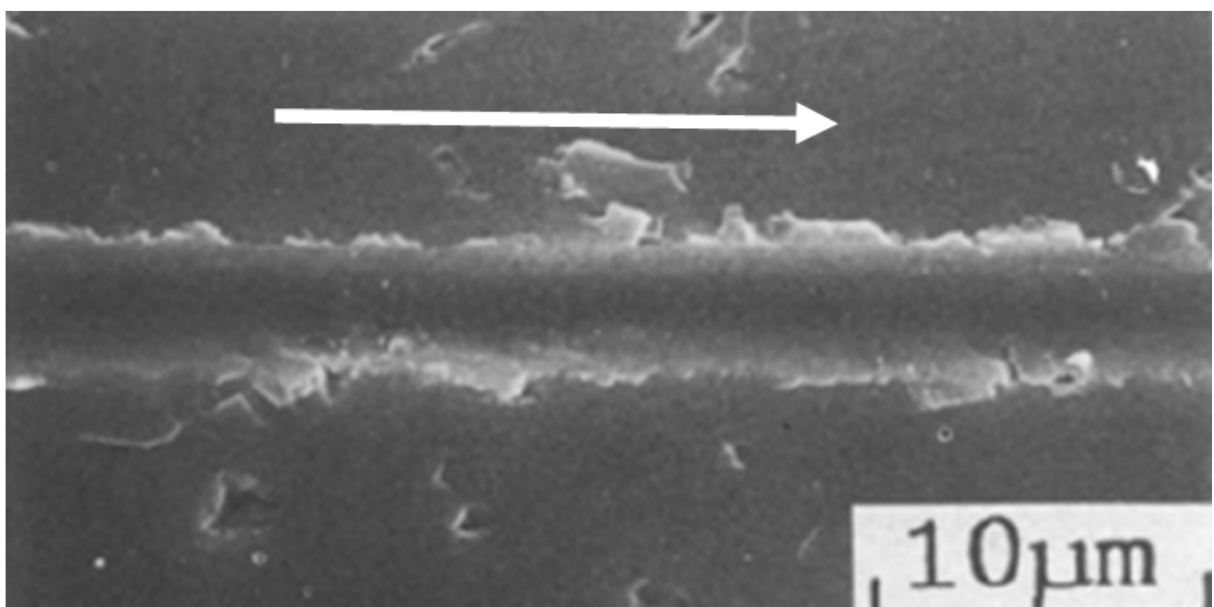


Figura 7 - Deformação plástica macroscópica na alumina. Fonte: (BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988). Nota: a seta indica o sentido do risco, editado pelo autor.

Com o aumento da carga, em alguns experimentos onde foi notado inicialmente o mecanismo de sulcamento plástico, foi possível verificar o surgimento de trincas perpendiculares ao risco com formato de escamas e alguma remoção de matéria através de *chipping*, Figura 8. Esse mecanismo, denominado *scale-like cracking* foi primeiramente identificado por Bi, Tokura e Yoshikawa (1988).

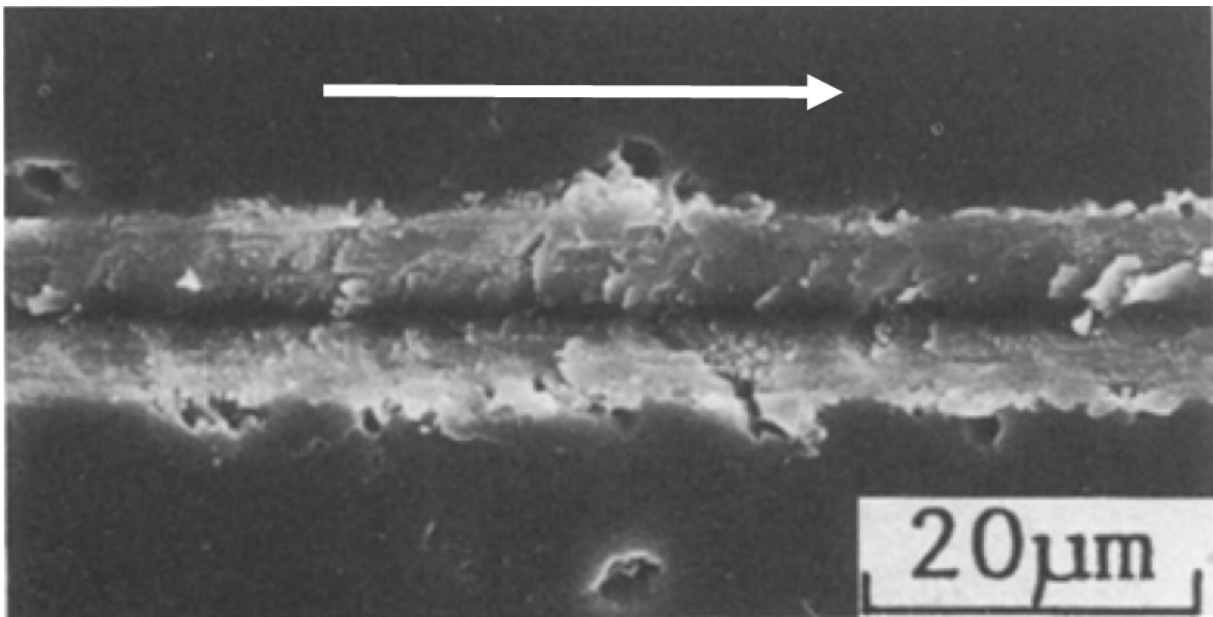


Figura 8 - *Scale-like cracking* na alumina. Fonte: (BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988). Nota: a seta indica o sentido do risco, editado pelo autor.

Segundo Beste, Lundvall e Jacobson (2004), à medida que a carga é aumentada em rochas ou minerais mais frágeis, o riscamento levará à formação de trincas e pequenos destacamentos na trilha de desgaste (Figura 9). Essas trincas podem ser paralelas ou perpendiculares à direção do risco, caracterizando o *in-track cracking* ou trincamento na trilha (TNT).

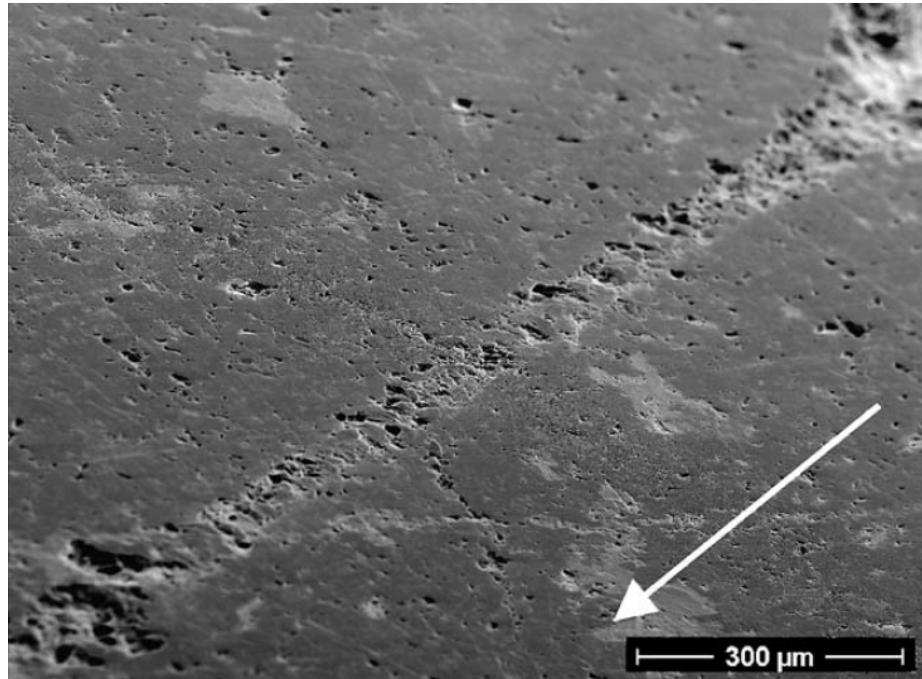


Figura 9 – *In-track cracking* no Leptinito. Fonte: (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004).
Nota: a seta indica o sentido do risco.

Finalmente, com o aumento ainda maior da carga em materiais frágeis, como as rochas, o trincamento poderá se estender além da trilha de desgaste, Figura 10. Esse tipo de mecanismo, também conhecido como *chipping* ou *out-of-track cracking* leva a uma alta taxa de remoção de material e fragmentação (Beste *et al.*, 2004; BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988).

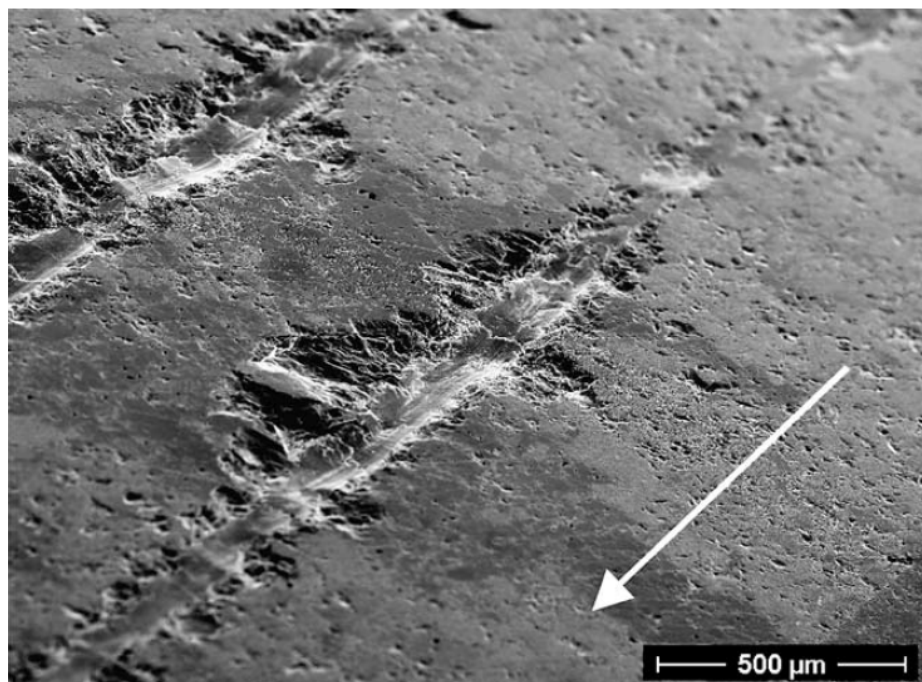


Figura 10 - Sulcamento plástico e chipping na hematita. Fonte: (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004). Nota: a seta indica o sentido do risco.

2.3.2 Resposta à carga normal

Desa e Bahadur (1999) observaram um aumento da taxa de desgaste com a carga normal em ensaios de esclerometria linear com indentador de diamante Vickers para alumina e nitreto de silício (Figura 11).

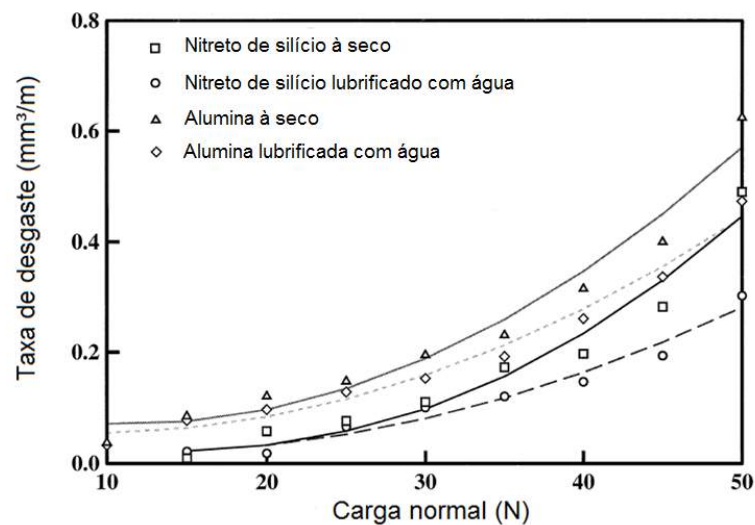


Figura 11 - Variação da taxa de desgaste de diferentes materiais em condições ambientais distintas com a carga normal. Fonte: (DESA e BAHADUR, 1999). Nota: Editado pelo autor.

Li, Shapiro e Li (1998) mostraram a proporcionalidade entre carga normal e o quadrado da largura dos riscos para indentadores de diferentes morfologias em ensaios sobre o vidro comum (Figura 12). Esses autores, também, observaram a independência da carga normal com a razão entre as forças, tangencial e normal, para indentadores afiados (sem desgaste) e a dependência para indentadores desgastados, além de menores valores dessa razão de forças para o último caso, Figura 13.

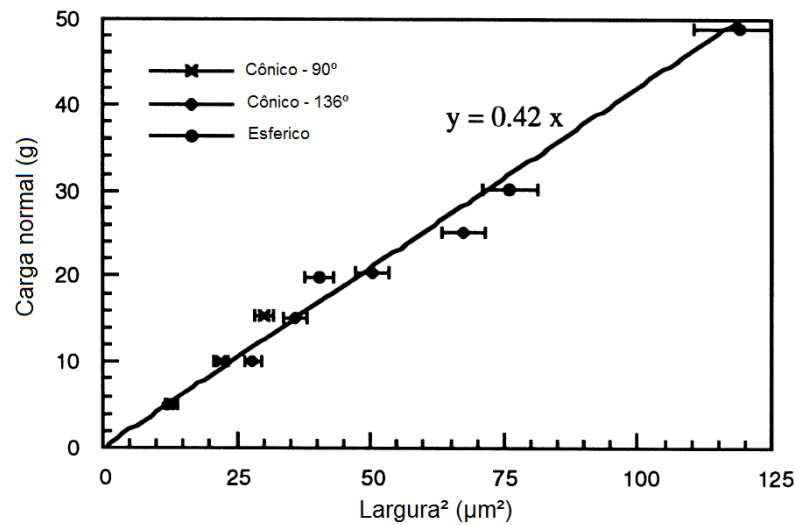


Figura 12 – Gráfico apresentando a proporcionalidade entre carga normal e o quadrado da largura para diversos indentadores sobre o vidro comum. Fonte: (LI, SHAPIRO e LI, 1998). Nota: Editado pelo autor.

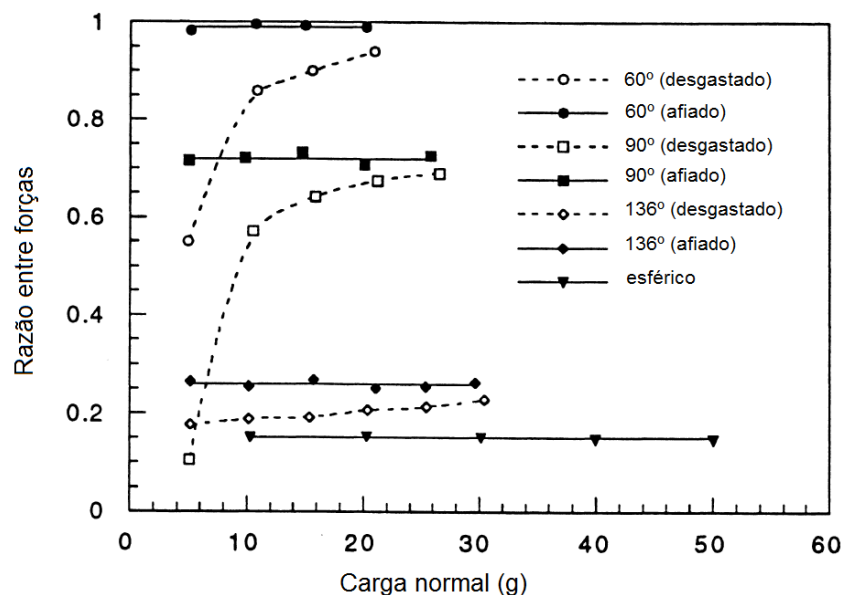


Figura 13 - Variação da razão entre forças, tangencial e normal, com a carga normal para diferentes indentadores. Fonte: (LI, SHAPIRO e LI, 1998). Nota: Editado pelo autor.

2.3.3 Resposta à distância entre riscos

Em ensaios de riscamento com uma única partícula, sem influência de outros riscos, o fator mais importante, no diz respeito ao comportamento do material, é o ângulo de ataque dessas partículas. Porém, quando há interação dos riscos gerados, o grau dessa interação se mostra fundamental na determinação dos mecanismos de desgaste. (WILLIAMS e XIE, 1992).

Silva Júnior e Mello (2009) desenvolveram uma metodologia para simulação de desgaste abrasivo, na qual conseguiram correlacionar a superfície oriunda desse processo de desgaste instrumentado com uma superfície de desgaste originária de um ensaio padronizado. Além disso, observaram a influência da distância entre riscos no desgaste. Nesse trabalho, os autores utilizaram um critério chamado de “grau de superposição (DS)” para classificar as distâncias entre os riscos (D). O Grau de superposição com base na largura do risco (SW) foi calculado de acordo com a equação (1).

$$DS = \frac{SW - D}{SW} \times 100\% \quad (1)$$

A Figura 14 apresenta um esquema desses ensaios.

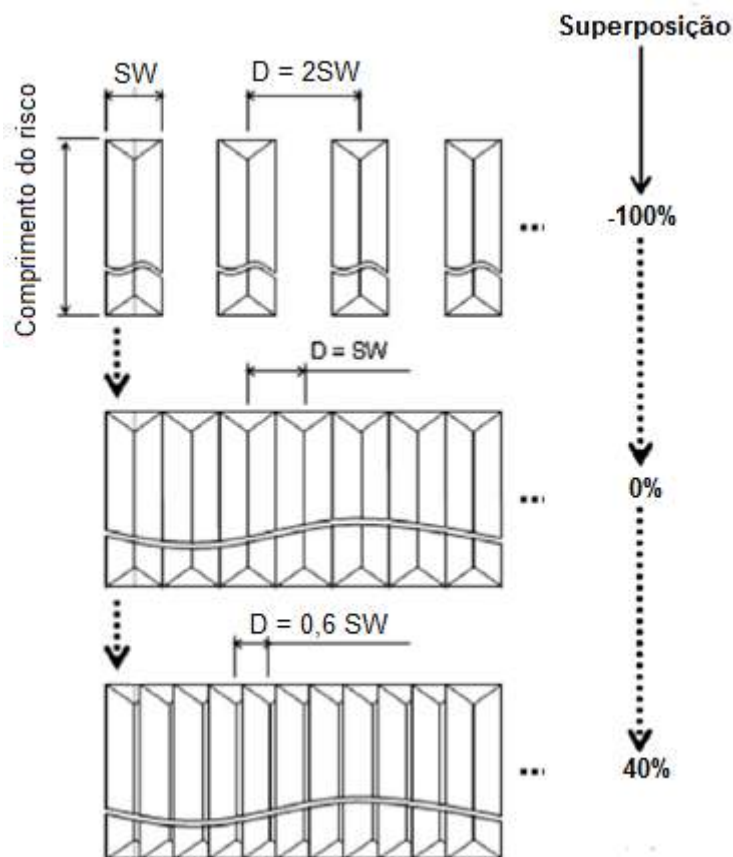


Figura 14 - Representação esquemática dos ensaios variando a distância entre riscos.
Fonte: (SILVA JÚNIOR E MELLO, 2009) Nota: Editado pelo autor.

Saloto (2010) observou influência do grau de superposição nos mecanismos de desgaste em materiais frágeis em cargas mais baixas (Figura 15). Porém, não observou transição de mecanismos em cargas mais altas, quando já em pequenos graus de superposição o mecanismo de desgaste tinha caráter frágil (Figura 16).

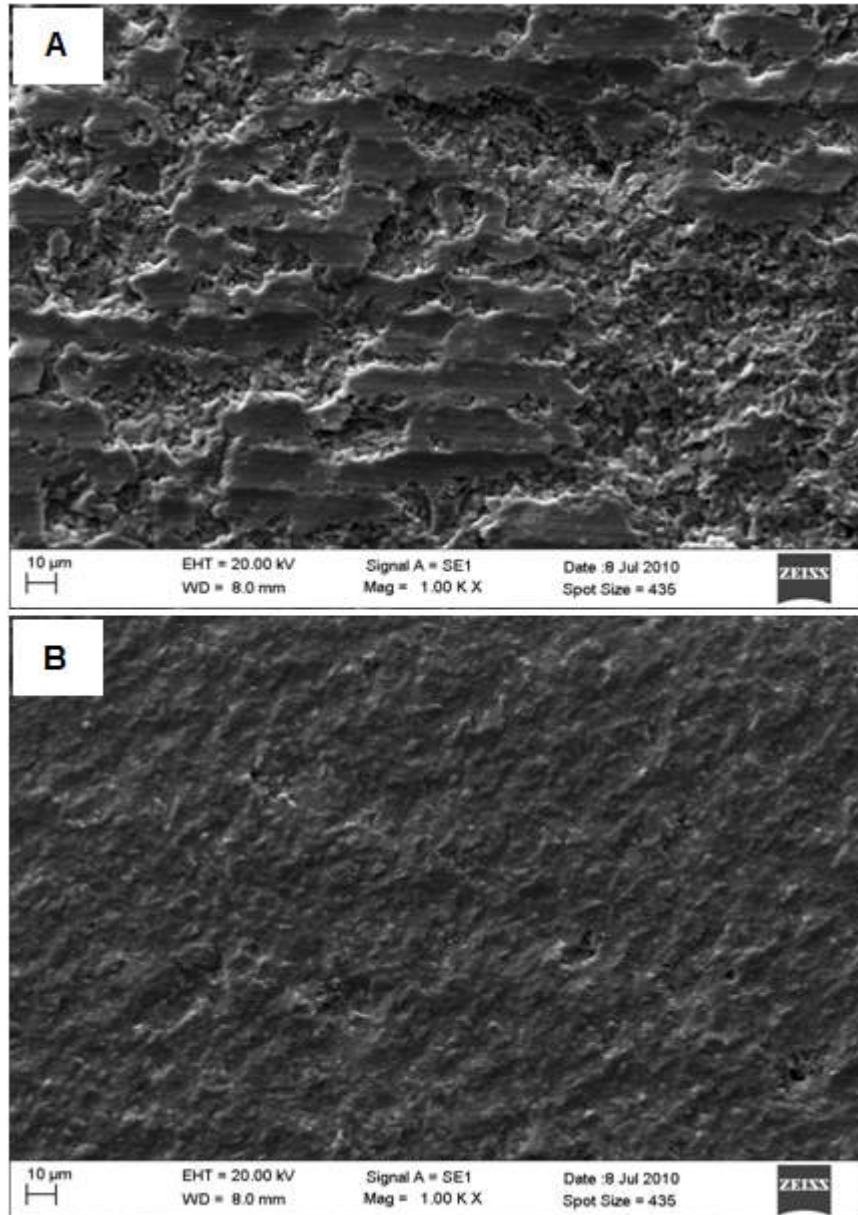


Figura 15 – Ensaio variando o grau de superposição sob carga de 2 N. (A) Deformação plástica no grau de superposição de 0%. (B) Ausência de deformação plástica no grau de superposição de 98%. FONTE: (SALOTO, 2010). Nota: Editado pelo autor.

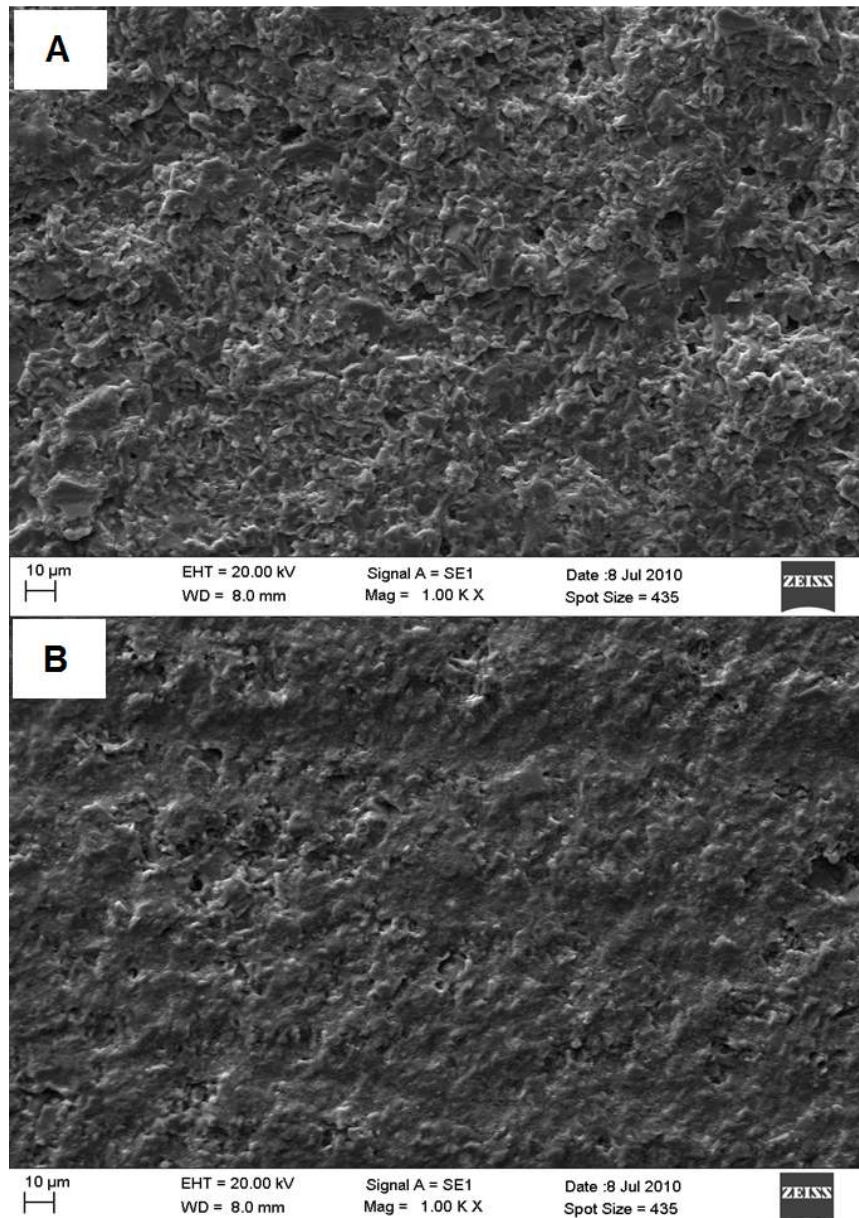


Figura 16 - Ensaio variando o grau de superposição sob carga de 5,7 N. (A) Grau de superposição de 0%. (B) Grau de superposição de 98%. FONTE: (SALOTO, 2010). Nota: Editado pelo autor.

2.3.4 Resposta à velocidade tangencial e condições ambientais

Li, Shapiro e Li (1998) realizaram experimentos variando cerca de duas ordens de grandeza a velocidade tangencial com indentador cônico de diamante sobre o vidro. Como resultado, a razão entre forças, tangencial e normal, ou seja, o coeficiente de atrito aparente, não sofreu influência da velocidade. Já a largura e profundidade do risco foram reduzidas à medida que a velocidade tangencial era aumentada (Figura 17).

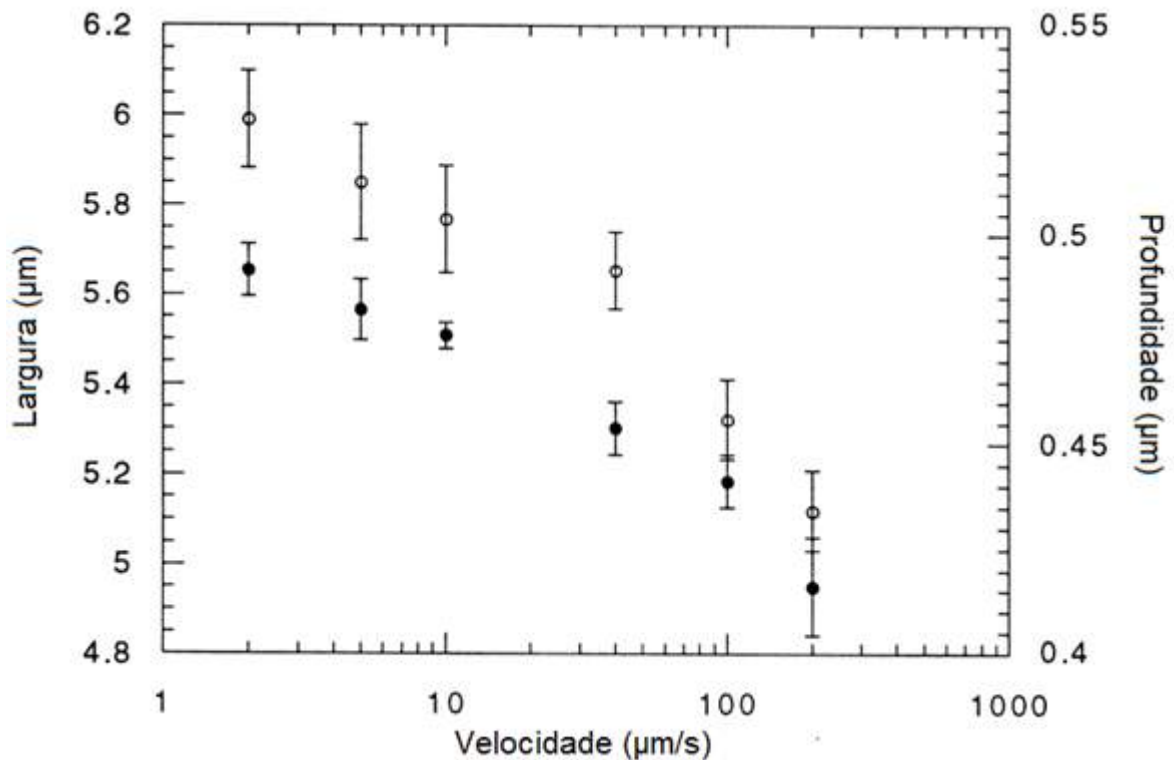


Figura 17 - Largura e profundidade do risco em função da carga normal. Fonte: (LI, SHAPIRO e LI, 1998). Nota: Editado pelo autor.

Segundo esses autores, como a trinca tem que ser nucleada a partir do risco, esse procedimento deve levar algum tempo, o qual depende da concentração de tensões no local. Após a nucleação e propagação da trinca, a concentração de tensões é reduzida, logo, a próxima trinca só se propagará quando a concentração de tensões aumentar novamente. Conseqüentemente, se a velocidade é alta, a probabilidade de trincamento é reduzida.

Já Swain, em 1979, sobre experimentos realizados em cerâmicos, afirma que a propagação de trincas é muito sensível à velocidade de riscamento, pois, para este material, o fator intensidade de tensões é preponderantemente dependente do ambiente, como na presença de vapor d'água (corrosão sob tensão). Já em ambientes de baixa umidade, como no vácuo ou em solução de parafina, as trincas seriam independentes da velocidade e governadas apenas pela tenacidade à fratura (K_{IC}).

Desa e Bahadur (1999) estudaram o efeito de condições ambientais para alumina e nitreto de silício. Esses autores observaram maiores taxas de desgaste para ambientes sem lubrificação. No entanto, dentre os diversos tipos de líquidos estudados, a água e o hidróxido de amônia obtiveram as maiores taxas de desgaste

para a alumina e o nitreto de silício, respectivamente. Esse resultado também foi atribuído a corrosão sob tensão.

Enomoto, em 1981, estudando o deslizamento de indentadores esféricos de WC sobre o vidro, na presença de vários ambientes contendo diferentes líquidos, mensurou a carga crítica para ocasionar a fratura através de trincas hertzianas. O autor encontrou que a presença de líquidos quimicamente ativos reduz esta carga crítica, tornando, assim, o material mais frágil. A explicação dada refere-se à dependência da carga crítica com a energia de superfície para fratura e com o atrito.

Chen, Farris e Chandrasekar (1991) em ensaios com indentador cônico sobre alguns tipos de vidro, perceberam a presença de trincas mais extensas quando a água era o meio interveniente, além da redução do coeficiente de atrito. A explicação dada por esses autores foi de que a redução do coeficiente de atrito acarretou na redução da força motriz para propagação de trincas.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostras da formação ferrífera bandada de Carajás (jaspilito), medindo aproximadamente 60 mm X 50 mm X 20 mm, foram preparadas com lixas d'água de carboneto de silício com granulometria de 80 a 1200 *mesh* e polidas com diamantes em suspensão de 6 a 1 μm .

Após limpeza ultrassônica com acetona e secagem, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Universidade de São Paulo (USP) onde foi realizado um mapeamento via espectroscopia por energia dispersiva (EDS) de algumas regiões do jaspilito.

Posteriormente, uma das amostras foi levada ao espectrômetro RAMAN Horiba modelo Xplora One, também do LFS, com resolução espectral de 3 cm^{-1} , e potência de 30 mJ, onde quinze pontos diferentes foram analisados (cinco em cada microconstituente).

3.2 ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA RETILÍNEA

Após preparação e limpeza, riscos retilíneos foram realizados à temperatura e pressão ambientes e a velocidade constante, no microtribômetro universal CETR Apex – atual Bruker (Figura 18) do Laboratório de Caracterização de Superfície e Materiais (LCSM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Em todos os ensaios, o comprimento dos riscos foi de no mínimo 5 mm.

Com exceção dos ensaios variando o grau de superposição, todos os outros foram realizados com uma distância entre riscos equivalente a dez vezes a sua largura.

Com ressalva aos ensaios variando a velocidade, todos os ensaios foram executados com velocidade de 0,05 mm/s.

Todos os ensaios foram realizados a seco, exceto os ensaios variando as condições ambientais.

De acordo com a Figura 18, tem-se a unidade responsável pela movimentação vertical, (Z - carriage), acoplada a ela, pode-se observar um bloco de montagem em que são alocados a célula de carga, a suspensão, o porta-indentador e o indentador. A célula de carga tem a capacidade de medir as forças em Z (carga normal) e em X (tangencial). A suspensão é composta por molas que atenuam a variação da carga normal durante os ensaios. No porta-amostra é fixada a amostra e a mesa responsável pelos movimentos em X, perpendicular ao plano da folha, e Y, perpendicular a X e Z.

Para os ensaios, foram utilizadas duas células de carga, uma com faixa de medição de 0,2 a 20 N e resolução de 1 mN e outra com faixa de medição de 2 a 200 N e resolução de 10 mN. As células de carga foram calibradas antes do início dos ensaios de acordo com o manual CETR, 2009. A taxa de aquisição de dados utilizada nos ensaios foi de 50 Hz.

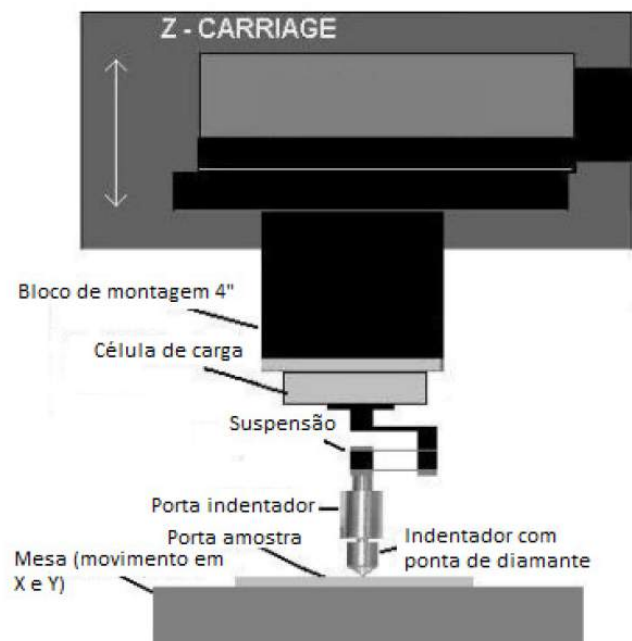


Figura 18 - Desenho esquemático da unidade de esclerometria retilínea. Fonte: (CETR, 2009). Nota: Editado pelo autor.

Os ensaios foram realizados com três indentadores de diamante distintos, Vickers, Rockwell e Knoop, em configurações específicas (Tabela 3). Além de um outro indentador Vickers que foi desgastado durante os ensaios (Figura 19).

Tabela 3 – Indentadores e respectivas configurações utilizadas nos ensaios. Fonte: autor.

Indentador	Configuração	Raio da ponta	Ângulo de ataque	Intervalo de cargas
Rockwell	-	200 μm	30°	2 a 90 N
Vickers	Aresta // ao risco	0,5 μm	16°	0,2 a 10 N
Vickers Desgastado	Aresta // ao risco	-	16°	0,2 a 10 N
Knoop	Aresta // ao risco	0,5 μm	3° 45'	0,2 - 8 N

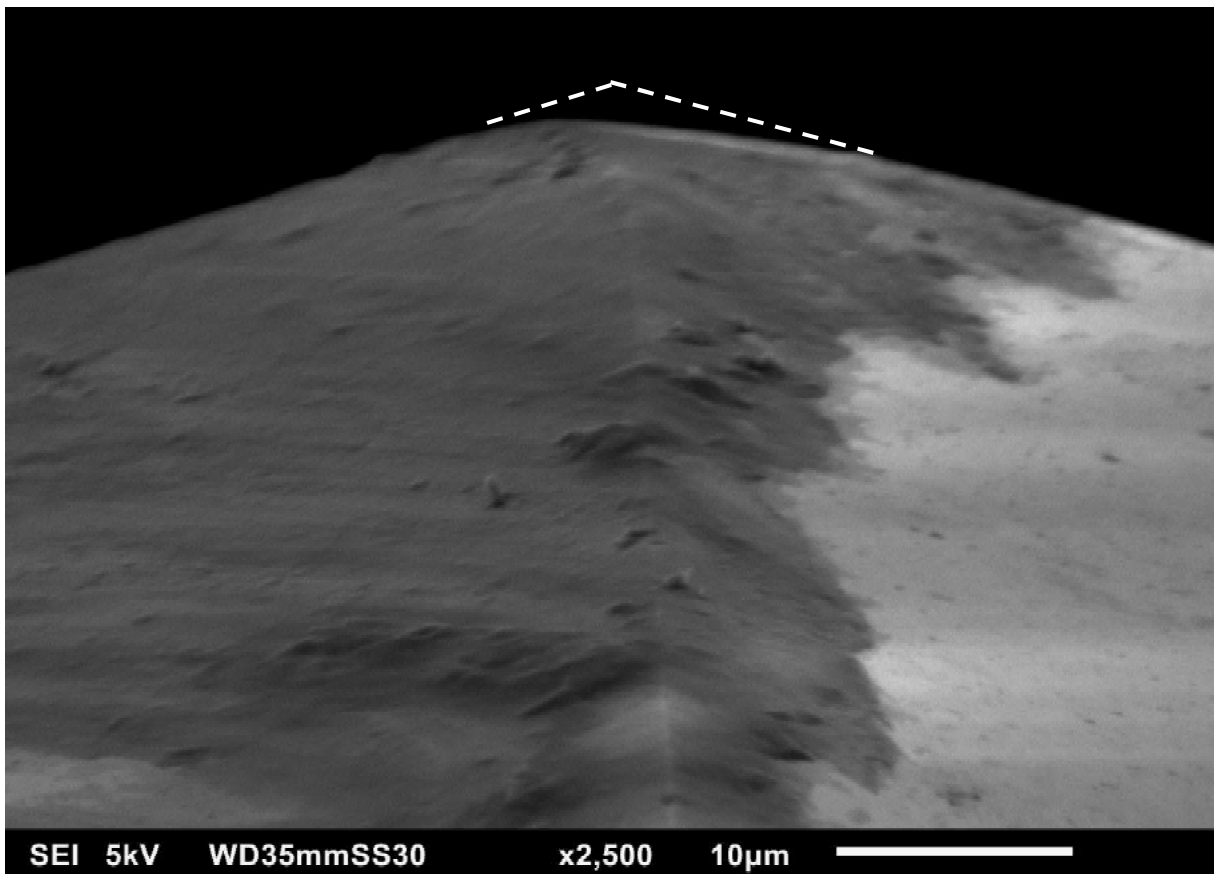


Figura 19 - Micrografia eletrônica de varredura (MEV) apresentando o desgaste da ponta de um dos indentadores Vickers. Fonte: autor.

3.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS CARGAS CRÍTICAS DE TRANSIÇÃO DE MECANISMOS

Riscos foram executados nas duas bandas do jaspilito (ferrífera e silicosa) em diferentes amostras com cargas constantes variando de 2 a 90 N com intervalo de 1 N para o penetrador Rockwell e 0,2 a 10 N com intervalo de 0,2 N com indentador Vickers. Além dos ensaios com carga constante, alguns outros foram realizados com o aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com penetrador Vickers a fim de obter-se maior precisão na determinação das cargas críticas de transição de mecanismos. Riscos com carga progressiva (0,2 a 8 N) foram efetuados com indentador Knoop nas configurações supracitadas na Tabela 3, porém apenas no veio dos óxidos de ferro.

3.4 ENSAIOS VARIANDO A CARGA NORMAL

Riscos foram realizados com indentador Vickers (afiado e desgastado) em diferentes cargas normais (0,2, 0,5, 2, 5 e 10 N) nas duas lamelas do jaspilito. Nove riscos foram executados em cada carga, com cada indentador e em cada banda da rocha. O comprimento dos riscos foi de 10 mm.

3.5 ENSAIOS VARIANDO O GRAU DE SUPERPOSIÇÃO

Foram realizadas nove seções com dez riscos de 5 mm de comprimento abrangendo os veios de jaspe e os veios férreos. Os dois primeiros ensaios (5N-1 e 5N-2) foram realizados com o indentador Vickers e o terceiro ensaio (5N-3) foi executado com o indentadores Vickers já desgastado. Cada um dos ensaios foi realizado em uma amostra diferente de jaspilito. Todos os riscos foram executados sob mesma carga normal (5 N). A distância entre os riscos foi variada para cada secção utilizando um critério chamado de “Grau de superposição” proposto por Silva Júnior e Mello (2009).

Diferente da metodologia desses autores, em que a área onde os ensaios realizados era fixa e a quantidade de riscos variava de acordo com a necessidade para preencher esta área pré-estabelecida, nesse trabalho, a quantidade de riscos foi fixada em 10 riscos. Assim, a área resultante dos ensaios é variável, sendo reduzida, conseqüentemente, à medida que o grau de superposição aumenta.

Para obtenção do parâmetro “Largura do risco (SW)”, foi calculada a média de 30 larguras aleatórias em um risco de 10 mm, sob carga normal de 5 N, que passava sobre as duas bandas do jaspiloto.

Os graus de superposição selecionados foram: -500%, -100%, -20%, 0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%. O grau de superposição inicial de -500% foi escolhido, pois, segundo a norma ASTM G171, os riscos devem estar sempre a uma distância no mínimo cinco vezes à sua largura para que o próximo ensaio não seja influenciado pelo anterior, logo, como o objetivo é estudar essa influência, a distância entre riscos foi reduzida a partir deste grau. Três ensaios completos foram realizados em amostras diferentes, totalizando 270 riscos.

3.6 ENSAIOS VARIANDO AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Ensaio variando o tipo de lubrificante foram levados a cabo com indentador Vickers, sobre os óxidos de ferro, em duas cargas normais distintas, 0,2 e 1 N.

Os lubrificantes utilizados foram água destilada e uma solução com bentonita (4% em peso).

A metodologia dos ensaios constituiu-se da realização de três riscos sem lubrificação, seguindo-se de três riscos com um dos dois tipos de lubrificante sob a mesma carga normal que os ensaios sem lubrificação anteriores. O mesmo processo foi aplicado a todas as condições e repetido três vezes. O comprimento dos riscos foi de 5 mm.

Diferente dos ensaios anteriores (seções 3.4 e 3.5), onde o único pré-requisito para a escolha da localização dos riscos era a existência tanto de veios de jaspe quanto de veios ferríferos, nestes ensaios, os riscos foram realizados somente sobre os veios ferríferos e perpendicularmente aos mesmos.

3.7 ENSAIOS VARIANDO A VELOCIDADE TANGENCIAL

Ensaio variando a velocidade tangencial foram realizados com indentador Vickers sob cinco cargas normais distintas (0,2, 0,25, 0,3, 0,5 e 1 N). As velocidades estudadas foram de 0,01, 0,1 e 1 mm/s. O comprimento, o mineral estudado e a orientação foram exatamente os mesmos dos ensaios variando as condições ambientais.

A metodologia dos ensaios constituiu-se da realização de três riscos em cada uma das velocidades para cada carga normal. O processo foi repetido por três vezes.

3.8 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Nos parágrafos subsequentes, é elucidado o procedimento para identificação dos mecanismos de desgaste e respectivos intervalos de carga em que ocorrem, assim como a maneira com que os dados gerados pelo microtribômetro foram examinados e, finalmente, os parâmetros e técnicas utilizados para medição da taxa de desgaste.

3.8.1 Avaliação dos dados do microtribômetro

Os dados dos ensaios (carga normal, força tangencial, velocidade e coeficiente de atrito aparente) foram avaliados separadamente para cada mineral. Para isso, esses dados foram expostos em forma de gráfico juntamente com a imagem no respectivo risco como mostra a Figura 20. Dessa forma, foi possível analisar, os dados gerados, para cada lamela do jaspilito.

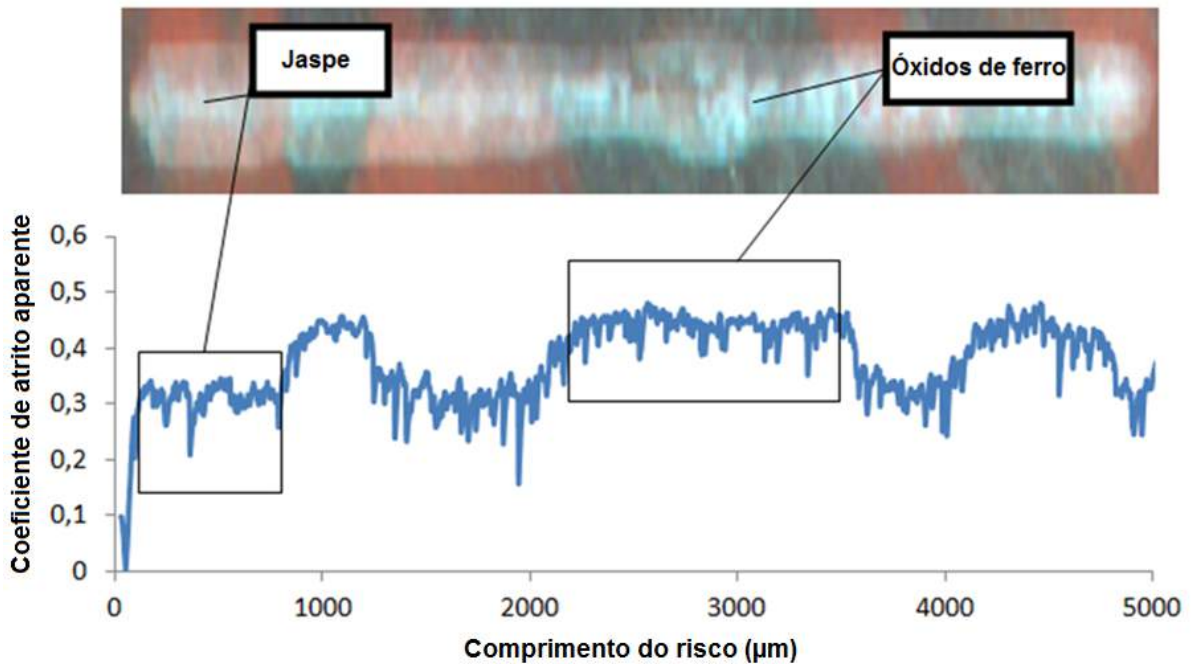


Figura 20 - Representação esquemática da metodologia de análise dos dados do CETR para o coeficiente de atrito aparente em cada banda (jaspe e óxidos de ferro). Fonte: autor.

3.8.2 Avaliação dos mecanismos de desgaste

Após limpeza dos riscos, com acetona, para remoção dos debris gerados pelo processo de desgaste e secagem, as amostras foram levadas ao estereoscópio Zeiss, modelo Stereo Discovery.V12 do Laboratório de Caracterização de Superfície de Materiais (LCSM), que possui capacidade de ampliação de até 150 vezes e ao microscópio metalográfico invertido Nikon modelo Eclipse MA200 do Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da UFES, que possui ampliação máxima de 1000 vezes. As amostras foram analisadas em diferentes ampliações e combinações de filtros e os mecanismos de desgaste determinados. Para confirmação alguns mecanismos, as amostras, também, foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) Jeol modelo JSM 6010LA e a um analisador tridimensional de superfícies Taylor Hobson modelo CCI-MP do

Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Universidade de São Paulo (USP).

3.8.3 Avaliação da taxa de desgaste

As amostras foram levadas ao analisador tridimensional de superfícies, onde a área da seção transversal de vários ensaios foi verificada.

As medições foram realizadas sob incidência de luz verde, com intensidade em torno de 50%, sem aumento digital, na menor velocidade de varredura, no modo “*low reflectance I*” e com aumento óptico de 20 vezes. Nessas configurações, foi possível verificar uma área de 865 x 865 μm por vez, com porcentagem de pontos não medidos inferior a 0,5%. Após a montagem dos quadros (*stitching*) e exclusão de regiões irrelevantes, tem-se, por exemplo, uma área de 4260 x 865 μm (Figura 21).

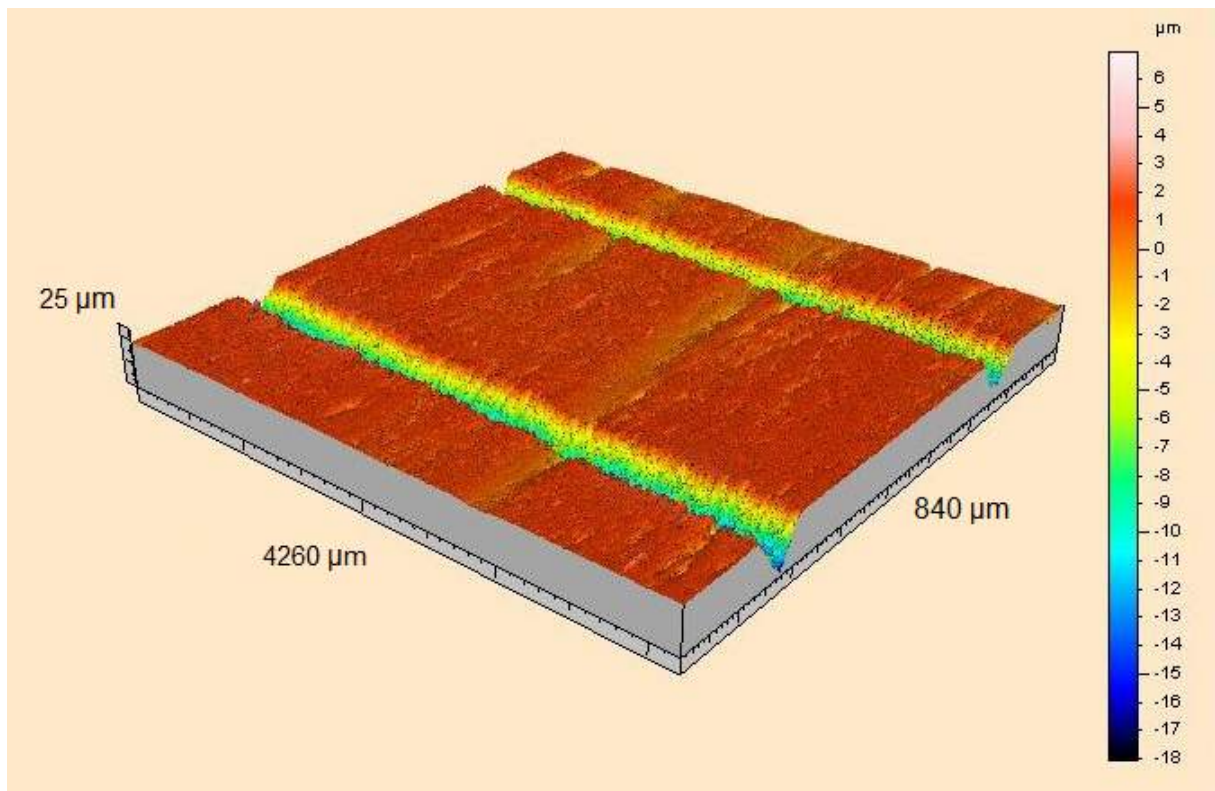


Figura 21 - Imagem em 3D obtida através do analisador tridimensional de superfícies de dois riscos realizados com indentador Vickers e com carga normal de 5 N. Fonte: autor.

Após o stitching de todas as imagens relativas a um riscos, um trecho de aproximadamente 400 μm no início e no final dos riscos é removido. Um operador de nivelamento e outro de preenchimento de pontos não medidos do *software Mountains Map* foram utilizados em todas as medições. A área da seção transversal média de cada quadro foi obtida para cada banda do jaspilito (Figura 22).

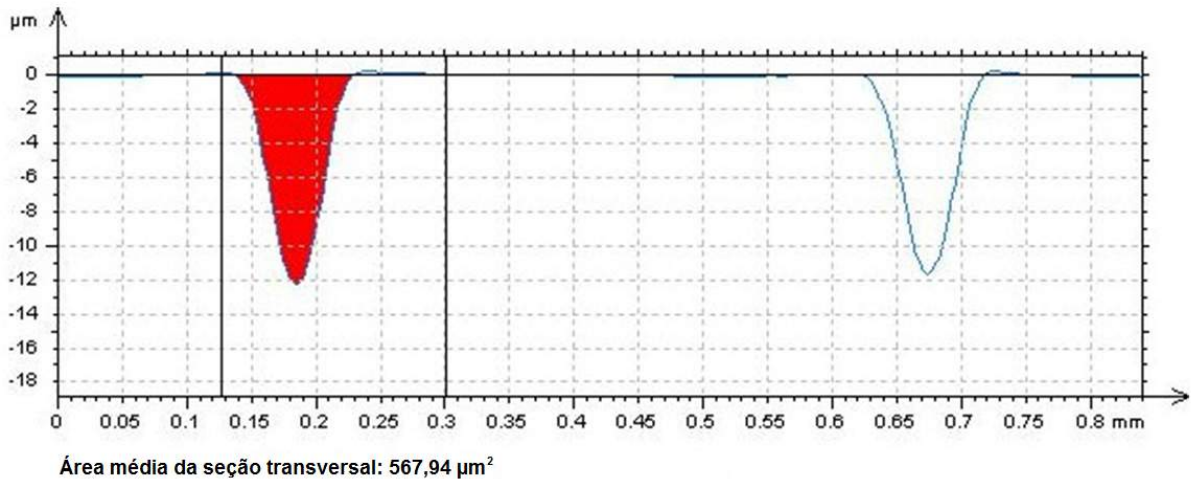


Figura 22 - Perfil médio juntamente com a média da área da seção transversal do risco da esquerda da figura anterior. Fonte: autor.

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na seção 3.8.1, foi apresentada a metodologia para obtenção do coeficiente de atrito aparente para cada banda do jaspilito, ferrífera e silicosa. A média e o desvio padrão do atrito foram calculados para cada risco. No entanto, considerando a grande quantidade de riscos realizados para cada condição e sabendo-se que o desvio padrão do valor do atrito dos riscos individuais não ultrapassou 4%, esse foi desconsiderado a fim de facilitar a abordagem estatística. Sendo assim, a medida de dispersão apresentada nos gráficos subsequentes advém dos desvios padrão da média dos coeficientes de atrito médio de cada risco.

Nas análises da taxa de desgaste (seção 3.8.3), o Software utilizado não forneceu as medidas de dispersão do perfil médio obtido, o qual foi utilizado para o cálculo da área da seção transversal. Logo, nos gráficos subsequentes de taxa de desgaste, a taxa representa a média das áreas de seção transversal médias dos riscos. Já a

dispersão apresentada nos gráficos, representa o desvio padrão em relação a essa média.

Devido ao caráter heterogêneo das amostras, observado durante esse trabalho, nos ensaios onde o objetivo era a determinação da influência de algum parâmetro (carga normal, velocidade e condições ambientais), os mesmos foram realizados em uma mesma região, da ordem de milímetros quadrados, do jaspilto.

Contudo, os ensaios variando o grau de superposição foram executados em diferentes amostras de jaspilto, não podendo, desta maneira, serem avaliados como os ensaios anteriores. A medida de dispersão da taxa de desgaste desses ensaios se dá através da média da área da seção transversal de cinco perfis individuais aleatoriamente retirados do respectivo mineral, do grau de superposição e do ensaio (5N-1, 5N-2, 5N-3). O coeficiente de atrito aparente dos gráficos representa a média dos coeficientes de atrito médios de cada risco (excluindo-se o primeiro) em cada respectivo grau de superposição, mineral e ensaio. A dispersão do coeficiente de atrito se dá através do desvio padrão dessas médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA (JASPILITO)

Ao observar macroscopicamente as amostras de jaspilto, pode ser notada a sua estrutura bandada característica (Figura 23 e Figura 24).



Figura 23 – Amostra de jaspilto como recebida, em forma de testemunho de sondagem.
Fonte: autor.

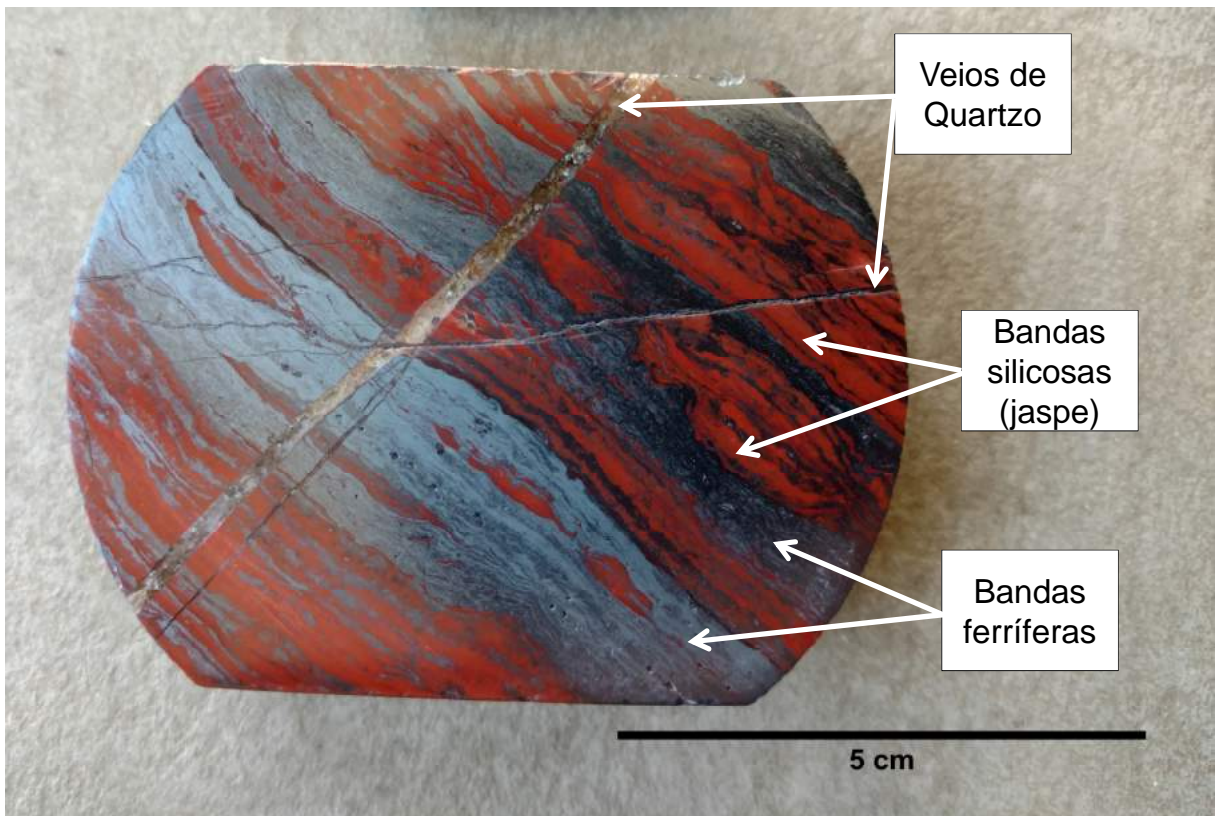


Figura 24 - Amostra de jaspilito após o polimento apresentando a sua estrutura bandada.
Fonte: autor.

Essas camadas, milimétricas até centimétricas, se alternam entre jaspe e óxidos de ferro. Também, foram observados veios de quartzo. Essa morfologia é comumente encontrada nos jaspilitos de Carajás, como visto na seção 2.1.2.1 (Prado *et al.* 2016, Macambira e Schrank, 2002).

Após a análise micrográfica do jaspilito, percebeu-se que o veio dos óxidos de ferro é na verdade composto de dois microconstituintes principais, um de coloração clara, e outro, de escura (Figura 25).

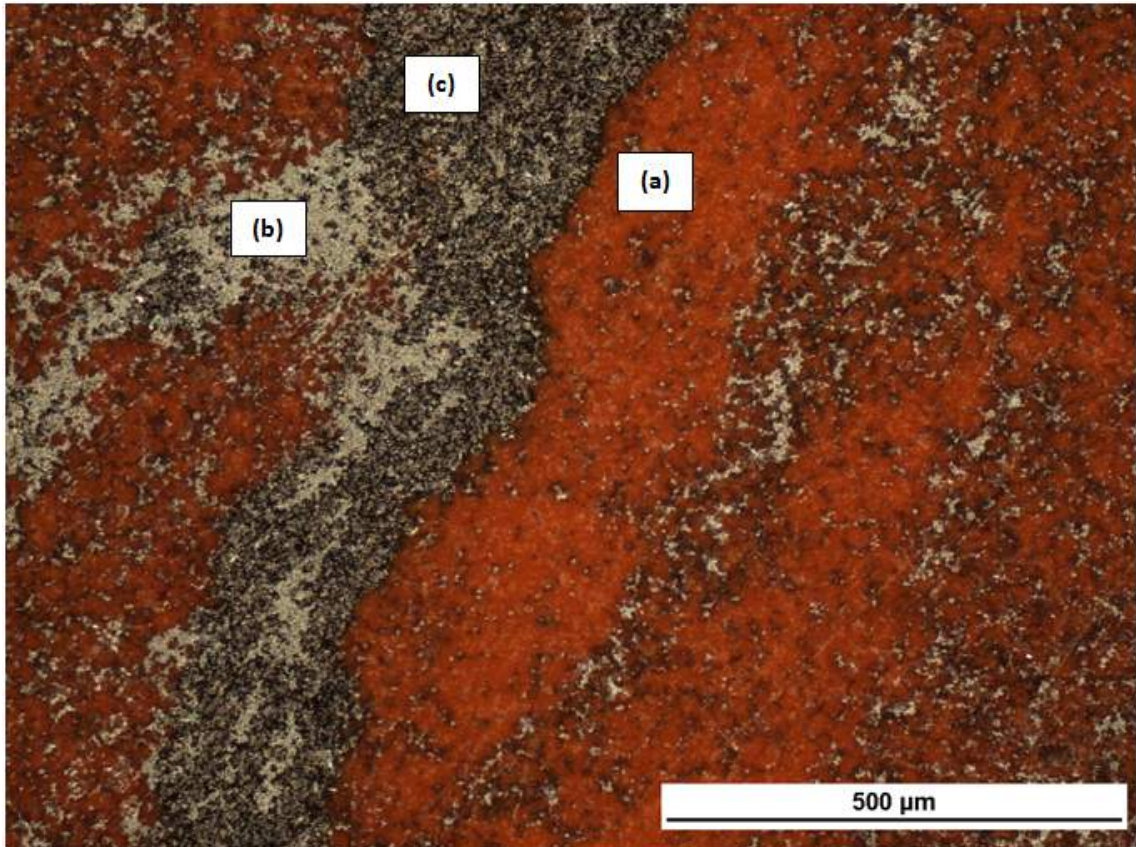


Figura 25 - Micrografia óptica do jaspilito apresentando o jaspe (a) e os microconstituintes do veio ferrífero, claro (b) e escuro (c). Fonte: autor.

Após a análise da rocha via espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS), Figura 26, foi possível perceber uma alta concentração de silício e oxigênio nos veios de jaspe, apontando para existência de óxido de silício, composição química do jaspe.

No microconstituente claro do veio ferrífero, foi observado uma grande concentração de ferro e oxigênio. No microconstituente escuro desse veio, também, foi perceptível a grande concentração desses elementos, mas em proporções distintas. Nesse último microconstituente, a concentração de ferro foi menor do que no microconstituente claro, o oposto ocorreu com a concentração de oxigênio.

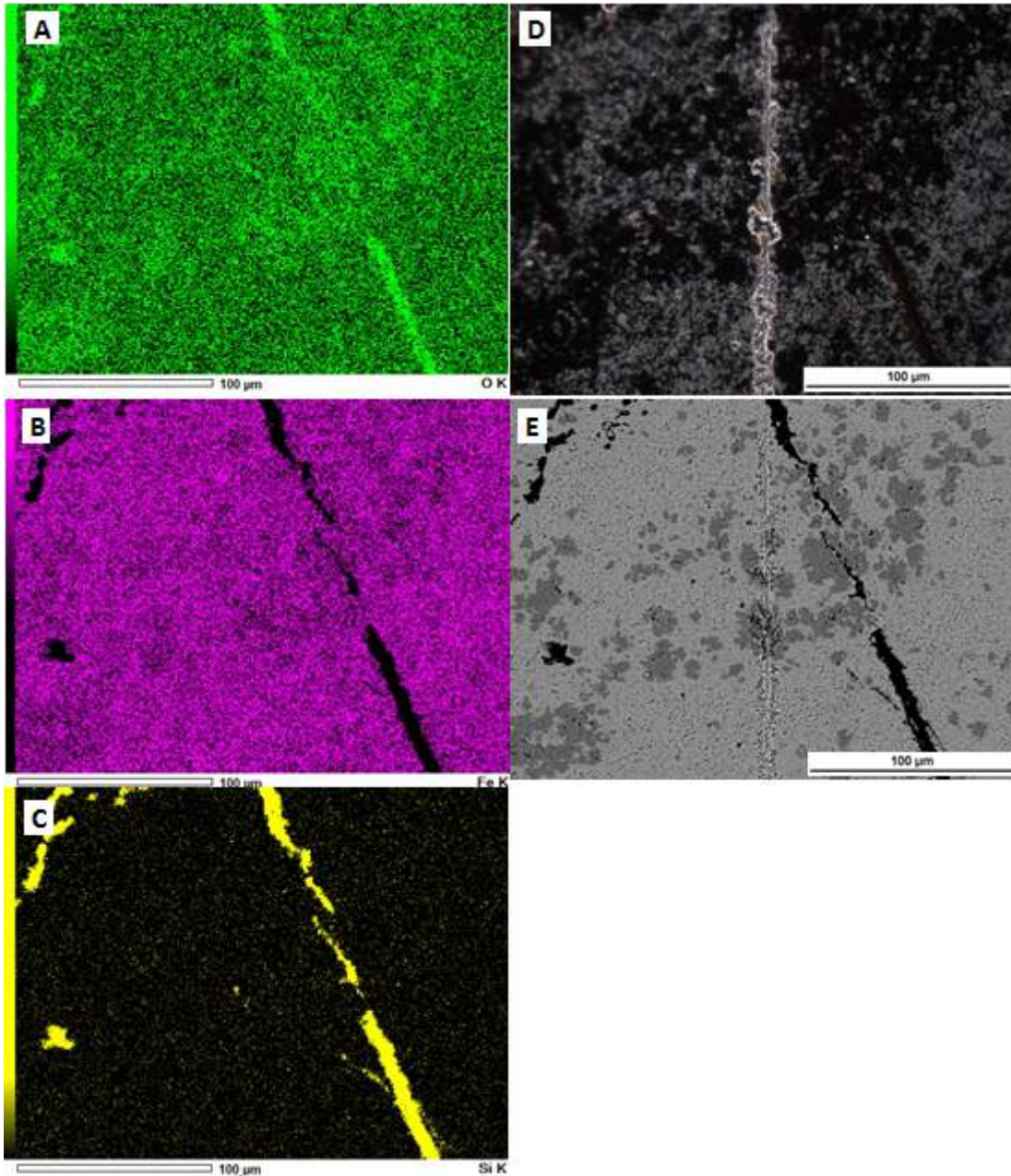


Figura 26 – Mapas de composição química via espectroscopia por dispersão de energia de raios-X (EDS) de uma região do jaspilito. (A) Oxigênio, (B) Ferro, (C) Silício, (D) Microscopia ótica e (E) MEV. Fonte: autor.

Depois da obtenção dos resultados da espectroscopia RAMAN e comparação com outros trabalhos (Tabela 4), foi confirmada a atribuição do microconstituente de coloração avermelhada ao mineral jaspe (quartzo- α). Ainda foi possível perceber que o microconstituente escuro se tratava do mineral goethita (α -FeO(OH)) e, o claro, da hematita (α -Fe₂O₃).

Esses resultados corroboram com vários autores que analisaram os jaspilitos de Carajás (Macambira e Schrank, 2002; Figueiredo e Silva, 2013; Prado *et al.*, 2016).

Além disso, a presença de goethita indica que essas amostras sofreram algum grau de alteração hidrotermal (ABREU, MACAMBIRA E CABRAL, 2016).

Tabela 4 – Comparação entre comprimentos de onda medidos e publicados. Nota: Os valores sublinhados e em negrito correspondem as maiores amplitudes medidas já os valores apenas sublinhados representam as segundas maiores medidas e as principais publicadas. Fonte: autor.

Microconstituente	Mineral	Comprimentos de onda medidos (cm ⁻¹)	Comprimentos de onda publicados (cm ⁻¹)	Referências
Claro	Hematita (α-Fe ₂ O ₃)	<u>224</u> 243 <u>288</u> <u>411</u> 499 610 661 1315	<u>225</u> 245 290 412	(HANESCH, 2009)
			226 245 <u>292</u> 411 497 612	(OH, COOK E TOWNSEND, 1998)
			<u>227</u> 245 <u>293</u> 298 <u>414</u> 501 612	(THIBEAU, BROWN, HEIDERSBACH, 1978)
			<u>225</u> 245 <u>295</u> <u>415</u> 500 615 1320	(OHTSUKA, KUBO E SATO, 1986)
Escuro	Goethita (α-FeO(OH))	107 164 202 243 <u>296</u> 383 417 481 <u>547</u> 679 1002 1110 1315	244 299 <u>385</u> 480 548 681	(HANESCH, 2009)
			205 247 300 <u>386</u> 418 481 549	(OH, COOK E TOWNSEND, 1998)
			245 300 <u>390</u> 420 480 550 685	(OHTSUKA, KUBO E SATO, 1986)
			248 <u>303</u> <u>397</u> 485 554 680 1002 1120	(DÜNNWALD e OTTO, 1989)
			245 300 <u>390</u> 485 550 675	(OHTSUKA, 1996)
Avermelhado	Jaspe (α-SiO ₂)	123 202 <u>215</u> <u>290</u> 350 <u>407</u> 459 610 805 1313	205 260 296 350 394 <u>462</u> 693 801 1076 1155	(POP <i>et al.</i> , 2004)
			<u>202</u> <u>465</u> 505	(KINGMA e HEMLEY, 1994)

4.2 DIAMANTES EMPREGADOS NAS COROAS

Diamantes sintéticos octaédricos truncados revestidos com titânio, usualmente empregados em coroas diamantadas utilizadas em sondagem mineral, foram analisados via estereoscópio.

Foi possível perceber que os ângulos entre faces e arestas são próximos ao do indentador Vickers, 136° e 148°, respectivamente.

Não foi possível mensurar o raio da ponta desses diamantes com os aumentos proporcionados pelo microscópio estereoscópico, assim como o raio da ponta do penetrador Vickers (Figura 27). O que sugere uma semelhança entre os mesmos.

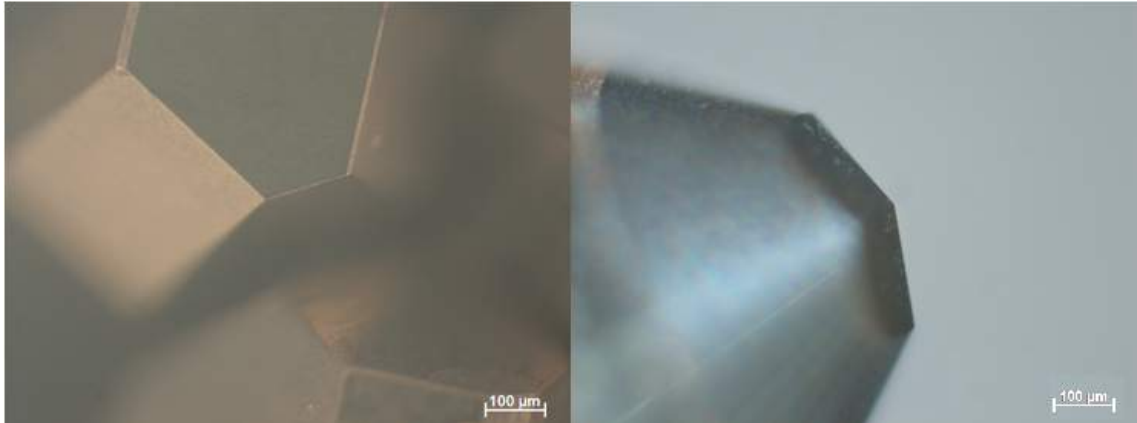


Figura 27 - Micrografia estereoscópica - Diamantes empregados em coroas diamantadas (esquerda) e indentedor de diamante Vickers (direita). Fonte: autor.

4.3 MECANISMOS DE DESGASTE E CARGAS CRÍTICAS DE TRANSIÇÃO

4.3.1 Mecanismos de desgaste

Como pode ser observado na Figura 28, pouco ou nenhum dano aparente foi notado na hematita e na goethita, quando o mecanismo de *burnishing* é dominante. Esse mecanismo esteve presente apenas nos ensaios com indentador Rockwell.

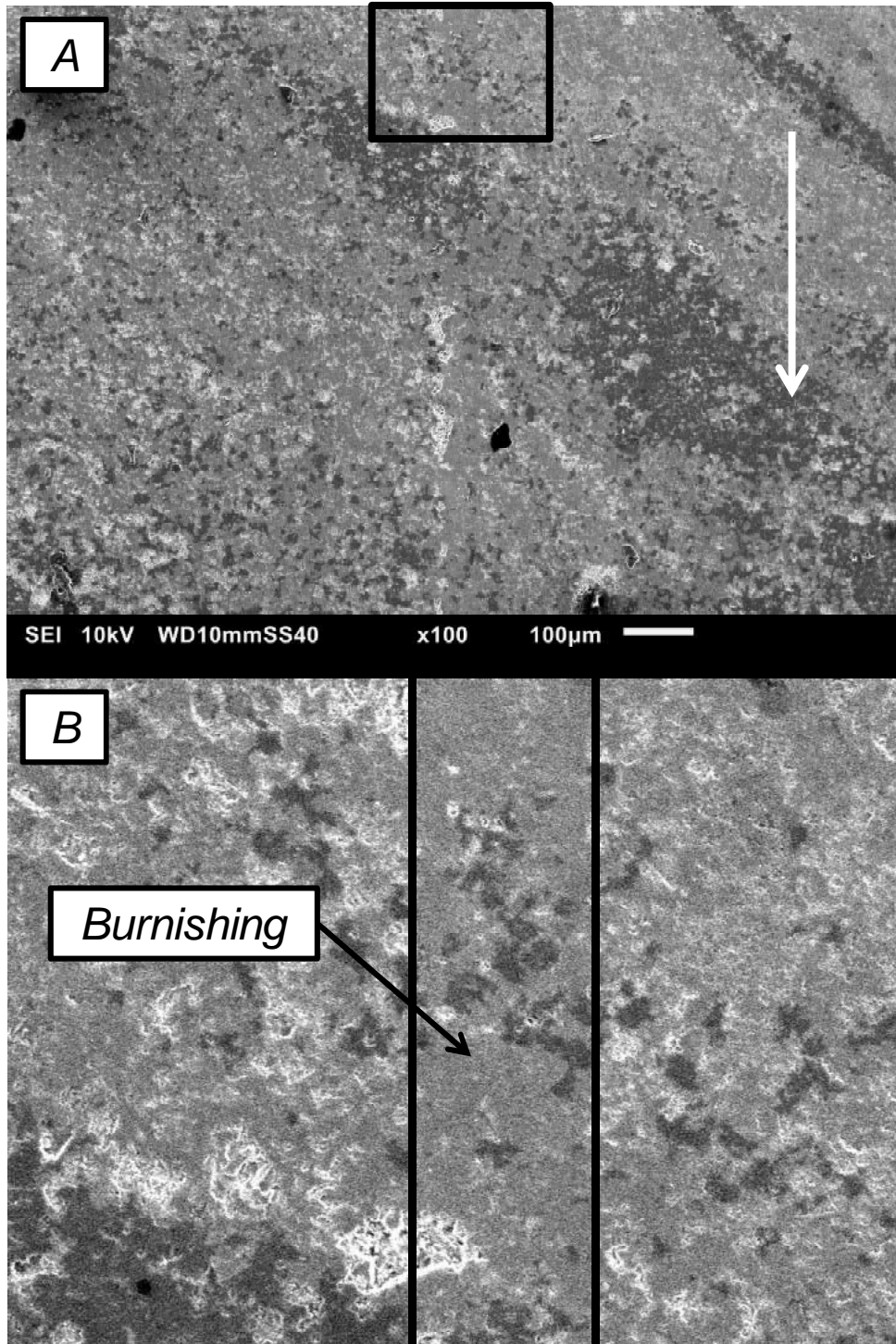


Figura 28 – (A) *Burnishing* na banda ferrífera do jaspilito, 10 N. (B) ampliação de (A). Nota: as regiões mais escuras são microlamelas de jaspe e a seta branca indica o sentido do risco. Fonte: autor.

Na Figura 29, observa-se na região do risco o preenchimento das porosidades, ocasionado pela deformação plástica, indicando que o mecanismo dominante foi sulcamento plástico. Além disso, nota-se uma diferença de profundidade entre o

centro e a borda do risco, assim como formação de *ridges* nas laterais (Figura 30). Esse mecanismo foi verificado apenas no veio ferrífero para os indentadores Rockwell (Figura 29), Vickers desgastado (Figura 31) e Knoop (Figura 32), sendo que nesse último, para todas as cargas estudadas.

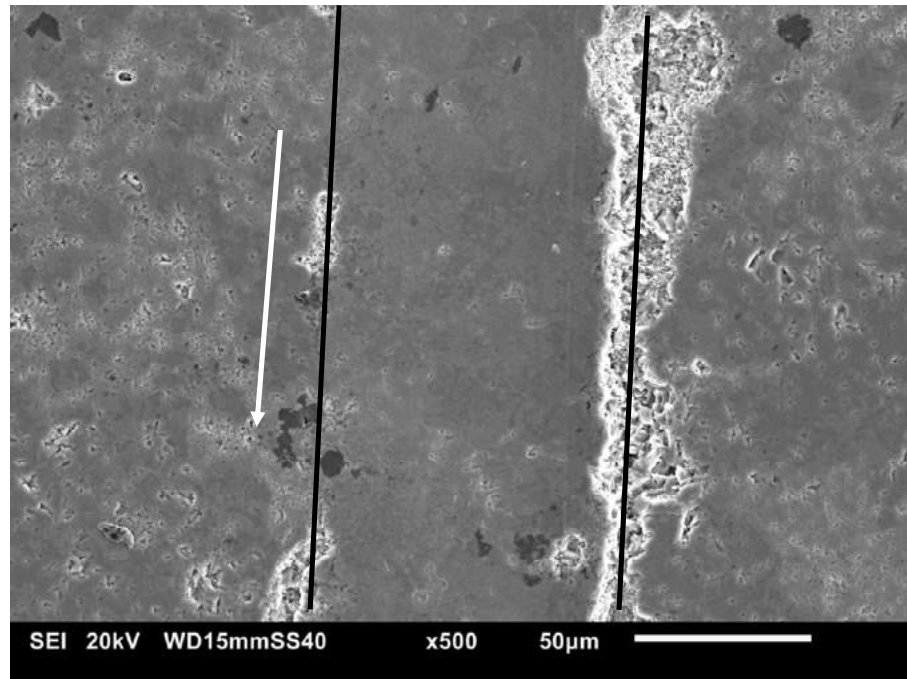


Figura 29 – Imagem apresentando sulcamento plástico com preenchimento de vazios em risco sobre o veio férreo com indentador Rockwell, sob carga normal de 30 N. Nota: A região entre as linhas pretas representa a trilha de desgaste. Fonte: autor.

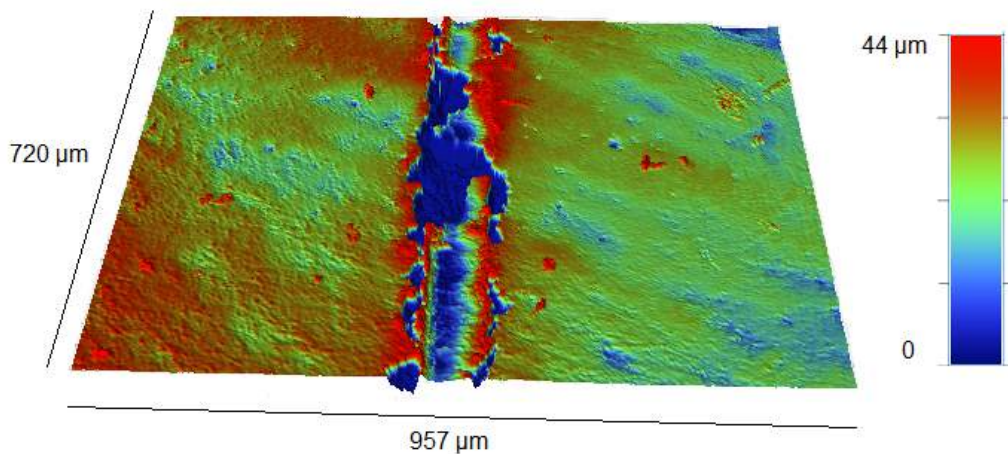


Figura 30 – Imagem gerada pelo analisador tridimensional de superfícies do risco da figura anterior. Fonte: autor.

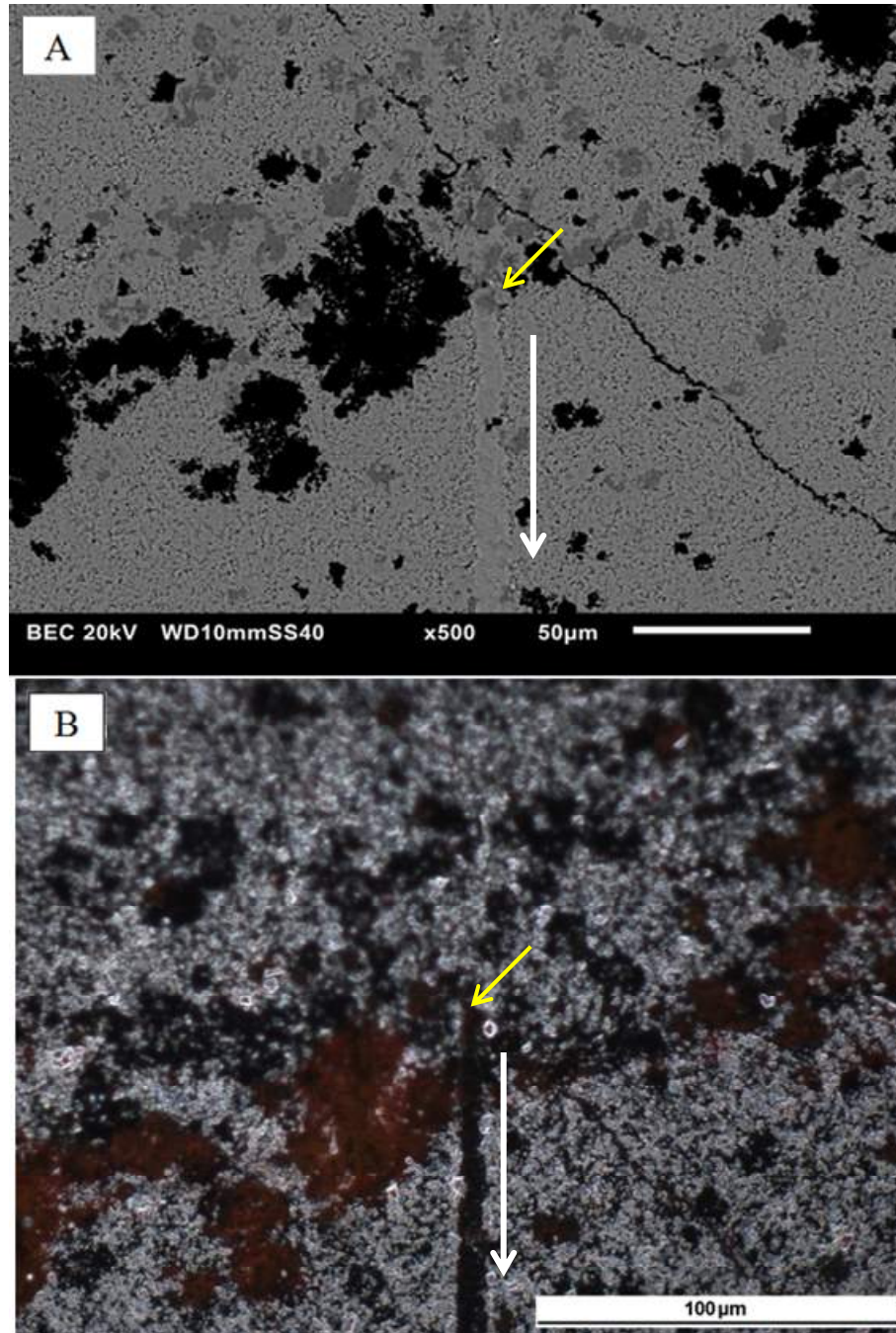


Figura 31 - Parte inicial do risco com aumento progressivo da carga (0,2N até 10 N) com indentador Vickers (desgastado) sobre o veio ferrífero. Em (A), (MEV) as regiões pretas são jaspe, as cinza escuro, goethita e as cinza claro, hematita. (B) micrografia óptica. Nota: a seta amarela aponta o início do risco. E a branca, o sentido. Fonte: autor.

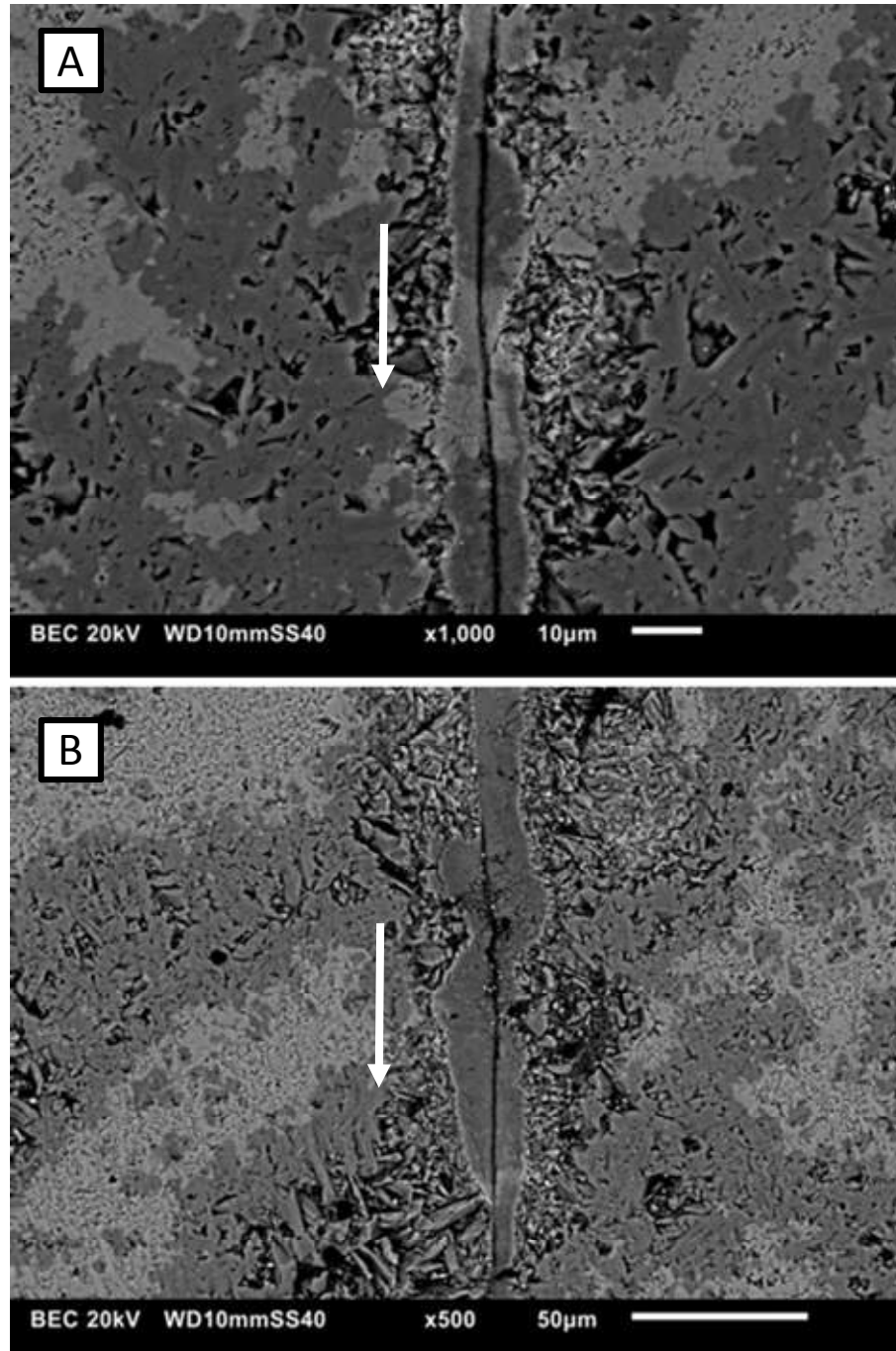


Figura 32 – Sulcamento plástico, na hematita (regiões claras) e goethita (regiões escuras), no risco com indentador Knoop. (A) Parte intermediária; (B) Parte final do risco com carga crescente (0,2-8 N). Nota: a seta indica o sentido do risco. Fonte: autor.

Nos ensaios com indentador Vickers (desgastado) sobre o veio ferrífero, o aumento da carga levou a uma transição de mecanismos caracterizada pelo surgimento de trincas no sulco plástico, perpendiculares a direção do risco, e remoção de matéria moderada, onde, anteriormente, havia apenas deformação plástica macroscópica.

Segundo Bi, Tokura e Yoshikawa (1988), esse tipo de reposta é denominada *Scale-like cracking* (Figura 33).

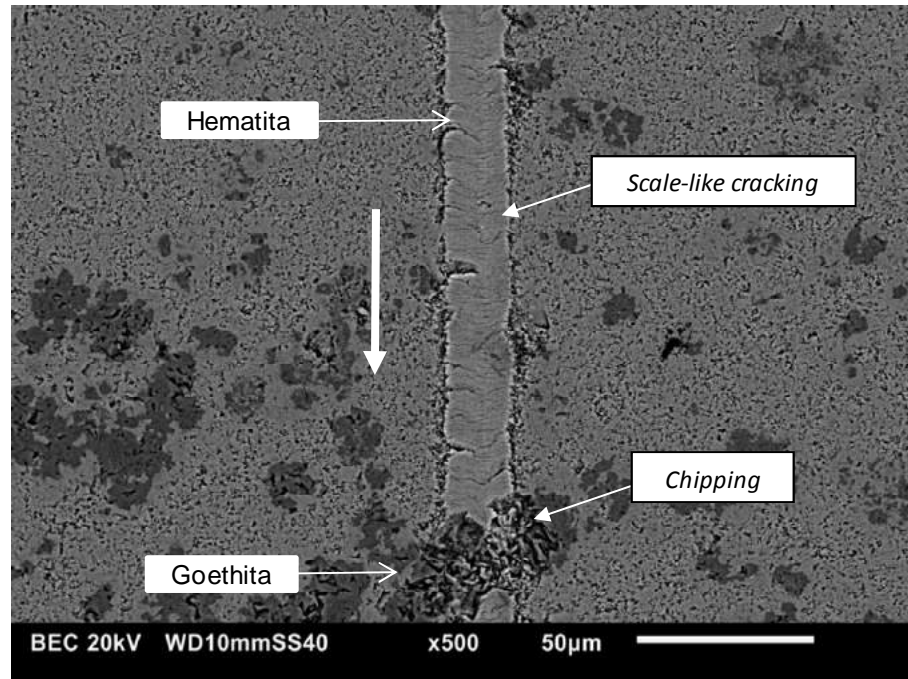


Figura 33 – Imagem do risco com aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com indentedor Vickers desgastado sobre o veio ferrífero apresentando o mecanismo de *scale-like cracking* na hematita e *chipping* na goethita. Fonte: autor.

Nos ensaios sobre o jaspe, com penetrador Rockwell (Figura 34), mecanismos dúcteis não foram observados. Para as menores cargas, não foi notado dano aparente e, a partir de 9 N, o mineral apresentou resposta frágil configurada pela formação de trincas e *chipping* no interior da trilha de desgaste. Segundo Beste, Lundvall e Jacobson (2004), esse comportamento se trata do mecanismo de *in-track-cracking* ou trincamento na trilha (TNT).

Já quando o indentedor Vickers deslizava sobre a rocha, a observação desse mecanismo não foi trivial. Nesse caso, foi atribuído a esse mecanismo discrepâncias na proporcionalidade da largura de riscos com aumento progressivo da carga normal, essas discrepâncias ocorreram entre 0,2 e 0,5 N em todos os minerais (Figura 35).

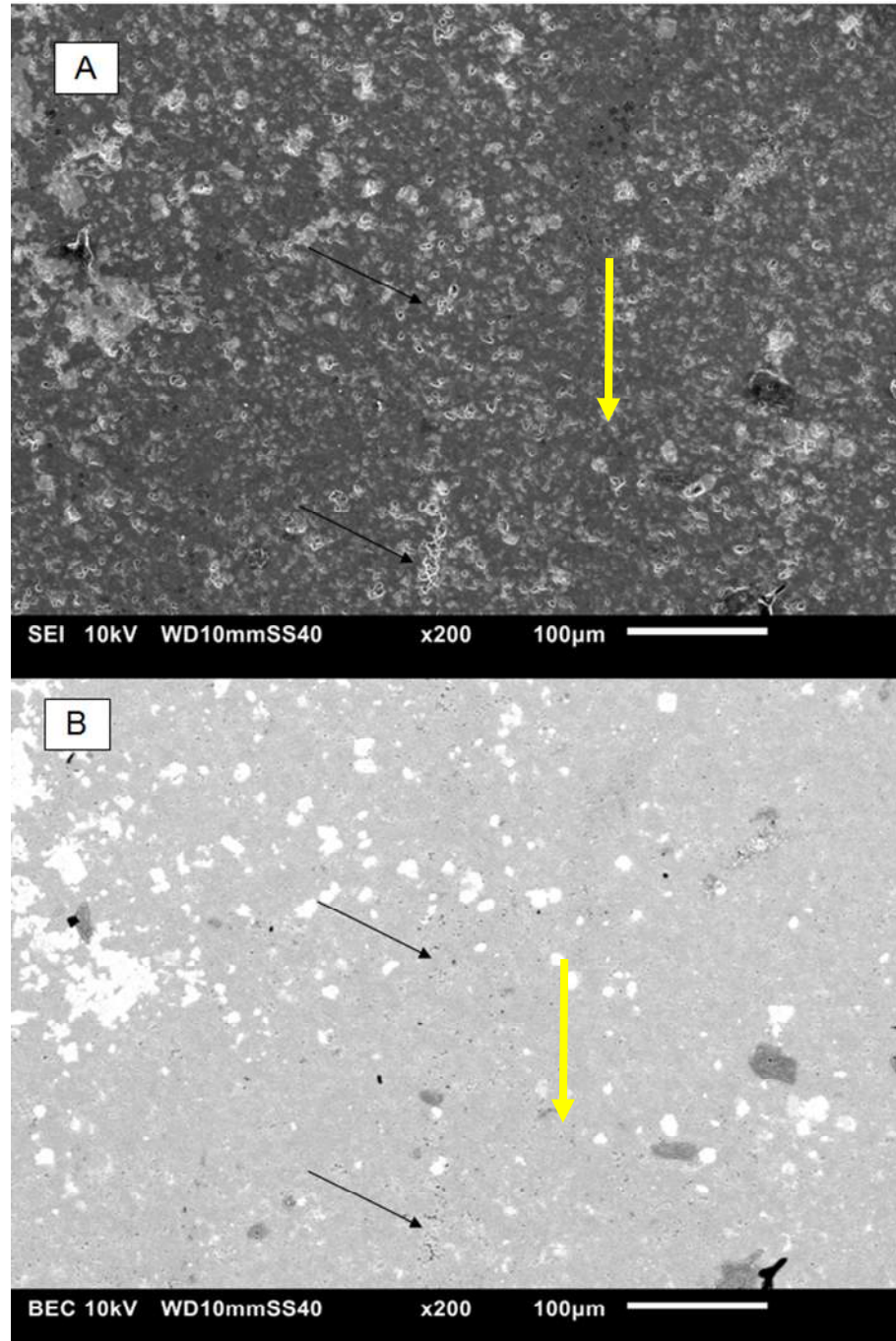


Figura 34 – MEV do risco de 9 N com indentador Rockwell. (A) Detector secundário e (B) retroespalhado. OBS: as setas pretas indicam a aparente remoção de pequenas partículas. As amarelas, o sentido do risco. Fonte: autor.

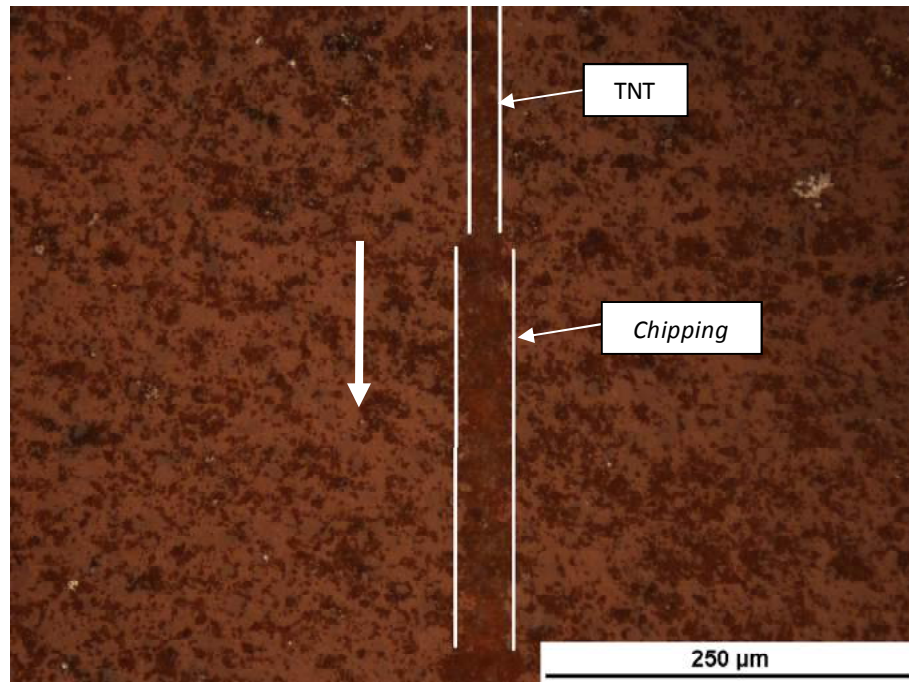


Figura 35 – Imagem com aumento progressivo da carga (0,2-10 N) com indentador Vickers sobre o jaspe. As linhas brancas mostram a discrepância na linearidade da largura do risco.
Fonte: autor.

Todas as combinações entre minerais e indentadores, em um determinado momento, com o aumento progressivo da carga, culminaram em destacamento de matéria de forma mais severa, estendendo-se fora da trilha de desgaste (Figura 36, Figura 37 e Figura 38). Esse tipo de mecanismo é conhecido por *chipping* ou *out-of-track cracking* (BESTE, LUNDVALL E JACOBSON, 2004; BI, TOKURA e YOSHIKAWA, 1988).

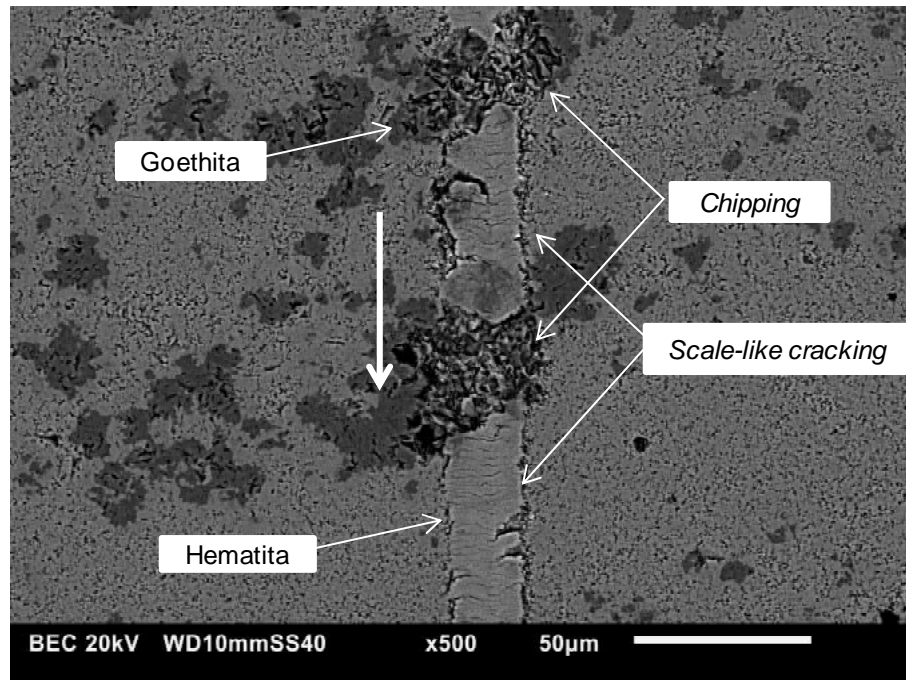


Figura 36 – Imagem do risco com aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com indetador Vickers (desgastado) sobre o veio ferrífero apresentando o mecanismo de *scale-like cracking* na hematita *out-of-track cracking* na goethita. Fonte: autor.

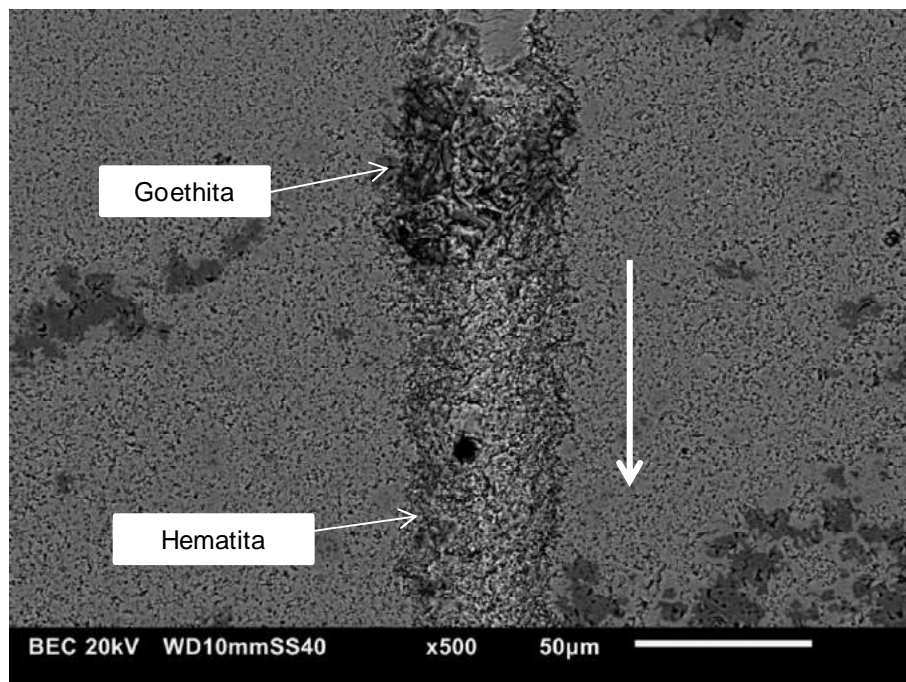


Figura 37 - Imagem do risco com aumento progressivo da carga (0,2 a 10 N) com indetador Vickers desgastado sobre o veio ferrífero apresentando o mecanismo de *chipping* ou *out-of-track cracking* na goethita e hematita. Fonte: autor.

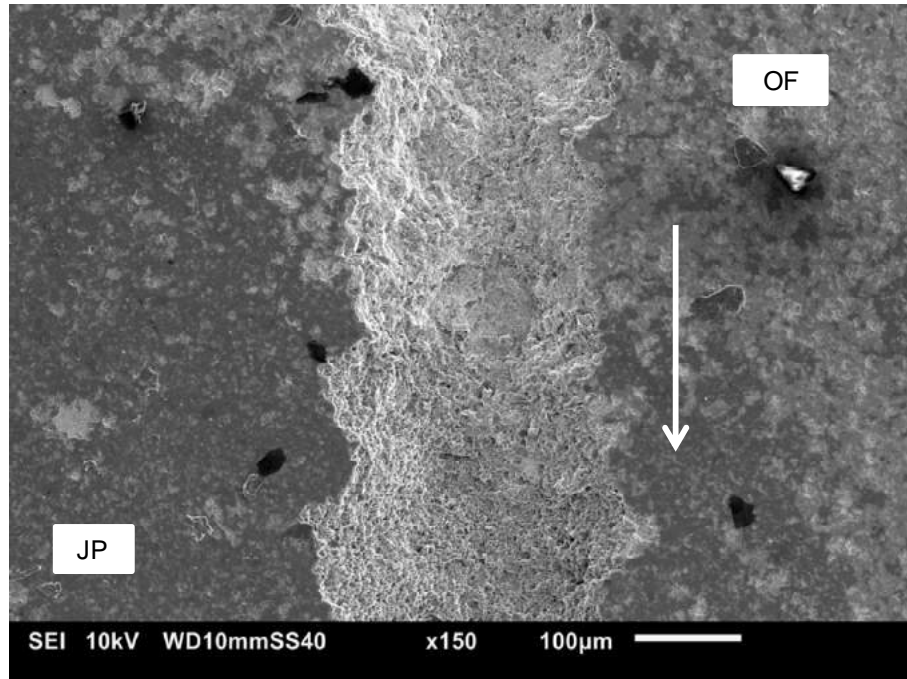


Figura 38 – Imagem de risco, com carga de 81 N e indentador Rockwell, apresentando trincamento fora trilha sobre jaspe (JP) e óxidos de ferro (OF). Fonte: autor.

Além da hematita, da goethita e do jaspe, as amostras, também, são constituídas de veios de quartzo. Esse mineral influenciou na resposta tribológica dos minerais que o tangenciam, tendendo a fragilizá-los, como pode ser percebido na Figura 39 para o jaspe e na Figura 40 para a hematita. O próprio veio de quartzo exibiu uma resposta muito mais frágil ao riscamento em relação aos demais, como ilustrado na Figura 41.

O quartzo é um mineral de origem magmática intrusiva, ou seja, solidificou-se lentamente no interior da rocha, possibilitando assim o crescimento extensivo de seus grãos. Os minerais próximos a esse veio, possivelmente, sofreram metamorfismo de contato ocasionando em crescimento dos grãos próximos ao veio de quartzo (Figura 39), que como já foi explicado anteriormente, pode ser deletério no que tange a extensão da fratura (RICE, FREIMAN e BECHER, 1981 e KLECKA e SUBHASH, 2008).

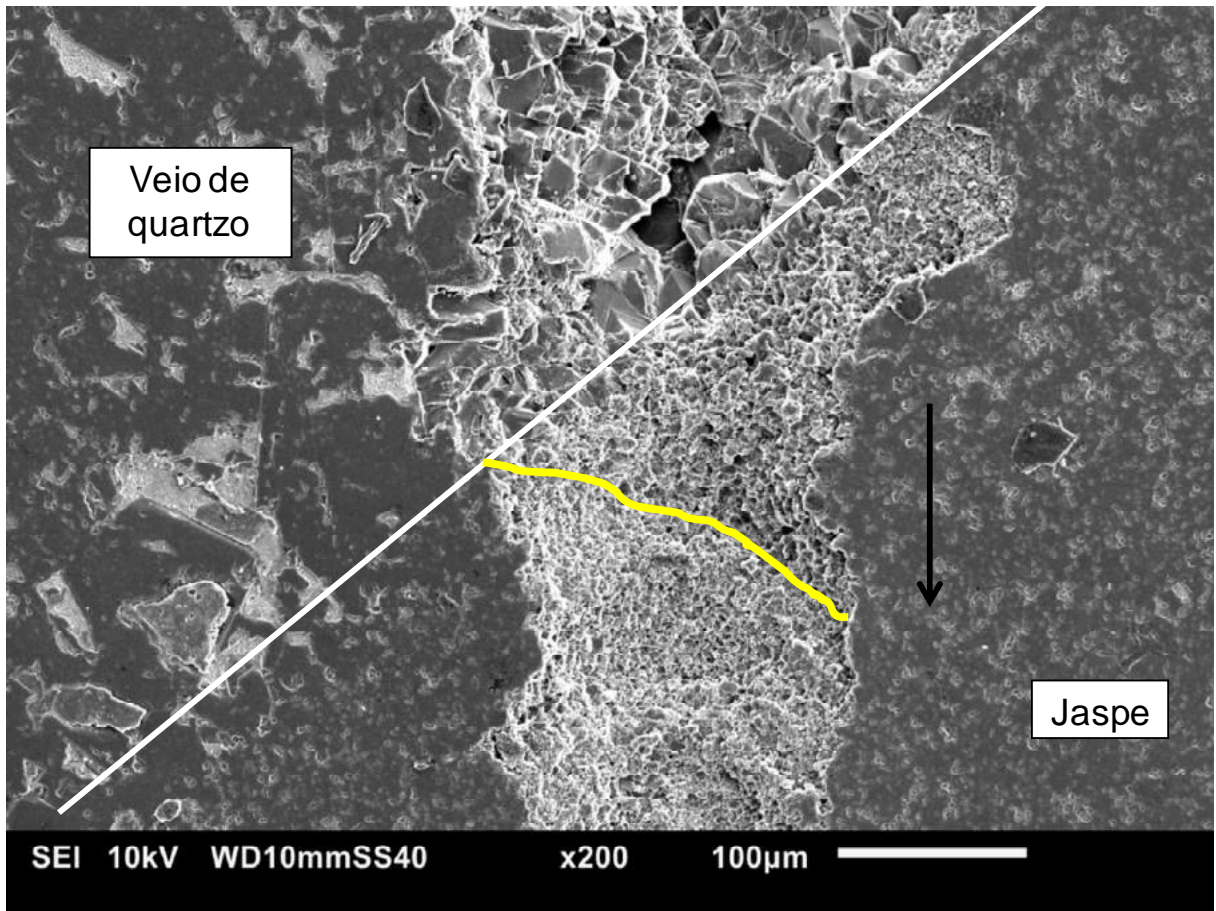


Figura 39 - MEV – Rockwell – 60 N apresentando a influência do veio de quartzo no jaspe. A micrografia indica que os grãos tem granulometrias diferentes, possivelmente, devido ao metamorfismo de contato. Nota: A linha branca separa o veio de quartzo dos outros minerais, e a linha amarela separa a zona metaformizada da não metaformizada. Fonte: autor.

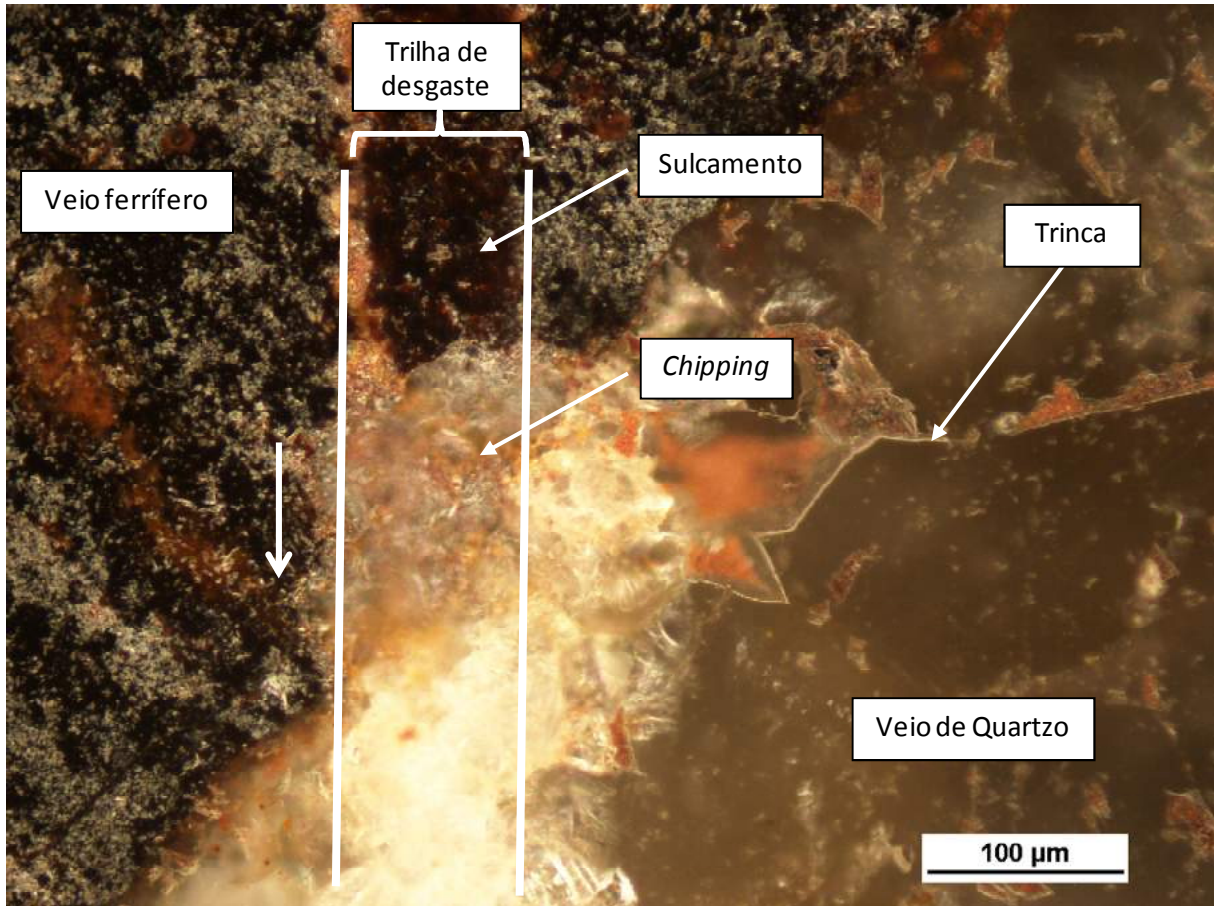


Figura 40 - Micrografia - Rockwell - 28 N - Veio de quartzo e sua influência. Transição entre sulcamento e trincamento fora da trilha no veio de hematita e trincamento fora da trilha no quartzo. Fonte: autor.

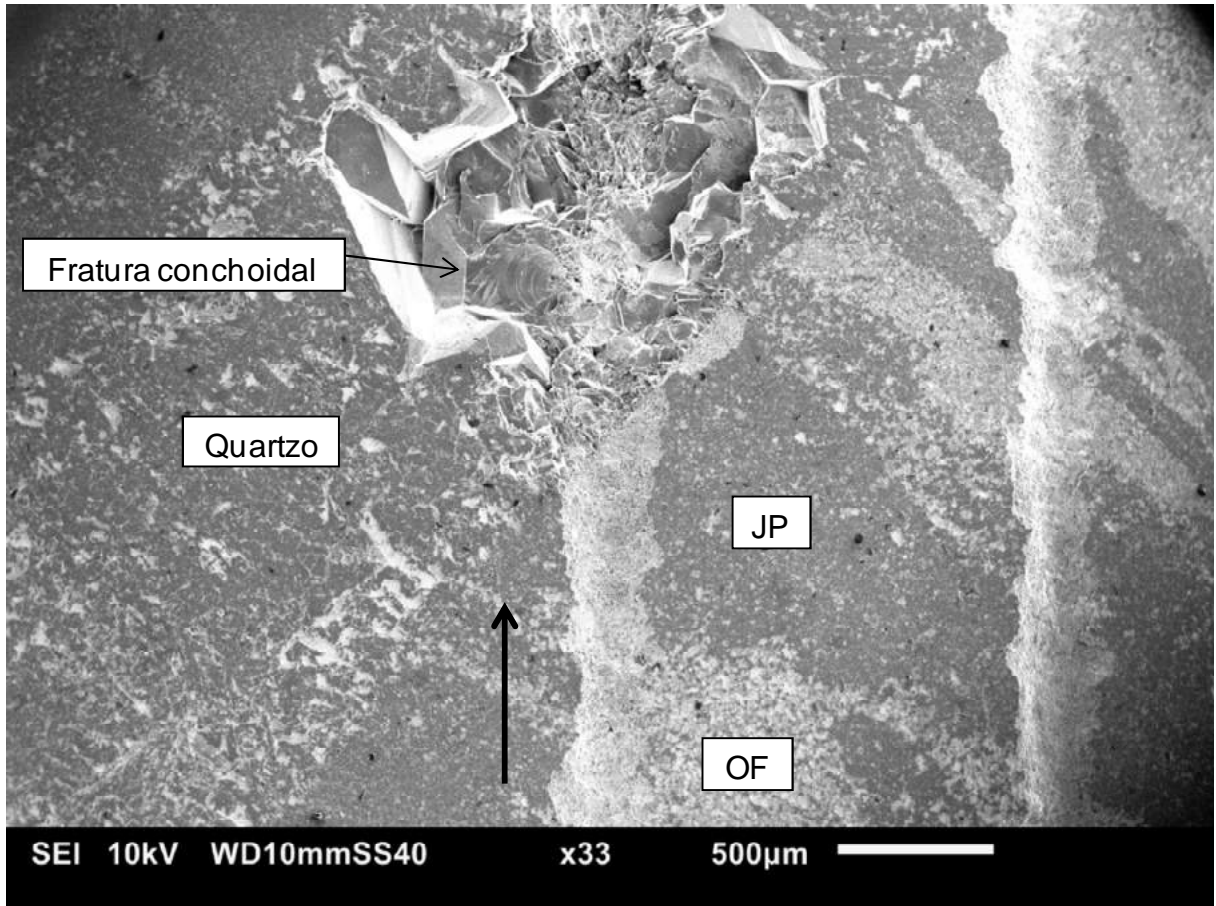


Figura 41 – MEV – Rockwell - 90 N. Comparação da extensão do dano entre o veio de quartzo e os outros minerais e fratura conchoidal no quartzo. Nota: a seta indica o sentido do risco. Fonte: autor.

4.3.2 Cargas críticas de transição de mecanismos

Após a conclusão dos ensaios, foi construída uma tabela indicando o intervalo aproximado de cargas em que cada mecanismo é observado para cada condição.

Indiretamente, através da análise da Tabela 5, é possível identificar as cargas críticas de transição de mecanismos.

Tabela 5 – Intervalo de cargas, em Newton, de ocorrência de mecanismos para cada condição. Fonte: autor.

Indentador	Banda	Mineral	Mecanismo				
			<i>Burnishing</i>	Sulcamento	<i>Scale-like cracking</i>	TNT	<i>Chipping</i>
Vickers	Ferrífera	Hematita	-	-	-	0,2-0,4	> 0,4
		Goethita	-	-	-	-	> 0,2
	Silicosa	Jaspe	-	-	-	0,2-0,5	> 0,5
Vickers (desgastado)	Ferrífera	Hematita	-	0,2-0,4	0,3-2,6	-	> 2
		Goethita	-	0,2-0,3	0,3-0,5	-	> 0,4
	Silicosa	Jaspe	-	-	-	0,2-3	> 3
Rockwell	Ferrífera	Hematita	2-15	10 - 49	-	-	> 45
		Goethita	2-7	5 - 25	-	-	> 20
	Silicosa	Jaspe	-	-	-	9-54 N	> 50
Knoop	Ferrífera	Hematita	-	0,2 - 8	-	-	-
		Goethita	-	0,2 - 8	-	-	-

As cargas críticas para transição de mecanismos nos ensaios com indentador Vickers foram muito menores que nos ensaios com indentador Rockwell e tanto o mecanismo de *burnishing* quanto de sulcamento não foram observados, como apresentado na Tabela 5.

Comparado ao Rockwell, o Vickers é um indentador afiado, o que pode gerar um campo elasto plástico de tensões devido à indentação e, conseqüentemente, a uma forma mais severa de fratura levando diretamente ao desgaste (LAWN e WILSHAW, 1975; LAWN e SWAIN, 1975).

Como pode ser visto na Tabela 5, as cargas críticas de transição de mecanismos relativas ao indentador Vickers desgastado são menores, além da observação de mecanismos dúcteis nos ensaios com esse indentador.

Após a remoção de sua extremidade (Figura 19), o indentador Vickers deixar de ser afiado, que como explicado acima, essa geometria pode gerar formas de fratura menos severas. Outro ponto que pode contribuir para aumento das cargas críticas de transição, para esse caso, é o novo ângulo de ataque, muito menos agudo, entre indentador e rocha nas cargas iniciais. Segundo Challen e Oxley (1979) e Hokkirigawa e Kato (1988), um ângulo de ataque pequeno induz ao sulcamento plástico e a coeficientes de atrito mais baixos. O trabalho desses autores também

corroborar o comportamento dúctil dos minerais estudados quando sujeitos ao riscamento pelo indentador Knoop. Apesar de afiado, esse indentador tem baixo ângulo de ataque ($3^{\circ}75'$).

Outro aspecto observável são as menores cargas de transição para a goethita. Esse mineral, pertencente ao grupo dos hidróxidos, possui ligações mais fracas do tipo ponte de hidrogênio, como mostrado na seção 2.1.1, acarretando em uma menor resistência ao desgaste, quando comparado aos demais minerais constituídos de ligações iônico-covalentes. A Figura 36 ilustra tal comportamento demonstrado pela transição entre scale-like cracking (hematita) para chipping (goethita) para as mesmas condições.

Como pode ser visto na Tabela 5 e nas figuras anteriores, em nenhuma das condições o jaspe apresentou o mecanismo de sulcamento, ao contrário dos outros minerais, o que demonstra o comportamento mais frágil do mesmo, porém apresentou as maiores cargas críticas de transição. Já a hematita teve cargas de transição próximas a do jaspe, além de responder de maneira dúctil em condições semelhantes.

4.3.3 Atrito

Para evitar o uso do termo “coeficiente de atrito” que pode ter outras implicações, nesse trabalho será utilizado o termo “coeficiente de atrito aparente (μ)”. Nesse trabalho “ μ ” é razão entre forças, tangencial e normal.

Após a determinação das cargas críticas de transição de mecanismos, os dados referentes ao coeficiente de atrito aparente foram armazenados e dispostos em tabela. Foi percebida uma correlação entre atrito e mecanismos de desgaste, como mostrado na Tabela 6.

Pode-se constatar que, para mecanismos de desgaste mais severos, o μ é maior, para as mesmas condições. Esse resultado, também, foi observado por Beste, Lundvall e Jacobson (2004) em diversos tipos de rocha, como descrito na Tabela 2.

Segundo Hutchings (1992) e Blau (2009), o trincamento, que aumenta com a severidade da resposta ao riscamento, é um mecanismo adicional de dissipação de energia, que pode resultar em um aumento do coeficiente de atrito.

Também foi observado maior μ para os óxidos de ferro. Possivelmente, esse aumento está relacionado com a presença de deformação plástica nesses minerais, sendo assim um mecanismo adicional de dissipação de energia.

Em condições onde não foi observado desgaste evidente (indentador Rockwell sobre o jaspe em cargas menores que 9 N), o coeficiente de atrito variou entre 0,06 e 0,08. Segundo Briscoe e Stolarski (1993), nessas condições, a energia é dissipada através do cisalhamento de filmes interfaciais, justificando os baixos valores encontrados.

Tabela 6 - Estimativa do coeficiente de atrito aparente (μ) em cada configuração. Fonte: autor.

Identador	Banda	Mecanismo				
		<i>Burnishing</i>	Sulcamento	<i>Scale-like cracking</i>	TNT	<i>Chipping</i>
Vickers	Ferrífera	-	-		0,40-0,42	0,42 - 0,45
	Silicosa	-	-	-	0,26-0,32	0,32 - 0,36
Vickers (desgastado)	Ferrífera	-	0,25-0,28	0,28-0,33	-	0,33-0,43
	Silicosa	-	-	-	0,11-0,20	0,20-0,33
Rockwell	Ferrífera	0,08-0,12	0,12-0,15	-	0,15-0,20	0,20-0,31
	Silicosa	-	-	-	0,09-0,15	0,15-0,23
Knoop	Ferrífera	-	0,06-0,1	-	-	-

4.4 ENSAIOS VARIANDO A CARGA NORMAL

4.4.1 Desgaste

Após medição da área média da seção transversal dos riscos, via interferometria, foi confeccionado um gráfico da variação da taxa de desgaste com a carga normal, onde uma função crescente foi observada (Figura 42). O resultado está de acordo com os obtidos nos trabalhos de Desa e Bahadur (1999) e de Li, Shapiro e Li (1998) em ensaios de esclerometria sobre cerâmicos.

Quanto maior a carga normal, maior a profundidade do risco e extensão do dano, logo, maior a taxa de desgaste. O comportamento linear da taxa de desgaste mostrada do gráfico abaixo, sendo similar ao comportamento de materiais metálicos sujeitos ao ensaio de esclerometria, talvez, possa ser explicada pelo diminuto tamanho de grão dos minerais estudados. Devido a esse pequeno tamanho, as trincas não se estendem muito além do contato, o que resulta em uma morfologia do risco muito próxima a do indentador Vickers (Figura 22), assim como em ensaios em metais, com exceção da formação de *rigdes*, que ocorrem nestes últimos.

Além disso, para as mesmas condições, a taxa de desgaste do jaspe é maior do que os óxidos de ferro, apesar de ambos apresentarem cargas críticas de transição para *chipping* semelhantes.

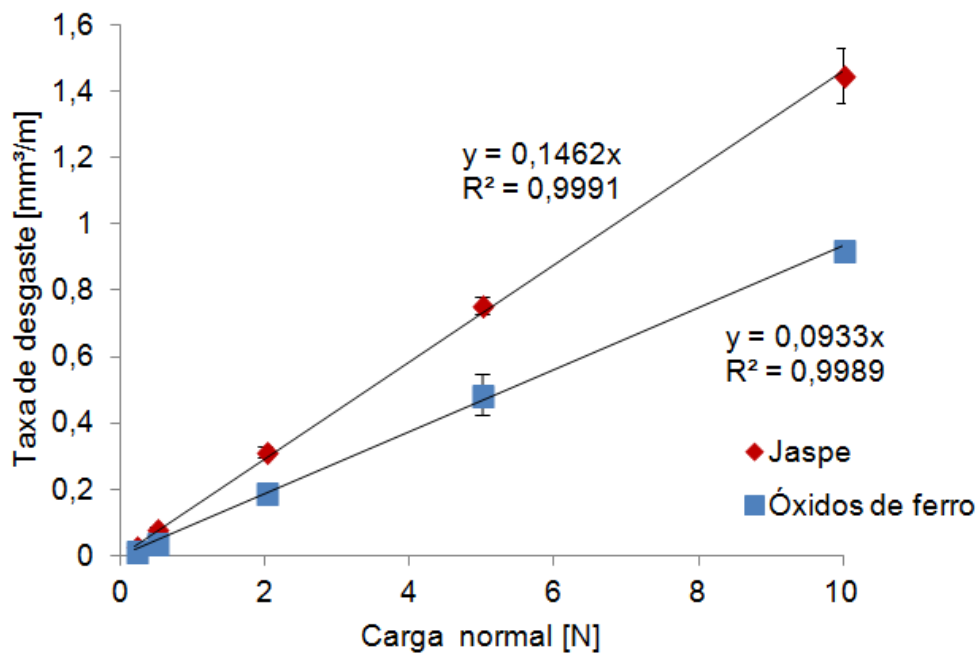


Figura 42 – Gráfico apresentando a dispersão da taxa de desgaste com a carga normal para hematita e jaspe. Indentador Vickers e 0,05 mm/s. Fonte: autor.

No gráfico da Figura 43, pode-se observar que a taxa de desgaste específica, tanto para os óxidos de ferro (OF) quanto para o jaspe (JP), é menor nas menores cargas. Esse comportamento pode ser atribuído à ocorrência de mecanismos de desgaste menos severos (trincamento na trilha) nessas cargas (Tabela 5).

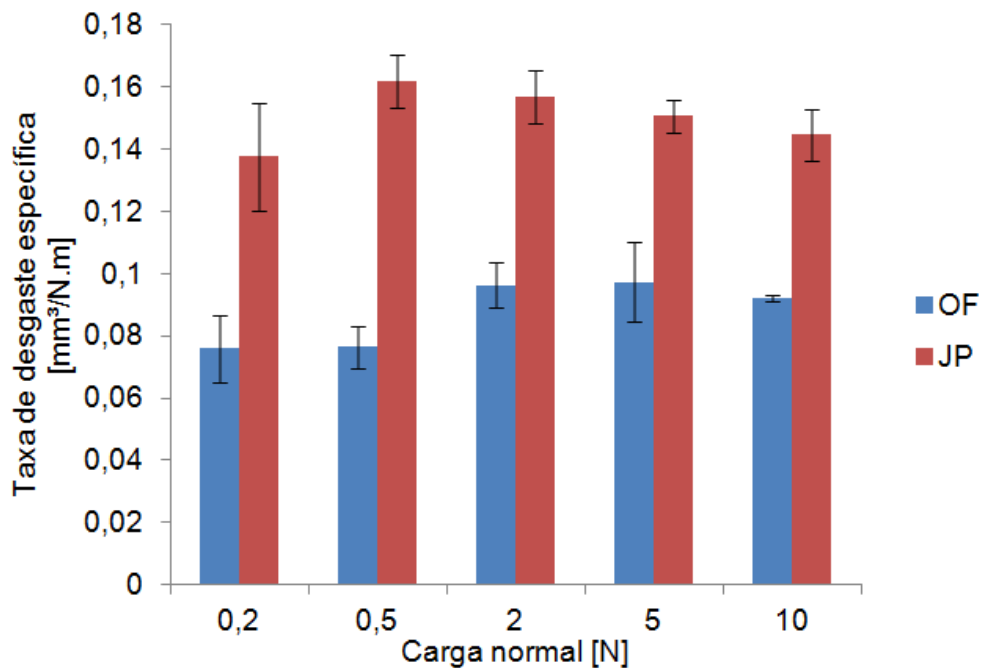


Figura 43 – Variação da taxa de desgaste específica com a carga normal para ambos os minerais. Fonte: autor.

4.4.2 Atrito

O gráfico da Figura 44, apresenta uma tendência à estabilização do coeficiente de atrito para cargas maiores que 0,5 N em ambos minerais com indentador Vickers. Esse comportamento está de acordo com as cargas críticas de transição de mecanismos da Tabela 5, que apresenta uma transição de (TNT para *chipping*) entre 0,3 e 0,5 N para ambos minerais com esse indentador. Esse último mecanismo permanece inalterado, mesmo com o aumento da carga normal até 10 N.

Ainda no mesmo gráfico, estão descritos o comportamento do atrito aparente para o indentador Vickers desgastado, no jaspe e no veio dos óxidos de ferro. Nele é perceptível o aumento progressivo do atrito, alcançando valores próximos aos dos indentadores afiados na carga de 10 N. Esse resultado, também, foi encontrado por Li, Shapiro e Li (1998) em ensaios sobre o vidro comum (Figura 13). Esse efeito está de acordo com a Tabela 5, onde são apresentadas maiores cargas críticas de transição para o indentador Vickers desgastado, além da presença de mecanismos menos severos.

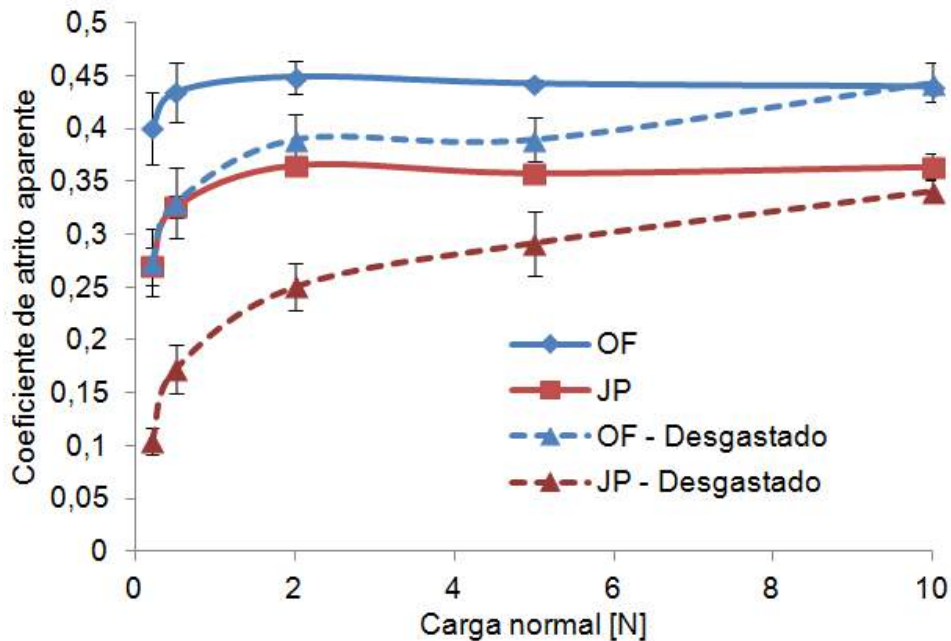


Figura 44 – Coeficiente de atrito em função da carga normal, para ambos minerais, e diferentes condições do indentador Vickers (perfeito e desgastado). Fonte: autor.

4.5 ENSAIOS VARIANDO A DISTÂNCIA ENTRE RISCOS

4.5.1 Mecanismos de desgaste

Não foi notada alteração nos mecanismos de desgaste em nenhum grau de superposição. Como pode ser verificado através da comparação entre a imagem da Figura 45, onde os riscos estão no grau de superposição de -20%, e da Figura 46, onde os riscos se encontram no grau de 80% e 100%, respectivamente.

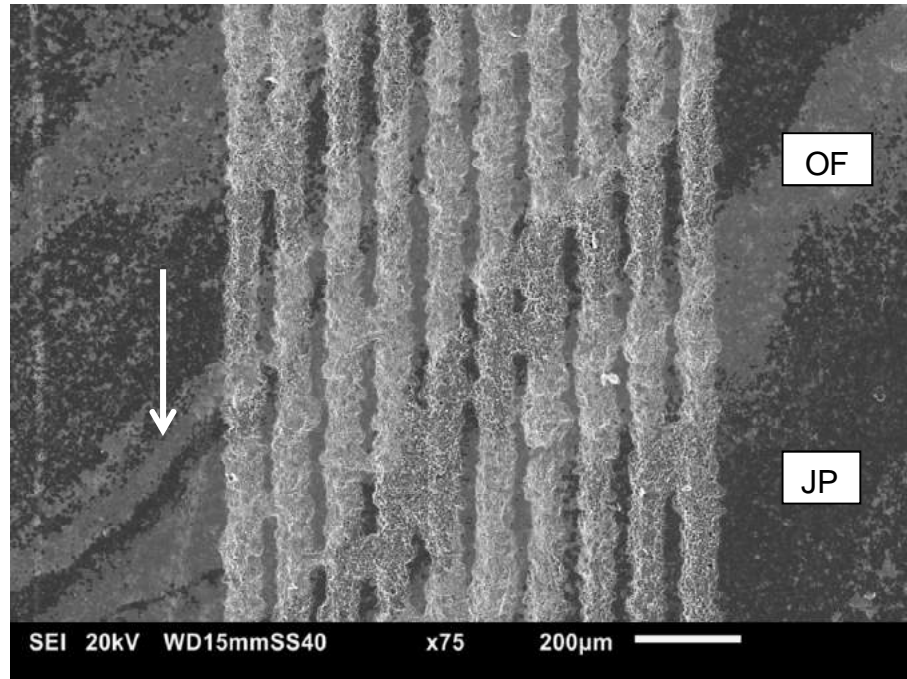


Figura 45 – MEV dos riscos no grau de superposição de -20%.OBS: carga normal de 5 N e indentador Vickers. Fonte: autor.

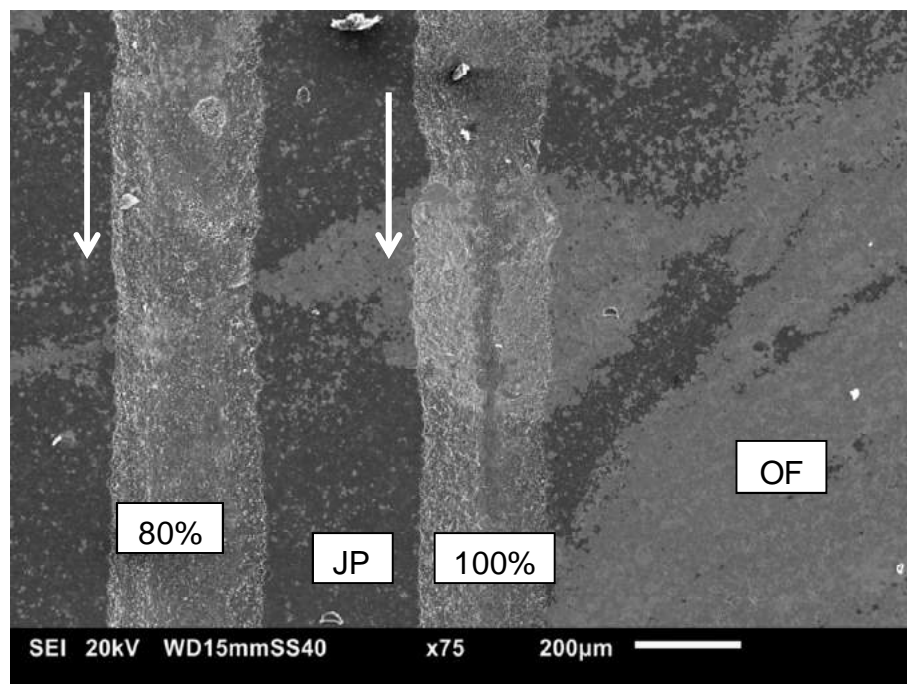


Figura 46 - MEV dos riscos no grau de superposição de 80 e 100%. OBS: carga normal de 5 N e indentador Vickers. Fonte: autor.

Essa não alteração dos mecanismos de desgaste também foi notada por Saloto (2010), em cargas elevadas (Figura 16).

4.5.2 Desgaste

As taxas de desgaste em função da distância entre riscos para os três ensaios estão apresentadas no gráfico da Figura 47 e da Figura 48. Como se pode observar por esses gráficos, a taxa de desgaste, para o mesmo grau de superposição, é sempre maior para o jaspe do que para o veio ferrífero. Após uma rápida análise, ainda desses mesmos gráficos, percebe-se uma tendência de maiores taxas de desgaste para os graus de superposição de -20 e 20% para o jaspe e 0 e 40% para os óxidos férreos.

Os valores de taxa de desgaste são menores em todos os graus no terceiro ensaio porque o mesmo foi realizado com indentador Vickers desgastado.

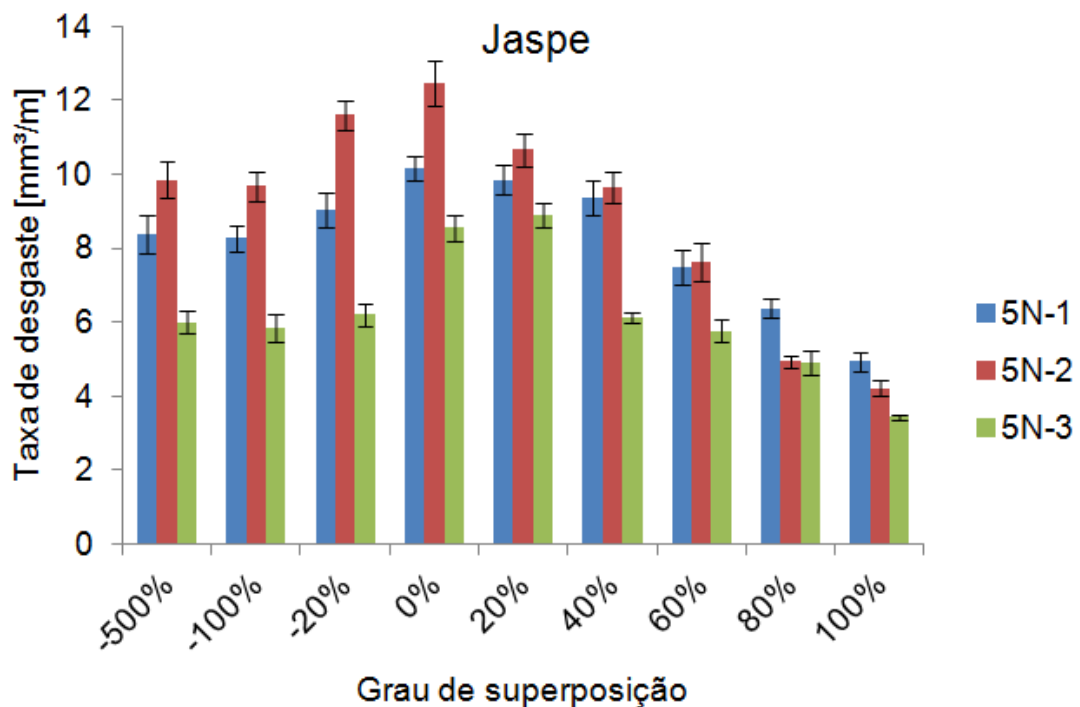


Figura 47 - Variação da taxa de desgaste com a distância entre riscos para o jaspe em três ensaios distintos. Fonte: autor.

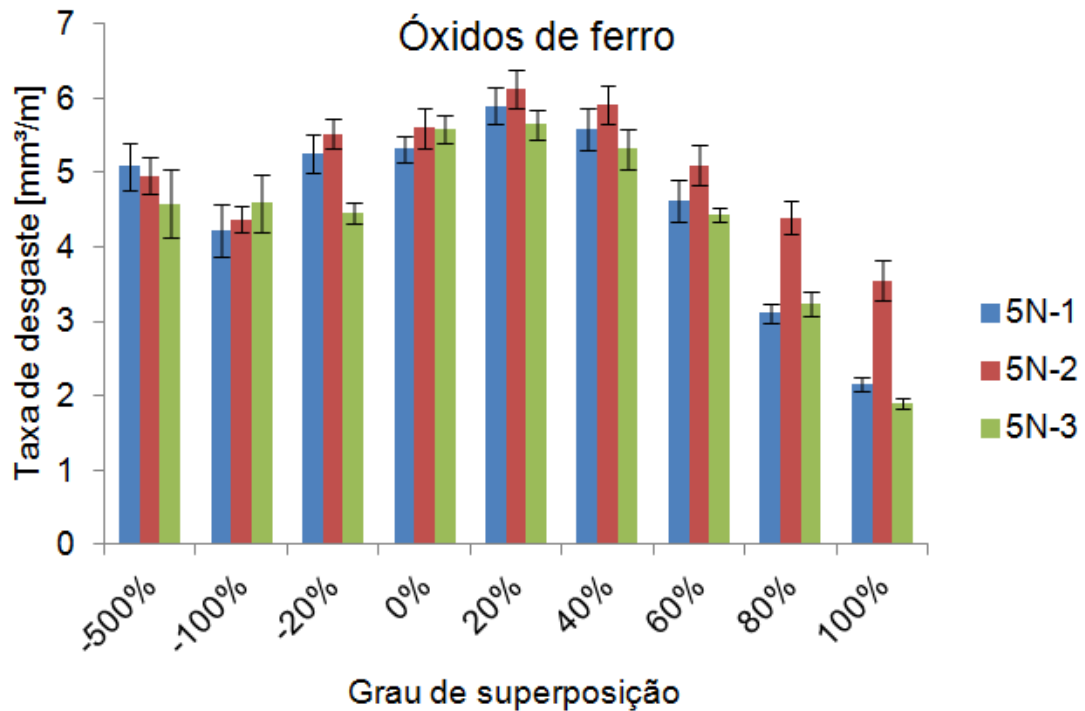


Figura 48 – Variação da taxa de desgaste com a distância entre riscos para o veio ferrífero em três ensaios distintos. Fonte: autor.

As figuras a seguir apresentam imagens e perfis médios, gerados através do analisador tridimensional de superfícies, de 10 riscos nos respectivos graus de superposição.

Os riscos da Figura 49 estão no grau de superposição de -100%, verificando o perfil médio desses riscos, é possível perceber um platô intacto entre cada risco, afirmando a inexistência de qualquer influência do grau de superposição na taxa de desgaste, que como esperado, foi a mesma do grau de superposição anterior (-500%).

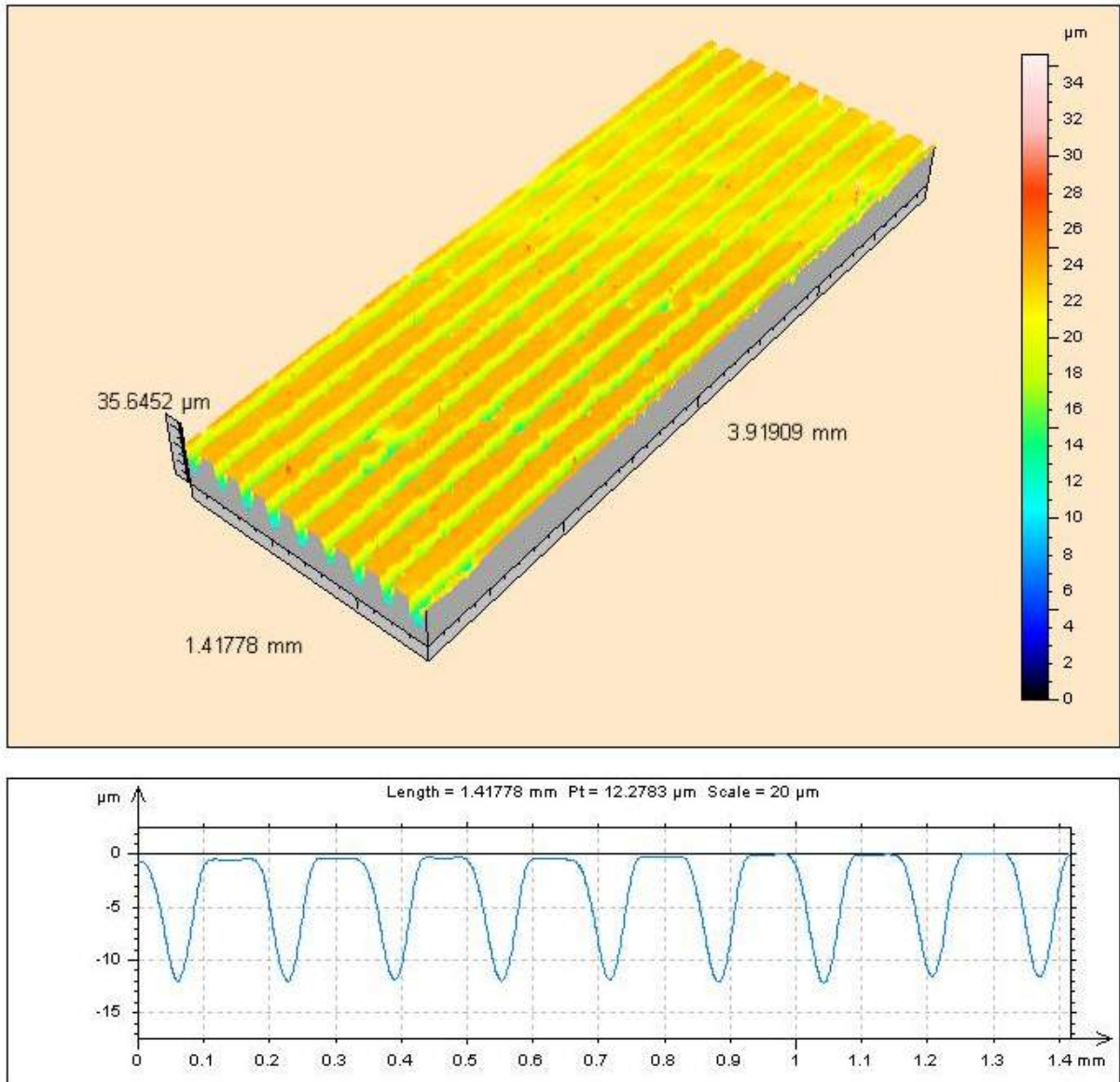


Figura 49 - Imagem em 3D e perfil médio, gerados via interferometria, dos riscos com grau de superposição de -100%. Fonte: autor.

A imagem da Figura 50 representa o grau de superposição de -20%. Nessa imagem, as regiões em que os riscos estão bem definidos são constituídas principalmente de hematita e goethita, já as outras regiões, de jaspe, ilustrando as diferenças quanto a seus comportamentos. Esta disparidade é devida não necessariamente à influência da distância entre os riscos ser maior no jaspe, mas, possivelmente, à maior largura do risco quando no jaspe, ou seja, para mesma carga normal, a largura do risco é maior no jaspe do que nos óxidos de ferro, o que se traduz em uma distância menor entre riscos para o jaspe em um mesmo grau de superposição.

O perfil médio dos riscos nesse grau de superposição é representado por picos e vales periódicos já sem a existência do platô encontrado no grau de superposição

anterior, indicando o início da influência do grau de superposição, aumentando a taxa de desgaste.

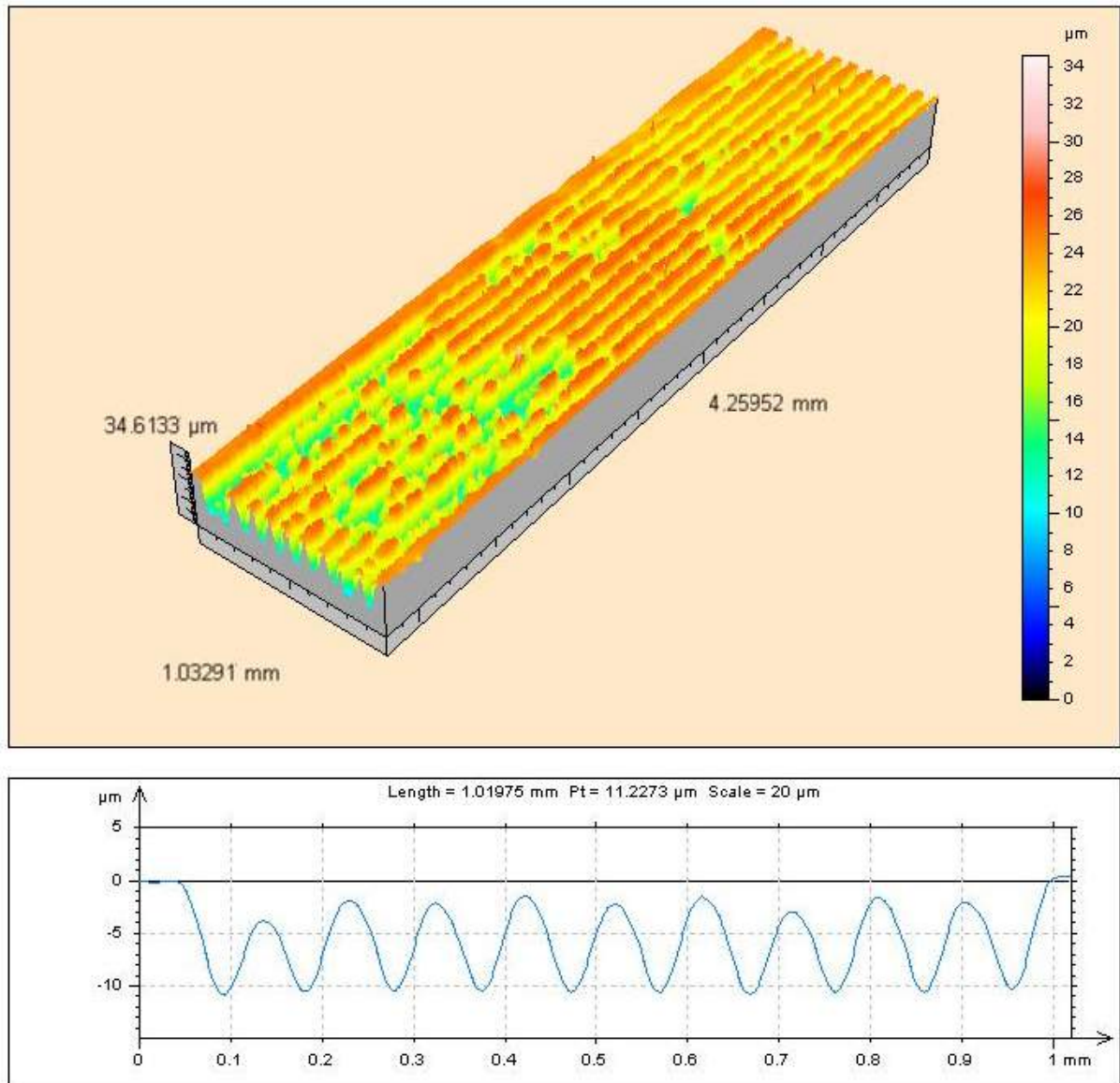


Figura 50 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de -20%.
Fonte: autor.

Na Figura 51, com os riscos realizados lado a lado (grau de superposição de 0%), podemos observar uma redução na amplitude dos picos e vales, o que explica os maiores valores de taxa de desgaste para o jaspé.

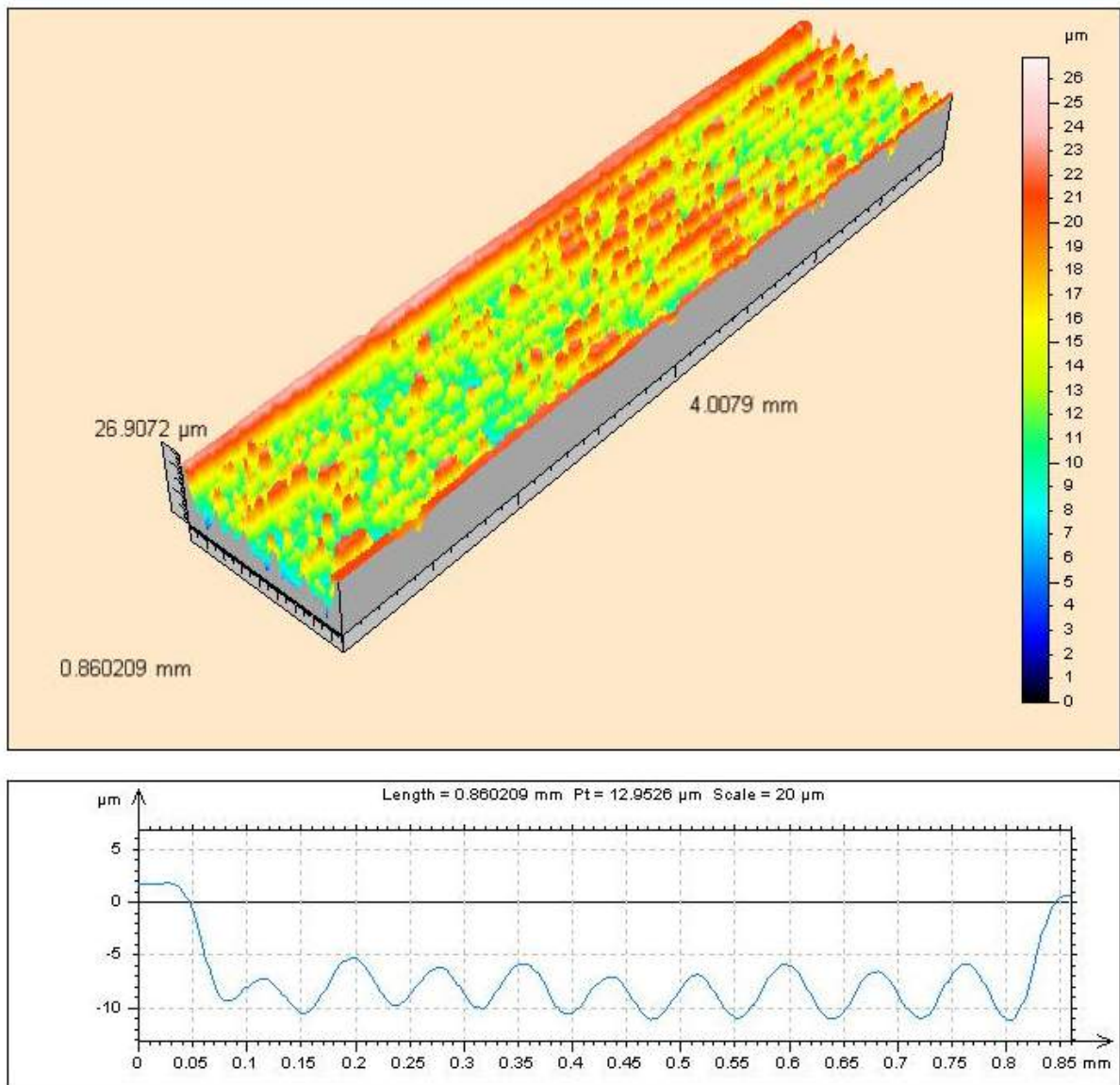


Figura 51 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 0%.
Fonte: autor.

Já para o grau de 20% (Figura 52), o processo de redução de amplitude continua atingindo, dessa maneira, a maior taxa de desgaste para os óxidos de ferro.

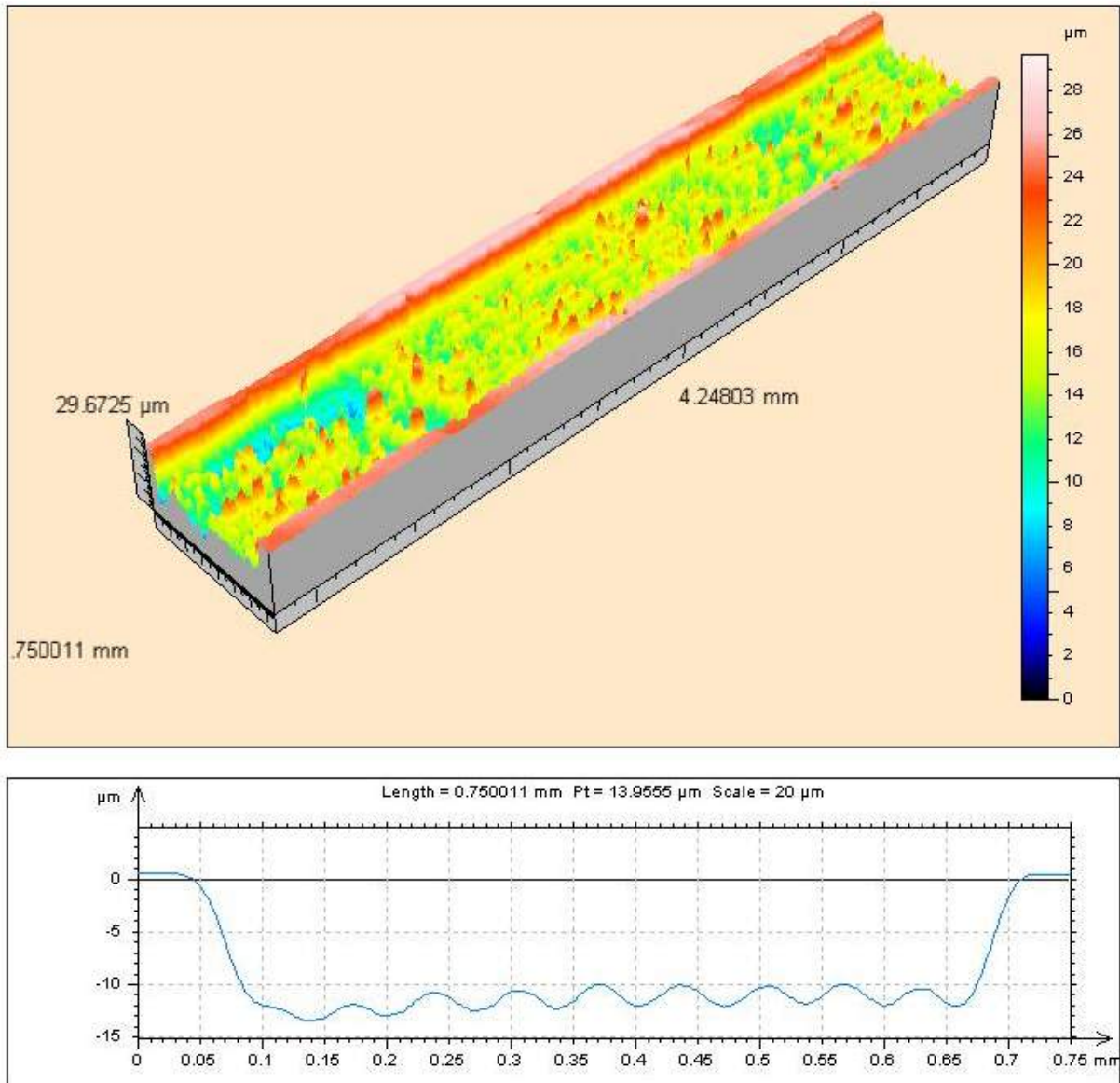


Figura 52 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 20%.
Fonte: autor.

No grau de superposição de 40% (Figura 53), o perfil médio já exibe a completa eliminação do perfil ondulado vistos anteriormente, resultando em taxas de desgaste tão altas quanto o grau de superposição anterior, para os óxidos de ferro. Para o jaspe, é exibida uma queda considerável, lembrando que para esse mineral, o grau de superposição é ligeiramente maior.

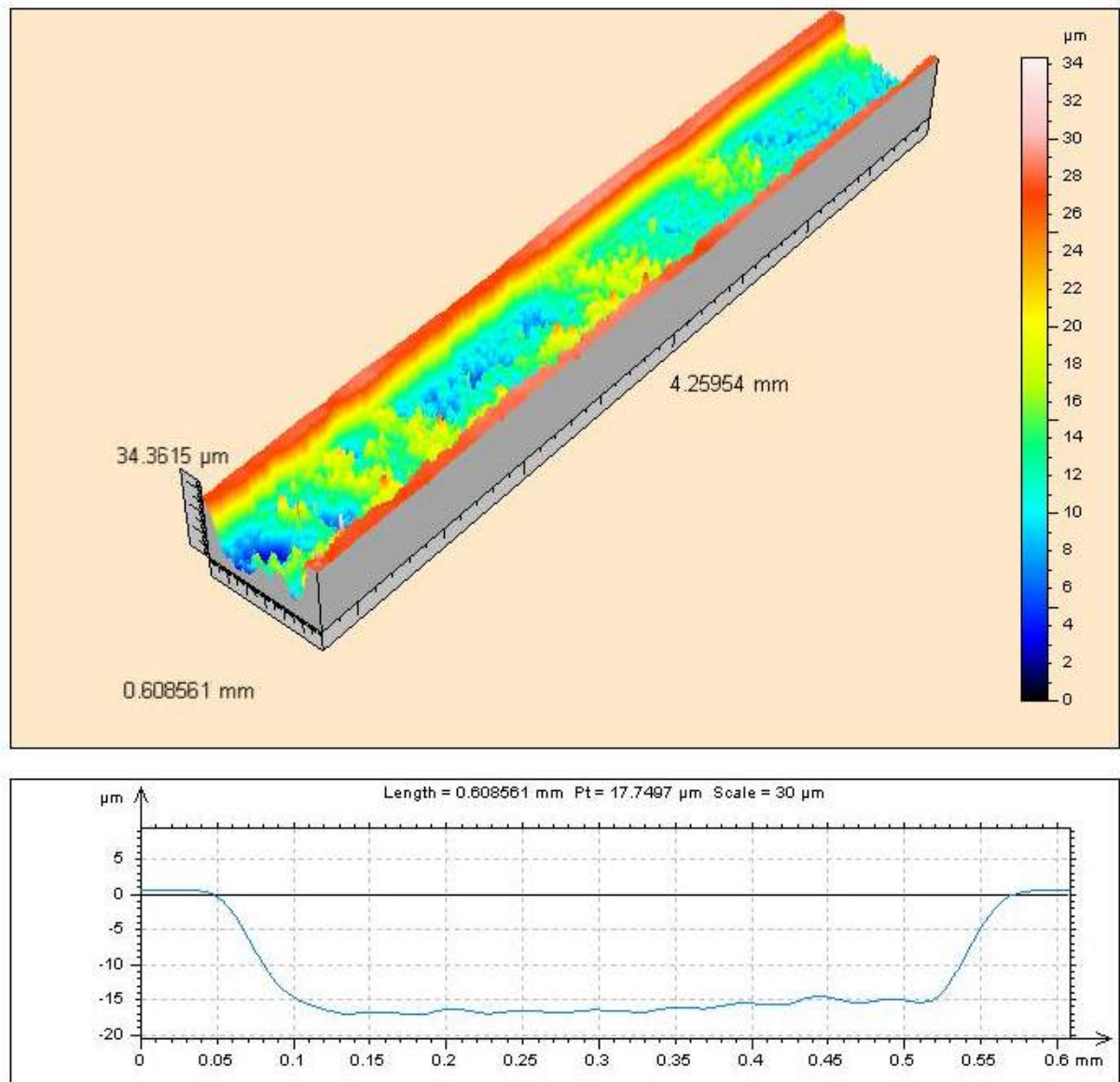


Figura 53 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 40%.
Fonte: autor.

Nos graus superiores ao grau de superposição de 40% (Figura 54), a superposição se dá de tal forma que, a cada passe, apenas um lado do indentador encontra matéria a ser removida, reduzindo cada vez mais a taxa de desgaste.

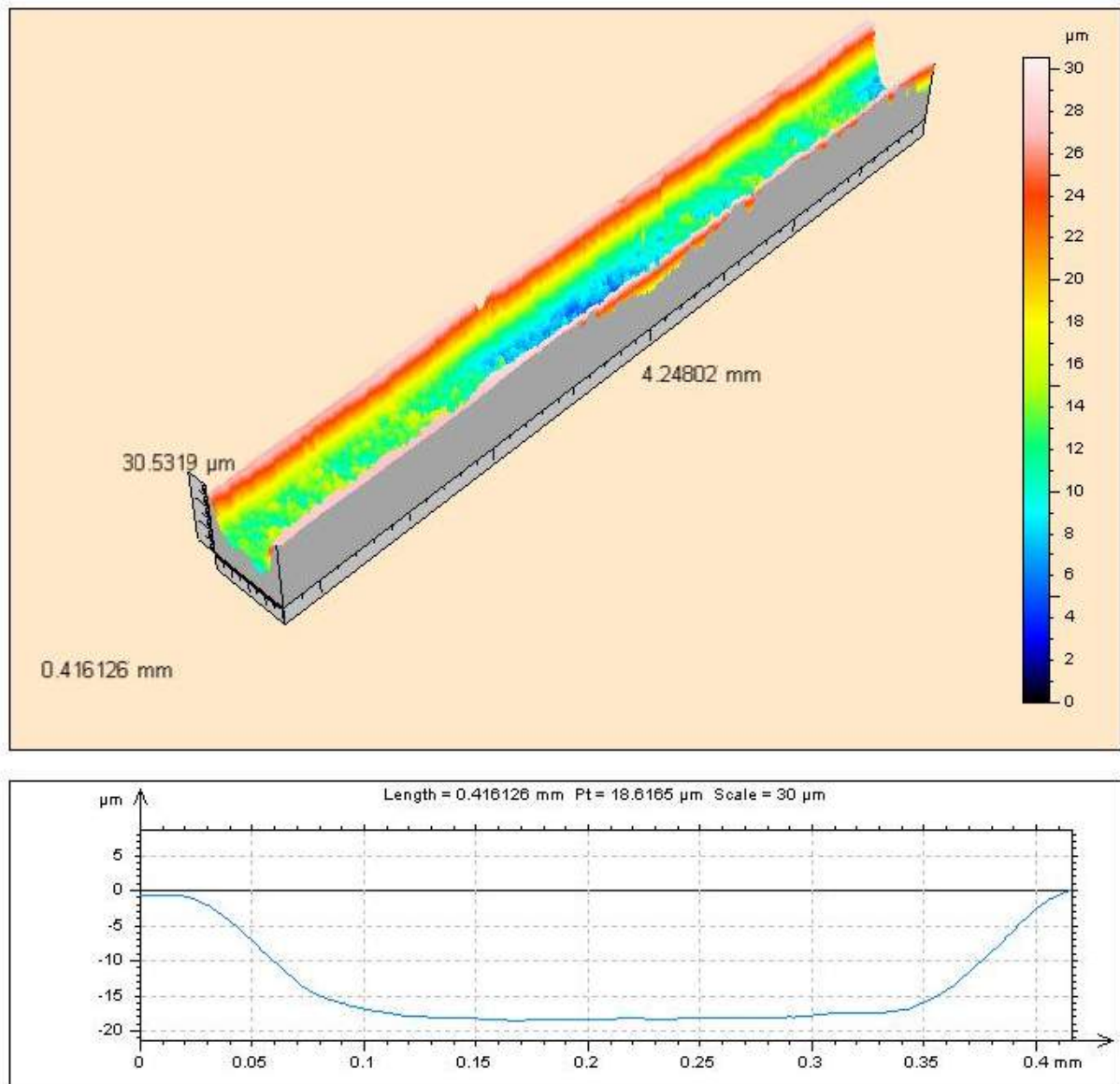


Figura 54 - Imagem em 3D e perfil médio dos riscos com grau de superposição de 60%.
Fonte: autor.

4.5.3 Atrito

Após a análise dos gráficos das Figura 55 e Figura 56, pode-se concluir que o coeficiente de atrito aparente não sofre influência do grau de superposição. O que era esperado, pois não foram observadas mudanças no mecanismo de desgaste. Os valores de coeficiente de atrito aparente são menores em todos os graus no terceiro ensaio porque o mesmo foi realizado com indentador desgastado.

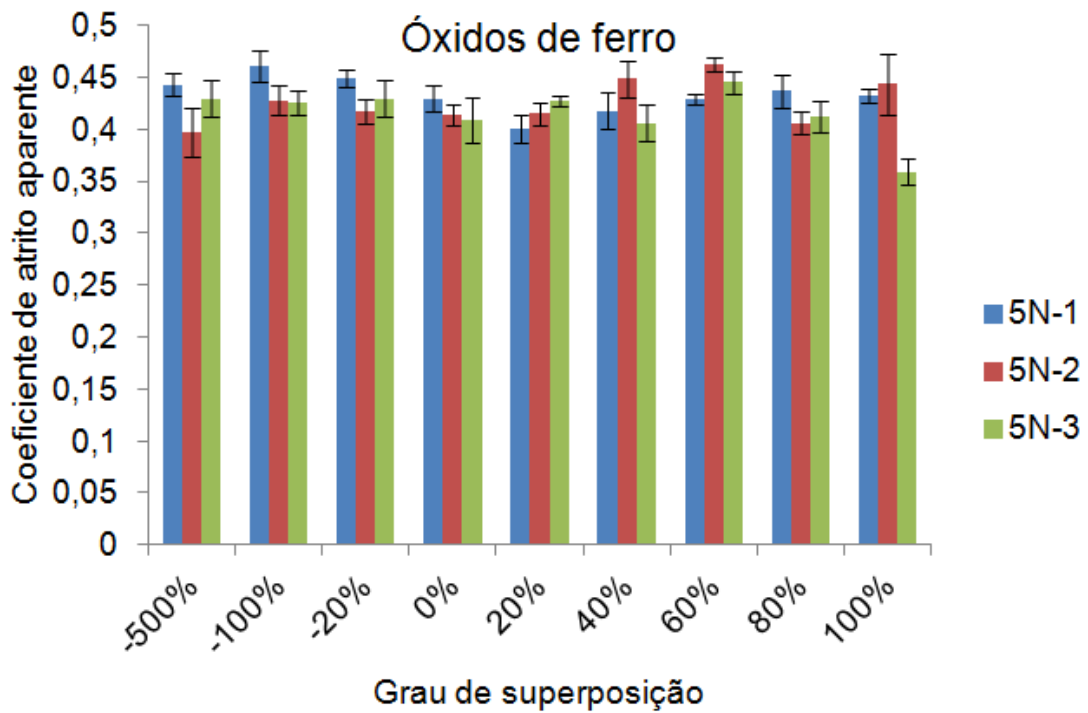


Figura 55 – Coeficiente de atrito em função do grau de superposição para o veio férreo. Fonte: autor.

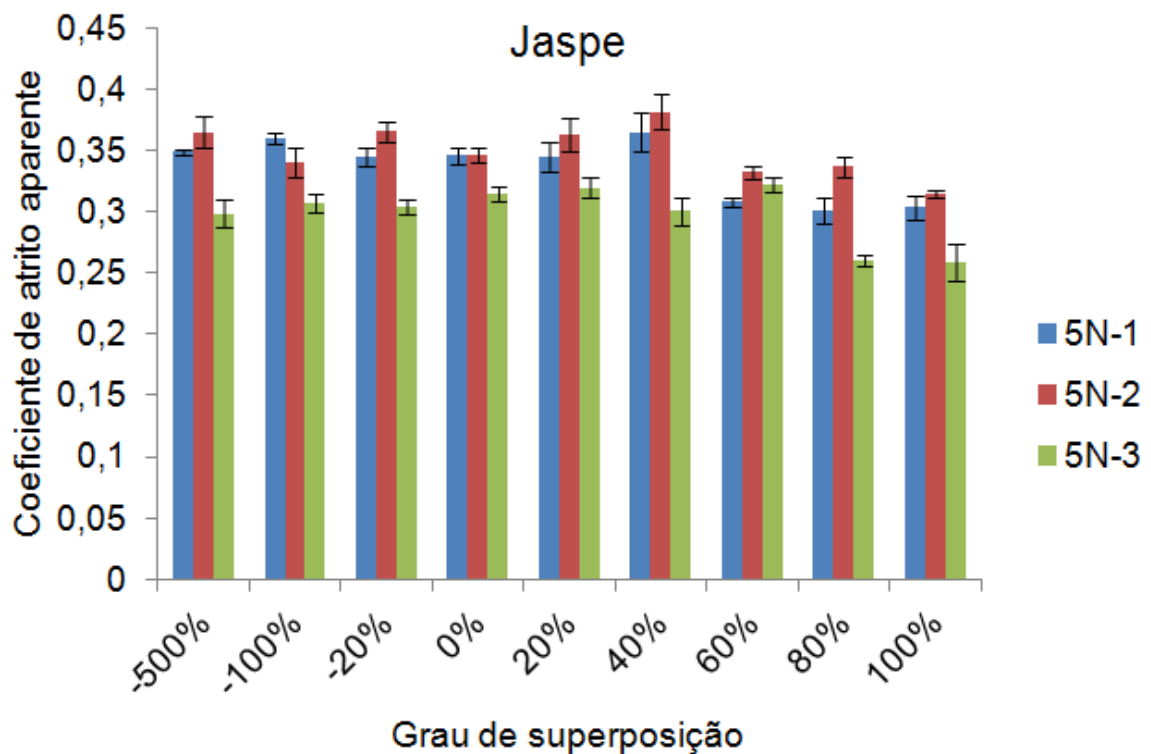


Figura 56- Coeficiente de atrito em função do grau de superposição para o jaspe. Fonte: autor.

Os gráficos (Figura 57 e Figura 58) comparam o coeficiente de atrito no primeiro risco com os demais riscos em cada grau de superposição. O primeiro risco,

independente do grau de superposição, sempre estará a um grau de superposição de -500%. Ao analisá-los, pode-se perceber que o valor do atrito no primeiro risco, na maioria das vezes, é muito semelhante a média do atrito dos outros nove riscos em mesmo grau de superposição. Logo, a variação aparentemente aleatória do coeficiente de atrito, observada nos gráficos da Figura 55 e da Figura 56, na verdade, varia em função da região onde o ensaio foi realizado.

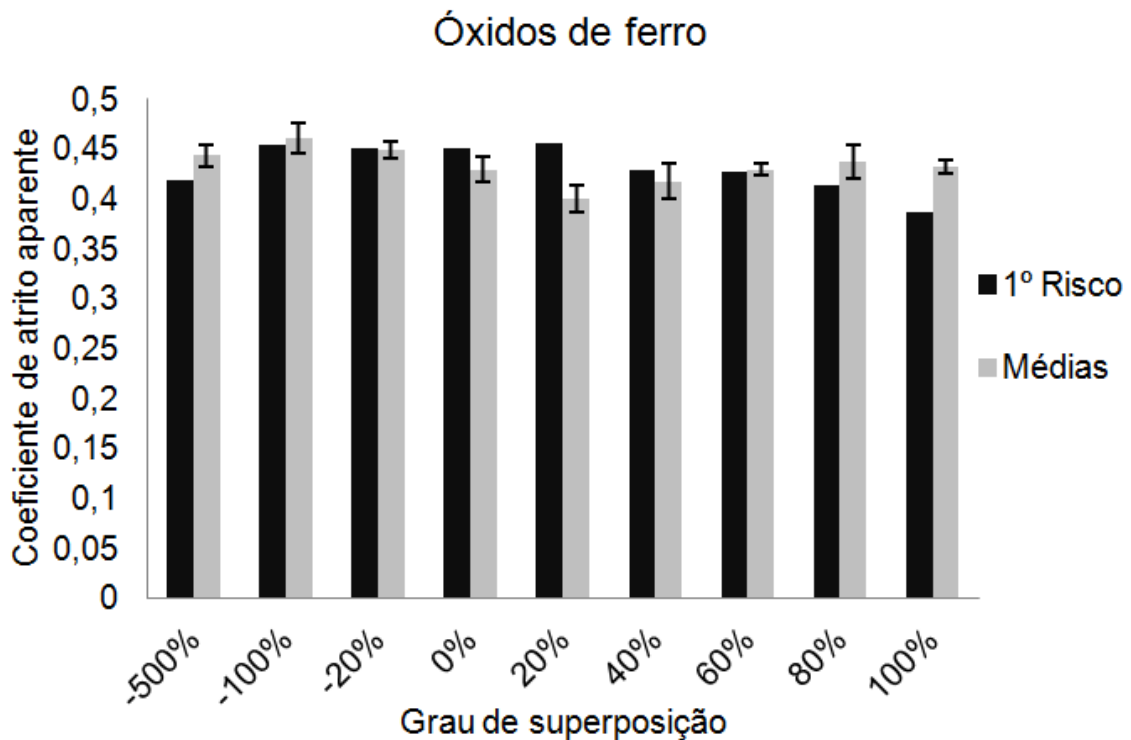


Figura 57 – Relação entre o coeficiente de atrito do primeiro risco e a média dos riscos restantes para cada grau de superposição, no primeiro ensaio, para o veio ferrífero. Fonte: autor.

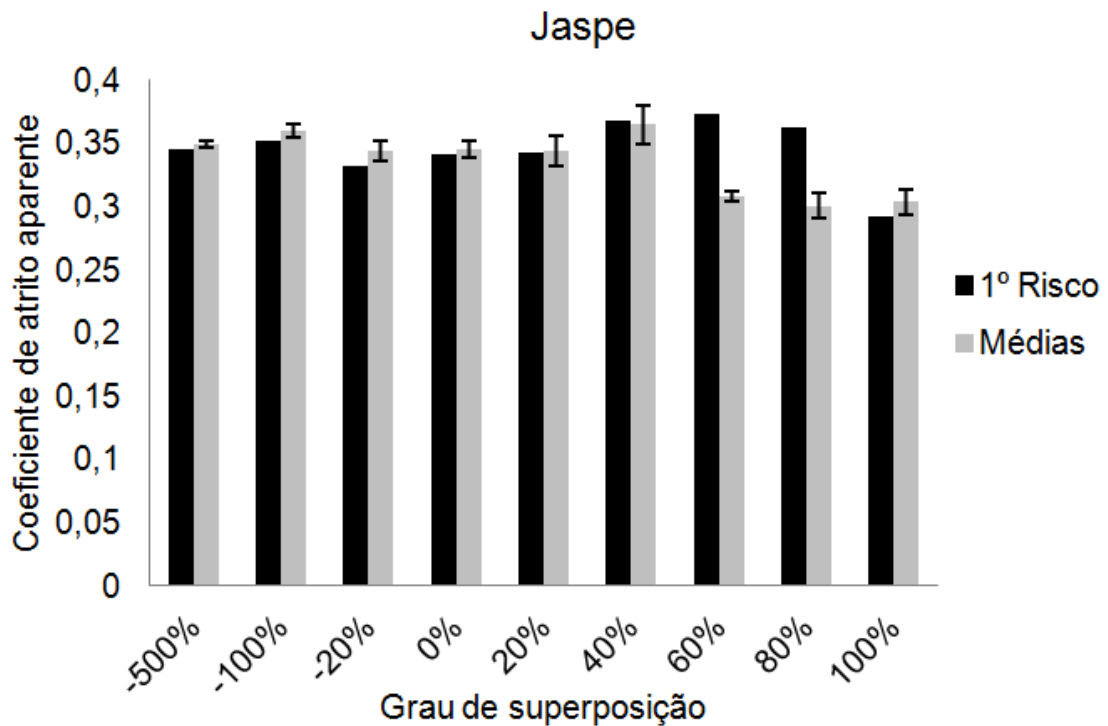


Figura 58 - Relação entre o coeficiente de atrito do primeiro risco e a média dos riscos restantes para cada grau de superposição, no primeiro ensaio, para a o jaspe. Fonte: autor.

4.6 ENSAIOS VARIANDO A VELOCIDADE

4.6.1 Mecanismos de desgaste

Ao inquirir as imagens resultantes dos ensaios variando a velocidade, foi possível perceber o aumento de regiões brilhantes nos riscos com o aumento da velocidade tangencial (Figura 59), com exceção dos ensaios sob carga normal de 1 N (Figura 60). Essas regiões brilhantes são caracterizadas pelo mecanismo de *scale-like cracking*, já nas outras, *chipping*. A Figura 61 exhibe os mecanismos supracitados de forma ampliada.

É importante destacar que, nas regiões onde foram realizados os ensaios variando a velocidade, tal como os ensaios variando as condições ambientais, foi notada a presença de mecanismos plásticos em ensaios com indentador Vickers em perfeito

estado e sob mesmas condições que ensaios anteriores (Seções 4.3 e 4.4). Esse tipo de resposta não foi notado nos ensaios já discutidos, onde as cargas críticas de transição de mecanismos foram determinadas. Esse efeito frisa o caráter heterogêneo das amostras, sendo possível comparar apenas resultados de ensaios que sejam realizados em regiões muito próximas uma da outra.

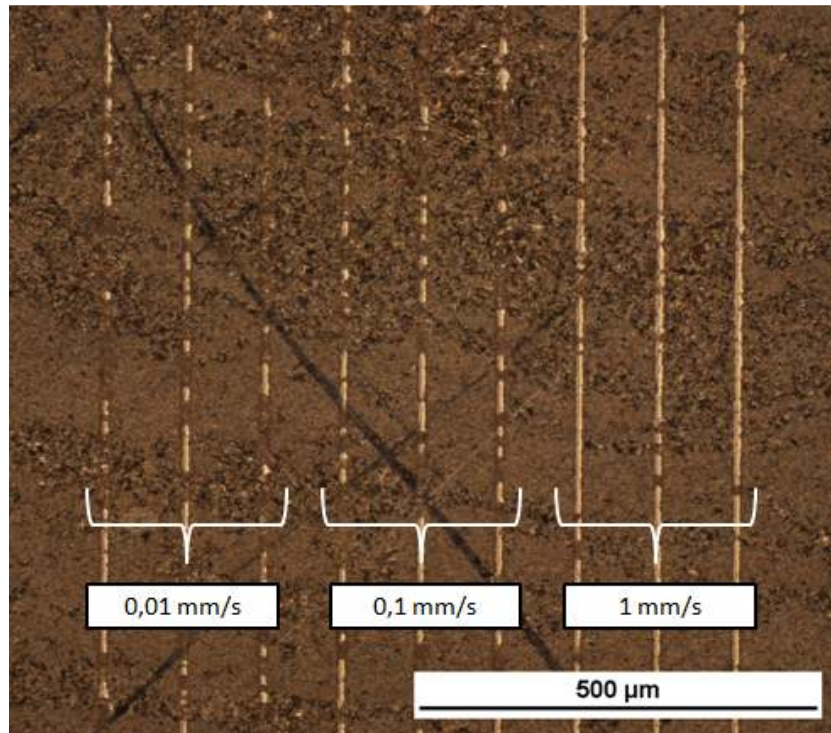


Figura 59 – Micrografia no modo “campo claro” dos ensaios variando a velocidade sobre carga normal de 0,5 N. Fonte: autor.

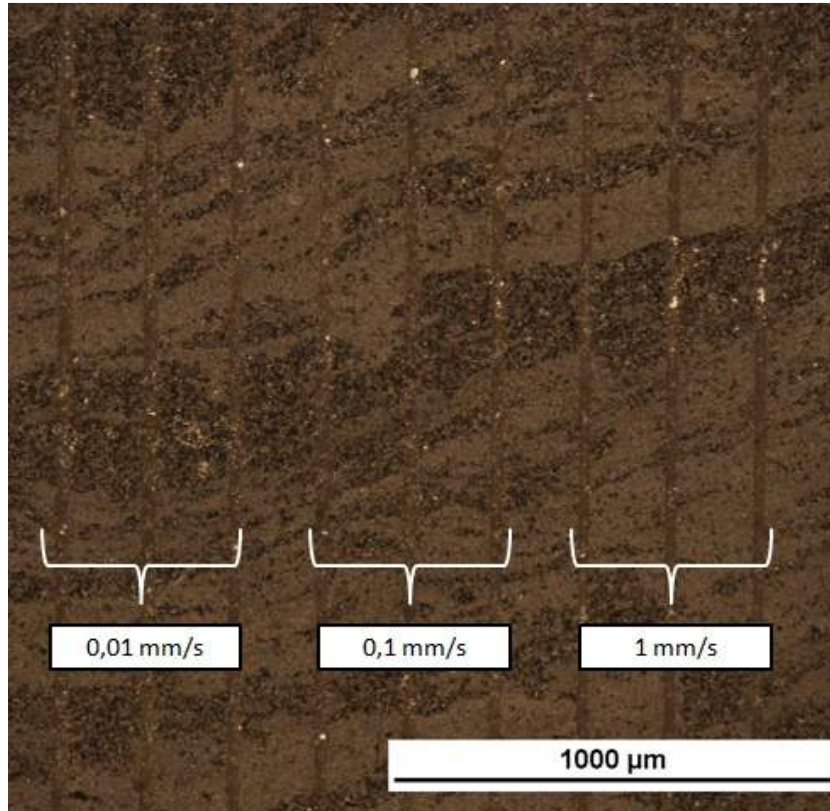


Figura 60 - Micrografia no modo “campo claro” dos ensaios variando a velocidade sobre carga normal de 1 N. Fonte: autor.

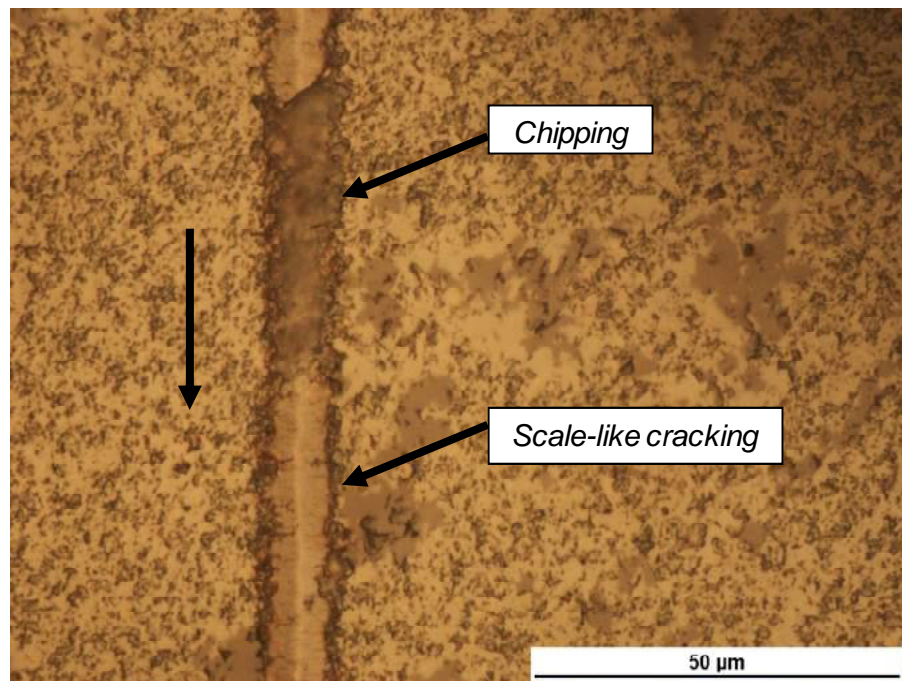


Figura 61 – Micrografia no modo “campo claro” apresentando deformação plástica no risco realizado sob carga de 0,2 N e velocidade de 1 mm/s. Fonte: autor.

4.6.2 Desgaste

Após a verificação dos dados referentes à variação da carga normal durante os ensaios, percebeu-se uma variação significativa da carga normal na velocidade de 1 mm/s em todos os ensaios, como mostra o gráfico da Figura 62.

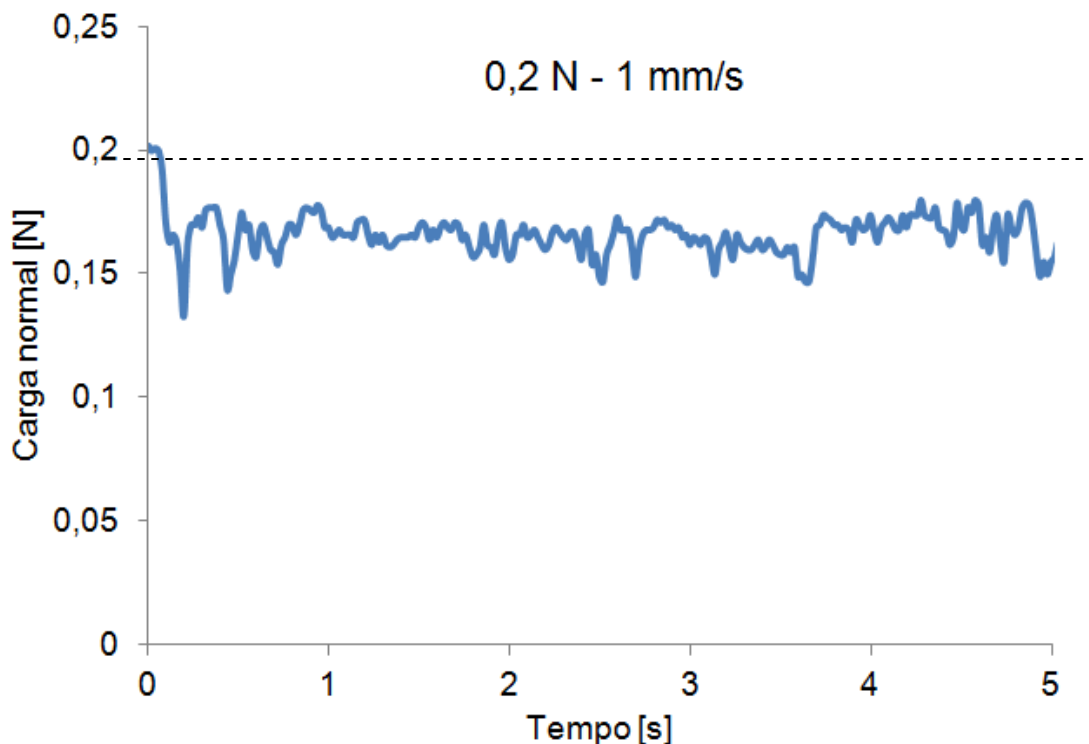


Figura 62 - Variação da carga normal durante o ensaio com a maior velocidade (0,2 N-1mm/s). Fonte: autor.

Assim, ao término de cada risco, foi calculada a média aritmética da carga normal aplicada. Nos ensaios com velocidade de 0,01 mm/s e 0,1 mm/s, a diferença máxima observada em relação ao valor nominal foi de 2,5%, então, para essas velocidades, os valores de carga normal utilizados nos gráficos subsequentes foram os valores nominais (0,2 N, 0,25 N, 0,3 N, 0,5 N e 1 N). Já nos ensaios com 1 mm/s de velocidade, o sistema de controle do equipamento não conseguiu manter o *setpoint* no valor nominal especificado, ocasionando em diferenças de até 23,5%. Por isso, para essas velocidades, os valores de carga normal utilizados representam a média dos valores reais em cada ensaio (0,16 N, 0,2 N, 0,25 N, 0,45 N e 0,92 N).

O gráfico da Figura 63 representa a variação da taxa de desgaste específica com a velocidade para diferentes cargas normais. Nele, é possível perceber uma tendência à redução da taxa de desgaste com a velocidade. Li, Shapiro e Li (1998), atribuíram esse comportamento à dependência do tempo necessário para nucleação da trinca. Já Swain (1979), à corrosão sob tensão, que é predominante em baixas velocidades em ambientes com presença de umidade, facilitando o trincamento.

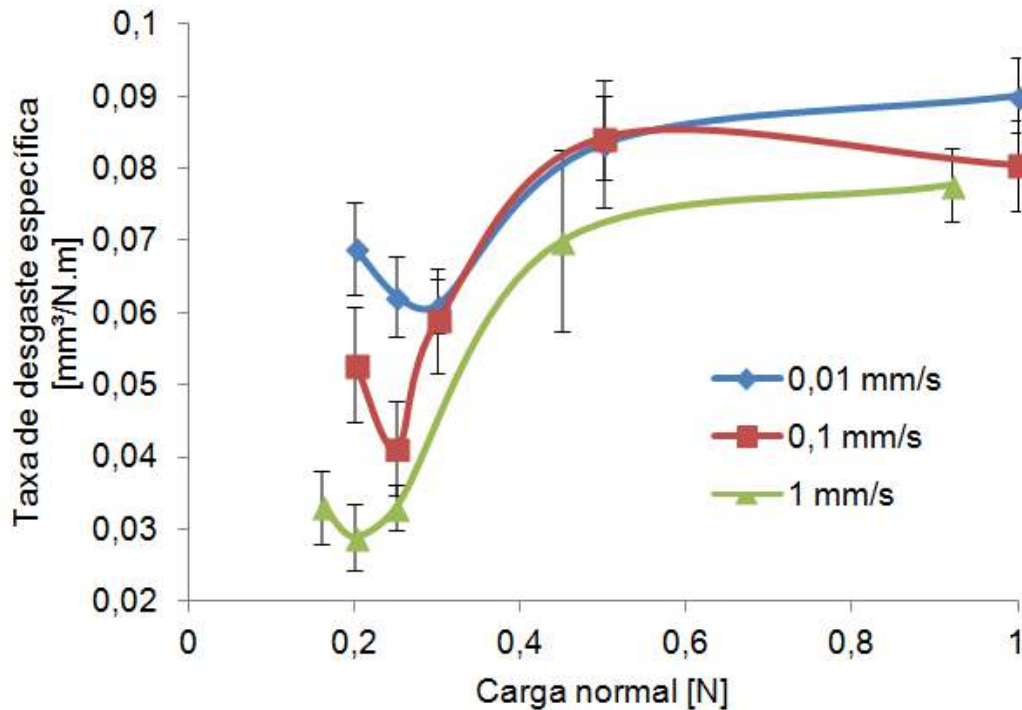


Figura 63 - Variação da taxa de desgaste específica com a velocidade para diferentes cargas normais. Nota: O desvio padrão das cargas é desprezível. Fonte: autor.

4.6.3 Atrito

Os dados referentes ao coeficiente de atrito foram analisados e organizados no gráfico da Figura 64, que como pode ser notado, não sofreu influência da velocidade. Esse resultado também foi observado por Li, Shapiro e Li (1998) em ensaios de riscamento sobre o vidro comum.

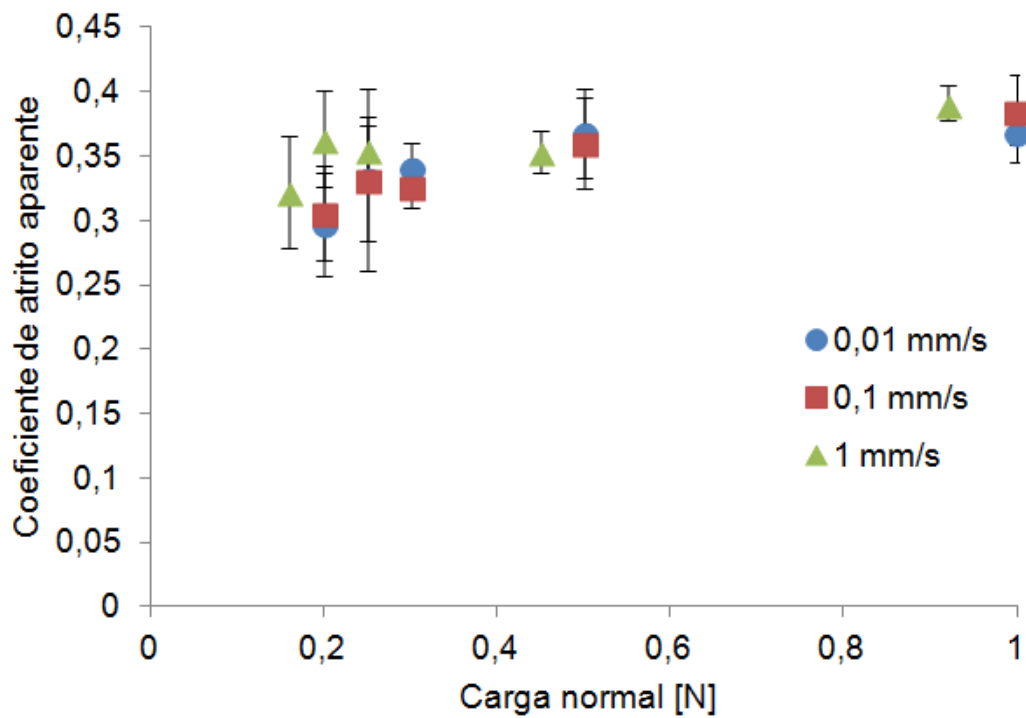


Figura 64 - Variação do coeficiente de atrito com a velocidade para diferentes cargas normais. Fonte: autor.

4.7 ENSAIOS VARIANDO AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

4.7.1 Mecanismos de desgaste

Scale-like cracking esteve presente em todas as condições sob carga normal de 0,2 N e ausente nos ensaios com carga normal de 1 N, nesses últimos, *chipping* foi dominante.

A presença de lubrificante aumentou o destacamento de material, como pode ser visto na Figura 65 e Figura 66.

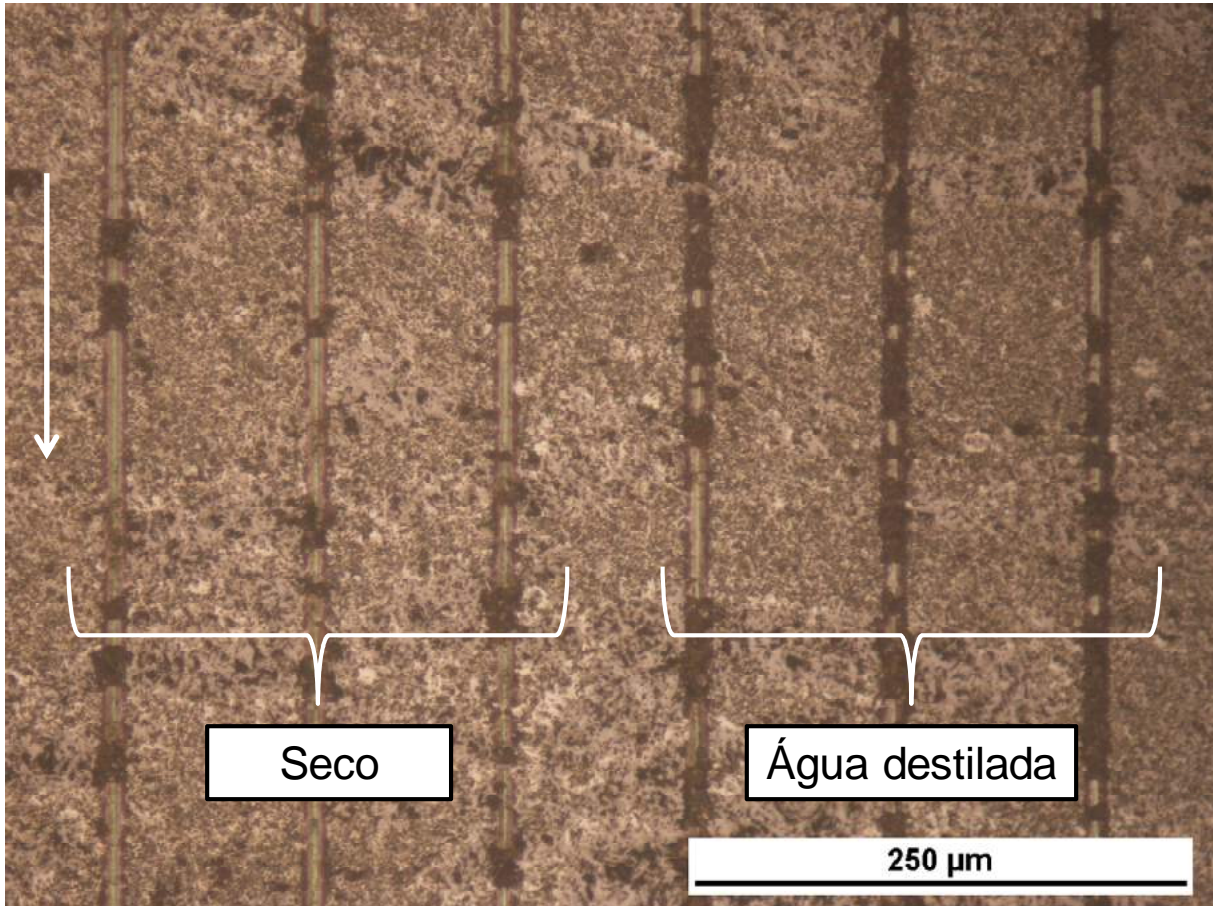


Figura 65 – Micrografia óptica no modo “campo claro” apresentando o aumento do desprendimento de material nos ensaios com água de destilada em relação aos ensaios a seco. Nota: As partes escuras do risco são mecanimos de desgaste dúcteis. Fonte: autor.

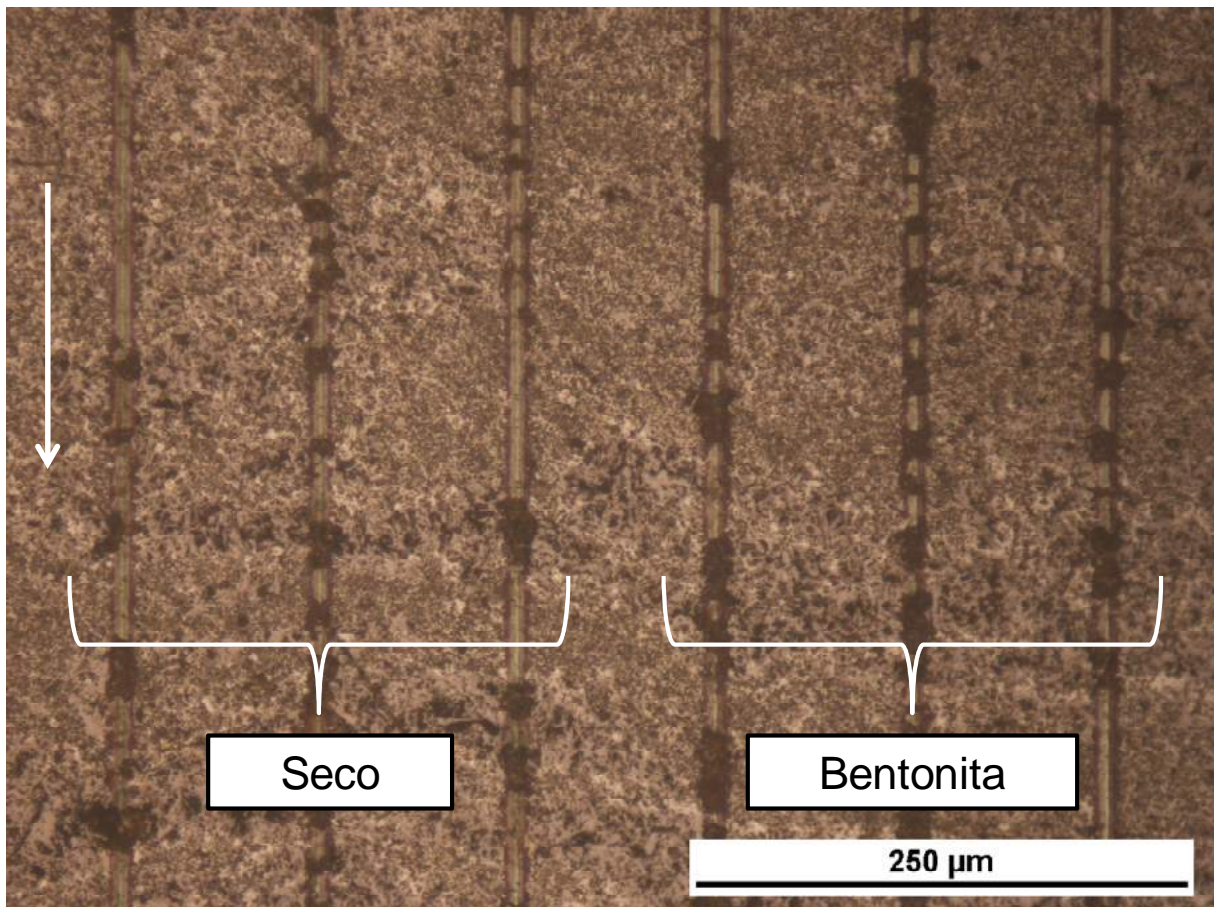


Figura 66 – Micrografia óptica no modo “campo claro” apresentando o aumento do destacamento de material nos ensaios com solução de água de destilada e bentonita em relação aos ensaios a seco. Nota: As partes escuras do risco são mecanimos de desgaste dúcteis. Fonte: autor.

4.7.2 Desgaste

O gráfico abaixo (Figura 67) apresenta a variação da taxa de desgaste específica para riscos a seco, lubrificados com água destilada e com uma solução com 4% em peso de bentonita. Essa variação foi estudada em duas cargas normais, 0,2 e 1 N.

Para a carga de 0,2 N, a lubrificação definitivamente aumentou o desgaste, não sendo possível dizer qual lubrificante teve maior influência sobre a taxa de desgaste.

Já para 1 N de carga normal, não foi possível confirmar influência da solução de bentonita no desgaste, apenas quando o lubrificante era água destilada pura.

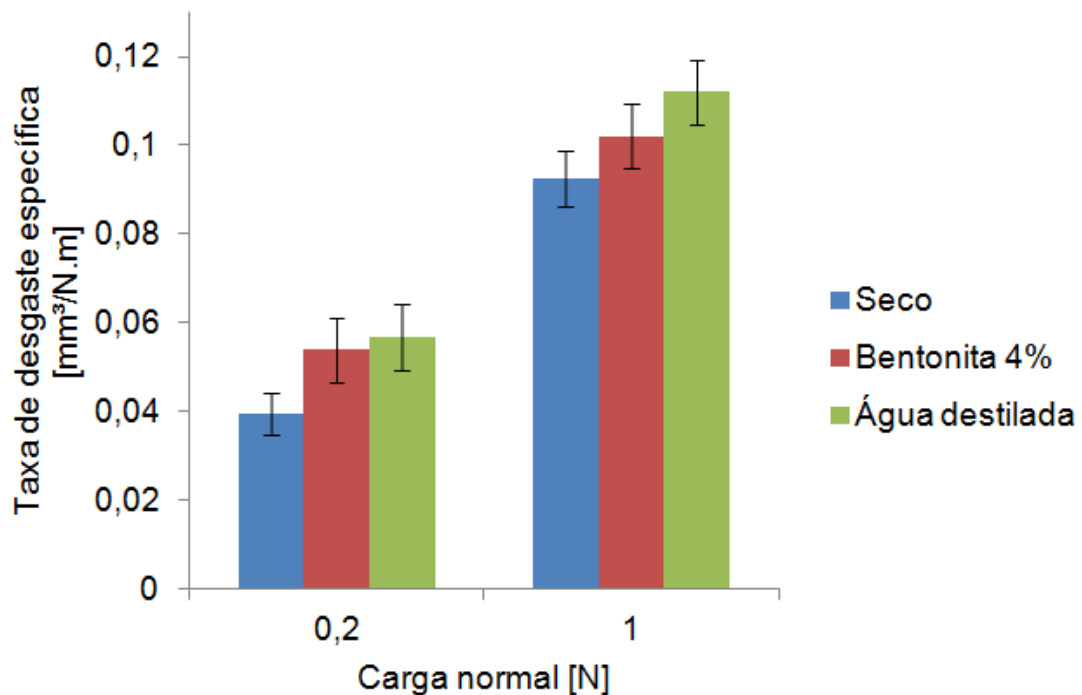


Figura 67 – Variação da taxa de desgaste específica com as condições ambientais, para 0,2 e 1 N. Fonte: autor.

Provavelmente, esse aumento é devido a uma transição de mecanismos (*scale-like cracking* para *chipping*) induzida pela lubrificação, pois, segundo Enomoto (1981), a presença de um lubrificante, quimicamente ativo com a superfície, reduz a carga crítica de transição de mecanismo, aumentando, dessa maneira, o desgaste. Swain (1979) e Desa e Bahadur (1999) atribuíram esse comportamento à corrosão sob tensão, que acontece em ambientes quimicamente ativos com a superfície.

4.7.3 Atrito

Já quanto ao comportamento do atrito, podemos perceber no gráfico da Figura 68, que praticamente não há mudança quando a carga normal vigente é de 0,2 N. Quando se trata da carga normal de 1 N, um aumento do atrito é notado apenas para solução com bentonita.

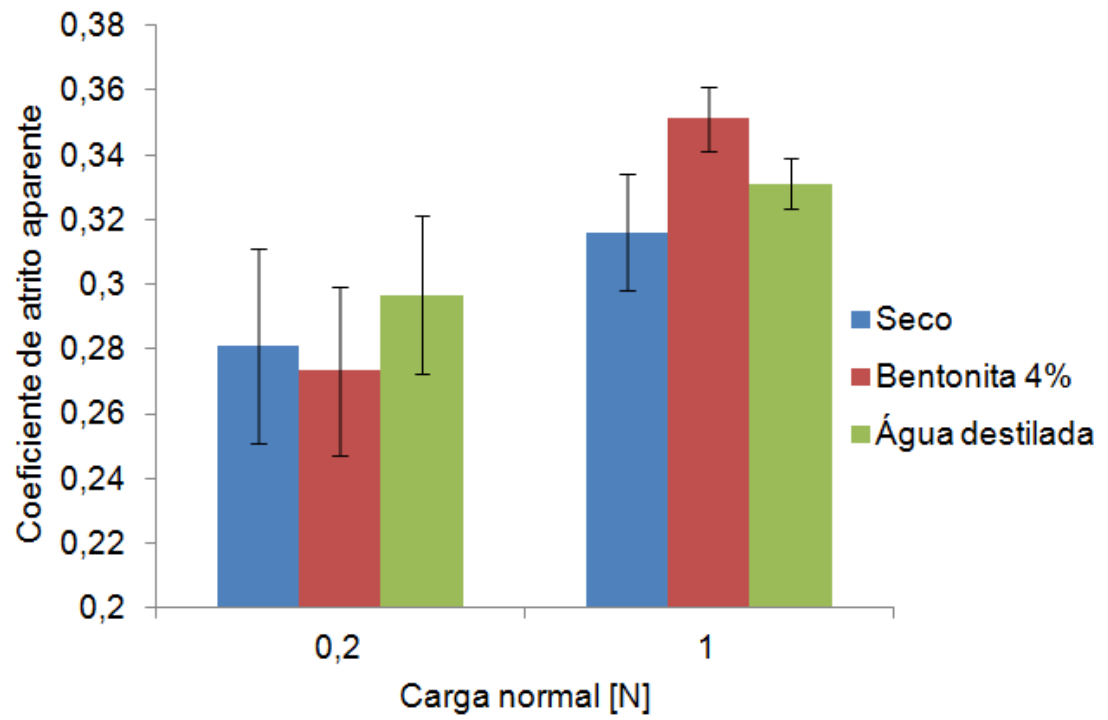


Figura 68 - Variação coeficiente de atrito aparente com as condições ambientais, para 0,2 e 1 N. Fonte: autor.

5 CONCLUSÕES

Goethita e hematita apresentaram mecanismos de desgaste dúcteis, sendo menores cargas críticas de transição para a primeira. O jaspe apresentou apenas mecanismos frágeis e as maiores cargas críticas de transição para os mecanismos mais severos. Fraturamento mais extensivo que o restante dos minerais foi observado no veio de quartzo, sendo que o mesmo propiciou a fragilização dos minerais em seu entorno.

Indentadores com menores raios de ponta e com maiores ângulos de ataque resultaram em menores cargas críticas de transição em todos os minerais estudados.

Foi observada uma correlação entre mecanismos de desgaste e coeficiente de atrito, sendo maiores coeficientes de atrito para mecanismos de desgaste mais severos.

A taxa de desgaste específica foi menor nas cargas abaixo de 2 N, a partir dessa, se mostrou independente da carga normal. O coeficiente de atrito aparente também sofreu relativa estabilização a partir dessa carga.

Nos ensaios variando a distância entre riscos, as maiores taxas de desgaste se concentraram entre -20 e 40% de superposição. O atrito não sofreu influência da distância entre riscos. Nenhuma transição de mecanismos foi observada.

Nos ensaios em que a taxa de desgaste esteve em função da velocidade, foi notada uma tendência à redução do desgaste com o aumento da velocidade através da transição para repostas ao risco menos severas. O atrito não apresentou qualquer relação com a velocidade.

A presença de líquido no contato induziu mecanismos de desgaste mais severos, sendo essa influência mais forte para a água destilada, aumentando a taxa de desgaste.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Caracterizar outros tipos de rocha objetivando a construção de um mapa tribológico.
Medir a dureza e tenacidade à fratura dos minerais e correlacioná-las com o desgaste.

Estudar o efeito do grau de superposição em condições onde ocorrem, previamente, mecanismos dúcteis.

Estudar outros tipos de lubrificantes.

7 REFERÊNCIAS

- ABREU, S. da S.; MACAMBIRA, J.; CABRAL, E. da S. Geologia e petrografia de formações ferríferas com ênfase na gênese de cavidades em serra norte, carajás-pa. **Espeleo-Tema**, v.27, n.1, p. 33-44, 2016.
- ARAÚJO, O. J. B. de *et al.* A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: **Anais VII Congresso Latino-Americano de Geologia, Belem**, p. 324-338, 1988.
- ASTM G 171-03 - **Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus**. 2009.
- AXEN, N.; KAHLMAN, L.; HUTCHINGS, I. M. Correlations between tangential force and damage mechanisms in the scratch testing of ceramics. **Tribology international**, v. 30, n. 7, p. 467-474, 1997.
- BESTE, U.; LUNDVALL, A.; JACOBSON, S. Micro-scratch evaluation of rock types - a means to comprehend rock drill wear. **Tribology Internacional**, Vol. 37, p. 203-210, 2004.
- BI, Z.; TOKURA, H.; YOSHIKAWA, M. Study on surface cracking of alumina scratched by single-point diamonds. **Journal of materials science**, p. 3214-3224, 1988.
- BLAU, P. Embedding wear models into friction models. **Tribology Letters**, v. 34, p. 75-79, 2009.
- BLAU, P. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications**. 2ª. ed. **Boca Raton: CRC Press**, v. 1, 2008.
- BRISCOE, J.; STOLARSKI, T. A. Friction, in Characterization of Tribomaterials, **W. A. Glaeser, Butterworth-Heinemann**, Boston, pp. 44–46, 1993
- CETR-UMT & CETR- APEX. Multi-Specimen Test System – **User Manual**, 2009.
- CHALLEN, J. M.; OXLEY, P. L. B. An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models. **Wear**, v. 53, n. 2, p. 229-243, 1979.
- CHEN, S. Y.; FARRIS, T. N.; CHANDRASEKAR, S. Sliding microindentation fracture of brittle materials. **Tribology transactions**, v. 34, n. 2, p. 161-168, 1991.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Diretoria De Planejamento e Desenvolvimento da Mineração. **Informe Mineral**. Brasília, 2015.
- DESA, O.; BAHADUR, S. Material removal and subsurface damage studies in dry and lubricated single-point scratch tests on alumina and silicon nitride. **Wear**, p. 1264-1275, 1999.
- DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. In: **Província Mineral de Carajás–Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In Anexo do 35. Congresso Brasileiro de Geologia**, Belém, p. 11-56, 1988.
- ENOMOTO, Y. Sliding fracture of soda-lime glass in liquid environments. **Journal of Materials Science**, v. 16, n. 12, p. 3365-3370, 1981.
- FARIAS, C. E. G.; COELHO, J. M. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. **CGEE PNUD**, 2002.

FIGUEIREDO E SILVA, R. C. *et al.* Hydrothermal fluid processes and evolution of the Giant Serra Norte jaspilite-hosted iron ore deposits, Carajás mineral province, Brazil. **Economic Geology**, v. 108, n. 4, p. 739-779, 2013.

GAVA, G. H. S. *et al.* Effect of Load Partition and Particle Distribution on Micro-Abrasive Wear Mapping of Two-Phase Metal Matrix Composites, **Wear**, Vol. 301, p. 130-136, 2013.

HOGAN, J. D. *et al.* Fracture and fragmentation of quartz and albite during single-diamond sliding-point contact. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 96, p. 165-178, 2012.

HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. **Tribology international**, v. 21, n. 1, p. 51-57, 1988.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. **Arnold**, London, 1st edition, 1992.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. Bookman Editora, 2009.

LAWN, B. R.; SWAIN, M. V. Microfracture beneath point indentations in brittle solids. **Journal of materials science**, v. 10, n. 1, p. 113-122, 1975.

LAWN, B.; WILSHAW, R. Review indentation fracture: principles and applications. **Journal of Materials Science**, p. 1049-1081, 1975.

LAWN, B; WILSHAW, R. Indentation fracture: principles and applications. **Journal of materials science**, v. 10, n. 6, p. 1049-1081, 1975.

LI, K.; SHAPIRO, Y.; LI, J. C. M. Scratch test of soda-lime glass. **Acta mater**. Vol. 46, n. 15, p. 5569-5578, 1998.

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. CRC press, 1996.

MACAMBIRA, J. B.; SCHRANK, A. Químio-estratigrafia e evolução dos jaspilitos da Formação Carajás (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 567-578, 2016.

MENEGÁZ, A. **Microabrasão de Compósitos de Matriz Metálica a Base de Tungstênio Empregados em Coroas de Perfuração Utilizadas em Sondagem Mineral**. Vitória: Dissertação de Mestrado, 2008.

PRADO, E. M. G. *et al.* Reflectance spectroradiometry applied to a semi-quantitative analysis of the N4ws deposit, Carajás Mineral Province, Pará, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 78, p. 101-119, 2016.

RICE, R. W.; FREIMAN, S. W.; BECHER, P. F. Grain-Size Dependence of Fracture Energy in Ceramics: I, Experiment. **Journal of the American ceramic society**, v. 64, n. 6, p. 345-350, 1981.

SALOTO, A. **Efeito da superposição de ranhuras paralelas no desgaste abrasivo**. Vitória: Dissertação de Mestrado, 2010.

SILVA JÚNIOR, W. M. da; MELLO, J. D. B. de. Using parallel scratches to simulate abrasive wear. **Wear**, p. 1987-1997, 2009.

SUBHASH, G.; KLECKA, M. Ductile to Brittle Transition Depth During Single-Grit Scratching on Alumina Ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 90, n. 11, p. 3704-3707, 2007.

SWAIN, M. V. Microfracture about scratches in brittle solids. **Proc. R. Soc. Lond. A**, v. 366, n. 1727, p. 575-597, 1979.

TEIXEIRA, Wilson *et al.* **Decifrando a terra**. Oficina Textos, 2001.

THOMPSON, G. R.; TURK, J. **Introduction to physical geology**. Brooks/Cole Publishing Company, 1998.

TOTTOLA, R. M. **Estudo Comparativo de Propriedades Mecânicas e Tribológicas de compósitos de Matriz Metálica a Base de Tugnstênio Utilizados em Coroas de Sondagem Geológica e seu Desempenho em Campo**. Vitória: Dissertação de Mestrado, 2007.

WILLIAMS, J. A.; XIE, Y. The generation of wear surfaces by the interaction of parallel grooves. **Wear**, v. 155, n. 2, p. 363-379, 1992.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Elsevier, 1987.