



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



TALITA CAROLINA ROWE

**AVALIAÇÃO DOS MICROMEKANISMOS E TAXA DE DESGASTE
ABRASIVO NO PAR TRIBOLÓGICO AÇO P410D E ZIRCÔNIA COM
DIFERENTES LAMAS ABRASIVAS**

OURO PRETO - MG
2023

TALITA CAROLINA ROWE
talita.rowe@aluno.ufop.edu.br
talita.rowe14@gmail.com

Avaliação dos micromecanismos e taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço P410D e zircônia com diferentes lamas abrasivas

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc.Vinícius Carvalho Teles

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R878a Rowe, Talita Carolina.

Avaliação dos micromecanismos e taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço p410d e zircônia com diferentes lamas abrasivas. [manuscrito] / Talita Carolina Rowe. Talita Carolina Rowe. - 2023. 60 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Carvalho Teles.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Desgaste mecânico - Desgaste abrasivo. 2. Desgaste mecânico - Ensaio de microabrasivo. 3. Partículas abrasivas. 4. Desgaste mecânico - Microecanismos de desgaste. 5. Lama abrasiva. I. Rowe, Talita Carolina. II. Teles, Vinicius Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Talita Carolina Rowe

Avaliação dos micromecanismos e taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço P410D e zircônia com diferentes lamelas abrasivas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 07 de março de 2023

Membros da banca

Dr. - Vinícius Carvalho Teles - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. - Igor Cezar Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. - Diogo Antônio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto

Vinícius Carvalho Teles, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/03/2023, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0486175** e o código CRC **10DB4C57**.

À Deus dedico essa conquista, por ser meu apoio e sempre iluminar meu caminho.

Aos meus pais e irmãos pela força e amparo.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por ter me sustentado até aqui e me dado apoio para concluir mais um ciclo. Ao meu paizinho, Mauro, agradeço por todo aprendizado e incentivo, dedico essa conquista a você.

À minha mãe e irmãos por serem canal de força e exemplo de amor.

Ao Jhonata pela força e incentivo, obrigada por sonhar comigo.

Ao meu orientador Vinícius Teles, agradeço pela excelência em compartilhar seu conhecimento.

Aos meus amigos: Ana Luiza, Daniela, Duda, Luiz, Manu, Regina, Rejane, Ricardo e Talia.

Aos amigos que a UFOP me deu e que foram minha segunda família ao longo desses anos: Aline, Bárbara, Bernardo, Dayane, Nayane, Maria Fernanda, Milena, Renata, sem vocês essa aventura não teria graça!

Aos grandes mestres da UFOP, em especial os da Escola de Minas ao transmitir todo conhecimento e ensinamento.

Agradeço ao Laboratório de Metalografia e Ensaio Mecânicas da UFOP e ao Marconi pelas imagens de micrografias.

Agradeço ao Laboratório de Materiais de Construção Civil, ao professor Ricardo Fiorotti e ao técnico Júnio Batista.

E a pessoa que me tornei, mesmo inserida em um cenário com diversos desafios sempre fui resiliente e com muita persistência, permaneci com constância neste ciclo, alcançando sonhos e objetivos.

“Quer façam qualquer outra coisa, façam tudo para glória de Deus.” I Coríntios 10:31

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.”

Abraham Lincoln

RESUMO

A abrasão é um dos mecanismos de desgaste mais comuns na indústria. Embora seja comumente estudado, observa-se que as análises são realizadas para um único material abrasivo com distribuição granulométrica e forma fixa. Porém, em um cenário real, é notório a presença de partículas de diversos materiais, com forma e granulometria variada. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas no micromecanismo e na taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço inoxidável P410D e zircônia. Para isso foi empregado o ensaio de microabrasão por esfera rotativa fixa. O contra corpo utilizado foi de zircônia e diâmetro de 25,4 mm. A lama abrasiva foi preparada com água destilada e 10% em massa de abrasivos. Foram preparadas cinco lamas abrasivas: 100% sílica; 80% sílica + 20% hematita; 50% sílica + 50% hematita; 20% sílica + 80% hematita; e 100% hematita. Carga normal aplicada de 1,5 N e rotação da esfera de 100 rpm. Foi avaliado a taxa de desgaste e o micromecanismo de desgaste. A análise granulométrica mostrou que o tamanho média das partículas de sílica era de 1,5 μm e as partículas de hematita apresentaram 0,3 μm . A lama composta de 100% sílica apresentou a maior taxa de desgaste e a lama 100% hematita a menor, isso pode estar conectado ao tamanho da partícula abrasiva. Para soluções abrasivas intermediárias com concentração de sílica menor que 50%, à medida que a quantidade de sílica diminui, também diminui a taxa de desgaste. Por fim, o micromecanismo de desgaste predominante foi o deslizamento de partículas abrasivas com rolamento de partículas em alguns pontos. Concluiu que o tamanho média da partícula é relevante, pois influenciará se ela atuará ou não. O material do contra corpo também influencia diretamente no desgaste, principalmente se ele for dúctil que permitir a partícula penetrar.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Ensaio de microabrasivo. Partículas abrasivas. Microecanismos de desgaste. Lama abrasiva.

ABSTRACT

Abrasion is one of the most common wear mechanisms in the industry. Although it is commonly studied, it is observed that the analyzes are performed for a single abrasive material with a granulometric distribution and shape. However, in a real scenario, particles of different materials, with varied shapes and granulometry, are notorious. Therefore, this work aims to analyze the effect of the mixture of different abrasive particles on the micromechanism and the rate of abrasive wear in the tribological pair P410D stainless steel and zirconia. For this, the microabrasion test using a fixed rotating sphere was used. The counter-body used was made of zirconia and had a diameter of 25.4 mm. The abrasive slurry was prepared with distilled water and 10% by mass of abrasives. Five abrasive slurries were prepared: 100% silica; 80% silica + 20% hematite; 50% silica + 50% hematite; 20% silica + 80% hematite; and 100% hematite. Normal load of 1.5 N and ball rotation of 100 rpm. The wear rate and the wear micromechanism were evaluated. The granulometric analysis showed that the average size of the silica particles was 1.5 μm , and the hematite particles were 0.3 μm . The 100% silica composite slurry showed the highest wear rate, and the 100% hematite slurry the lowest; it may be connected to the abrasive particle size. For intermediate abrasive solutions with less than 50% silica concentration, the wear rate also decreases as the amount of silica decreases. Finally, the predominant wear micromechanism was sliding abrasive particles with rolling particles at some points. It was concluded that the average particle size is relevant, as it will influence whether it will act. The counter body material also directly influences wear, especially if it is ductile and allows the particle to penetrate.

Key-words: Abrasive wear. Microabrasive test. Abrasive particles. Wear micromechanisms. Abrasive slurry

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área Real
Al	Alumínio
b	Diâmetro da Calota Esférica
D	Tamanho da Partícula Abrasiva
F	Fator de Circularidade
F_n	Força Normal Sobre a Partícula
FR	Força de Indentação
H	Dureza da Superfície Desgastada
k	Coefficiente de Desgaste
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
P	Perímetro
R	Raio da Esfera Rotativa
S	Distância Deslizada
V	Volume Degastado
<i>Ha</i>	Dureza da Partícula Abrasiva
<i>Hs</i>	Dureza da Partícula Superfície

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas tribológicos afetados pelo mecanismo de desgaste abrasivo.....	5
Figura 2 - (a) Relação entre a dureza da partícula abrasiva e a dureza do material desgastado e (b) Desgaste em função da dureza da partícula abrasiva.....	6
Figura 3 - Ilustração do contato entre uma partícula abrasiva submetida a uma carga normal e uma superfície plana. (a) se H_a for maior que $1,2 H_s$ e (b) se H_a for menor que $1,2 H_s$	7
Figura 4 - Abrasão entre dois (a) e três corpos (b).	7
Figura 5 - Sinal de desgaste por riscamento (a) e sinal de desgaste por rolamento (b).....	8
Figura 6 - Tipos de interações entre partículas abrasivas e a superfície desgastada. Microsulcamento (a), microfadiga (b), microcorte (c) e microtrinca (d).	9
Figura 7 - (a) microsulcamento em aço e (b) microcorte em aço.....	10
Figura 8 - Microindentação.	10
Figura 9 - Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) corte em planta.	11
Figura 10 - Relação entre a distância do desgaste e a perda de massa para três metais dúcteis.	12
Figura 11 - Relação entre a força normal e a perda de massa para três metais dúcteis.....	13
Figura 12 - Relação da taxa de desgaste pela dureza do material.	13
Figura 13 - Equipamentos configurados para o ensaio com esfera livre e com esfera fixa, respectivamente.	14
Figura 14 – Mapa de micromecanismo de desgaste em um ensaio de microabrasão de um aço ferramenta em termo de carga aplicada e concentração de abrasivo. (a) Pasta de SiC F1200. (b) Pasta de diamante de $3 \mu\text{m}$	15
Figura 15 - Geometria da partícula abrasiva: Angulosas (a) e Esféricas (b).....	16
Figura 16 - Taxas de desgaste no cobre para diferentes tamanhos de partículas em função do desgaste abrasivo e erosivo de dois e três corpos em partículas de carboneto de silício.	17
Figura 17 - Resultados de ensaios de desgaste abrasivo realizados para diferentes distribuições granulométricas para as cargas 0,2 N e 0,4 N.	19
Figura 18 – Imagens obtidas do MEV para crateras com diferentes distribuições granulométricas com carga normal de 0,2 N: (a) 0L; (b) 10L; (c) 20L; (d) 30L; (e) 40L; (f) 50L; (g) 70L; (h) 80L e (i) 100L. (b).	20
Figura 19 - Coeficientes de desgaste em função da fração de massa de maior tamanho (100 L) para uma esfera de aço 52100 (a) e para uma esfera de aço inoxidável 304 (b).	21

Figura 20 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície das crateras obtidas com pós com diferentes distribuições granulométricas indicadas, carga normal de 0,4 N e diferentes esferas: a) borracha de poliuretano, b) aço inoxidável AISI 304, c) AISI 52100 martensítico aço e d) zircônia-alumina.....	21
Figura 21 - Coeficiente de desgaste em função de diferentes concentrações de lamas. Ensaio de microabrasão com esfera de nylon.	22
Figura 22 - Coeficiente de desgaste em função de diferentes concentrações de lamas. Ensaio de microabrasão com esfera de aço.....	23
Figura 23: Micromecanismos de desgaste para diferentes lamas abrasivas. (a) 100%SiO ₂ , (b) 80%SiO ₂ +20%Fe ₂ O ₃ , (c) 50%SiO ₂ +50%Fe ₂ O ₃ , (d) 20%SiO ₂ +80%Fe ₂ O ₃ , (e) 100%Fe ₂ O ₃	24
Figura 24 - Fluxograma do projeto.....	26
Figura 25- Microabrasão de esfera fixa.	29
Figura 26 - Esquema impressão do desgaste por uma esfera.	30
Figura 27 - Microestrutura do aço inoxidável P410D.	32
Figura 28 - Curva de percentual acumulado da Sílica analisada por granulometria a laser.....	33
Figura 29 - Curva de percentual acumulado da Hematita analisada por granulometria a laser.	33
Figura 30 - Coeficiente de desgaste (k) em função do tempo para diferentes concentrações de abrasivos.....	34
Figura 31 - Coeficiente de desgaste para diferentes concentrações de lama abrasiva em uma amostra de aço inoxidável.	35
Figura 32: Esquema de atuação das partículas abrasivas (a) grande quantidade de sílica e	36
Figura 33 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta 100% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.	37
Figura 34 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de e 80% de Sílica 20 % de Hematita. (b) ampliação do centro da calota.....	38
Figura 35 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 50 % de Hematita e 50% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.....	38
Figura 36 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 80 % de Hematita e 20% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.....	38
Figura 37 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 100% de Hematita. (b) ampliação do centro da calota.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço P410D.	27
Tabela 2 - Características dos abrasivos escolhidos.....	28
Tabela 3 - Concentração do abrasivo para cinco lamas abrasivas.....	28
Tabela 4 - Variáveis e Indicadores da pesquisa.....	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Abrasão	5
2.2	Microabrasão	14
2.3	Efeito da forma e tamanho da partícula abrasiva.....	16
2.3.1	Forma da partícula	16
2.3.2	Tamanho da partícula	17
2.4	Aço Inoxidável.....	18
2.5	Mistura de partículas abrasivas.....	19
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	Tipo de pesquisa	25
3.2	Materiais e métodos	26
3.2.1	Preparação das amostras	26
3.2.2	Definição da concentração dos abrasivos.....	27
3.2.3	Ensaio de desgaste microabrasivo	29
3.2.4	Análise da microestrutura, dureza e micromecanismos de desgaste	30
3.3	Variáveis e indicadores	30
3.4	Instrumento de coleta de dados.....	31
3.5	Tabulação de dados.....	31
3.6	Considerações finais	31
4	RESULTADOS	32

	8
4.1 Caracterização da Microestrutura	32
4.2 Análise de Granulometria	33
4.3 Taxa de desgaste na microabrasão	34
4.4 Micromecanismos de Desgaste	37
5 CONCLUSÃO.....	40
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Zum Gahr (1998) define o desgaste abrasivo como o desgaste que ocorre entre superfícies móveis devido à penetração de partículas duras presentes na interface ou de protuberâncias duras presentes na superfície do contra corpo. Estudos estimam que aproximadamente 50% de todos os problemas de desgaste na indústria são provenientes da abrasão (PETRICA, 2013), o que torna o estudo desse mecanismo de desgaste muito importante.

As partículas duras, responsáveis pela abrasão, podem ser inerentes ao processo, por exemplo, processo de lapidação; ou oriundas de contaminantes externos ou debris de desgaste de algum componente que compõe o sistema tribológico (HUTICHINGS; SHIPWAY, 2017). Dois abrasivos comuns são o dióxido de silício (SiO_2), também chamada de sílica, e a hematita (Fe_3O_2). A sílica é a areia da praia ou um dos compostos que compõe o solo; a hematita, por sua vez, forma-se, comumente, em processos de desgaste devido a oxidação do aço.

Ao estudar o desgaste abrasivo, nota-se que é comumente empregado apenas um único material abrasivo com distribuição granulométrica e forma fixa. Porém, em campo, observa-se a presença de partículas de diversos materiais, formatos e tamanhos. Obviamente, essas simplificações são necessárias para se ter maior controle sobre o ensaio laboratorial e, assim, permitir compreender melhor os resultados.

Entretanto, recentemente, alguns trabalhos foram conduzidos misturando-se partículas abrasivas: mesmo material com diferentes granulometrias (GOMEZ et al, (2015) e ESTEVES et al, (2021)) e materiais diferentes (LISBOA (2022) e CEZAR (2022)).

Gomez et al, (2015) misturou partículas de carbeto de silício (SiC) e duas granulometrias, 2 e 6 μm , em diferentes proporções. O material ensaiado foi o aço ASTM 1020. Empregou-se o ensaio de microabrasão de esfera fixa com força normal de 0,2 e 0,4 N e contra corpo de aço AISI 52100. Os resultados mostraram que à medida que se aumenta a concentração de partículas grandes existe um ponto de mínimo na taxa de desgaste ao empregar a lama abrasiva com, aproximadamente, 50% de partículas pequenas e 50% de partículas grandes para ambas as cargas. Segundo eles, para essa concentração houve um mínimo de atuação das partículas abrasivas. O micromecanismo de desgaste permaneceu o mesmo para as diferentes lamas abrasivas: riscos paralelos, porém com diferentes larguras e/ou profundidade.

Esteves et al, (2021) realizou testes de microabrasão de esfera fixa com diferentes contra corpos e lamas abrasivas de SiC com diferentes granulometrias. Os autores observaram que a

capacidade da esfera (contra corpo) de arrastar as partículas abrasivas para o contato, influencia fortemente nas taxas de desgaste e isso está diretamente ligado as propriedades mecânicas dela. Alguns contra corpos apresentaram ponto de mínimo nas taxas de desgaste ao aumentar o tamanho da partícula abrasiva, enquanto outros a taxa de desgaste aumenta conforme o tamanho da partícula aumenta.

Já o trabalho de Lisboa (2022) e Cezar (2022) estudaram a influência da mistura de sílica e hematita em diferentes proporções com a esfera de nylon e aço AISI 52100, respectivamente. Em ambos os casos, ao empregar lama abrasiva composta de 100% sílica, a taxa de desgaste foi maior que a lama de 100% hematita. Ao usar esfera de nylon, as taxas de desgaste para lamas compostas de mistura de sílica e hematita, independente da proporção, foram estatisticamente iguais a lama de 100% hematita. Entretanto, ao empregar a esfera de aço, a taxa de desgaste diminuiu à medida que a concentração de partículas de sílica diminuía. Em todos os casos o micromecanismo de desgaste foi semelhante: riscos/sulcos paralelos.

Existem diversos fatores que contribuem para o aumento na taxa de desgaste ou volume desgastado no ensaio microabrasivo, sendo os principais: contra corpo, a concentração de partículas abrasivas no contato, força normal, as características da partícula abrasiva, etc (ZUM GAHR, 1998; HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017; TREZONA, ALLSOPP E HUNTCHINGS, 1999).

Fica claro, portanto, que o grande número de variáveis torna o processo abrasivo complexo e difícil de se prever o resultado. Assim, estudar o desgaste abrasivo com mistura de partículas abrasivas pode ajudar a compreender melhor os sistemas tribológicos. Por fim, pretende-se responder com este trabalho a pergunta:

Qual o efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas no micromecanismo e na taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço inoxidável P410D e zircônia?

1.2 Justificativa

O desgaste abrasivo ocasiona a remoção de matéria (ZUM GAHR, 1998) e por isso segundo Petrica (2013) é um tema muito estudado no setor industrial para reduzir custos com manutenção. Assim, compreender o comportamento dos materiais sob a influência de diversas lamas abrasivas é fundamental para selecionar os materiais resistentes ao desgaste, principalmente para o desenvolvimento tecnológico na área.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura emprega-se apenas uma única partícula abrasiva (COZZA, 2011, GAVA et al, 2013; LABIAPARI, 2015). Porém, em

situações reais há uma mistura de diferentes partículas abrasivas que desgastam simultaneamente o material. Em estudo recente Lisboa (2022) avaliou a influência da mistura de sílica e hematita e constatou que a sílica apresenta maior abrasividade que a hematita, entretanto, ao empregar lama com mistura das duas partículas o resultado foi semelhante ao visto com apenas a hematita. Este resultado mostra que misturar partículas abrasivas torna o sistema ainda mais complexo e pode ajudar e entender melhor a dinâmica da partícula e os micromecanismos de desgaste.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar o micromecanismo e taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço inoxidável P410D e zircônia empregando lama abrasiva composta de uma mistura de sílica e hematita em diferentes proporções.

1.3.2 Específicos

- Elaborar uma revisão bibliográfica referente ao desgaste microabrasivo, partículas abrasivas e aço inoxidável ferrítico;
- Desenvolver uma metodologia a fim de analisar o micromecanismo e taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço inoxidável P410D e zircônia;
- Estudar a influência da lama abrasiva com mistura de sílica e hematita no micromecanismo e taxa de desgaste, avaliando a granulometria das partículas abrasivas;
- Avaliar o micromecanismo e a taxa de desgaste na microabrasão.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, no qual primeiro capítulo foi exposto a formulação do problema, a justificativa, os objetivos gerais específicos e a estrutura do trabalho.

Por conseguinte, têm-se o capítulo dois que é apresentado a revisão bibliográfica abordando os temas pertinentes ao trabalho.

No terceiro capítulo desenvolveu-se a metodologia empregado para estudar o efeito da mistura de partículas abrasivas no desgaste de abrasivo.

No quarto capítulo são expostos os principais resultados e discussões.

No capítulo 5 têm-se as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Abrasão

Zum Gahr (1987) traz que os desgastes podem ser diferenciados pelos mecanismos de desgastes, que é a forma como as superfícies se interagem, sendo os mais conhecidos: abrasão, adesão, fadiga e a tribocorrosão. O desgaste abrasivo é o desgaste que ocorre entre superfícies móveis devido à penetração de partículas duras presentes na interface ou de protuberâncias duras presentes na superfície do contra corpo. A Figura 1 ilustra alguns sistemas tribológicos onde o mecanismo de desgaste abrasivos é o predominante (ZUM GAHR, 1987).

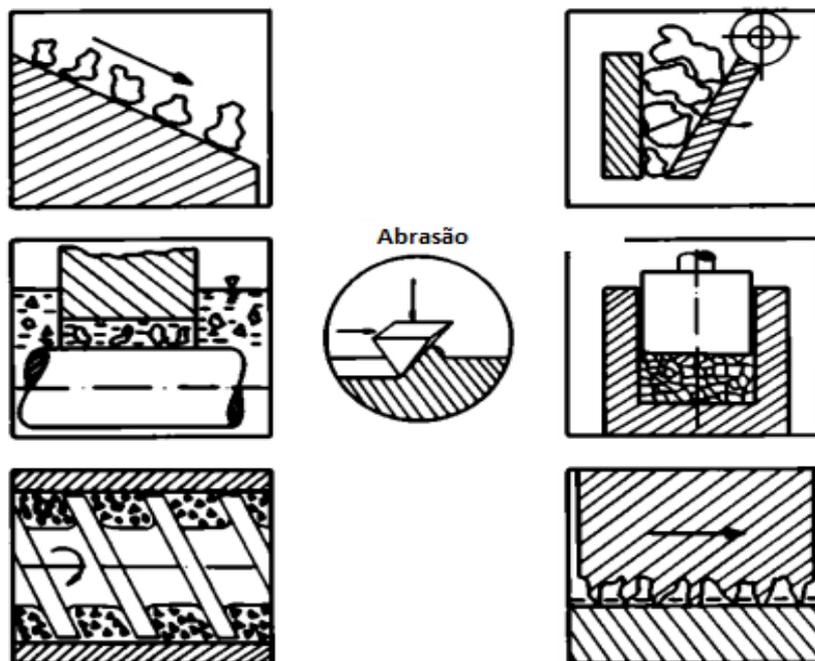


Figura 1 - Sistemas tribológicos afetados pelo mecanismo de desgaste abrasivo.
Fonte: Adaptado de Gahr (1987, p. 93).

Observa-se (Figura 1) que o desgaste abrasivo engloba diversas situações cotidianas e corriqueiras em diversos setores da indústria.

Segundo Uetz e Fohl (1969) e Wellinger (1955), o nível do desgaste abrasivo, ou severidade, está relacionado com a razão entre a dureza da partícula, H_a , e superfície o qual está sofrendo o desgaste, H_s . A Figura 2 apresenta, para materiais homogêneos e para materiais heterogêneos, de igual dureza, a transição de desgaste abrasivo suave para desgaste abrasivo severo. A Figura 2 apresenta o desgaste de diversos materiais em função da dureza da partícula abrasiva.

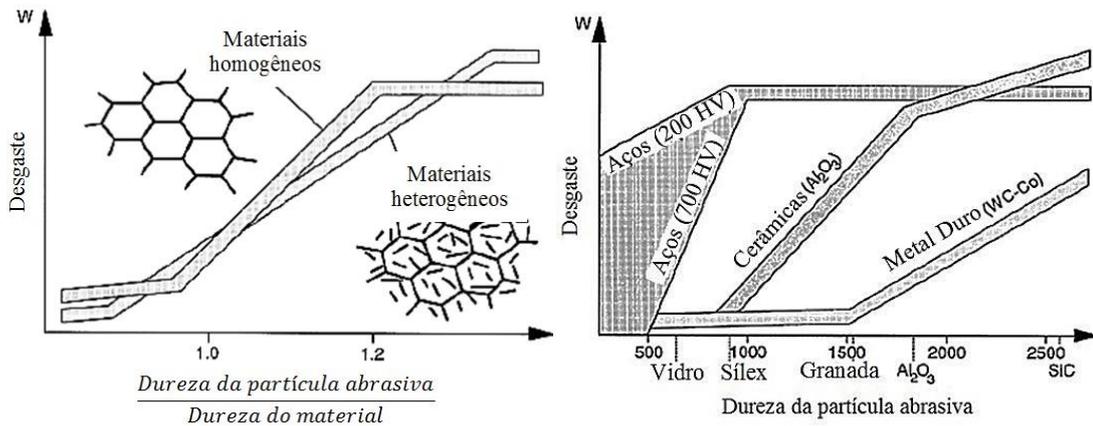


Figura 2 - (a) Relação entre a dureza da partícula abrasiva e a dureza do material desgastado e (b) Desgaste em função da dureza da partícula abrasiva.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Observa-se na Figura 2 (a) que para materiais homogêneos, quando a dureza do abrasivo é menor ou próxima da superfície ($H_a/H_s \leq 1$) as partículas se degradam e o regime de desgaste é suave. Se a dureza do abrasivo for maior que a dureza da superfície, o regime de desgaste será severo, apresentando altas taxas de desgaste. No caso de materiais heterogêneos, com a presença de fase dura, a transição de regime suave para severo não é tão acentuada quanto para materiais homogêneos.

Nota-se na Figura 2(b) que, ao se utilizar partículas abrasivas com dureza maior que 1000 HV, não é possível discernir as taxas de desgaste dos aços, mesmo para aços de alta dureza. No caso de cerâmicas, abrasivos muito moles, abaixo de 1000HV, impossibilitam a distinção entre as propriedades tribológicas destes materiais. O mesmo ocorre para o metal duro, que exige partículas abrasivas com dureza superior a 1500 HV (ZUM GAHR, 1998).

Durante o contato entre a partícula e a superfície, devido às pressões de contato existentes, as tensões de escoamento da superfície ou da partícula abrasiva podem ser ultrapassadas. Esta pressão de contato pode ser entendida como a resistência à penetração da superfície (dureza da superfície). A deformação plástica da superfície pode ocorrer se a partícula suportar os esforços (pressão de contato) sem se deformar, conforme Figura 3. Se a partícula falhar por deformação ou por fratura, então, o nível das deformações plásticas na superfície é insignificante. Pode ser observado experimentalmente que, independentemente da forma da partícula abrasiva, quando a relação $H_a/H_s > 1,2$, o risco ou a indentação gerado tem uma componente de deformação plástica significativa (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

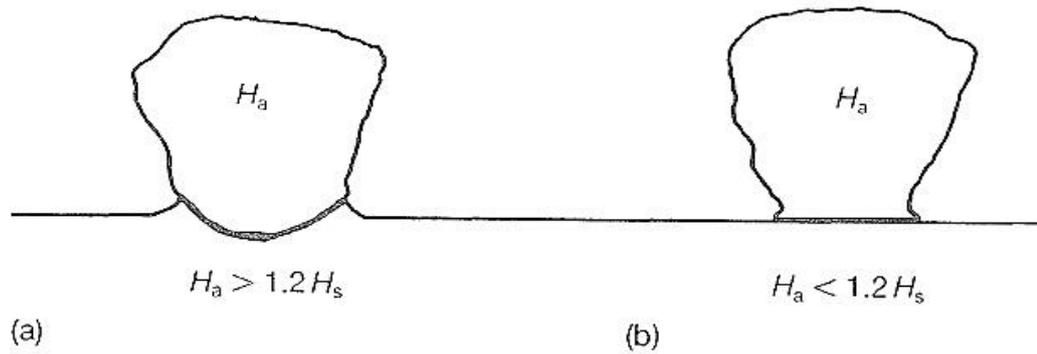


Figura 3 - Ilustração do contato entre uma partícula abrasiva submetida a uma carga normal e uma superfície plana. (a) se H_a for maior que $1,2 H_s$ e (b) se H_a for menor que $1,2 H_s$
 Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

O desgaste por abrasão pode ser classificado como abrasão a dois ou três corpos (BURWELL JR, 1957). A Figura 4 mostra a distinção entre os dois tipos de desgaste abrasivo.

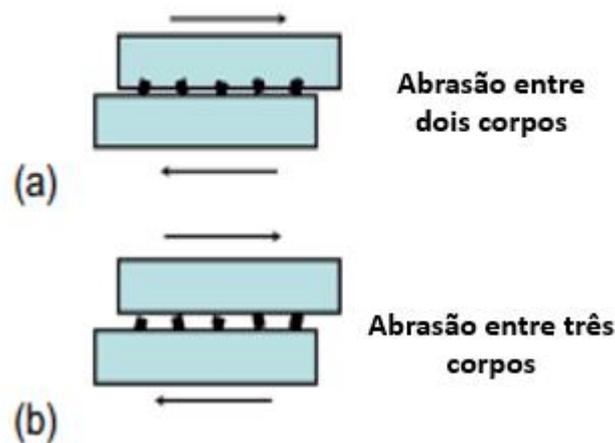


Figura 4 - Abrasão entre dois (a) e três corpos (b).
 Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017, p. 166).

Conforme a ilustração da Figura 4, o desgaste a três corpos é causado por partículas abrasivas livres na interface, entre um corpo e o contra corpo, um exemplo é o polimento de amostras, utilizando pastas de diamante ou alumina. O desgaste a dois corpos ocorre quando asperidades duras e/ou partículas abrasivas rigidamente encrustadas na superfície do contra corpo causam riscos e/ou sulcos na superfície da amostra durante o contato e o movimento relativo de ambos os corpos, pode ser visto no lixamento de amostras (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

Todavia, apesar dos termos “abrasão de dois e três corpos” caracterizarem o processo de desgaste, os autores Trezona, Allsopp e Hutchings (1999) ressaltam que estes modos ainda

não são suficientes para a descrição do processo, devido a dinâmica das partículas livres. As partículas soltas podem deslizar entre as superfícies causando uma série de riscos paralelos, ou rolar causando indentações múltiplas, Figura 5. Também é possível observar o micromecanismo misto, onde parte das partículas deslizam e parte rolam.

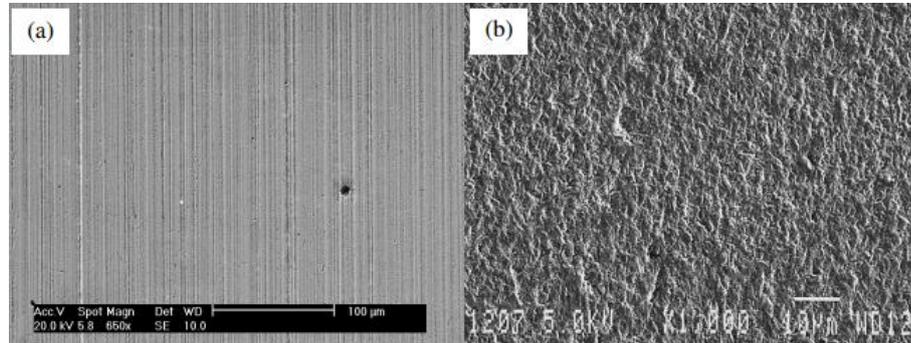


Figura 5 - Sinal de desgaste por riscamento (a) e sinal de desgaste por rolamento (b).
Fonte: Adaptado de Cozza (2009), (a) e Trezona (1999), (b).

Segundo Zum Gahr (1987) e Silva (2008) existem cinco micromecanismos de remoção de massa na abrasão e estes definem o processo de interação entre a asperidades ou partículas abrasivas com a superfície, são eles: microcorte, microsulcamento, microfadiga, microtrinca e indentações múltiplas.

Conforme Silva (2008) cada tipo de interação oferece uma forma de remoção de material da superfície diferente, e é primordial compreender esses micromecanismos para entender conceitos vinculados ao desgaste abrasivo. Sendo assim, a Figura 6 ilustra os quatro modos de iterações quando a partícula desliza entre as superfícies.

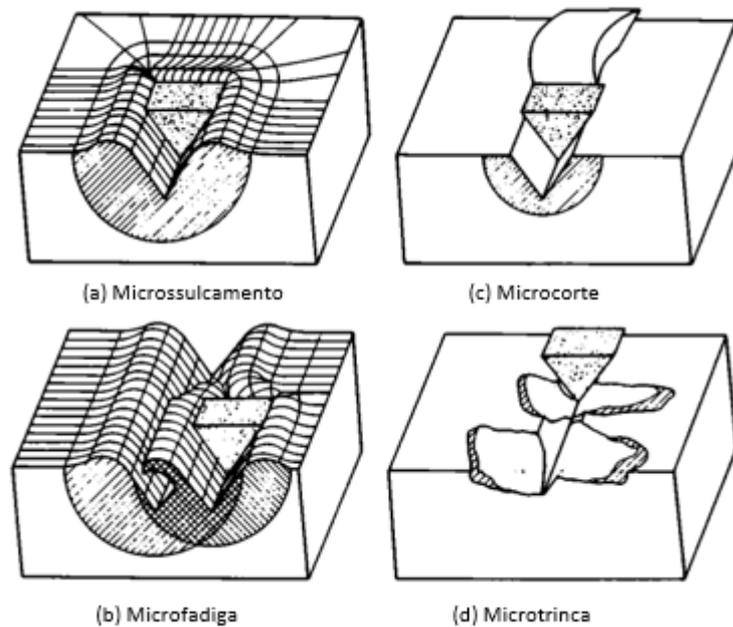


Figura 6 - Tipos de interações entre partículas abrasivas e a superfície desgastada. Microsulcamento (a), microfadiga (b), microcorte (c) e microtrinca (d).
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987, p. 96).

O microsulcamento acontece em materiais com características dúcteis, ocorrendo o deslocamento do material para as bordas do risco, não ocasionando a perda de material, somente a formação de saliências nas laterais (MULHEARN e SAMUELS, 1962; GAHR, 1987). Gahr (1987) destaca que o deslocamento da partícula abrasiva, promove a formação de sulcos e em razão da atuação de várias partículas ocorre a microfadiga, que proporciona a remoção da matéria.

Por conseguinte, têm-se o microcorte, neste caso Gahr (1987) e Mulhearn e Samuels (1962) descrevem o volume do material destacado é proporcional a do risco originado. A Figura 7 exemplifica os micromecanismos de desgaste na superfície de um aço.

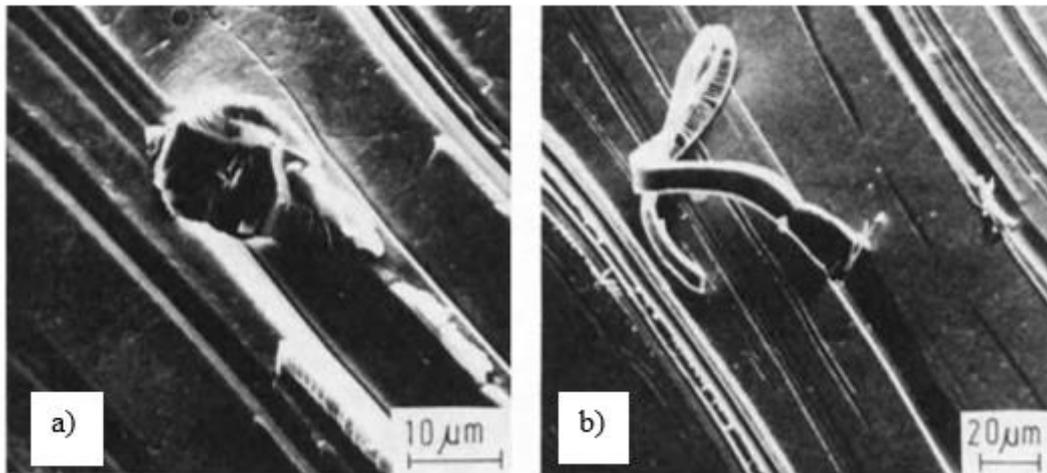


Figura 7 - (a) microsulcamento em aço e (b) microcorte em aço.
 Fonte: Adaptado de Gahr (1987, p. 95)

A microtrincamento causa a perda de massa devido a propagação das trincas. Este micromecanismo acontece em materiais tipicamente frágeis que são expostos a elevadas tensões provocadas pelas partículas abrasivas (MULHEARN E SAMUELS, 1962; GAHR 1987).

Segundo da SILVA (2008) a literatura é deficitária ao definir o micromecanismo presente no rolamento da partícula. O mesmo autor propõe que indentações múltiplas é um micromecanismo de remoção de matéria ocorrendo quando a partícula abrasiva toca a superfície com uma determinada carga sem deslizar, gerando deformação plástica localizada (Figura 8).

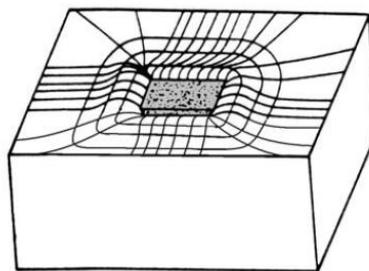


Figura 8 - Microindentação.
 Fonte: Adaptado de Silva (2008).

A literatura dispõe que a formação das saliências laterais no microsulcamento e o material extraído no microcorte é influenciado pelo ângulo de ataque das partículas abrasivas duras, além disso os micromecanismos citados ocorrem principalmente em materiais dúcteis (GAHR, 1987; BLACK; KOPALINSKY e OXLEY, 1988). Posto isso, Black; Kopalinsky e Oxley (1988) mostraram que para ocorrer o microcorte o ângulo de ataque deve ser superior ao

crítico. No entanto, existe a deformação que produz efeito intermediário, ora o material se concentra na lateral do sulco, ora se destaca produzindo cavaco (BLACK; KOPALINSKY e OXLEY, 1988; JUNIOR SILVA, 2008).

Hutchings e Shipway (2017) alegam que os micromecanismos de desgaste abrasivo envolvem tanto a deformação plástica quanto a fratura frágil. Em algumas circunstâncias a deformação plástica ocorre isoladamente, porém, os dois podem ocorrer juntos, até mesmo em materiais aparentemente frágeis. Modelos para ambos os micromecanismos foram desenvolvidos, porém, isoladamente, ou seja, não levando em consideração os efeitos de um micromecanismo no outro. Para isso, Rabinowicz (1965) sugerem um modelo para o desgaste abrasivo de materiais dúcteis, Figura 9.

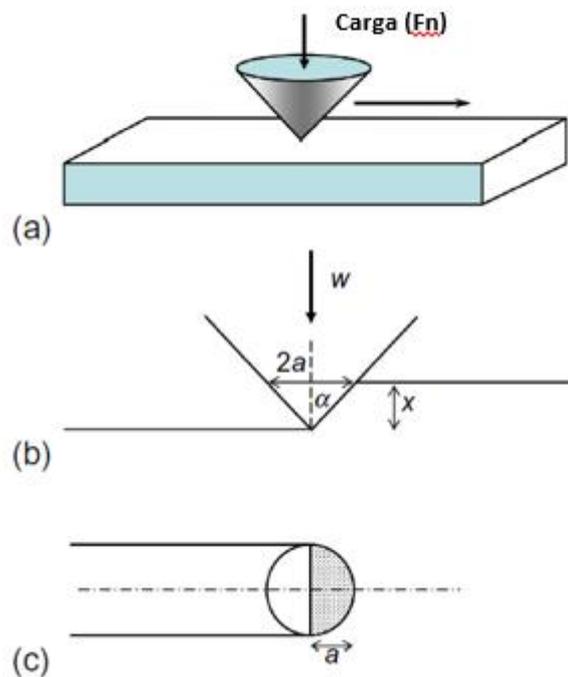


Figura 9 - Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) corte em planta. Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017, p. 175).

O modelo consiste em um cone, com ângulo de abertura α , com a partícula abrasiva percorrendo a superfície do material dúctil sob a influência de uma força normal F_n , resultando em um risco. O volume perdido é dado pela Eq. 1.

$$\frac{V}{S} = K \cdot \frac{F_n}{H} \quad (1)$$

Onde V é o volume de material perdido, K é o coeficiente de desgaste, S a distância deslizada, F_n a força normal sobre a partícula e H é a dureza da superfície desgastada.

O coeficiente de desgaste K , adimensional, pode ser utilizado para mensurar o desgaste abrasivo. Em testes a três corpos e a dois corpos realizados, sob condições comparáveis (carga, tamanho de abrasivo, distância deslizada, etc), verifica-se que o coeficiente de desgaste no desgaste abrasivo a dois corpos está no intervalo de 10^{-1} a 10^{-2} , enquanto no três corpos é de uma ordem de grandeza menor, 10^{-2} a 10^{-3} (RABINOWICZ; DUNN; RUSSELL, 1961). Uma vez que não há diferenças na geometria do abrasivo nos dois casos, os grãos abrasivos em três corpos consomem cerca de 90% do tempo rolando, não produzindo desgaste e apenas cerca de 10% do tempo deslizando e desgastando as superfícies do corpo e contra corpo (RABINOWICZ; DUNN; RUSSELL, 1961).

Frequentemente, a Eq. (1) é simplificada para a Eq. (2) para facilitar a comparação de materiais com diferentes durezas:

$$V = k \cdot F_n \cdot S \quad (2)$$

Onde k também é chamado de coeficiente de desgaste e possui as unidades de $\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

Experimentalmente, observa-se que o volume do material removido é diretamente proporcional à distância de deslizamento e a carga normal (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017). A Figura 10 mostra o efeito da distância deslizada e a Figura 11 apresenta a influência da força normal na perda de massa para três metais.

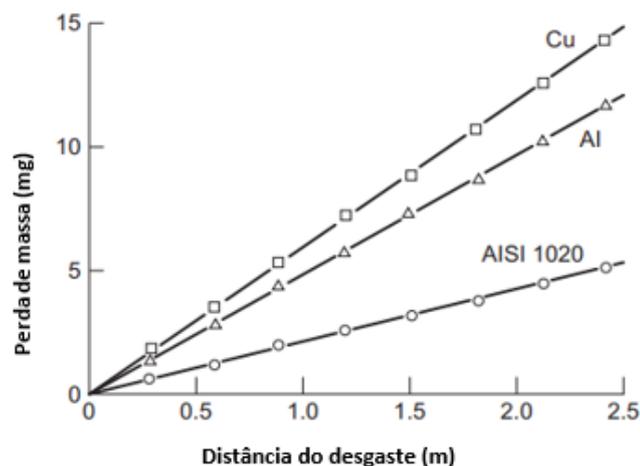


Figura 10 - Relação entre a distância do desgaste e a perda de massa para três metais dúcteis. Fonte: Adaptado de Khrushov (1974).

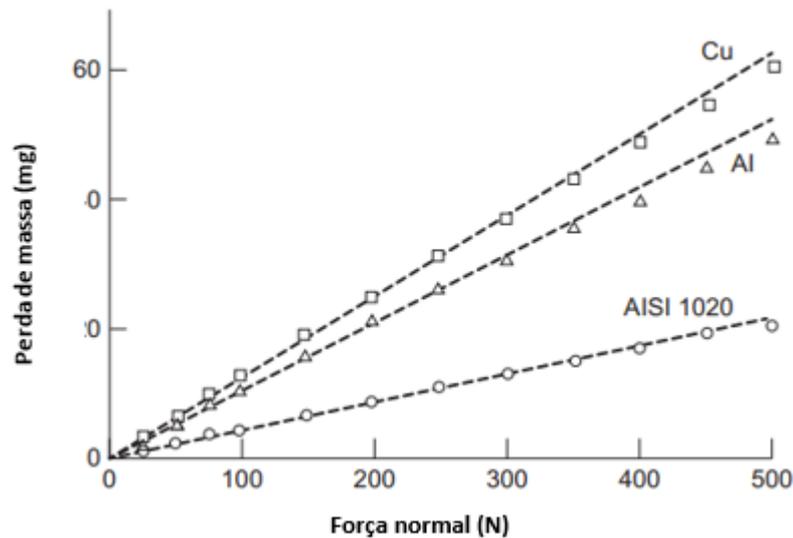


Figura 11 - Relação entre a força normal e a perda de massa para três metais dúcteis.
Fonte: Adaptado de Khruschov (1974).

Além da distância percorrida e da força normal (Figura 10 Figura 11), a Eq (1) mostra que o coeficiente de desgaste é inversamente proporcional com a dureza do corpo. A Figura 12 mostra a relação entre a taxa de desgaste e a dureza do material, em um ensaio realizado com abrasão por deslizamento para metais puros, metais trabalhados a frio e tratados termicamente (KHRUSCHOV,1974).

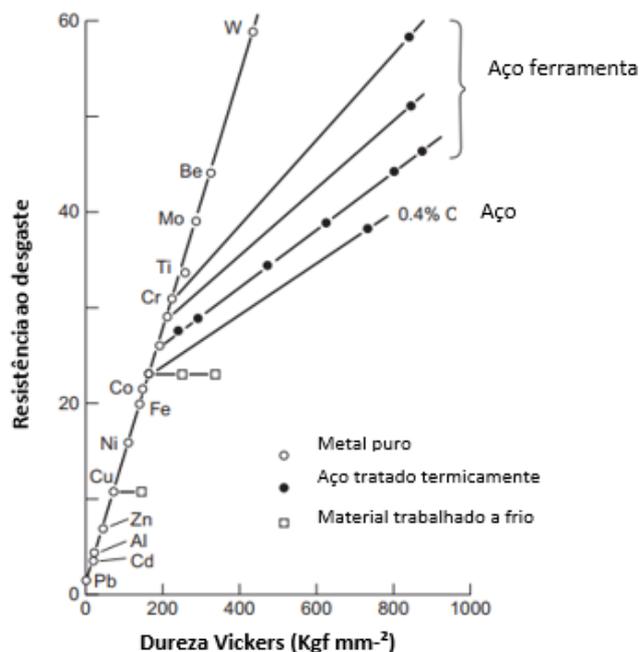


Figura 12 - Relação da taxa de desgaste pela dureza do material.
Fonte: Adaptado de Khruschov (1974).

De acordo com a Figura 12 o aumento na dureza da matriz nem sempre apresenta um ganho na resistência à abrasão. Os metais puros apresentam boa correlação com a dureza, os

aços tratados termicamente também apresentam, porém, a influência da dureza diminui e materiais trabalhados a frio (encruados) não apresentam ganho algum com o aumento da dureza (KHRUSCHOV,1974).

2.2 Microabrasão

O ensaio de microabrasão consiste em rotacionar uma esfera de raio conhecido contra a superfície da amostra na presença de uma lama abrasiva e sob o efeito de uma força normal. As partículas abrasivas apresentam diâmetro médio menor que $10\ \mu\text{m}$ e os eventos são também da ordem dos micrometros (RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1997; TREZONA E HUTCHINGS, 1999). Existem duas configurações básicas do equipamento: a de esfera fixa Figura 13(a) e esfera livre Figura 13 (b).

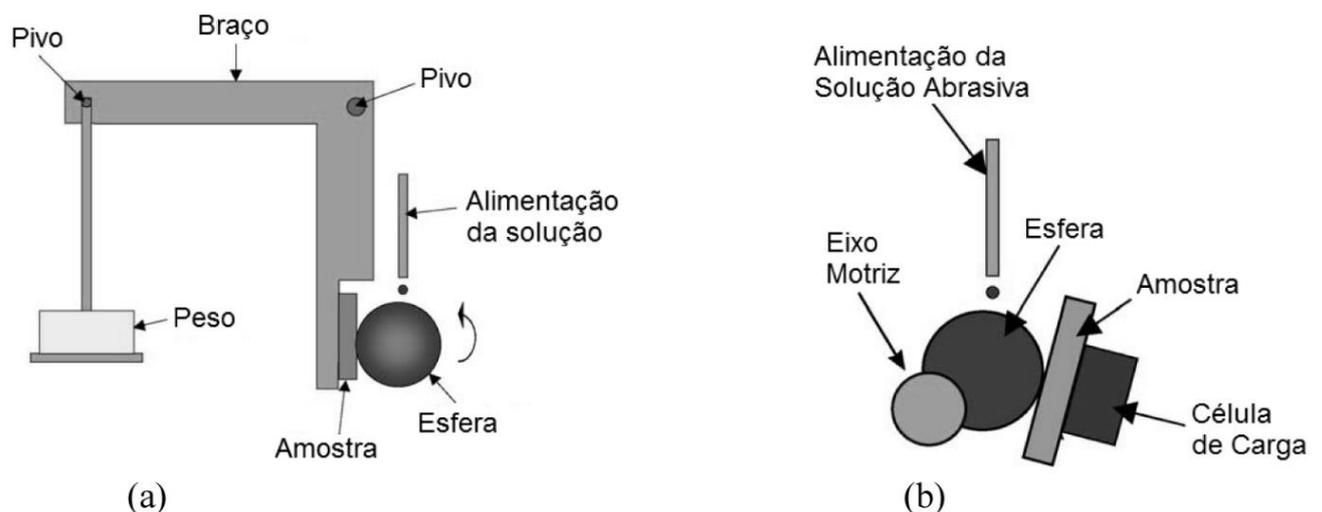


Figura 13 - Equipamentos configurados para o ensaio com esfera livre e com esfera fixa, respectivamente.
Fonte: Adaptado de Santos (2015).

A principal diferença entre os dois equipamentos está na aplicação da força normal; no equipamento de esfera livre a força normal depende da massa da esfera e da inclinação da amostra em relação a esfera. Já no de esfera fixa a força normal é aplicada por um sistema de alavanca e peso morto (RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1997; TREZONA E HUTCHINGS, 1999).

Neste ensaio também deve-se controlar a rotação da esfera, normalmente entre 100 e 150 rpm que resulta em uma velocidade tangencial de aproximadamente de $0,1\ \text{m/s}$, e o volume de lama abrasiva entregue, por volta de 3 a 5 gotas por segundo. A marca de desgaste final será uma calota esférica com o mesmo raio da esfera que a formou (RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1997).

O volume de material desgastado por ser estimada a partir da equação Eq. (3):

$$V \approx \frac{\pi b^4}{64R} \quad \text{para } b \ll R \quad (3)$$

Onde o volume desgastado (V) pode ser calculado em função do diâmetro da cratera de desgastada (b) e o raio da esfera (R) que o originou.

Com a união das equações 2 e 3 pode-se calcular a taxa de desgaste pela Eq. (4):

$$k = \frac{\pi b^4}{64 R S F n} \quad \text{para } b \ll R \quad (4)$$

A principal vantagem do ensaio de microabrasão sobre os outros ensaios abrasivos é a possibilidade de controlar o micromecanismo de desgaste predominante: deslizamento de partículas abrasivas ou rolamento de partículas abrasivas, (Figura 5). A Figura 14 mostra o mapa de micromecanismos de desgaste ao variar a força normal e concentração de partículas abrasivas Trezona *et al* (1999).

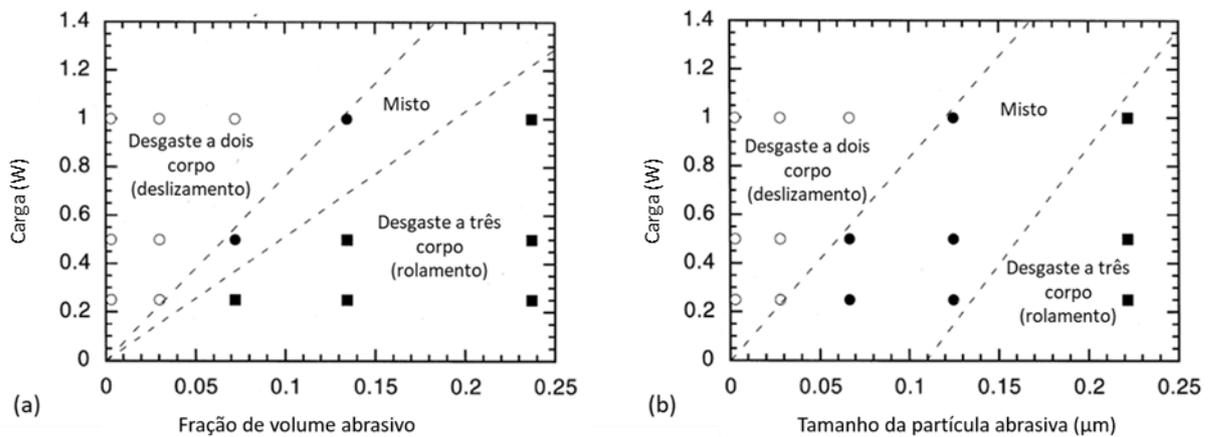


Figura 14 – Mapa de micromecanismo de desgaste em um ensaio de microabrasão de um aço ferramenta em termo de carga aplicada e concentração de abrasivo. (a) Pasta de SiC F1200. (b) Pasta de diamante de 3 μm . Fonte: Adaptado de Trezona *et al* (1999).

Observa-se que para altas cargas e baixas concentrações de abrasivos o micromecanismo tende a ser de deslizamento de partículas abrasivas (semelhante a abrasão a dois corpos) e para baixas cargas e altas concentrações de abrasivo ocorre o rolamento de partículas abrasivas (abrasão a três corpos). Por último, cargas e concentrações intermediárias podem levar ao regime misto. Deve-se ressaltar, que o mecanismo de desgaste final depende

fortemente dos materiais da amostra, contra corpo e da partícula abrasiva (TREZONA *et al*, 1999).

2.3 Efeito da forma e tamanho da partícula abrasiva

2.3.1 Forma da partícula

É importante abordar a forma da partícula abrasiva, visto que, são variáveis que influenciam nas taxas de desgaste do material. A forma da partícula pode variar desde esférica até formas bastante complexas e angulosas, sendo que a última provoca maior desgaste na superfície (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017). A Figura 15 apresenta dois tipos de partícula em ambos os extremos.

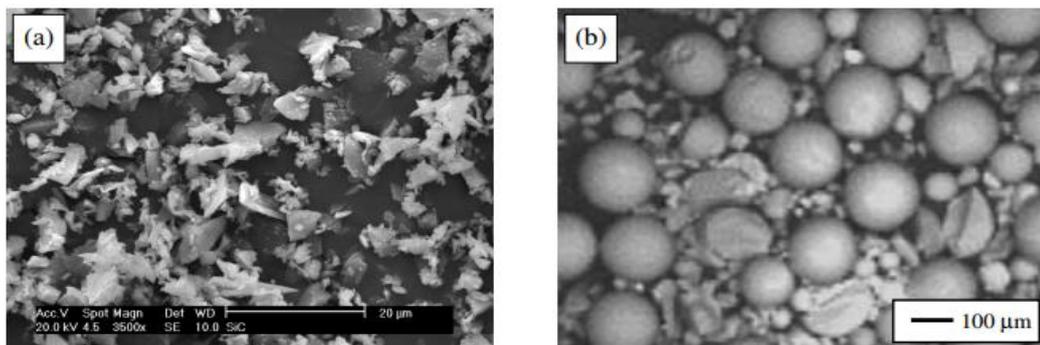


Figura 15 - Geometria da partícula abrasiva: Angulosas (a) e Esféricas (b).
Fonte: Adaptado de Cozza (2011).

Hutchings e Shipway (2017) apresentam o fator de arredondamento da partícula, F , Eq. (5). Esse parâmetro é baseado no perímetro e na área da projeção bidimensional da partícula, geralmente formada por microscópio óptico, onde o valor de F é obtido pela razão entre a área real (A) da projeção do abrasivo e a área de um círculo de mesmo perímetro (P).

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (5)$$

O valor de F determina o quão próximo de um círculo a forma está: valores de F mais próximo de 1 indica que a projeção é próxima da área de um círculo e quanto mais próximo de 0 menor é a semelhança da projeção com um contorno circular (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Em seus estudos, Fang *et al.* (1993), constatou que as partículas arredondadas, conforme a Figura 15 (b) se engastam com mais facilidade na superfície causando o efeito de

deslizamento, por outro lado, os grãos abrasivos que possuem mais ângulos (Figura 15 (a)) tem predisposição ao rolamento.

2.3.2 Tamanho da partícula

No desgaste abrasivo a perda de massa é causada pelas partículas duras. Elas são responsáveis por remover a matéria da superfície por sulcamento, microcorte ou rolamento, como visto anteriormente. Quanto maior o tamanho da partícula abrasiva maior é o evento originado por ela e, assim, maior é a perda de matéria. Porém, o tamanho da partícula pode influenciar nas taxas de desgaste até certo ponto, como pode ser visto na Figura 16 (MISRA e FINNIE, 1981).

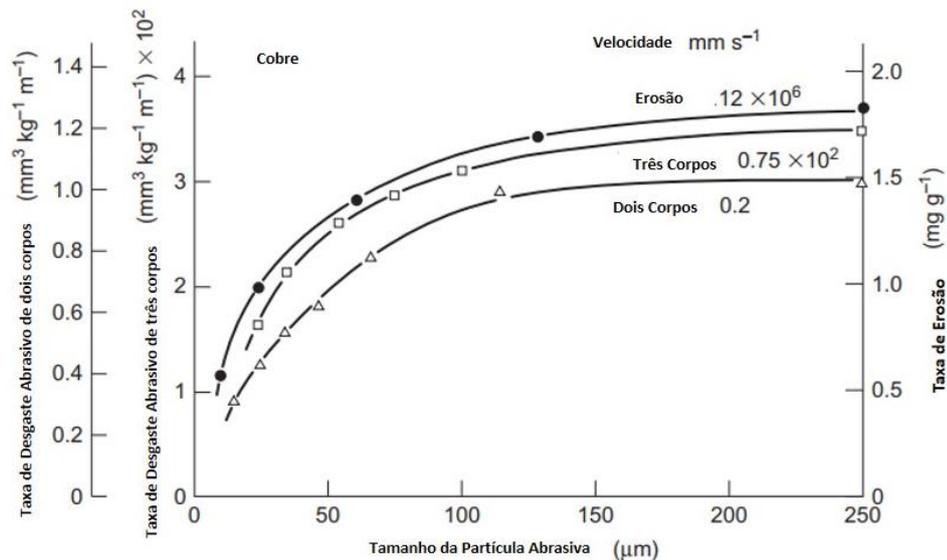


Figura 16 - Taxas de desgaste no cobre para diferentes tamanhos de partículas em função do desgaste abrasivo e erosivo de dois e três corpos em partículas de carboneto de silício. Fonte: Adaptado de Misra; Finnie (1981).

Várias explicações foram propostas para este efeito do tamanho da partícula na abrasão, e é provável que nenhum mecanismo único seja responsável por todo o efeito. Alguma contribuição pode ser devido a um efeito escala na resistência do material, também visto em experimentos de dureza e riscamento, associado à dificuldade de nuclear ou deslocar discordâncias em um volume pequeno. Esse aumento na tensão de escoamento local à medida que a escala da deformação diminui leva a uma redução nas taxas de desgaste por processos plásticos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Outra explicação é que com o aumento do tamanho das partículas, menos partículas vão se acomodar entre as duas superfícies e, assim,

um menor número de partículas vão ter que sustentar toda a carga. Caso a carga por partícula seja grande o suficiente essas partículas podem fraturar, diminuindo as taxas de desgaste (BOZZI e DE MELLO, 1999).

2.4 Aço Inoxidável

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro (Fe), Carbono (C) e Cromo (Cr) que foram desenvolvidos no século XX para o mercado bélico. Sua aplicabilidade era diversa principalmente por ser um material resistente a ataques químicos (PADILHA e GUEDES, 1994).

Callister e Rethwisch (2020) afirma que o principal componente do aço inoxidável é o Cromo com aproximadamente 10,7% de sua composição. As ligas de ferro são resistentes a corrosão e oxidação em ambientes distintos, em especial na atmosfera ambiente, a presença dos elementos de ligas, produz uma camada de óxido protetora (CHIAVERINI, 1977). É pertinente enfatizar que a adição de níquel e molibdênio pode melhorar a performance da resistência a corrosão (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

De acordo com Callister *et al* (2020), a microestrutura dos aços inoxidáveis é dividida em três grupos, sendo eles: Austeníticos, ferríticos e martensíticos. As microestruturas dessas classes podem ser desenvolvidas por meio de tratamentos térmicos, propriedades mecânicas ou através dos componentes químicos dessa liga. Partindo desse pressuposto, Lo *et al* (2009), afirma que existem outras classes como aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis duplex, aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis martensíticos e aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

Smith (1977) relata que os aços inoxidáveis austeníticos tem melhor resistência a corrosão e sua composição química varia de 16 a 25% de Cr e 7 a 20% de Ni, essa classe destaca-se por ter boa conformabilidade, tenacidade e ductilidade. Os aços inoxidáveis ferríticos possuem alto teor de Cr (23% – 28%), sendo que a resistência por pite pode ser alterada com a presença de molibdênio (SMITH, 1977). Na visão de Smith (1977), aços inoxidáveis martensíticos recebem o endurecimento apropriado quando exposto a temperaturas de 980°C e tem como característica de material menos resistente a ambientes desfavoráveis.

2.5 Mistura de partículas abrasivas

Gomes *et al* (2015) empregou o ensaio de microabrasão de esfera fixa com diferentes proporções de uma mistura de carбето de silício (SiC) com duas granulometrias de 2 e 6 μm , amostra de aço ASTM 1020 e contra corpo esférico de aço AISI 52100, e força normal de 0,2 e 0,4 N. Os autores afirmam que há um ponto mínimo na taxa de desgaste para a mistura de 50% de partículas pequenas e 50% de partículas grandes (Figura 18(a)) para as duas cargas.

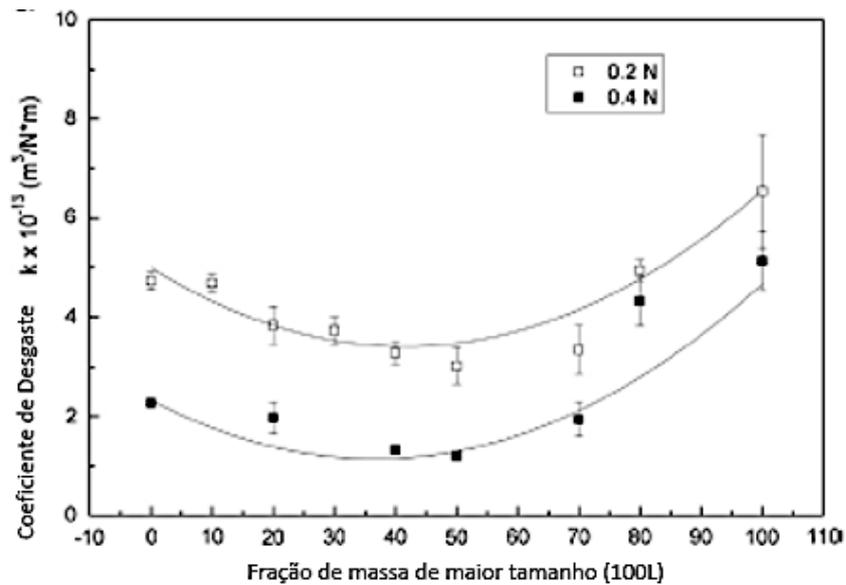


Figura 17 - Resultados de ensaios de desgaste abrasivo realizados para diferentes distribuições granulométricas para as cargas 0,2 N e 0,4 N.
Fonte: Gomez et al (2015).

O principal modo de desgaste observado em todos os testes foi a abrasão por sulcos. No entanto, as análises de MEV indicaram que as partículas também rolaram ao longo dos riscos formados, principalmente para as lamas compostas apenas por partículas pequenas ou grandes, 0L e 100L respectivamente. Esse fenômeno foi explicado pela diminuição da pressão de contato a cada ensaio, o que aumenta a tendência de rolagem das partículas ao invés de deslizamento, conforme mostra a Figura 18.

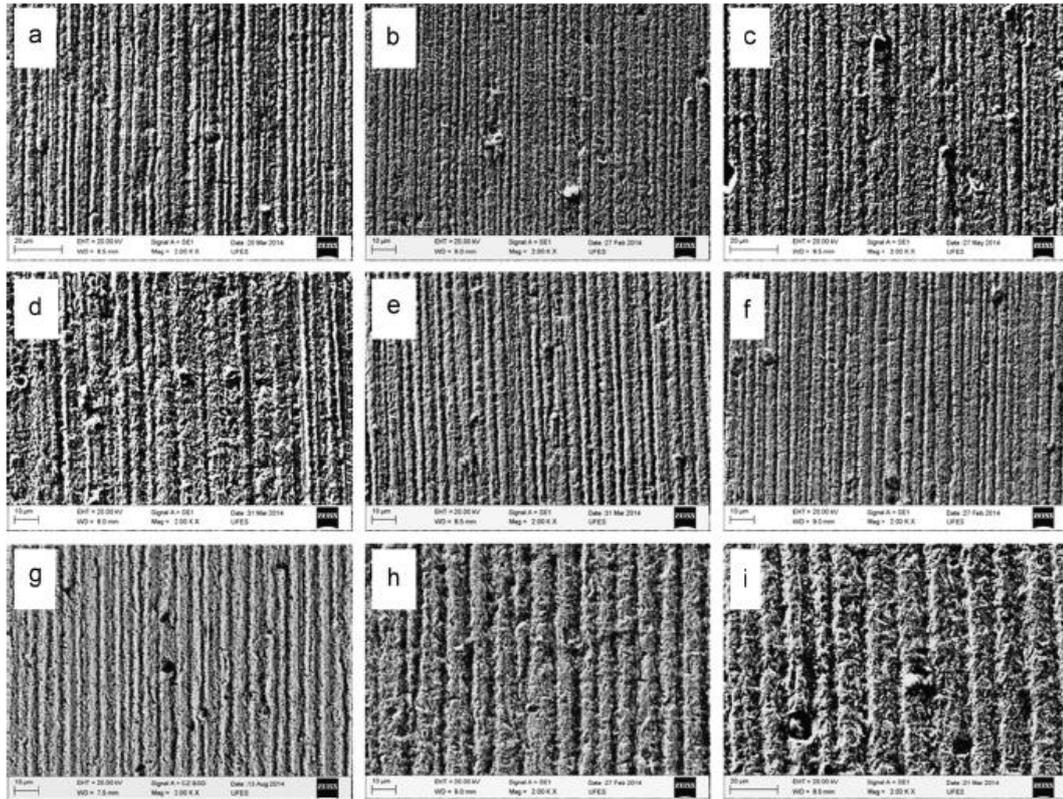


Figura 18 – Imagens obtidas do MEV para crateras com diferentes distribuições granulométricas com carga normal de 0,2 N: (a) 0L; (b) 10L; (c) 20L; (d) 30L; (e) 40L; (f) 50L; (g) 70L; (h) 80L e (i) 100L. (b).
Fonte: Gomez (2015).

Segundo Esteves *et al* (2021), a mesma tendência foi observada para composto por uma amostra de aço AISI 1020 para esferas de (i) Aço martensítico AISI 52100; (ii) Aço inoxidável austenítico AISI 304; (iii) Borracha de poliuretano e (iv) Zircônia-alumina. A Figura 19 (a) mostra que ao empregar a esfera de aço 52100, foi possível notar que somente a lama 50L há número suficiente de partículas grandes para suportar o contato. À medida que se aumenta a quantidade de abrasivos na mistura (80 e 100 L), a taxa de desgaste aumenta, com carga mais baixa, 0,2 N. Entretanto, ao utilizar a esfera de aço inoxidável AISI 304, nota-se que o menor coeficiente de desgaste foi encontrado para a mistura com 20% de partículas grandes (20L), este resultado ocorre devido à baixa dureza do material do contra corpo (Figura 19 (b)).

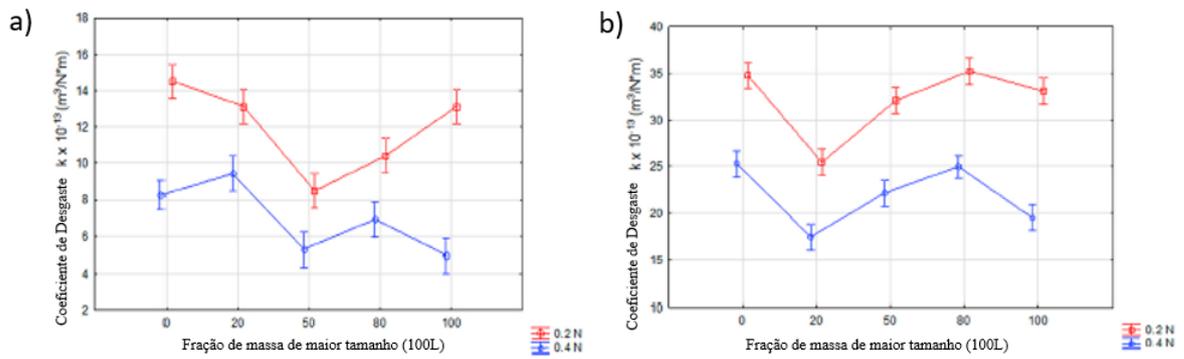


Figura 19 - Coeficientes de desgaste em função da fração de massa de maior tamanho (100L) para uma esfera de aço 52100 (a) e para uma esfera de aço inoxidável 304 (b).
Fonte: Adaptado de Esteves *et al* (2020).

Esteves *et al* (2020), relata que as esferas de borracha e poliuretano e aço inoxidável AISI 304 possuem a dureza inferior ao abrasivo utilizado no ensaio, sendo assim, as maiores partículas abrasivas se encrustaram a esfera provocando maior desgaste e favorecendo o micromecanismo de deslizamento, conforme Figura 20 (a) e (b). Todavia, para esferas de material mais duro, observou-se a ocorrência do micromecanismo de laminação, Figura 20 (c) e (d).

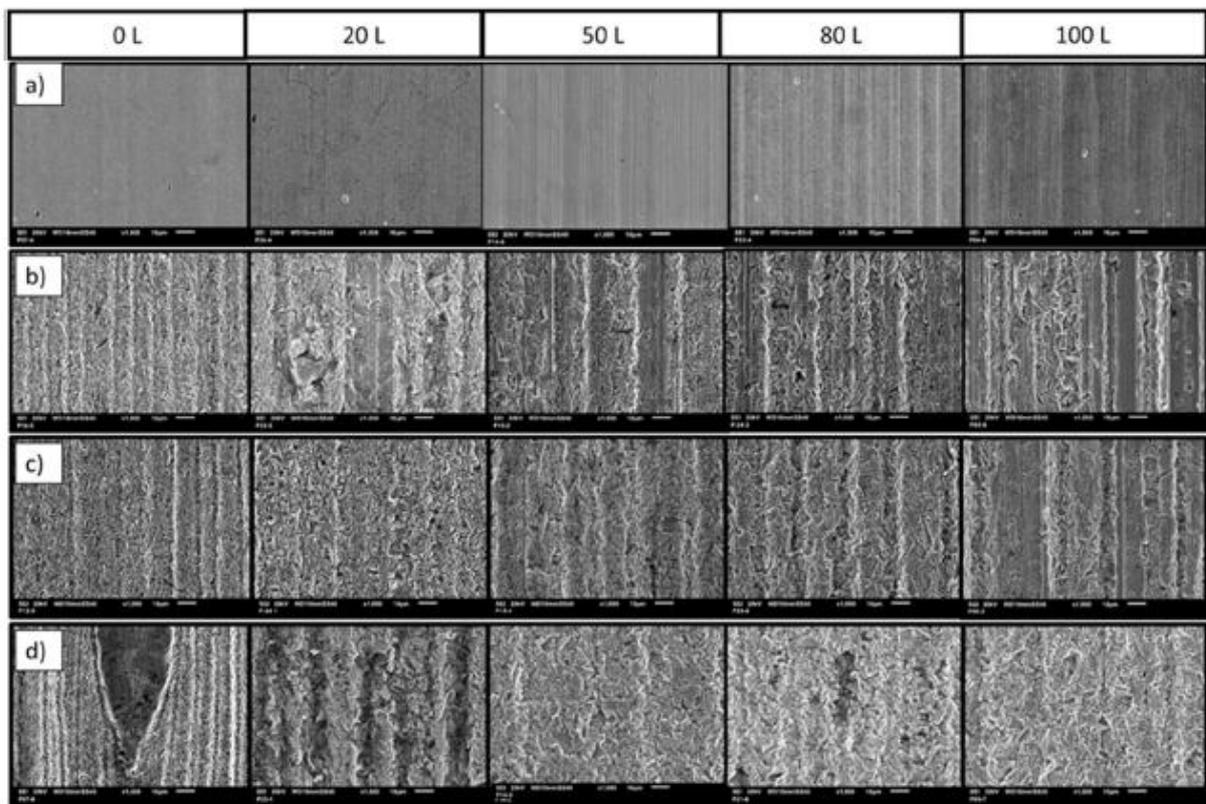


Figura 20 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície das crateras obtidas com pós com diferentes distribuições granulométricas indicadas, carga normal de 0,4 N e diferentes esferas: a) borracha de poliuretano, b) aço inoxidável AISI 304, c) AISI 52100 martensítico aço e d) zircônia-alumina.
Fonte: Adaptado de Esteves *et al* (2020).

Em um recente estudo, Lisboa (2022) estudou a resistência ao desgaste abrasivo do aço P410D a uma lama abrasiva composta de uma mistura de sílica e hematita em ensaios de microabrasão com esfera de nylon. A concentração de sílica na lama variou de 100% até 0%, essa última sendo composta apenas de hematita. A taxa de desgaste para cada lama é apresentada na Figura 21.

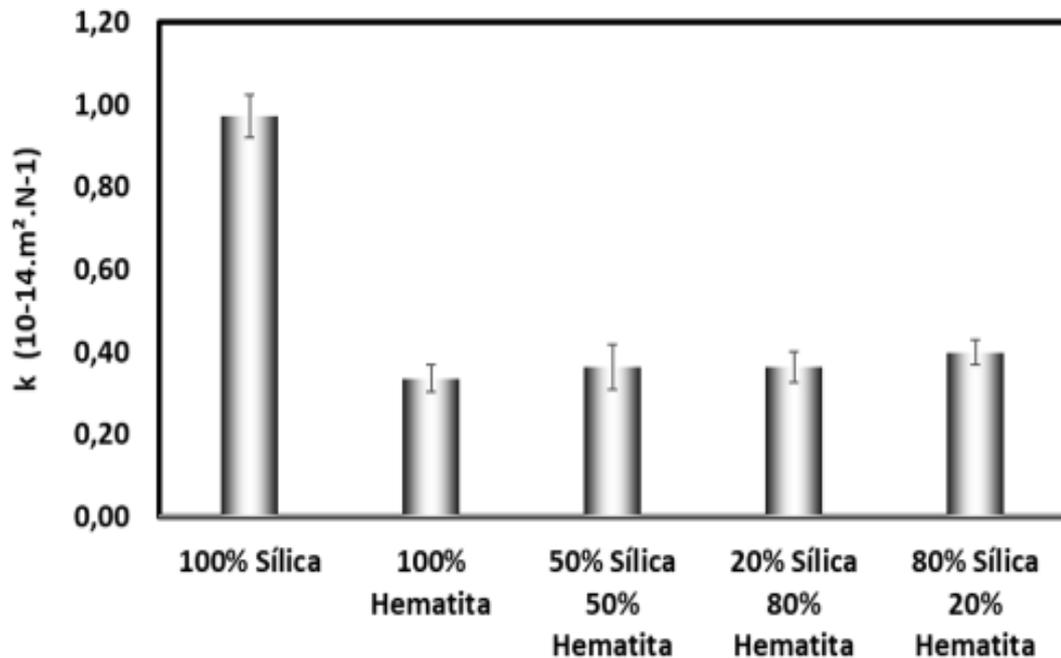


Figura 21 - Coeficiente de desgaste em função de diferentes concentrações de lamas. Ensaio de microabrasão com esfera de nylon.
Fonte: Lisboa (p. 49, 2022).

Primeiramente, observa-se que a lama composta apenas de partículas de sílica é mais abrasiva que a lama composta apenas de hematita. Para concentrações intermediárias as taxas de desgaste foram estatisticamente semelhantes. Esses resultados indicam que para esse sistema tribológico a hematita foi dominante no mecanismo de desgaste.

Cezar (2022) realizou os mesmos testes que Lisboa (2022), porém empregou esfera de aço ABNT 52100. Os principais resultados são apresentados na Figura 22.

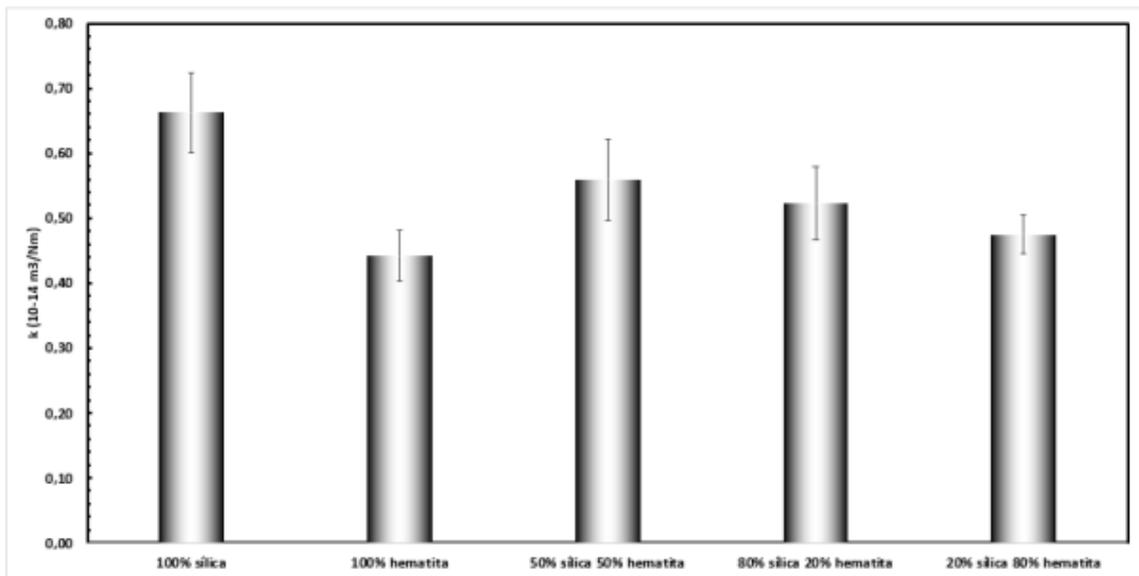


Figura 22 - Coeficiente de desgaste em função de diferentes concentrações de lamas. Ensaio de microabrasão com esfera de aço.

Fonte: Silva (2022).

Os resultados mostram que novamente a lama composta apenas por sílica é mais abrasiva que a lama de hematita. A principal diferença está nas lamas intermediárias; à medida que a concentração de sílica diminuiu as taxas de desgaste também diminuiu. A Figura 23 apresenta os micromecanismos de desgaste para as cinco lamas abrasivas.

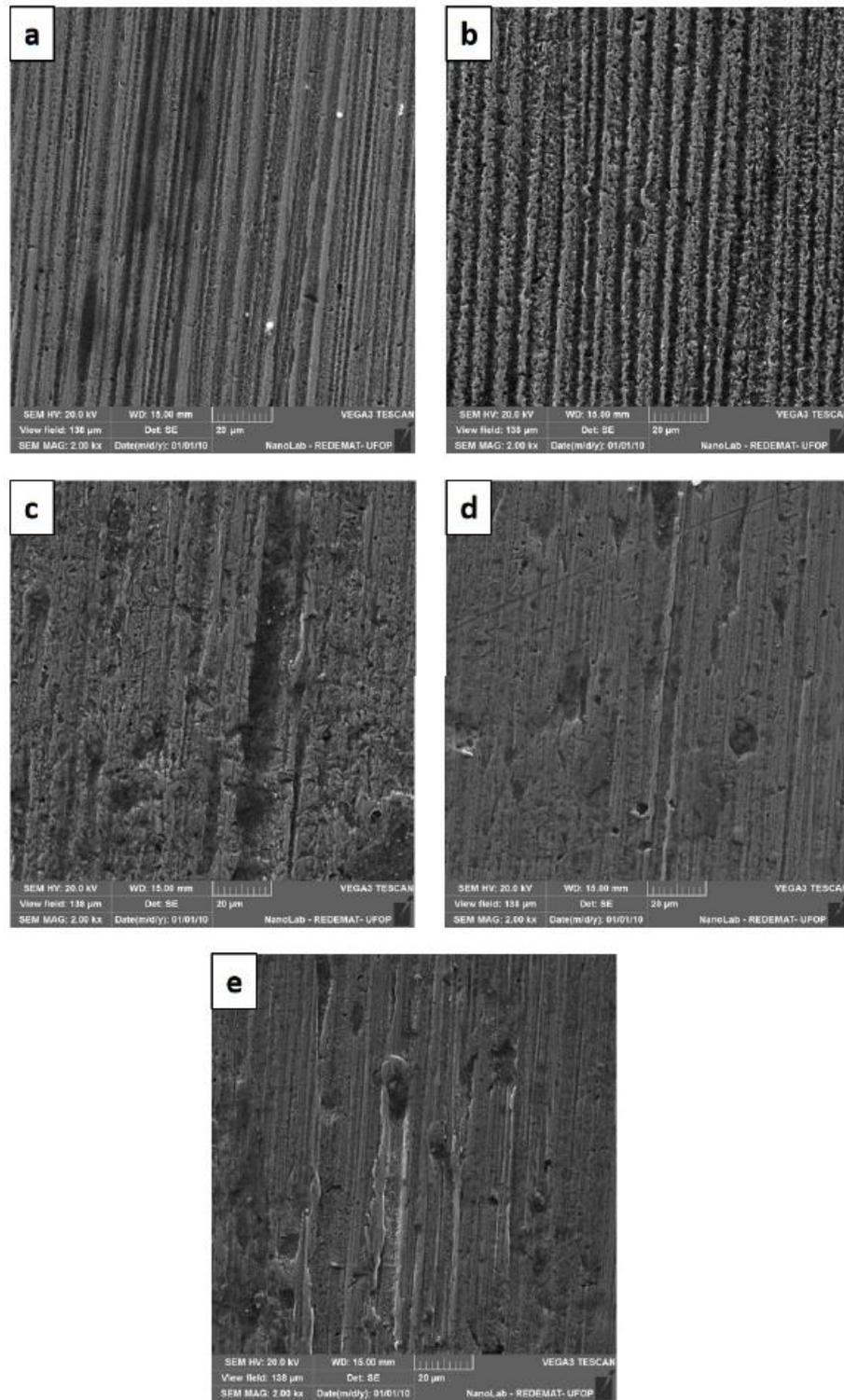


Figura 23: Micromecanismos de desgaste para diferentes lamas abrasivas. (a) 100%SiO₂, (b) 80%SiO₂+20%Fe₂O₃, (c) 50%SiO₂+50%Fe₂O₃, (d) 20%SiO₂+80%Fe₂O₃, (e) 100%Fe₂O₃.
Fonte: Cezar (2022).

O micromecanismo de desgaste principal também foi alterado pela lama abrasiva. Conforme pode ser visto na Figura 23, para as maiores concentrações de sílica houve um predomínio de riscos e sulcos, porém ao aumentar a concentração de hematita o micromecanismo tendeu para o misto.

3 METODOLOGIA

No capítulo 3 foi abordada a metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho. A estrutura deste capítulo está dividida em tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumento de coleta de dados, tabulação dos dados e por fim as considerações finais.

3.1 Tipo de pesquisa

Conforme Marconi e Lakatos (2003) a pesquisa é um meio de estudo definido como uma ciência que discorre acerca de um tema envolvendo o método utilizado, a aplicação dessa metodologia e a análise detalhada sobre o assunto escolhido.

Segundo Creswell (2021), a pesquisa pode ser classificada em quantitativa, qualitativa e mista. O mesmo autor, evidencia que a pesquisa quantitativa é objetiva, tem o foco em verificar os dados numéricos por meio da estatística afim de obter uma quantificação numérica. Entretanto, de acordo com Creswell (2021), a pesquisa qualitativa busca analisar o porquê de cada fenômeno, testar as hipóteses, visando a compreensão de diferentes argumentos já existentes do assunto. Por fim, a pesquisa mista possui características quantitativas e qualitativas. Além de explorar os dados numéricos, este estudo visa embasamento teórico (SAMPIERI ET AL, 2013).

Nessa perspectiva, este trabalho pode ser classificado como um estudo misto, visto que abrange a pesquisa quantitativa e qualitativa. Foram analisados os coeficientes de desgaste em um corpo de prova de aço P410D, compreendendo a pesquisa quantitativa e o levantamento dos dados dos mecanismos de desgaste gerados de acordo com a lama abrasiva, caracterizando a pesquisa qualitativa. Embora a utilização da metodologia da pesquisa seja enriquecedora de forma individual, Creswell (2021), ressalta que a aplicação conjunta possibilita melhor compreensão dos resultados.

As pesquisas são classificadas conforme o objetivo geral e dividem-se em três grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. O estudo exploratório tem o objetivo de esclarecer, levantar e aprimorar as informações, auxiliando no levantamento de hipóteses. A pesquisa descritiva visa a exposição do fenômeno e a partir disso estabelece relação entre as variáveis. E por último, a pesquisa explicativa detecta os fatores que contribuem para o acontecimento de determinado fenômeno (GIL, 2019). Tendo em vista os conceitos apresentados, o presente trabalho é compreendido como estudo explicativo já que visa identificar quais fatores estão

relacionados para o fenômeno pesquisado ocorrer e também como descritiva pois elabora a descrição dos fenômenos e a relação com as variáveis.

Lakato e Marconi (2021) abordam a pesquisa bibliográfica que tem foco na abrangência de um assunto, sendo utilizado artigos, teorias e livros como base para estudo. Tendo em vista a revisão bibliográfica realizada no capítulo 2 deste trabalho, pode-se concluir que este método é adequado para realização do estudo.

Além do mais, Gil (2002), discorre acerca da pesquisa experimental, onde se determina as variáveis e quais os efeitos destas variáveis no objeto. Diante dos ensaios realizados em laboratório, conclui-se que esta metodologia será apropriada.

3.2 Materiais e métodos

Este tópico apresenta o fluxograma, Figura 24, que será seguido para o desenvolvimento da pesquisa. Em primeiro lugar se estabelece a pergunta problema evidenciada na introdução que posteriormente é respondida com o levantamento dos dados extraídos no decorrer do estudo. Por conseguinte, elabora-se a revisão bibliográfica com os assuntos em evidência.

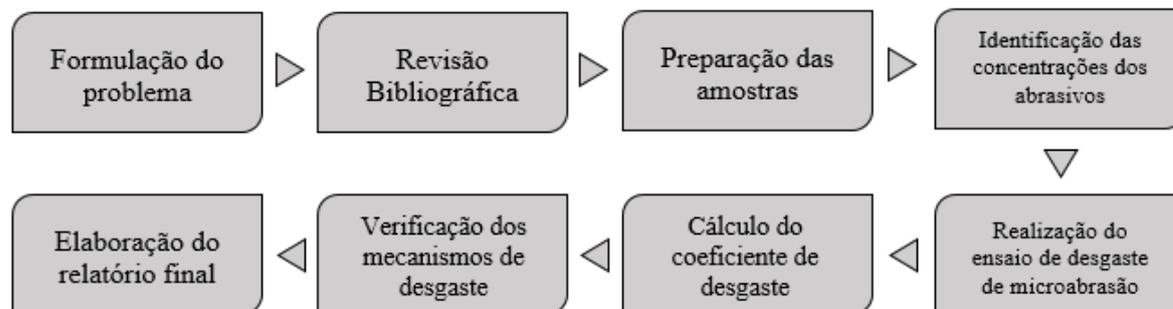


Figura 24 - Fluxograma do projeto.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

3.2.1 Preparação das amostras

Foi selecionado o aço inoxidável P410D como material para amostra dos ensaios, fornecidos pela empresa Aperam com sede na cidade de Timóteo – MG. Sabe-se que esse material tem variadas aplicações desde a indústria sucroalcooleira como por exemplo, em chapas para picadores de cana de açúcar, a automobilística e, por isso, foi selecionado como objeto de estudo.

Labiapari (2015), afirma que o aço inoxidável ferrítico P410D é um material que possui baixo teor de cromo e por isso é considerado de baixo custo. É utilizado em cenários úmidos, como ambientes abrasivos – corrosivos, sendo mais viável que o aço carbono, por exemplo. Atualmente, o aço inoxidável P410D está substituindo outros aços na indústria sucroalcooleira devido a sua capacidade de resistência (corrosão e abrasão) (LABIAPARI, 2015).

A Tabela 1 apresenta a composição química do Aço inoxidável P410D.

Tabela 1 - Composição química do aço P410D.

Elemento	% em peso
C	0,0107
Mn	0,5332
Si	0,526
P	0,0271
S	0,0005
Cr	11,33
Ni	0,3046
Mo	0,0116
N	0,0128
Fe	Balanceado

Fonte: Pesquisa direta (2023).

A composição química do aço foi examinada por diferentes técnicas, como: absorção de infravermelho (Leco, CS444s), condutividade térmica (Leco, TC436s), espectrometria de fluorescência de raios X (Thermo ARL, 9900) e espectrometria de emissão óptica (Thermo ARL, 4460). Ressalta-se que todos os dados foram fornecidos pela empresa Aperam.

3.2.2 Definição da concentração dos abrasivos

Conforme visto na revisão bibliográfica, o material das partículas abrasivas influencia no micromecanismo de desgaste resultante e nas taxas de desgaste, têm-se como variáveis a dureza, a concentração, a forma e o tamanho. Dessa maneira, para este projeto, foram utilizados dois abrasivos sendo o Dióxido de silício e a Hematita, com fórmula química SiO_2 e Fe_2O_3

respectivamente. É importante ressaltar que esses abrasivos são comumente encontrados em cenários reais na indústria sucroalcooleira e justifica a escolha das duas partículas.

A Tabela 2 mostra algumas das propriedades das partículas empregadas. Esses dados foram retirados de Hutchings e Shipway (2017), Silva (2003) e da fabricante Sigma-Aldrich (2021).

Tabela 2 - Características dos abrasivos escolhidos.

ABRASIVO	DUREZA (HV)*	TAMANHOS NOMINAIS**
Sílica	750 - 1200	Tamanho da partícula: 0,5 - 10 μm aproximadamente 80% entre 1 - 5 μm
Hematita	739 - 1500	Tamanho da partícula: 96% < 5 μm

Fonte: Silva (2003)*, Hutchings e Shipway (2017)* e Sigma-Aldrich (2021)** .

Ressalta-se que os valores de dureza são aproximados.

A granulometria das partículas abrasivas foi avaliada em equipamento Bettersize2000 do fabricante Bettersize Instruments, as partículas foram dosadas em um béquer até atingir um índice de obscuração entre 15% à 20% que é definido pelo método padrão de análise do equipamento.

A mistura abrasiva é composta por partículas abrasivas e água. Sendo assim, para este trabalho foram produzidas lamas abrasivas com concentração de 10 % em massa de abrasivo em suspensão em água destilada. A Tabela 3 mostra as cinco lamas abrasivas e suas concentrações utilizadas no ensaio.

Tabela 3 - Concentração do abrasivo para cinco lamas abrasivas.

MISTURA ABRASIVA	SÍLICA (SiO₂)	HEMATITA (Fe₂O₃)
1	100%	0%
2	80%	20%
3	50%	50%
4	20%	80%
5	0%	100%

Fonte: Pesquisa direta (2023).

3.2.3 Ensaio de desgaste microabrasivo

Realizou-se o ensaio de desgaste microabrasivo em um equipamento de teste de microabrasão na configuração de esfera fixa, Figura 25. O equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFOP.



Figura 25- Microabrasão de esfera fixa.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A esfera utilizada foi de zircônia, com diâmetro de 25,4 mm. A esfera, antes dos testes, foi condicionada em lixa 320# para melhorar o arraste das partículas para o contato. Antes de cada teste a ela era limpa com água mineral e algodão para remoção de resquícios de abrasivos do ensaio anterior.

A força normal adotada foi de 1,5 N e rotação da esfera de 100 rpm. A lama abrasiva foi gotejada, com a ajuda de uma bomba peristáltica, durante o teste. Foi uma gota a cada 5 segundos.

O teste teve duração total de 25 minutos, porém, a cada 5 minutos o teste era interrompido para avaliar o diâmetro da calota formada. O diâmetro da impressão de desgaste foi determinado através de um microscópio óptico, um esquema da calota de desgaste pode ser visualizada através da Figura 26.

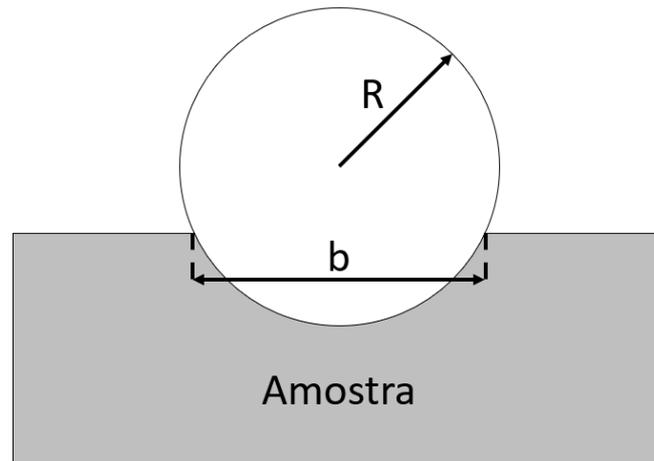


Figura 26 - Esquema impressão do desgaste por uma esfera.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Diante disso, é possível calcular o volume perdido e a taxa de desgaste com o auxílio das Eq. 3 e 4, definidas na seção 2.2.

3.2.4 Análise da microestrutura, dureza e micromecanismos de desgaste

A análise da microestrutura do corpo de prova foi realizada empregando o ataque químico Vilella. O reagente consiste em 1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorídrico e 100 ml de álcool etílico, por 80 segundos. A microestrutura foi visualizada no microscópio ótico Olympus modelo BX51M.

Para a análise dos micromecanismos de desgaste que ocorreram no ensaio de abrasão, empregou-se microscopia ótica. Antes de serem avaliadas, os corpos de prova foram preparados por um processo de limpeza usando o ultrassom.

A análise de dureza da amostra de aço P410D foi realizada no laboratório de ensaios metalográficos de engenharia mecânica na Universidade Federal de Ouro Preto. Utilizou-se o equipamento M4C025G3 do fabricante Emco Test com uma carga de 5KG e o indentedor Vickers.

3.3 Variáveis e indicadores

Francisco (2007) afirma que as variáveis podem ser determinadas conforme a quantidade de valores distintos que se pode assumir, tanto na pesquisa qualitativa ou quantitativa, devido a isso, é necessário o uso de indicadores para estabelecer e aferir essas variáveis.

Para mensurar as variáveis, os indicadores devem ser determinados de acordo com a ferramenta mais adequada, diante disso, a Tabela 4 apresenta as variáveis e indicadores utilizadas neste trabalho.

Tabela 4 - Variáveis e Indicadores da pesquisa.

VARIÁVEIS	INDICADORES
Lama abrasiva	Coefficiente de desgaste
	Micromecanismo de desgaste

Fonte: Pesquisa direta (2023).

3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados foi obtida através do equipamento de ensaio de microabrasão microscópio óptico, equipamento para ensaio de dureza e pela revisão bibliográfica.

3.5 Tabulação de dados

A tabulação de dados foi realizada no Microsoft Excel para o cálculo e para a realização da pesquisa e coleta de dados e para o armazenamento das informações e elaboração do relatório foi utilizado o Microsoft Word.

3.6 Considerações finais

Nesta seção foi apresentado a metodologia e ferramentas utilizadas para atingir os objetivos traçados inicialmente, com o intuito de desenvolver o ensaio de microabrasão por esfera fixa. Posteriormente, apresentou-se as variáveis e indicadores envolvidos no processo, as ferramentas utilizadas e o instrumento para a tabulação dos dados. No próximo capítulo, as análises obtidas serão tratadas a fim de estabelecer os resultados, responder e discutir as variáveis do ensaio de microabrasão.

4 RESULTADOS

O presente capítulo expõe os resultados encontrados durante a execução dos ensaios de microabrasão. Serão abordados os resultados relacionados aos micromecanismos de desgaste e a caracterização da microestrutura resultante na amostra.

4.1 Caracterização da Microestrutura

A Figura 27 exibe a microestrutura do aço P410D, utilizada como amostra neste trabalho. Este material está sendo largamente empregado na indústria sucroalcoleira (LABIAPARI, 2015).

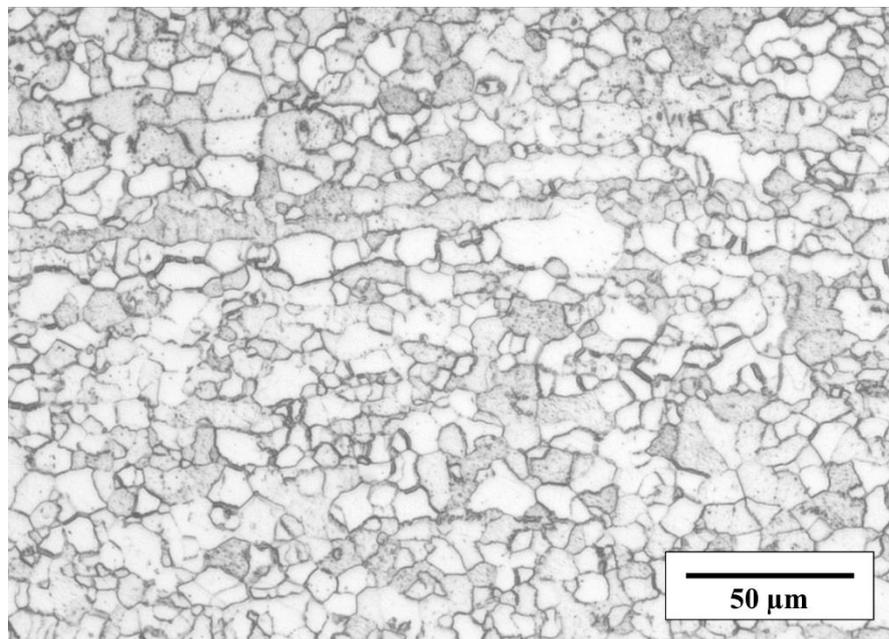


Figura 27 - Microestrutura do aço inoxidável P410D.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

É possível observar que há predominância ferrítica, visto que, o material não passou por tratamento térmico. Ressalta-se que a amostra possui grãos homogêneos.

A amostra não passou por nenhum processo térmico e apresentou a dureza de $167 \pm 1,73$ HV.

4.2 Análise de Granulometria

A distribuição granulométrica das partículas abrasivas de SiO₂ e Fe₂O₃ empregadas nesse trabalho foi obtida a laser, utilizando o equipamento *Bettersize 2000* do fabricante *Bettersize*. Os resultados são apresentados na Figura 28 e Figura 29.

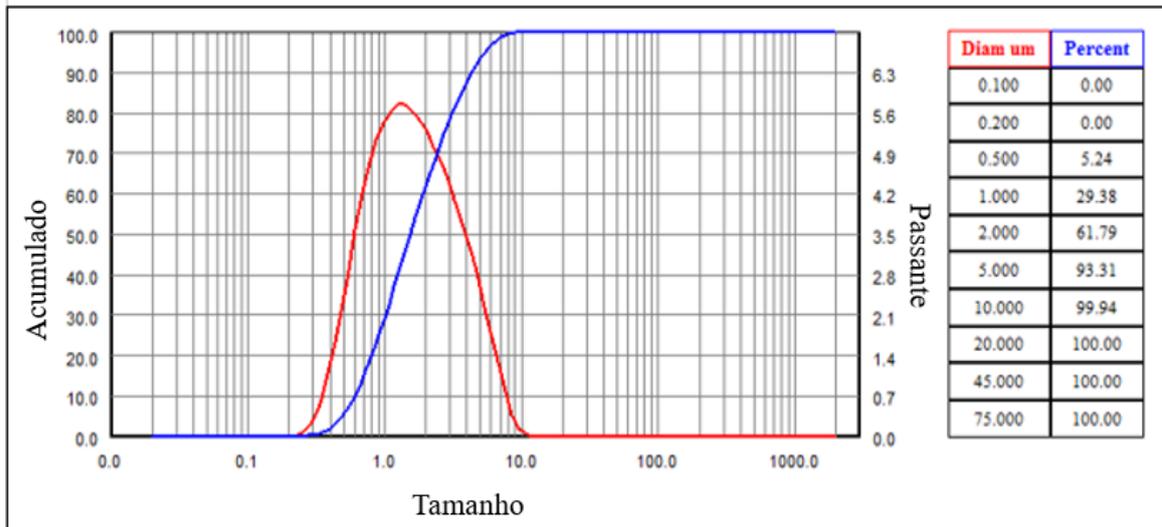


Figura 28 - Curva de percentual acumulado da Sílica analisada por granulometria a laser.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

As partículas de sílica apresentaram uma distribuição próxima à da normal, com tamanho médio igual a 1,5 μm . Ressalta-se que 50% das partículas apresentam tamanho menor que 1,5 μm e que 90% das partículas apresentaram diâmetro menor que 3 μm . Por fim, 100% das partículas são menores que 10 μm .

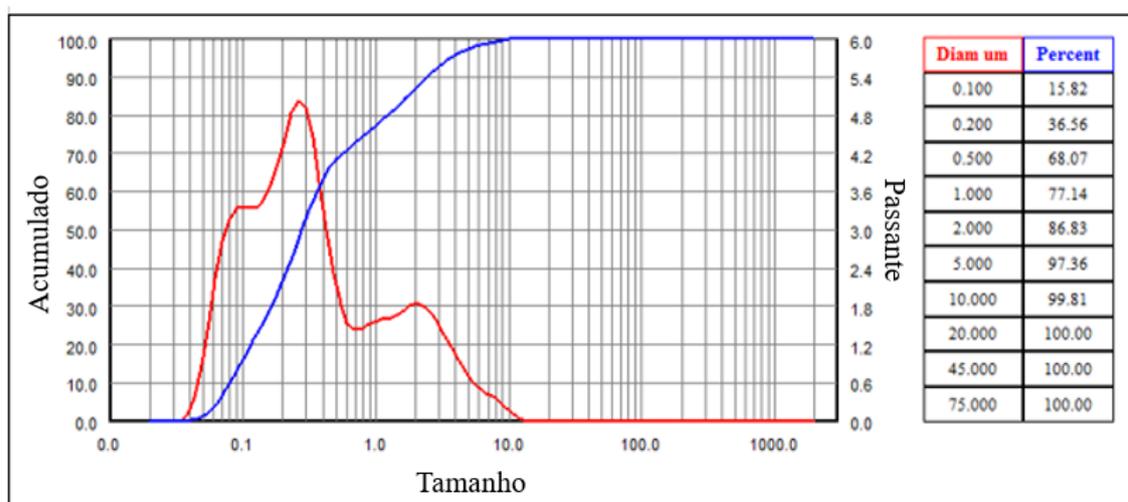


Figura 29 - Curva de percentual acumulado da Hematita analisada por granulometria a laser.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

As partículas de hematita não apresentaram uma distribuição normal, a distribuição foi aproximadamente bimodal, com a maior parte das partículas com tamanho médio igual a $0,3 \mu\text{m}$; 50% das partículas eram menores que $0,3 \mu\text{m}$; 90% menores que $2,5 \mu\text{m}$; e 100% menores que $10 \mu\text{m}$.

4.3 Taxa de desgaste na microabrasão

Para desenvolver deste trabalho, foram realizados ensaios no laboratório para diferentes concentrações de hematita e sílica. O sistema tribológico era constituído por:

- Esfera de zircônia (contra corpo);
- Corpo de prova de aço inoxidável ferrítico P410D;
- Lama abrasiva com 10% em massa de abrasivos.

A Figura 30 apresenta o valor do coeficiente de desgaste em função do tempo para diferentes misturas de hematita e sílica.

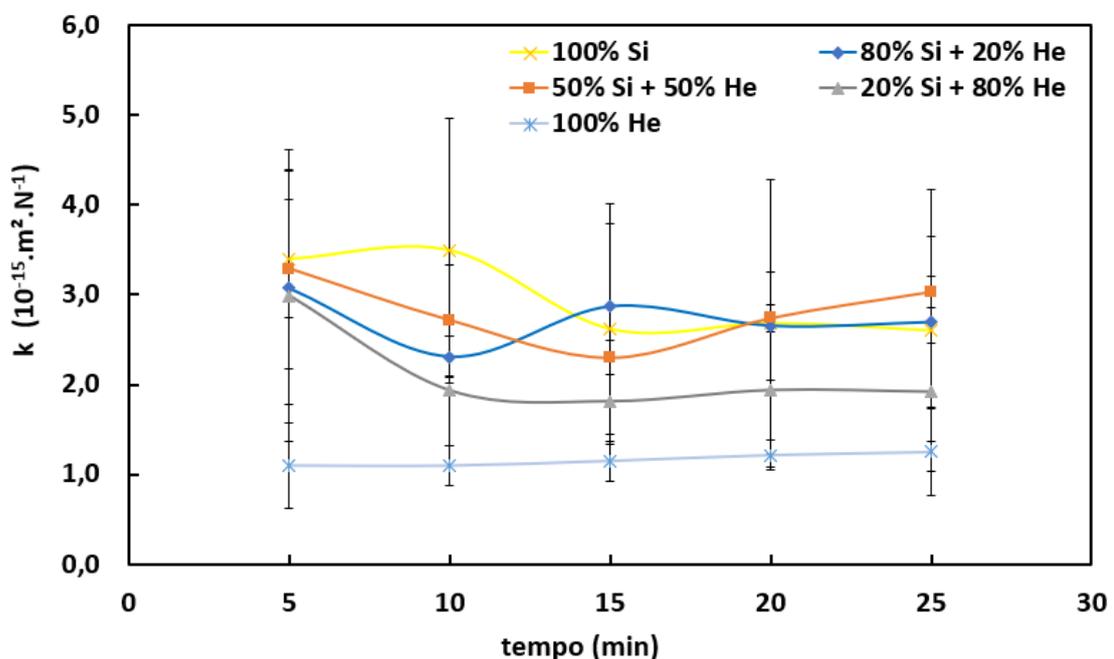


Figura 30 - Coeficiente de desgaste (k) em função do tempo para diferentes concentrações de abrasivos.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A Figura 30 apresenta o comportamento do coeficiente de desgaste para o intervalo de 5 minutos entre os testes, totalizando o período de 25 minutos totais de ensaio. É notório que o desempenho da taxa de desgaste avaliado, foi específico para cada mistura abrasiva, de modo que o regime permanente obtido após 15 minutos de ensaio.

Diante disso, a Figura 31 mostra a taxa de desgaste com os seus respectivos desvio padrão. Esse valor é a média dois três últimos valores de k encontrados dentro do regime permanente.

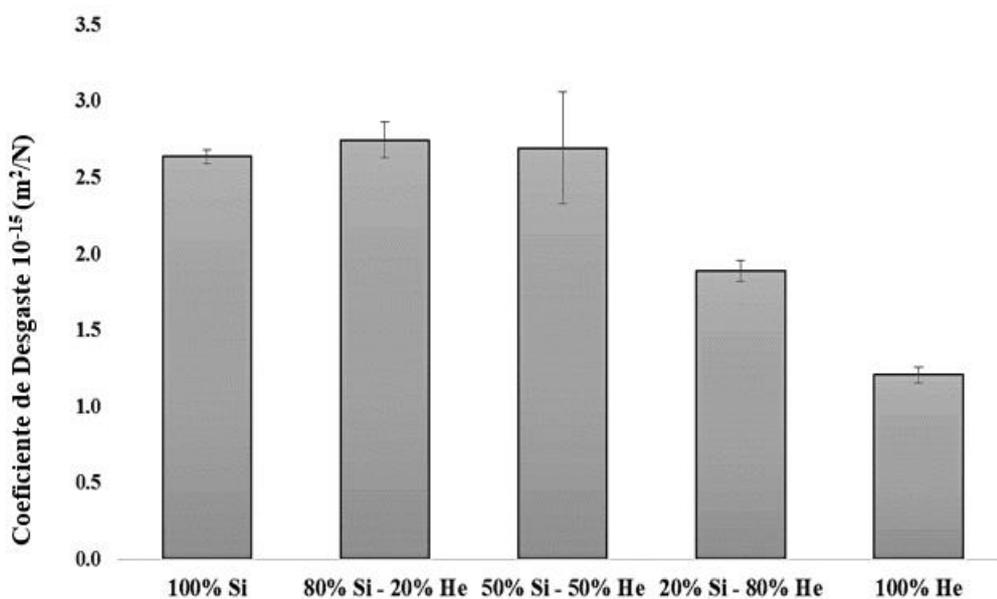


Figura 31 - Coeficiente de desgaste para diferentes concentrações de lama abrasiva em uma amostra de aço inoxidável.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

As lamas que possuíam maior concentração de sílica (acima de 50%) apresentaram os maiores coeficientes de desgaste, contudo, as amostras com maiores concentrações de hematita, apontaram menor desgaste. O mesmo resultado foi encontrado ao empregar esfera de nylon (LISBOA, 2022) e de aço (CEZAR, 2022). Como pode ser visto na Tabela 2, o valor de dureza das partículas é semelhante e essa diferença na abrasividade pode estar relacionada com a diferença no tamanho das partículas abrasivas. Assim, 50% das partículas de sílica apresentam tamanho médio menor que $2,5 \mu m$ e 90% menor que $3 \mu m$, enquanto as partículas de hematita 50% apresentam tamanho menor que $0,3 \mu m$ e 90% menor que $2,5 \mu m$. Para concentrações de sílica maiores ou iguais à 50%, os valores de k foram estatisticamente iguais. Ao diminuir a concentração de sílica e, conseqüentemente, aumentar o teor de hematita, o coeficiente de desgaste diminui até o valor mínimo para 100% hematita.

Nos testes conduzidos por Cezar (2022) foi empregado esfera de aço ABNT 52100, material com dureza de 938 ± 49 HV (ESTEVEZ, 2021). Os resultados foram semelhantes ao do presente trabalho, à medida que a quantidade de partículas de sílica diminuía também diminuía o valor do coeficiente de desgaste.

Lisboa (2022) empregou a esfera de nylon com valor de dureza 115 HRR (ARDILA et al, 2020) (note que esses valores de dureza não são comparáveis), material significativamente mais dúctil que o aço e a zircônia. Os resultados de Lisboa (2022) foram diferentes, todas as lamas que continham hematita apresentaram o mesmo valor de coeficiente de desgaste e a lama composta 100% de sílica apresentou um valor de coeficiente 35% maior. Resultado semelhante foi encontrado por Esteves et al (2021), devido à alta capacidade de deformação elástica o contracorpo de poliuretano foi indiferente a variação na distribuição granulométrica dos abrasivos. Observaram em imagens de EDS e MEV partículas abrasivas impregnadas na superfície da esfera e abrasivos de diferentes tamanhos foram encontrados em cavidades sobre a superfície.

Devido à alta dureza da zircônia, 1519 ± 61 HV (ESTEVEES et al, 2021), e da esfera de aço as partículas de sílica não conseguem penetrar profundamente a esfera e fraturam o que diminui a coeficiente de desgaste à medida que a quantidade de partículas de sílica diminui. Porém, a esfera de nylon é dúctil o suficiente para permitir as partículas de sílica a penetre, assim, mesmo para um valor mínimo de partículas de hematita elas estão atuando no desgaste da amostra.

A Figura 32 mostra um esquema de como as partículas suportaram a carga.

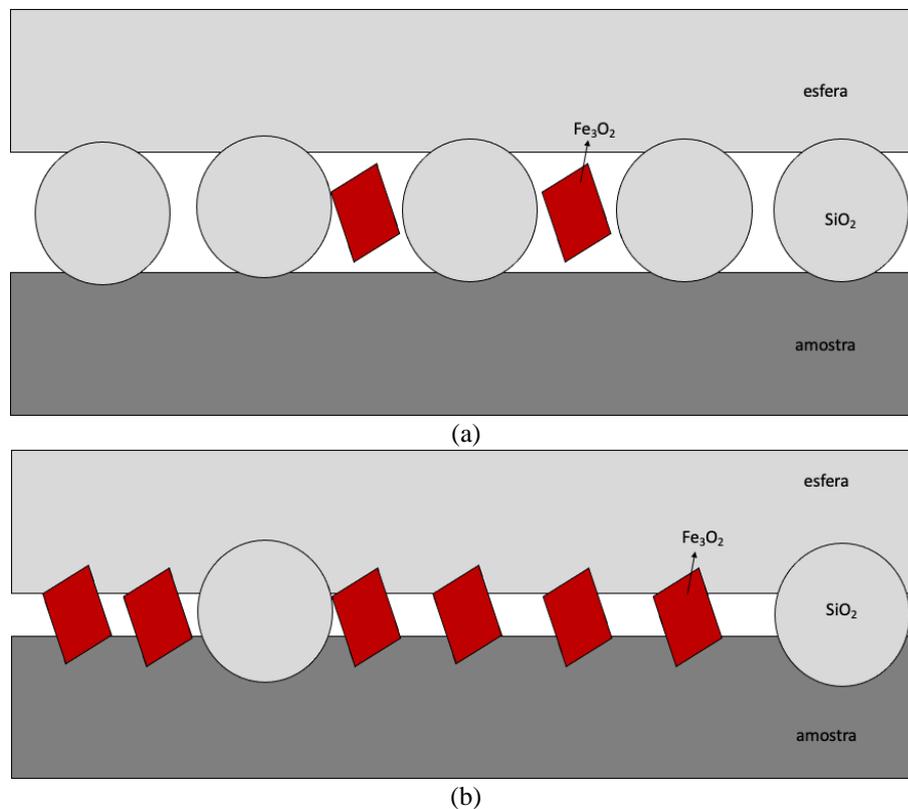


Figura 32: Esquema de atuação das partículas abrasivas (a) grande quantidade de sílica e (b) grande quantidade de hematita.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Nas situações de grande quantidade de sílica (concentração de sílica maior que 50%) a carga total era suportada apenas pelas partículas de sílica que são maiores que as partículas de hematita. Algumas partículas de hematita atuavam, mas eram exceção. À medida que a quantidade de partículas de sílica diminui a carga máxima passa a ser compartilhada com as partículas de hematita, neste momento, ou as partículas de sílica fraturam, devido ao excesso de carga por partícula, ou elas penetram mais profundamente na esfera e/ou na amostra. Uma terceira situação é quando a maior parte das partículas são de hematita (possuem menor granulometria), nesta circunstância, a distância entre as superfícies é menor, que o tamanho da partícula de sílica, para penetrar o contato.

4.4 Micromecanismos de Desgaste

Os micromecanismos de desgaste apontam o processo de interação entre as partículas abrasivas com a superfície (MULHEARN; SAMUELS, 1962; ZUM GAHR, 1987).

As Figuras Figura 33 a Figura 37 exibem as calotas formadas após 25 minutos de teste.

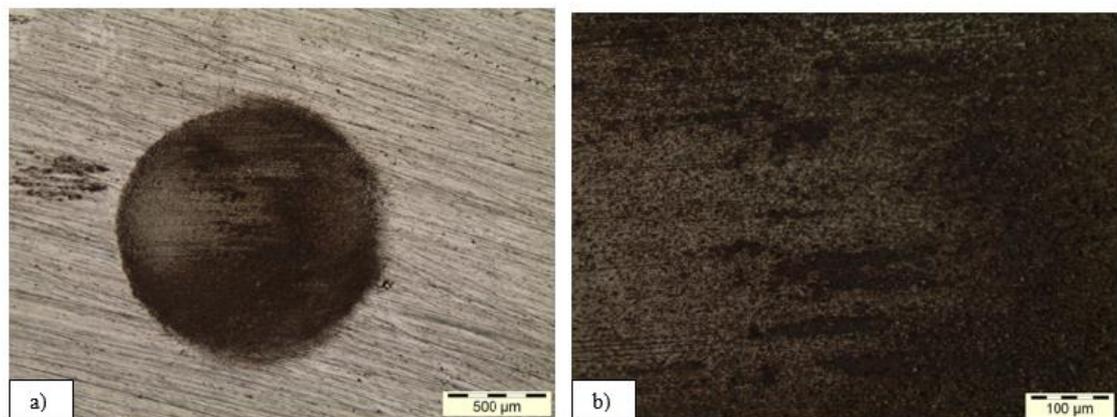


Figura 33 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta 100% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

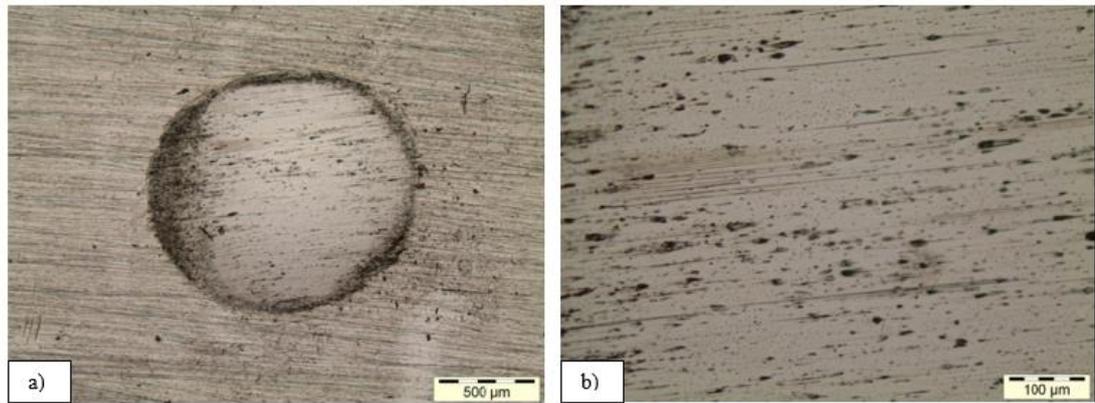


Figura 34 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 80% de Sílica 20 % de Hematita. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

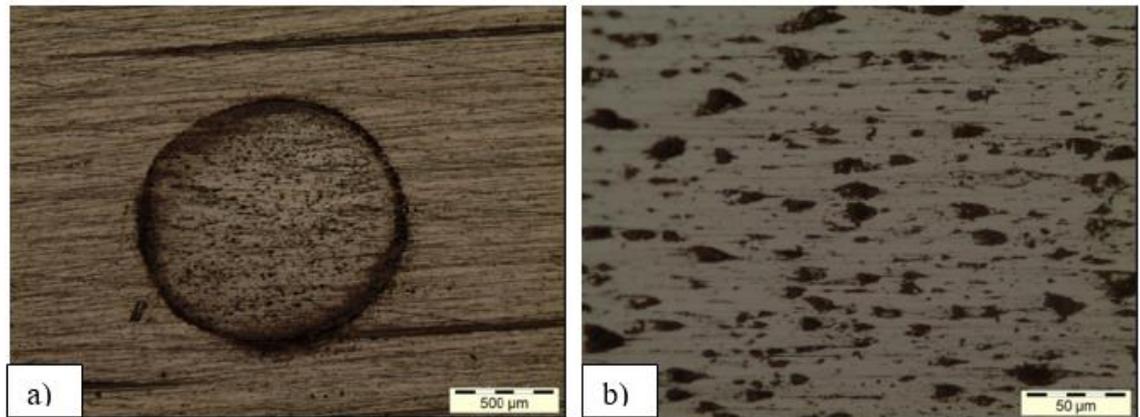


Figura 35 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 50 % de Hematita e 50% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa direta.

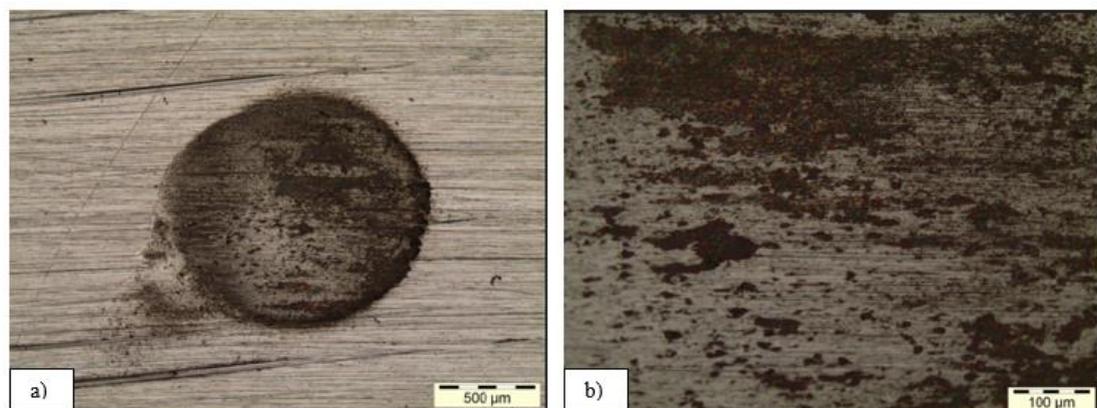


Figura 36 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 80 % de Hematita e 20% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

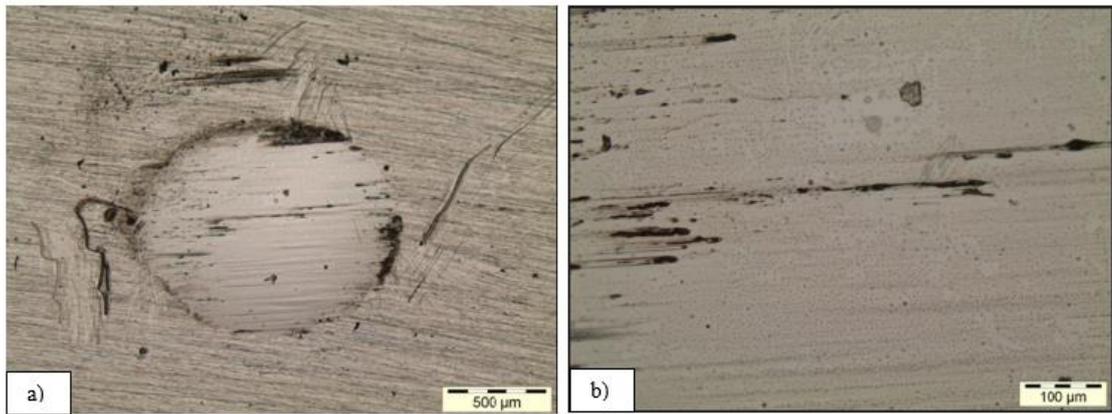


Figura 37 - Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 100% de Hematita. (b) ampliação do centro da calota.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

É possível observar que houve a ocorrência dos micromecanismos de microcorte e o microsulcamento, resultando em uma série de sulcos e riscos impressos na superfície das calotas. Trezona et al (1999) relatam que o fenômeno de riscamento é predominante quando existem baixas concentrações de abrasivo e altas cargas. Também é possível ver pontos de oxidação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve o objetivo de avaliar o micromecanismo e taxa de desgaste abrasivo em um par tribológico aço P410D e zircônia com diferentes lamas abrasivas. Poucos estudos são encontrados nesta área que analisa sistemas com mais de uma partícula abrasiva, e em um cenário real o tema é relevante, pois, aproximadamente 50% dos problemas na indústria são provenientes da abrasão.

Para a pasta abrasiva composta de 100% sílica, observou-se maior taxa de desgaste, enquanto a lama formada somente por hematita apresentou o menor coeficiente de desgaste.

As partículas de sílica são maiores e suportam a carga máxima, sendo assim, ao diminuir a quantidade sílica a carga máxima passou a ser compartilhada com a hematita e neste momento observou-se que as partículas de sílica se fraturavam devido ao excesso de carga, diminuindo a taxa de desgaste.

Por fim, fica claro que diversos parâmetros influenciam nos mecanismos e micromecanismos de desgaste abrasivo. Foi observado que para as misturas com maior concentração de Fe_2O_3 o principal micromecanismo foi o microcorte e microsulcamento, caracterizado um misto de riscos e sulcos, em contrapartida as lamas com maior quantidade de sílica observou-se o deslizamento das partículas abrasivas, foi possível observar também pontos de oxidação em algumas calotas.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMBRISH MISRA and IAIN FINNIE. **On The Size Effect In Abrasive And Erosive.** WEAR. Wear Elsevier, 65 (1981) 359 - 373

BOZZI, A. C.; MELLO, J. D. B. de. **Wear resistance and wear mechanisms of WC–12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion.** Wear Elsevier, Uberlândia, v. 1, p. 575-587, ago. 1999.

BURWELL JR, J. T. **Survey of possible wear mechanisms.** Wear, v. 1, n. 2, p. 119-141, 1957. ISSN 0043-1648.

CEZAR, BRUNO SILVA. **Estudo do efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas nos mecanismos e coeficientes de desgaste na microabrasão do aço inoxidável p410d.** Ouro Preto, 2022.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 4^oed., São Paulo, ABM, 1977.

COZZA, R. C. **Estudo de desgaste e atrito em ensaios microabrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão.** 2011. 290 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: método qualitativo, quantitativo e misto.** 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto.** 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021. 222 p.

FRANCISCO, Alberto de. **Metodologia de Pesquisa.** 2007.

GATES, J. D.. **Two-body and three-body abrasion: A critical discussion.** , Wear, volume 214, pp 139 – 146, 1998.

GAVA, G.H.s.; SOUZA, R.M.; MELLO, J.D.B. de; MACêDO, M.C.s. de; SCANDIAN, C.. **Effect of load partition and particle distribution on micro-abrasive wear mapping of two-phase metal matrix composites.** Wear, [S.L.], v. 301, n. 1-2, p. 130-136, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.080>.

- GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019. 230 p.
- HUTCHINGS, I. M, SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Butterworth-Heinemann. 2017.
- K. I. Schiffmann, R. Bethke, N. Kristen. **Analysis of perforating and non-perforating micro scale abrasion testes on coated substrates, Surface and coatings**. technology 200 (2005) 2348-2357.
- K.-H. ZUM GAHR. **Wear by hard particles**. Tribology International Volume 31 Number 10. 1998, p 587–588.
- KHRUSCHOV, M. M. **Principles of abrasive wear**. **Wear**, v. 28, n. 1, p. 69-88, 1974. ISSN 0043-1648.
- KRAMER, IRVIN. **Effects of environment on mechanical properties of metals**. Progress in Materials Science, volume 9, Issue 3, 1961, pages 133- 199.
- L. FANG, X. L. KONG, J.Y.SU,Q.D.ZHOU. **Movemente patterns of abrasive particles in three-body abrasion**. **Wear**, Volumes 162–164, Part B, 13 April 1993, Pages 782-789
- LABIAPARI, W. da S. **Abrasão-Corrosão em Aços Inoxidáveis Ferríticos**. 2015. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- LABIAPARI, W.S., ALCÂNTARA, C.M., COSTA, H. L., DE MELLO, J. D. B. **Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry**. **Wear** v. 302, p. 1536–1545, 2013.
- LISBOA, R. G. **Estudo do efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas no mecanismo e coeficiente de desgaste no par tribológico aço inoxidável p410d e nylon**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022.
- M.A.N. ARDILA, H.L. COSTA, J.D.B. DE MELLO. **Influence of the ball material on friction and wear in microabrasion tests**. **Wear**, 450-451 (2020).
- MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l: s.n.], 2003.

MISRA, A., FINNIE, I. **Correlations between two-body and three-body abrasion and erosion of metals.** *Wear*, v. 68, p 33 – 39, 1981.

MULHEARN, T. O.; SAMUELS L. E. **The Abrasion of Metals: A Model of the Process Wear.** Volume 5, 1962, p. 478 - 498.

PADILHA, A. F. e GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades.** Hemus Editora Limitada, S.P., 1994.

PAMELLA JUREVES ESTEVES, VANESSA SERIACOPI MARCELO CAMARGO SEVERO DE MACEDO ROBERTO MARTINS SOUZA CHERLIO SCANDIAN. **Combined effect of abrasive particle size distribution and ball material on the wear coefficient in micro-scale abrasive wear tests.** Elsevier, 2021.

R.I. TREZONA, D.N. ALLSOPP, I.M. HUTCHINGS. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of teste conditions in the microscale abrasive wear test.** *Wear* 225-229 (1999) 205-214.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials.** New York: J. Wiley, 1965. p.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L. A.; RUSSELL, P. G. **A study of abrasive wear under three-body conditions.** *Wear*, v. 4, n. 5, p. 345-355, 1961. ISSN 0043-1648.

RUTHERFORD, K.; HUTCHINGS, I. **A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems.** *Surface & Coatings Technology*, v. 79, p. 231-239, 1996.

RUTHERFORD, K.; HUTCHINGS, I. **Theory and application of a micro-scale abrasive wear test.** *Journal of Testing and Evaluation*, v. 25, p. 250-260, 1997.

SAMPIERI, R. H.; CALLADO, C. F.; LUCIO, M. DEL P. B. **Metodologia De Pesquisa.** . [S.l: s.n.]. 2013

SANTOS, Waldenir Caravantes et al . **Desenvolvimento de dispositivo e estudo do comportamento ao microdesgaste abrasivo do aço AISI 420 temperado e revenido.** *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro , v. 20, n. 2, p. 304-315, jun. 2015 .

SMITH, William F. **Structure and properties of engineering alloys**. 2ª edição. Editora McGraw-Hill, EUA, 1993.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**. *Wear*, v. 225–229, p. 225–229, 1999.

VICENTE, C. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Edição. ABM-Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2007.

VICTOR A.O. GOMEZ A, MARCELO C.S. DE MACÊDO A, ROBERTO M. SOUZA B,N, CHERLIO SCANDIAN. **Effect of abrasive particle size distribution on the wear rate and wear mode in micro-scale abrasive wear tests**. Elsevier, 2015.

WELLINGER, K. UND UETZ, H.: **Gleitverschleiß, Spiilverschleiß, Strahlverschleiß unter der Wirkung von körnigen Stoffen**. *VDI-Forschungsheft 449B*, Bd. 2 1. 1955.