



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



RENATA GONÇALVES LISBOA

**ESTUDO DO EFEITO DA MISTURA DE DIFERENTES PARTÍCULAS
ABRASIVAS NO MECANISMO E COEFICIENTE DE DESGASTE
ABRASIVO NO PAR TRIBOLÓGICO AÇO INOXIDÁVEL P410D E
NYLON**

**OURO PRETO - MG
2022**

RENATA GONÇALVES LISBOA
renata.lisboa@aluno.ufop.edu.br

**ESTUDO DO EFEITO DA MISTURA DE DIFERENTES PARTÍCULAS
ABRASIVAS NO MECANISMO E COEFICIENTE DE DESGASTE
ABRASIVO NO PAR TRIBOLÓGICO AÇO INOXIDÁVEL P410D E
NYLON**

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

Professor orientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles

OURO PRETO – MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L769e Lisboa, Renata Goncalves.

Estudo do efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas no mecanismo e coeficiente de desgaste abrasivo no par tribológico aço inoxidável p410d e nylon. [manuscrito] / Renata Goncalves Lisboa. - 2022.

61 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 abrasivo. 2. Ensaio microabrasivo. 3. Micromecanismos de desgaste. 4. Partículas abrasivas. 5. Sílica. 6. Hematita. I. Teles, Vinicius Carvalho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Renata Gonçalves Lisboa

Estudo do efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas no mecanismo e coeficiente de desgaste abrasivo no par tribológico aço inoxidável P410D e nylon

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 06 de Abril de 2022

Membros da banca

Dr. - Vinícius Carvalho Teles - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Ms. - Túlio Miorini Vieira Alves Rodrigues
Dr. - Igor Cezar Pereira - 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 15/04/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles**, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 07/04/2022, às 11:13, 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 **0307276** e o código CRC **3BE647A6**.

À Deus dedico esta conquista, por ser fonte de amor incondicional.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Deus por mais uma etapa concluída, por ser meu amparo e fortaleza.

Agradeço aos meus pais, irmãos e ao meu namorado pelo incentivo, dedicação, inspiração e amor incondicional.

Ao meu orientador Vinícius Teles por todo conhecimento, contribuições, sugestões e orientação neste trabalho.

Aos professores da UFOP por todos os ensinamentos durante minha graduação que contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

Aos meus amigos de graduação e agora de vida, Dayane, Nayane e Davi. Vocês foram essenciais. Obrigada por todo companheirismo e amor.

As minhas amigas de casa: Bárbara, Dayane, Luana, Nayane e Talita. Obrigada pela segunda família que construímos.

Aos meus amigos de curso, em especial Bernardo e Thiago, agradeço por toda parceria.

Aos meus colegas de trabalho, em especial Gleyson, Gerci, Willian e Fleck, por todos os ensinamentos.

Agradeço ao Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU e, em especial, ao Túlio Miorini Vieira Alves Rodrigues pela análise de interferometria laser 3D.

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

À cidade de Ouro Preto por ter me proporcionado tanto crescimento e momentos incríveis.

“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher.”

Cora Coralina

RESUMO

O desgaste é uma das principais causas de danos superficiais e perda de massa em componentes sujeitos a diferentes esforços, movimentos e ambientes. O desgaste abrasivo está associado a danos na superfície devido a presença de partículas duras no contato. Apesar de ser um dos tipos de desgaste mais estudados e conhecidos, ensaios laboratoriais empregam somente um material de partícula abrasiva, no entanto, em situações reais os equipamentos são sujeitos a diferentes tipos de materiais simultaneamente. Portanto, este trabalho tem como objetivo analisar a taxa de desgaste abrasivo do aço inoxidável ferrítico na presença de diferentes lamas compostas de misturas com diferentes frações mássicas de partículas abrasivas de sílica e hematita. Para isso foi empregado o ensaio de microabrasão por esfera rotativa fixa. O contra corpo esférico com diâmetro de 25,4 mm foi de nylon e a concentração de partículas na lama foi de 10% em massa. Carga normal de 1 N. Durante os ensaios de desgaste os diâmetros das crateras foram medidos a cada 3 minutos por microscopia óptica e os coeficientes de desgaste (k) foram calculados, o que permitiu avaliar o regime permanente. Além do coeficiente de desgaste também foi avaliado o mecanismo de desgaste predominante para cada teste e a granulometria das partículas abrasivas. Em análise granulométrica das partículas, foi possível observar que as partículas de hematita possuem tamanho médio maior que as de sílica. A lama abrasiva composta somente por partículas de sílica apresentou coeficiente de desgaste 190% maior que a lama composta exclusivamente de hematita. As demais lamas, com concentrações intermediárias de sílica e hematita, os valores de k foram estatisticamente iguais ao obtido na lama com 100% hematita. O modo de desgaste predominante foi o microsulcamento/microcorte, conforme esperado devido às condições de teste. Concluiu-se que a hematita, mesmo apresentando uma menor abrasividade, foi a partícula abrasiva dominante nas lamas. Ao empregar mistura de partículas abrasivas, o tamanho médio das partículas é um dos parâmetros mais importantes, pois, caso as maiores partículas suportem as tensões e não fraturem, elas vão impedir as partículas menores de atuarem durante o processo de desgaste.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Ensaio microabrasivo. Micromecanismos de desgaste. Partículas abrasivas. Sílica. Hematita.

ABSTRACT

The wear is one of the main causes of surface damage and loss of mass in components subjected to different forces, movements and environments. Abrasive wear is associated with surface damage due to the presence of hard particles in contact. Despite being one of the most studied and known types of wear, laboratory tests employ only one abrasive particle material, however, in real situations the equipment is subjected to different types of materials simultaneously. Therefore, this work aims to analyze the abrasive wear rate of ferritic stainless steel in the presence of different slurries composed of mixtures with different mass fractions of silica and hematite abrasive particles. For this, the microabrasion test by fixed rotating sphere was used. The spherical counter body with a diameter of 25.4 mm was made of nylon and the concentration of particles in the slurry was 10% by mass. The normal load used was of 1 N. During the wear tests, the diameter of the craters was measured every 3 minutes by optical microscopy and the wear coefficients (k) were calculated, which allowed the evaluation of the steady state. In addition to the wear coefficient, the predominant wear mechanism for each test and the granulometry of the abrasive particles were also evaluated. In granulometric analysis of the particles, it was possible to observe that the hematite particles have an average size larger than the silica ones. The abrasive slurry composed only of silica particles showed a wear coefficient 190% higher than the slurry composed exclusively of hematite. For the other slurries, with intermediate concentrations of silica and hematite, the k values were statistically equal to those obtained in the sludge with 100% hematite. The predominant wear mode was microgrooving/microcutting, as expected due to the test conditions. It was concluded that hematite, even with a lower abrasiveness, was the dominant abrasive particle in the slurry. When using abrasive particle mixing, the average particle size is one of the most important parameters, because if the larger particles withstand the stresses and do not fracture, they will prevent the smaller particles from acting during the wear process.

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

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área Real
b	Diâmetro da Calota Esférica
C	Carbono
Cu	Cobre
D	Tamanho da Partícula Abrasiva
F	Fator de Circularidade
Fe₂O₃	Hematita
h	Espessura do Filme
k	Coefficiente de Desgaste
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
W	Força Normal
P	Perímetro
F_R	Força de Indentação
R	Raio da Esfera Rotativa
S	Distância Deslizada
SiC	Carboneto de Silício
SiO₂	Dióxido de Silício
Sq	Rugosidade Superficial Quadrática
TCA	Tamanho Crítico do Abrasivo
V	Volume Degastado
H_a	Dureza da Partícula Abrasiva
H_s	Dureza da Partícula Superfície

α	Ângulo de Ataque
α_c	Ângulo de Ataque Crítico
β	Ângulo de uma partícula em formato de losango

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Severidade em abrasão em função da relação da dureza da partícula e da superfície.	7
Figura 2 – Representação esquemática do desgaste abrasivo por (a) dois corpos e (b) três corpos.	8
Figura 3 – Marcas de desgaste por (a) riscamento e (b) rolamento.....	9
Figura 4 – Modos de interação entre as partículas abrasivas e as superfícies. (a) microsulcamento. (b) microcorte. (c) microfadiga. (d) microtinca.	10
Figura 5 – Tipo do mecanismo e taxa de desgaste em função do ângulo de ataque da partícula microabrasiva.....	11
Figura 6 – Modelo de contato entre uma partícula abrasiva cônica e a superfície do material.	12
Figura 7 – Variação do material removido pela distância percorrida pela partícula abrasiva..	13
Figura 8 – Comportamento da taxa de desgaste com a dureza do material.....	14
Figura 9 – Representação esquemática da taxa de desgaste em relação ao tamanho crítico do abrasivo (TCA).	16
Figura 10 – Relação entre taxa de desgaste e tamanho da partícula para uma amostra de cobre sujeito a partículas de carboneto de silício.	17
Figura 11 – O efeito da razão D/h para o teste em um cilindro de bronze fosforoso com abrasivo de diamante.....	19
Figura 12 – Partícula abrasiva em função dos parâmetros D e β	20
Figura 13 – Dinâmica de interação entre a partícula e as superfícies devido a ação do binário (a) e (b), causando poucos danos na superfície.	21
Figura 14 – Comportamento da partícula até uma posição de equilíbrio para o caso do abrasivo maior que o tamanho crítico da partícula.	22
Figura 15 – Diagrama de força para o contato entre a esfera e o corpo de prova para uma configuração de equipamento de “esfera livre”.....	24
Figura 16 – Equipamento de ensaio de desgaste de microabrasão por esfera rotativa fixa.	25

Figura 17 – Imagem MEV da superfície produzida por altas cargas e baixas concentrações de abrasivo. Superfície desgastada de um aço ferramenta temperado e revenido produzido por microabrasão com carga de 0,25 N e submetido a pasta de diamante de 3 μm	26
Figura 18 – Imagem MEV da superfície produzida por baixas cargas e altas concentrações de abrasivo. Superfície desgastada de um aço ferramenta temperado e revenido produzido por microabrasão com carga de 0,25 N e submetido a pasta abrasiva de SiC F1200.....	27
Figura 19 – Mapa de mecanismo 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	28
Figura 20 – Fluxograma das etapas do método de pesquisa.....	32
Figura 21 – Amostra do material aço inoxidável P410D.	33
Figura 22 – Preparação da lama abrasiva em uma balança de precisão.	34
Figura 23 – Ensaio de microabrasão na configuração esfera fixa.	36
Figura 24 – Ensaio de microabrasão na configuração esfera fixa.	37
Figura 25 – Impressão de desgasta. (a) Impressão esquemática de cratera. (b) Cratera de desgaste de uma amostra de aço inoxidável P410D.....	38
Figura 26 – Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de teste. Lama abrasiva 100% sílica e esfera de nylon.	39
Figura 27 - Analisar de partículas Mastersize 3000E.....	40
Figura 28 – Microestrutura da amostra contendo 11%Cr. (a) superfície. (b) centro.....	43
Figura 29 – Topografia da amostra.....	44
Figura 30 – Curva de percentual acumulado da Hematita e Sílica analisada por granulometria a laser.....	44
Figura 31 – Interferometria laser da cratera de desgaste produzida com lama abrasiva, respectivamente, imagem 3D da cratera e perfil na região do centro da cratera. (a) lama abrasiva 100% Sílica. (b) 100% Hematita. (c) 50% Sílica e 50% Hematita.	47
Figura 32 – Coeficiente de desgaste (k) em função do tempo para cada concentração de abrasivo.....	48

Figura 33 – Coeficiente de desgaste para cada concentração de abrasivo na amostra de aço inoxidável ferrítico P410D.	49
Figura 34 – Coeficiente de desgaste para cada concentração de abrasivo versus severidade. .	51
Figura 35 – Severidade em abrasão em função da relação da dureza da partícula e da superfície.	52
Figura 36 – Morfologia das partículas abrasivas. (a) Hematita. (b) Sílica.	53
Figura 37 – Coeficiente de desgaste para as partículas abrasivas. (a) Fe_2O_3 (b) SiO_2	54
Figura 38 – Comportamento da granulometria das partículas abrasivas entre as duas superfícies.	54
Figura 39 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 100% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.	55
Figura 40 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 100% de Hematita. (b) ampliação do centro da calota.	56
Figura 41 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 80% de Hematita e 20% Sílica. (b) ampliação do centro da calota.	56
Figura 42 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 20% de Hematita e 80% Sílica. (b) ampliação do centro da calota.	57
Figura 43 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 50% de Hematita e 50% Sílica. (b) ampliação do centro da calota.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável ferrítico.	32
Tabela 2 – Características de dureza dos abrasivos.....	33
Tabela 3 – Concentrações de abrasivos na lama	35
Tabela 4 – Parâmetros de Ensaio.....	39
Tabela 5 – Variáveis e indicadores.....	42
Tabela 6 – Análise de Média e Variância.....	50
Tabela 7 – Valores da relação H_a/H_S de severidade para as lamas abrasivas estudadas.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Desgaste Abrasivo	6
2.2	Efeito das Partículas Abrasivas	14
2.2.1	Forma das Partículas Abrasivas.....	14
2.2.2	Tamanho das Partícula.....	15
2.2.3	Dinâmica da Partícula.....	18
2.3	Ensaio de Microabrasão.....	23
2.4	Aços Inoxidáveis	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Tipo de Pesquisa.....	30
3.2	Materiais e Métodos	31
3.2.1	Preparação das amostras	32
3.2.2	Definição da concentração de abrasivos.....	33
3.2.3	Ensaio de desgaste microabrasivo	35
3.2.4	Cálculo do coeficiente de desgaste	37
3.2.5	Análise da Microestrutura	40
3.2.6	Análise de Granulometria.....	40
3.2.7	Análise dos mecanismos de desgaste	41
3.2.8	Interferometria	41
3.3	Variáveis e Indicadores	41
3.4	Instrumento de coleta de dados	42
3.5	Tabulação dos dados.....	42
3.6	Considerações Finais	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

4.1	Caracterização da Microestrutura	43
4.2	Análise da Granulometria	44
4.3	Ensaio de Microabrasão	45
4.4	Mecanismos de desgaste	55
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

“A tribologia é a ciência e tecnologia de interação de superfícies em movimento relativo e de assuntos e práticas relacionados” (CZICHOS, 2020 p. 3). Como complemento, a tribologia abrange a investigação de atrito, lubrificação, desgaste e aplicação técnica do conhecimento tribológico (GAHR, 1987).

Além disso, um sistema tribológico pode ser definido como “a coleção de fatores de controle e relações que afetam o atrito e o desgaste” (CZICHOS, 2020 p. 3).

Conforme Cozza (2011), os custos com desgaste impactam na economia do Brasil na ordem de 5% do PIB. O mesmo autor destaca que os mecanismos de desgastes podem ser divididos em: fadiga, corrosivo, adesivo e abrasivo. Por isso, os mecanismos de desgastes são um dos principais focos de estudo na tribologia. Como foco deste trabalho, é estudado o desgaste por abrasão, visto que, segundo Eyre *apud* Silva Júnior (2008), representa aproximadamente 50% dos problemas industriais envolvendo desgaste.

Segundo Gahr (1987), o desgaste abrasivo pode ser definido como o desgaste oriundo do deslocamento de material causado pela presença de partículas duras, podendo estar entre as duas superfícies ou embutidas em uma ou em ambas as superfícies em movimento relativo ou pela presença de protuberâncias duras em uma ou ambas as superfícies. Este mecanismo pode ser classificado em abrasão a “dois corpos” ou “três corpos”. No primeiro, as partículas abrasivas estão fixas em uma das superfícies, ou são protuberâncias duras, e riscam a segunda superfície. Já a abrasão por três corpos, as partículas estão livres e podem deslizar ou rolar entre as duas superfícies causando riscos ou microindentações na superfície do corpo (GAHR, 1987).

Além disso, não se pode esquecer de citar o desgaste microabrasivo que é também objeto de estudo neste trabalho. Segundo Rutherford e Hutchings (1997), este tipo de desgaste é obtido quando a magnitude do abrasivo é em escala micrométrica, possibilitando o teste em amostras muito pequenas.

Hutchings e Shipway (2017) descrevem que os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser por deformação plástica ou fratura frágil, ambos ocorrem frequentemente juntos. Os mesmos autores expõem que desgaste abrasivo por deformação plástica é a remoção de um volume de material por abrasão por deslizamento proporcional à distância percorrida. O

segundo é a remoção do material por fratura frágil que provoca rachadura de diferentes geometrias resultando no desgaste.

As partículas duras, responsáveis pela abrasão, podem ser inerentes ao processo, por exemplo, a utilização de alguma ferramenta; oriundas de partículas contaminantes ou geradas a partir de oxidação e desgaste de algum componente que compõe o sistema tribológico (HUTICHIN; SHIPWAY, 2017).

A dureza das partículas envolvidas possui uma forte influência na taxa de desgaste. Conforme Hutchings e Shipway (2017), as partículas que possuem dureza inferior à da superfície provocam um menor desgaste em relação as partículas que possuem dureza superior. Em análise, quando a dureza da superfície (H_s) é superior a dureza abrasiva (H_a), ou seja, $H_a/H_s < 1,2$ as taxas de desgastes são menores e as partículas podem ser deformadas. Quando a relação $H_a/H_s > 1,2$ as taxas de desgaste são significativas e as partículas podem deformar a superfície.

A forma da partícula também influencia nas taxas de desgaste. Partículas mais angulares provocam maior desgaste do que partículas arredondadas. Embora seja uma característica que pode influenciar nas taxas de desgaste, a forma da partícula é um parâmetro ainda muito complexo de ser definido e quantificado (HUTICHIN; SHIPWAY, 2017). Porém, um método amplamente utilizado é de fator de circularidade (F), que é baseado na medição do perímetro, obtido pela razão entre a área de projeção da partícula e a área de um círculo do mesmo perímetro, quando o valor de F é próximo de 1 significa que a forma se assemelha a um círculo (HUTICHIN; SHIPWAY, 2017).

Além disso, o tamanho da partícula também possui influência no desgaste. Até certo ponto, à medida que o tamanho da partícula aumenta as taxas de desgaste também aumentam. Porém, ao atingirem um determinado tamanho deixam de influenciar nas taxas de desgaste. Devido essa relação de proporcionalidade entre o tamanho da partícula e o desgaste provocado, é justificado porque são aplicados métodos, como por exemplo de filtragem, para remoção de grandes partículas visando a redução das taxas de desgaste (HUTICHIN; SHIPWAY, 2017).

Outro parâmetro de grande influência é a concentração das partículas abrasivas. Trezona *et al* (1999) apresenta uma análise, com base em estudos do comportamento do mecanismo de desgaste submetido a diferentes concentrações. Conforme o mesmo autor, em baixas concentrações de abrasivos e/ou altas cargas o mecanismo dominante foi o riscamento, característico do desgaste abrasivo a dois corpos; para altas concentrações e baixas cargas, foi

observado intensa deformação e grande número de indentações; por fim, para concentrações intermediárias foi possível perceber uma característica mista, com presença de riscos e indentações (TREZONA *et al.*, 1999).

Com base no exposto acima, os materiais possuem diferentes comportamentos de desgaste abrasivo a partir de diversas variáveis como: propriedades mecânicas das superfícies dos materiais, propriedades das partículas abrasivas, origem, tamanho, forma e concentração.

O aço inoxidável P410D é um dos aços inoxidáveis mais baratos do mercado e possui aplicação em diversos ramos da engenharia nas quais necessita-se boa resistência a corrosão e abrasão simultaneamente (LABIAPARI, 2015). Desta forma, avaliar a influência de diversos materiais abrasivos em seu comportamento em abrasão podem auxiliar a selecionar de forma mais assertiva os materiais.

Portanto, tendo em vista que em um cenário real o material é sujeito a partículas de diferentes materiais e característica, este trabalho tem como objetivo responder a seguinte pergunta:

Qual o comportamento do mecanismo e coeficiente de desgaste abrasivo no aço inoxidável ferrítico P410D submetido a dois tipos de abrasivos em diferentes concentrações?

1.2 Justificativa

O desgaste influencia diretamente em paradas de equipamentos, perdas de produção e nos custos de manutenção nos setores industrial. Logo, é importante o conhecimento não somente em materiais e processos metalúrgicos, mas também nos processos de desgaste que atuam em situações específicas (COZZA, 2011).

Em análise de biografias como de Cozza (2011) e Labiapari (2015), é possível observar que ambos os trabalhos foram realizados ensaios de desgaste considerando somente um tipo de partícula abrasiva, nos estudos em questão foi utilizado o dióxido de silício. No entanto, em cenários reais o sistema tribológico é composto por diferentes materiais e formas de partículas abrasivas.

Um contexto prático é o desgaste de corpo moedores de moinhos de bolas para moagem de minérios. Segundo Massola (2015), os custos de moagem são significativos devido ao desgaste abrasivo-corrosivo, podendo chegar a representar 25% de todo o custo de operação. Este equipamento é sujeito a minérios de diversas características e, portanto, tamanho diferentes

de partículas abrasivas que, com a interação com outras variáveis, provocam diferentes taxas de desgaste (MASSOLA, 2015).

Desse modo, analisar materiais submetidos a diferentes partículas abrasivas permite observar a influência das características da partícula como dureza, tamanho e forma, no comportamento do mecanismo e nas taxas de desgaste.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Estudar o desgaste no aço inoxidável ferrítico P410D submetido a mistura de partículas abrasivas, com a finalidade de observar o mecanismo e as taxas de desgaste no material.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver uma revisão bibliográfica dos temas: desgaste abrasivo, ensaio de microabrasão, efeito das partículas abrasivas e aços inoxidáveis;
- Aplicar metodologia para estudar mecanismo de desgaste do aço inoxidável P410D;
- Analisar o efeito das partículas abrasivas de hematita e sílica com diferentes concentrações no mecanismo de desgaste;
- Realizar a análise dos mecanismos e o coeficiente de desgaste na microabrasão do aço inoxidável P410D.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo foi apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do estudo e os seus objetivos gerais e específicos.

No capítulo dois é apresentada a revisão bibliográfica tratando dos principais assuntos relacionados ao trabalho, sendo eles: desgaste abrasivo, ensaio de microabrasão, efeitos das partículas abrasivas e aços inoxidáveis.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia experimental com a apresentação dos métodos, materiais utilizados, caracterização das amostras e o procedimento do ensaio de microabrasão.

No quarto capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios de microabrasão, como os mecanismos e o coeficiente de desgaste nas amostras de aço inoxidável.

Por fim, no capítulo 5, estão descritas as conclusões do estudo acerca do efeito das concentrações das partículas abrasivas analisadas no desgaste do aço inoxidável ferrítico P410D.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste está presente em diversas situações e em equipamentos sujeitos a diferentes esforços, ambientes e movimentos. Sendo assim, essas diversas condições resultam em diferentes tipos de desgaste.

Conforme Garh (1987), o desgaste pode envolver danos na superfície ou perda de massa. Sendo assim, os desgastes podem ser distinguidos em função das características da superfície, do modo de desgaste ou, o mais comum entre as classificações, os mecanismos de desgaste. Garh (1987) cita quatro mecanismos principais de desgaste, são eles: Adesão, abrasão, fadiga e reação triboquímica.

O desgaste abrasivo pode ser definido como o mecanismo que provoca o deslocamento ou a remoção de material de uma superfície devido a presença de partículas duras ou por protuberâncias duras em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo (GAHR, 1987, HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). As partículas duras envolvidas no sistema podem ser produtos do processo, como a sílica ou outros minérios, fragmentos de desgaste endurecido ou partículas estranhas externas do tribossistema. Já as protuberâncias, podem ser oriundas da aspereza presentes na superfície do contra corpo (GAHR, 1987).

Segundo os autores Wellinger (1967), Uetz e Föhi (1972), o mecanismo de desgaste abrasivo pode envolver diferentes processos físicos que vão depender, principalmente, dos materiais desgastados e das condições operacionais. Além disso, segundo Gahr (1987), os níveis de desgaste variam de suave para severo de acordo com a relação entre a dureza do abrasivo e a dureza da superfície desgastada.

Como forma de elucidar a afirmação acima, a Figura 1 apresenta um gráfico que mostra a taxa de desgaste de um material homogêneo e um não homogêneo em função da relação entre a dureza do abrasivo e da superfície (GAHR, 1987).

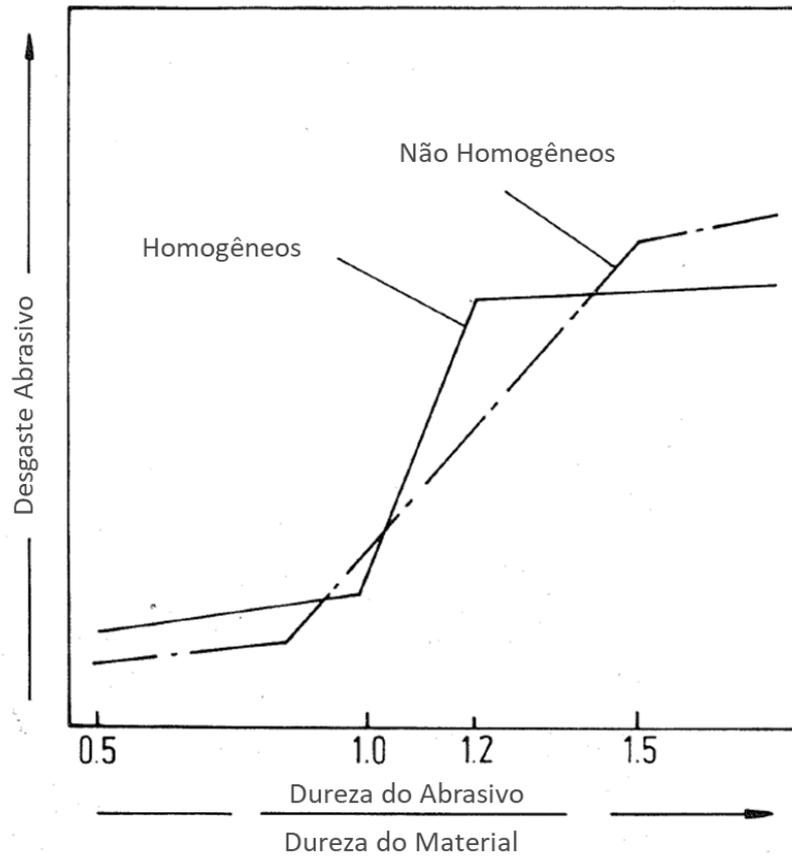


Figura 1 – Severidade em abrasão em função da relação da dureza da partícula e da superfície. Fonte: Adaptado Gahr (1987, p. 94).

Conforme pode ser observado na Figura 1, para o material homogêneo o nível de desgaste aumenta, do nível suave para o severo, quando a dureza da partícula abrasiva é semelhante à do material. Já para o material heterogêneo o nível de desgaste aumenta quando a dureza do abrasivo excede a dureza da matriz do material e alcança o nível severo quando iguala a dureza da segunda fase dura (GAHR, 1987). A partir disso, foram denominadas algumas nomenclaturas para referenciar as partículas. As partículas abrasivas de dureza igual ou inferior à da superfície são denominadas “abrasivos macios”, logo, as partículas de dureza superior são chamadas de “abrasivos duros” (GAHR, 1987).

Na literatura o desgaste abrasivo é classificado de dois modos principais: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. A Figura 2 ilustra os dois modos de desgaste.

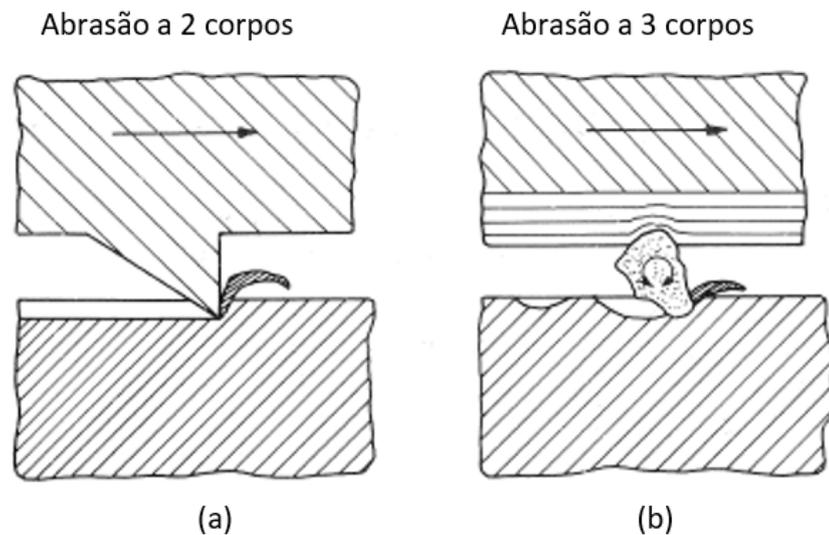


Figura 2 – Representação esquemática do desgaste abrasivo por (a) dois corpos e (b) três corpos.

Fonte: Adaptado Gahr (1987, p.84).

Na abrasão por dois corpos as partículas se comportam como elementos interfaciais entre o corpo e contracorpo, já a abrasão por três corpos é caracterizado pela movimentação livre das partículas abrasivas, permitindo rolamento e deslizamento da partícula sobre a superfície (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Embora Hutchings e Shipway (2017) abordem em sua literatura os dois modos de desgastes apresentados acima, os mesmos autores defendem que não é suficiente para descrever o processo, visto que, as partículas soltas, característica da abrasão a três corpos, podem vir a se fixar a uma das superfícies e caracterizar o modo de abrasão a dois corpos. Logo, a abrasão pode ser dividida em “abrasão por deslizamento ou riscamento de partículas abrasivas” ou “abrasão por rolamento de partículas abrasivas” a depender da dinâmica das partículas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). As taxas de desgaste devido à abrasão por rolamento são frequentemente inferiores quando comparada ao desgaste causado pelo deslizamento de partículas, isto porque, as partículas livres gastam energia rolando ao invés de remover matéria da superfície (GAHR, 1987, HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). As classificações citadas acima “riscamento” e “rolamento” são chamadas desta forma, devido as marcas de desgaste deixadas pelas partículas abrasivas devido ao seu movimento (COZZA, 2011). A Figura 3 mostra marcas de desgaste provenientes dos dois modos.

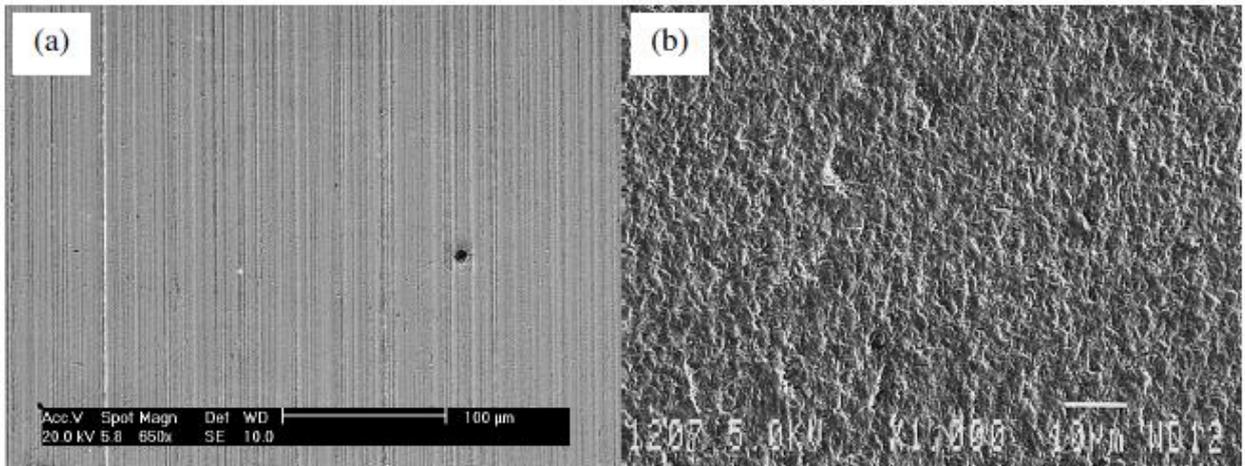


Figura 3 – Marcas de desgaste por (a) riscamento e (b) rolamento.
Fonte: Cozza (2011, p. 12).

Embora na Figura 3 esteja apresentado de modo separado os modos de desgaste por “riscamento” e “rolamento”, a presença dos dois micromecanismos podem ser encontrados juntos, tal situação é denominada como “modo misto” ou “desgaste abrasivo misto” (COZZA, 2011).

Outra forma de classificar o desgaste abrasivo é pelo aspecto da superfície desgastada chamado de micromecanismo, que é o processo de interações físicas entre as partículas e a superfície do material e define a forma de remoção do material (SILVA JÚNIOR, 2008, GAHR, 1987). Gahr (1987) apresenta quatro tipos de interações, são elas: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincas. Os micromecanismos estão elucidados na Figura 4.

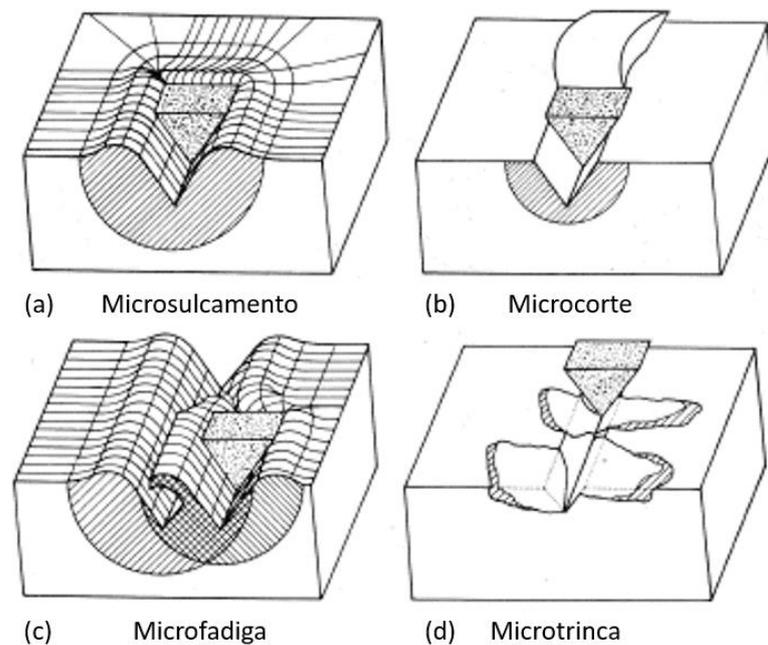


Figura 4 – Modos de interação entre as partículas abrasivas e as superfícies. (a) microsulcamento. (b) microcorte. (c) microfadiga. (d) microtrinca.
 Fonte: Adaptado Gahr (1987, p. 96).

A Figura 4 ilustra os modos de interação citado acima. O microsulcamento ocorre quando uma única passagem da partícula abrasiva não resulta em retirada do material, uma proa é formada a frente da partícula e o material é deslocado para os lados. Embora o microsulcamento provocado por uma única partícula não cause perda de massas, a perda de material ocorre devido a passagem sucessiva das partículas também chamado de microfadiga (GAHR, 1987).

No microcorte há a perda de material pela passagem da partícula, em casos de microcorte puro há uma perda de igual volume ao do risco formado (GAHR, 1987).

Por último, as microtrincas ocorrem quando se tem altas tensões concentradas causadas pelas partículas abrasivas, resultando assim, na perda de massa devido a formação e propagação de trincas. Este micromecanismo está restrito a materiais de baixa tenacidade a fratura (GAHR, 1987).

De acordo com Gahr (1987), os micromecanismos de sulcamento e corte são predominantes em materiais mais dúcteis. O mesmo autor afirma que a proporção de material deslocado para os lados no microsulcamento ou removido no microcorte, é em função do ângulo de ataque (α) da partícula abrasiva, conforme mostrado na Figura 5.

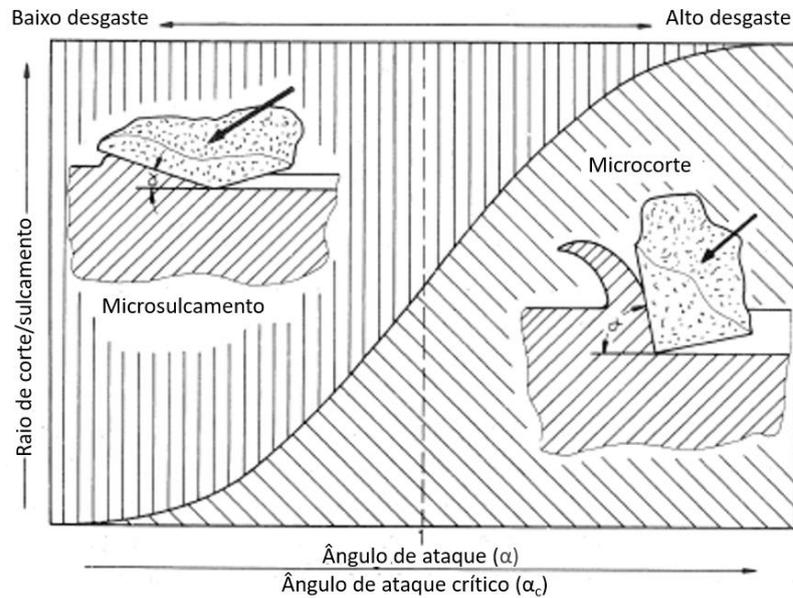


Figura 5 – Tipo do mecanismo e taxa de desgaste em função do ângulo de ataque da partícula microabrasiva.

Fonte: Adaptado Gahr (1987, p. 98).

A Figura 5 mostra a transição de uma interação de microsulcamento para o microcorte em função do aumento do ângulo de ataque. O ângulo de ataque é o ângulo formado entre a face da partícula abrasiva e a superfície do material. Conforme pode ser observado na figura, o desprendimento de detritos de desgaste do material inicia quando o ângulo de ataque do abrasivo é maior que o valor crítico (GAHR, 1987).

Segundo Hutchings e Shipway (2017), os mecanismos de desgaste podem envolver tanto a deformação plástica quanto a fratura frágil e, embora seja possível a ocorrência de um deles sozinho, são frequentemente encontrados juntos, mesmo em materiais frágeis. Apesar disto, Hutchings e Shipway (2017) propõe uma visão isolada desses dois grupos de mecanismo a fim de avaliar o comportamento dos materiais de engenharia.

Na literatura, Hutchings e Shipway (2017) mostram um modelo simples de análise para um desgaste abrasivo com remoção de material por deformação plástica. Na proposta, os autores idealizam uma partícula abrasiva cônica deslizando sobre a superfície de um material dúctil (Figura 6) que provoca uma ranhura no material. O desgaste então é assumido pela remoção de uma proporção do material pelo deslocamento da partícula (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

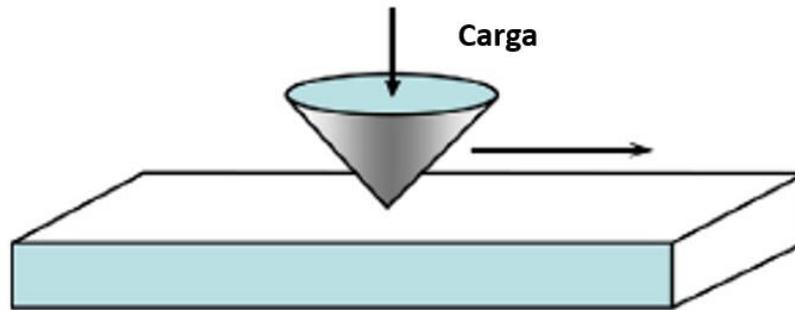


Figura 6 – Modelo de contato entre uma partícula abrasiva cônica e a superfície do material.
Fonte: Adaptado Hutchings e Shipway (2017, p. 175).

Para esse modelo, apresentado na Figura 6, o volume de material removido pode ser dado pela Eq. (1), equivalente a equação de Archard para desgaste deslizante.

$$V = k \frac{SN}{H_s} \quad (1)$$

Onde V é o volume removido, k é o coeficiente de desgaste, S a distância deslizada, W a força normal e H_s é a dureza da superfície.

O modelo proposto prevê que o volume de material removido seja diretamente proporcional à distância de deslizamento percorrida pela partícula e a carga normal aplicada, conforme apresentado na Figura 7 para três metais dúcteis (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

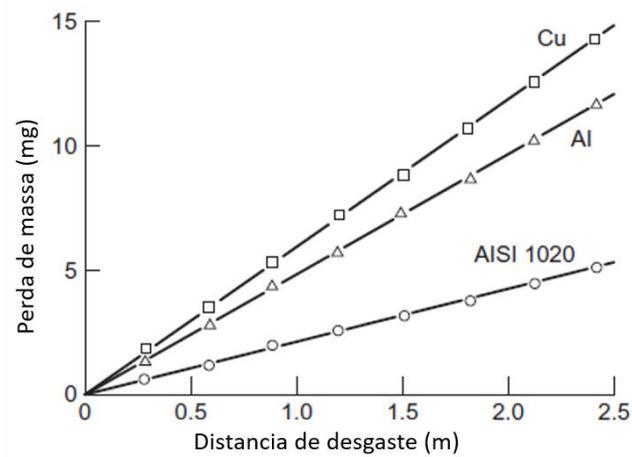


Figura 7 – Variação do material removido pela distância percorrida pela partícula abrasiva.

Fonte: Adaptado Hutchings e Shipway (2017, p. 177).

Além disso, outra sugestão do modelo proposto por Hutchings e Shipway (2017) é que a taxa de desgaste varia inversamente com a dureza do material. Os resultados apresentados na Figura 8 indicam que, para os metais puros, o volume desgaste é diretamente proporcional a dureza. Porém, para aços ferramenta e tratados termicamente a relação entre volume perdido e dureza assume outra proporção (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

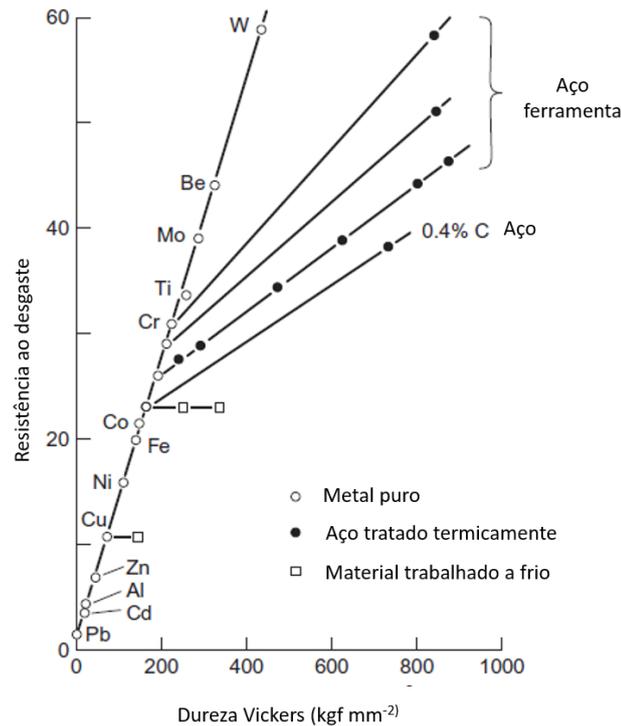


Figura 8 – Comportamento da taxa de desgaste com a dureza do material.
Fonte: Adaptado Hutchings e Shipway (2017, p.178).

A Figura 8 também mostra que, por ser um processo que envolve altas deformações plásticas, qualquer trabalho à frio no metal terá efeito desprezível em sua resistência ao desgaste embora possa aumentar a dureza, o efeito na taxa de desgaste é sobreposto pelas deformações muito maiores introduzidas pelo processo de desgaste. Quanto aos elementos de ligas, os mesmos só apresentam efeito sobre a resistência à abrasão somente quando o reforço levar ao aumento a resistência a altas deformações (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.2 Efeito das Partículas Abrasivas

2.2.1 Forma das Partículas Abrasivas

As formas das partículas influenciam diretamente nas taxas de desgaste do material. Segundo Hutchings e Shipway (2017) a maioria das partículas são equiaxiais, porém há variação das formas a depender da origem e/ou processo de fabricação do abrasivo. Sendo assim, as partículas podem ser consideradas mais angulares ou mais arredondas, onde as primeiras causam maiores desgastes que as últimas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Apesar de saber da influência da angularidade do abrasivo, esse parâmetro não é fácil de definir e por isso, ele é raramente medido quantitativamente. A principal dificuldade está em

identificar e quantificar as características da forma tridimensional complexa como das partículas abrasivas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Um das maneiras de determinar a forma da partícula é pelo chamado “fator de arredondamento ou circularidade (F)”. Esse parâmetro é baseado no perímetro e na área da projeção bidimensional da partícula, geralmente gerada 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) (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). O valor de F pode ser calculado pela Eq. (2) abaixo:

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

O valor de F determina o quão próximo de um círculo a forma do abrasivo está. Sendo assim, valores de F mais próximo de 1 significa 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).

2.2.2 Tamanho das Partícula

Outro parâmetro de grande influência nas taxas de desgaste abrasivo é o tamanho das partículas abrasivas (MIRSA; FINNIE, 1981). Como dito anteriormente, os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver deformação plástica ou fratura frágil, porém, independente do mecanismo dominante, conforme afirma Hutchings e Shipway (2017), as partículas menores causam menos desgaste que as maiores. Por isto, sistemas de remoção de partículas grandes, como filtros ou separação centrífuga, são eficientes na redução de taxas de desgaste por abrasão e erosão.

Hutchings e Shipway (2017) afirmam que a maior parte do desgaste abrasivo é causado por partículas com tamanho entre 5 a 500 μm , apesar de que no polimento possa ser encontrado partículas submicrométricas e no desgaste por goiavagem partículas duras com dezenas ou até centenas de milímetros de diâmetro.

Marin (2010) complementa que a taxa de desgaste aumenta de forma proporcional ao tamanho da partícula até um ponto denominado “tamanho crítico do abrasivo” (TCA). O mesmo

autor apresenta três situações diferentes que podem aparecer após o TCA. A Figura 9 mostra uma representação esquemática das situações.

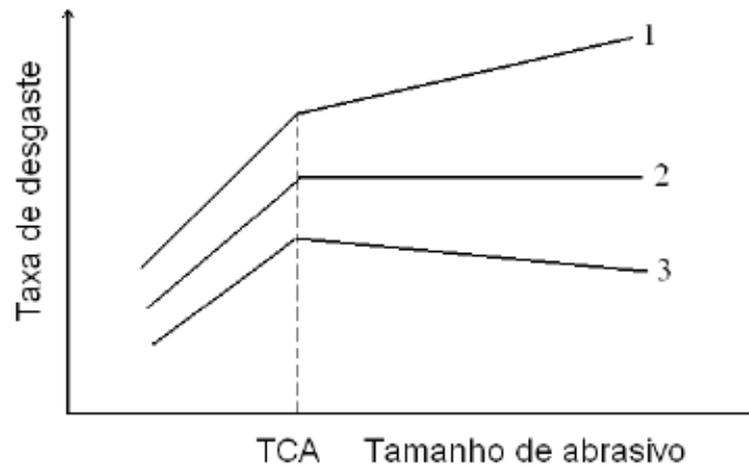


Figura 9 – Representação esquemática da taxa de desgaste em relação ao tamanho crítico do abrasivo (TCA).

Fonte: Marin (2010).

Na situação 1, Figura 9, a taxa de desgaste aumenta com o tamanho de partícula, porém, com uma menor inclinação de reta; a curva 2 é encontrado em situações que o desgaste torna-se independente do tamanho das partículas, e por fim, a curva 3 que mostra a redução da taxa de desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo (MARIN, 2010).

Misra e Finnie (1981) expressam que há pouco estudos sobre o efeito do tamanho da partícula abrasiva que considere mais de um mecanismo de desgaste. Por isso, os autores propuseram estudos e ensaios nas configurações de abrasão a 2 corpos, 3 corpos e erosão, de uma amostra de material de cobre (Cu) sujeito a diferentes tamanhos de partículas abrasivos de carboneto de silício (SiC), a fim de identificar um padrão de comportamento, conforme mostra a Figura 10.

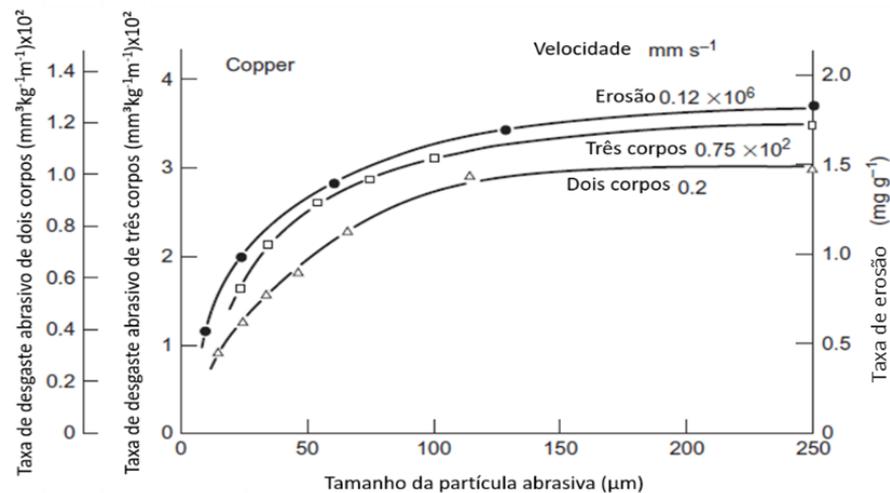


Figura 10 – Relação entre taxa de desgaste e tamanho da partícula para uma amostra de cobre sujeito a partículas de carboneto de silício.
Fonte: Adaptado Misra e Finnie (1981 p. 361).

Conforme pode ser observado na Figura 10, as taxas de desgastes aumentam expressivamente para as partículas de SiC com tamanhos inferiores a 100 μm . Em contrapartida, para as partículas maiores de 100 μm o tamanho representa pouca influência nas taxas de desgastes abrasivos (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

Após os resultados obtidos na Figura 10, Misra e Finnie (1981) realizaram uma série de análise e investigação para avaliar as explicações que foram dadas a respeito da influência do tamanho da partícula abrasiva no fenômeno de desgaste. Os mesmos autores reparam que as teorias propostas por vezes se aplicam somente a um processo, quando analisado para algum outro processo de desgaste, a explicação tornava-se totalmente inadequada.

Sendo assim, chegou-se à conclusão de que a influência do tamanho do abrasivo estaria ligado as propriedades da superfície do material. A primeira explicação é baseada no estudo de Kramer e Demer (1961) da existência de uma camada dura na superfície, comprovado posteriormente, através de investigações por Sumino e Yamamoto (1961), Kramer e Balasubramanian (1973) e o próprio Kramer (1963) que relatou camada dura no ouro.

O modelo de Kramer e Demer (1961) propõe que uma fina camada apresenta mais deformação plástica que o restante do material, é chamada camada dura (detritos), sendo assim, as partículas menores agem somente nessa camada superficial, já as partículas maiores deformam o material abaixo da camada dura, logo, provocam maiores desgastes. Porém, quando

chega a um TCA a influência da camada de detritos é baixa, com isso, haverá pouca influência e dependência do tamanho do abrasivo com a taxa de desgaste (*apud* MIRSA; FINNIE, 1981).

2.2.3 Dinâmica da Partícula

Os sistemas tribológicos em sua maioria possuem a presença de lubrificante entre os componentes, de modo que a interação entre eles proporcione a formação de uma película hidrodinâmica entre as superfícies evitando o contato direto. Entrando, é sabido que inevitavelmente com o tempo, essas superfícies sofrem degradação causado por partículas duras e contaminantes no óleo lubrificante. Com a presença desses contaminantes, a situação oriunda é o de desgaste de três corpos, porém, se as partículas ficarem estacionárias em algumas das superfícies a situação se transforma em um desgaste de dois corpos (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

Como dito inicialmente, há a formação de um filme fluido dinâmico entre os componentes, porém, a medida que o tempo passa e os componentes se desgastam por contaminantes, surgem folgas que modificam a espessura desse fluido. Com isso, Williams e Hyncica (1992) construíram um modelo para estudo de mecanismos de desgaste a partir da contaminação do fluido lubrificante de um mancal.

O modelo de Williams e Hyncica (1992) relaciona a taxa de desgaste com o movimento do abrasivo, sendo que este último que determina o mecanismo de remoção de matéria e depende da forma, tamanho da partícula e distância entre as superfícies.

No experimento, o óleo lubrificante foi contaminado com partículas abrasivas de carboneto de silício (SiC) e diamante sintético e durante a execução do experimento foi analisado o desgaste provocado no cilindro. O desgaste podia ser medido tanto pela perda de peso do cilindro quanto pelo dano na superfície desgastada e o potencial de dano dos abrasivos podia ser avaliado variando a natureza da partícula (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

Williams e Hyncica (1992) constaram em seus testes que a espessura do filme do fluido lubrificante exercia uma grande influência no desgaste produzido. Os autores mostraram que quando a espessura do filme é maior que a máxima dimensão da maioria das partículas presentes o desgaste é suave, porém, quando há uma proporção de cerca de 20% do abrasivo maior que a espessura do filme a taxa de desgaste começa a aumentar. A morfologia observada na superfície quando a espessura do filme (h) é maior que o tamanho da partícula é um desgaste

aleatório, pouca direcionalidade dos riscos e sulcos e com presença de indentações. Para um h pequeno em relação ao abrasivo, a superfície apresenta uma série de riscos/sulcos paralelos uns aos outros bem semelhante a uma superfície convencional severamente desgastada (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

A partir do observado os autores, Williams e Hyncica (1992), concluíram que o mecanismo de desgaste está associado a razão entre o tamanho da partícula (D) e a espessura do filme (h), conforme Eq. (3):

$$\frac{D}{h} = \frac{\text{Tamanho da partícula}}{\text{Espessura do filme}} \quad (3)$$

A Figura 11 apresenta a taxa de desgaste em função da relação D/h obtido no teste utilizando um cilindro de bronze fosforoso operando com abrasivos de diamante de vários tamanhos.

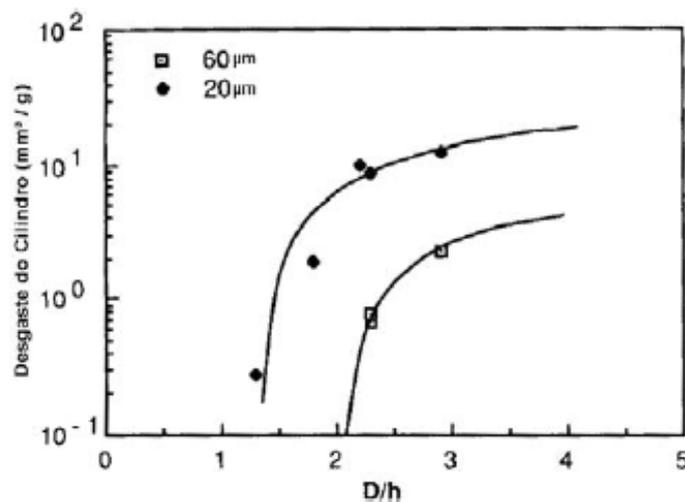


Figura 11 – O efeito da razão D/h para o teste em um cilindro de bronze fosforoso com abrasivo de diamante.

Fonte: Williams e Hyncica (1992).

Na Figura 11 é possível observar o volume perdido pelo desgaste provocado pelas partículas abrasiva de tamanhos de 60 e 20 μm , onde há um gradiente acentuado da curva no intervalo de $1 < D/h < 4$. É possível observar a mudança de mecanismo quando $D/h > 2$ em

ambas as curvas, onde para $D/h < 2$ há a formação de indentações, enquanto para $D/h > 2$ há presença de riscos/sulcos. Embora exista diferentes partículas contaminando o fluido lubrificante, é razoável pensar que grande parte não contribui para o processo de desgaste, visto que possuem tamanho inferior a espessura do filme, além disso, é plausível dizer que as partículas ajam independentemente umas das outras (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

Williams e Hyncica (1992) apresentaram uma excelente ilustração do movimento da partícula em relação as superfícies móveis. A figura abaixo considera um caso bidimensional da partícula.

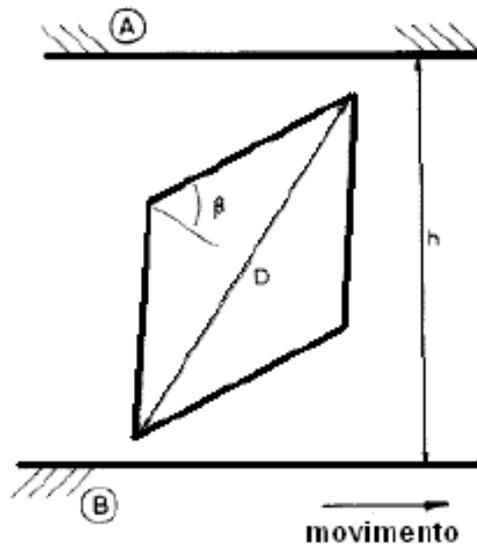


Figura 12 – Partícula abrasiva em função dos parâmetros D e β .
Fonte: Adaptado Williams e Hyncica (1992).

A Figura 12 mostra uma partícula abrasiva em formato de losango com a maior diagonal (D), um ângulo (β) entre 45° e 90° , entre uma espessura de filme (h) e suas superfícies (A) e (B) em movimento. Conforme pode ser observado, o caso representado na figura acima é para $D/h < 1$ que resulta em poucos danos da superfície (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

A Figura 13 apresenta a dinâmica de interação entre as partículas e as superfícies.

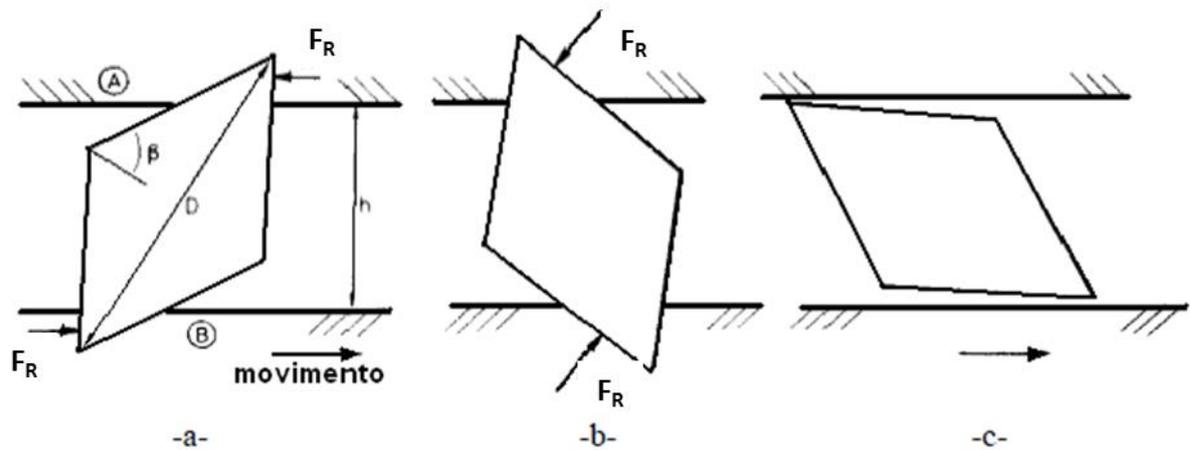


Figura 13 – Dinâmica de interação entre a partícula e as superfícies devido a ação do binário (a) e (b), causando poucos danos na superfície.

Fonte: Adaptado Williams e Hyncica (1992).

A Figura 13 a. e b., representa uma partícula com tamanho superior a espessura do filme, onde é coerente dizer que a configuração acima provoque riscos/sulcos nas superfícies (WILLIAMS; HYNICICA, 1992). A força associada a indentação, análogo a um teste de dureza Vickers, estará conexas a escala de indentação e a dureza do material. Comparando ao teste de dureza, acredita-se que a força de indentação (F_R) seja igual ao produto da dureza e a área projetada e atue na direção perpendicular a face de indentação. Se as indentações estão ocorrendo de forma simultânea nas duas superfícies, superior e inferior, duas forças F_R em direções opostas, forma um binário que tendem rotacionar a partícula abrasiva, conforme mostrado na Figura 13. Caso as forças F_R se tornem colineares, o binário é anulado e a partícula é mantida em uma determinada inclinação causando riscos em ambas as superfícies (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

Os autores Williams e Hyncica (1992) afirmam que existe um tamanho crítico da partícula $\left(\frac{D}{h}\right)_1$ em função do ângulo (β) para que ocorra a rotação da partícula, dado pela Eq (4) abaixo:

$$\left(\frac{D}{h}\right)_1 = \sec \beta \quad (4)$$

A Figura 14 mostra o comportamento da partícula para o caso em que $\left(\frac{D}{h}\right) > \left(\frac{D}{h}\right)_1$.

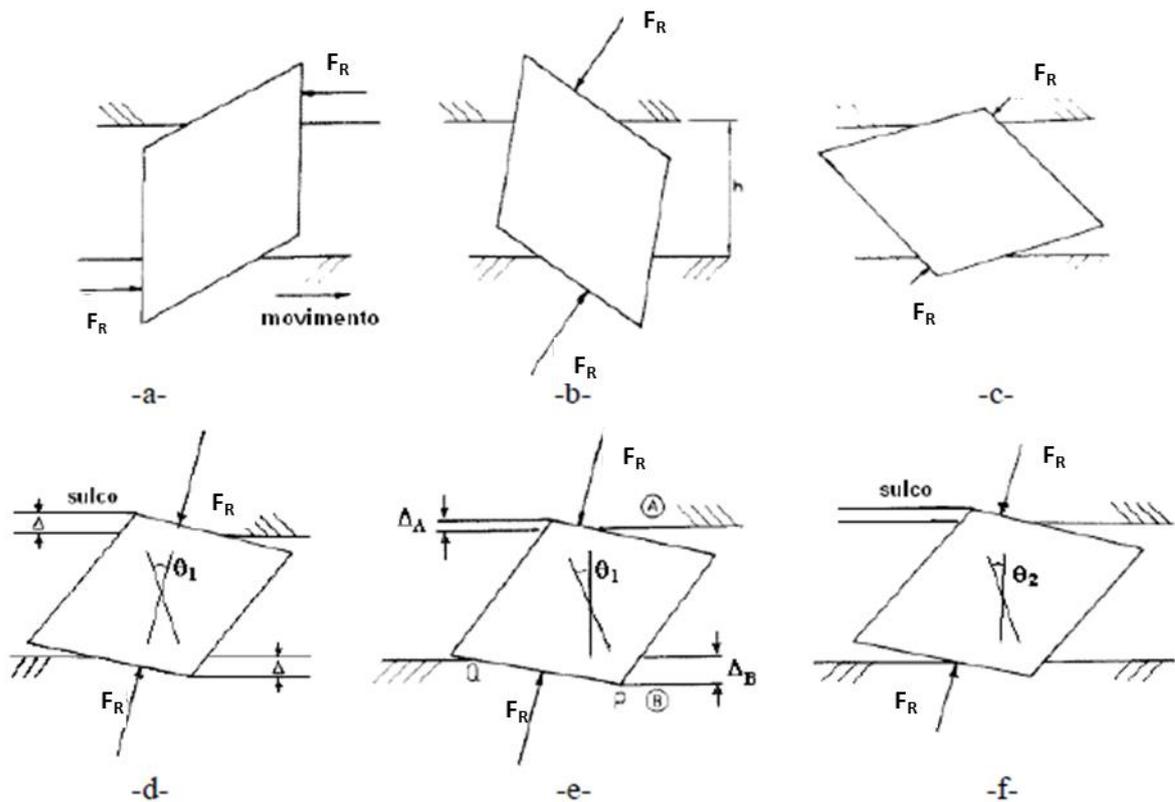


Figura 14 – Comportamento da partícula até uma posição de equilíbrio para o caso do abrasivo maior que o tamanho crítico da partícula.

Fonte: Williams e Hyncica (1992).

A Figura 14 representa a rotação de uma partícula, de tamanho superior ao tamanho crítico, rotacionando devido as forças F_R . Porém, como pode ser observado na Figura 14b. e c. acima, quando as forças F_R se tornam colineares elas se anulam e a partícula se mantém estacionada em uma determinada inclinação θ_1 . Como retratado na ilustração acima, a espessura do filme é menor que o tamanho da partícula, logo, espera-se encontrar sulcos/riscos nas superfícies causados pela atuação das partículas (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

Por fim, Williams e Hyncica (1992) indicam que existe uma importante característica que controla a transição entre os modos de desgaste, o chamado ângulo de ataque (α). Os mesmos autores informam que quando o ângulo α é pequeno, o sulcamento é favorecido, quando o α é acima de um valor crítico, ocorre a transição do sulcamento para o corte. Quando a razão D/h aumenta o ângulo de ataque efetivo da partícula também aumenta, então é possível antecipar a seguinte mudança do mecanismo de desgaste:

Rolamento → Sulcamento → Corte

2.3 Ensaio de Microabrasão

Com o avanço tecnológico, cada vez mais se vê o uso de sistemas em miniatura e o emprego de materiais localizados também em escalas menores. Sendo assim, surgiu a necessidade de desenvolver testes para avaliar a resistência ao desgaste de pequenos volumes de materiais, como em revestimentos finos, para avaliação de perda de massa ou mudanças dimensionais, e isso inclui o teste de microabrasão (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996).

Rutherford e Hutchings (1997) relatam que um dos primeiros ensaios de teste de abrasão em metais foi conduzido por Mikhail Lomonosov, onde o material era fixado em madeira e pressionado contra a pedra girando sob um peso morto. Posteriormente o mesmo teste foi modificado por Brinell (1921) que substituiu a pedra por um disco de aço e, entre o contato com a amostra, alimentou com partículas de quartzo.

No ano de 1949 teve-se os primeiros indícios de um ensaio em escala micrométrica, descrito por Grodzinski (1949). O teste consistia em uma roda de ferro fundido em forma cônica de diâmetro de 25 mm que era pressionada contra a amostra com uma força de 0,2 a 0,5N, uma velocidade de rotação de 20.000 rpm e o contato entre eles era alimentada por partículas abrasivas de diamante com tamanhos de até 2 μm . No entanto, apesar do teste ter sido utilizado por Grodzinski e Stern (1949) e Wilks (1952) para teste do comportamento anisotrópico do diamante frente ao desgaste abrasivo, o principal dificultador do teste era a excentricidade na rotação da roda (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997).

Happ e Shockley (1956) utilizaram do mesmo princípio citado acima, porém, com o uso de um cilindro de rotação controlado para traçar o perfil da profundidade das camadas de difusão em silício. Posteriormente Thompson *et al* (1979) foi o primeiro a utilizar um contra-corpo esférico revestido com uma pasta de diamante. Já em 1985 Valli *et al* (1985) realizou um estudo detalhado e determinou condições de teste ideais para medição da espessura do revestimento (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997).

Adachi e Hutchings (2003) define o ensaio de de microabrasão como um teste em microescala no qual uma esfera é girada contra um contra-corpo na presença de uma pasta abrasiva com partículas finas. Rutherford e Hutchings (1996) utilizaram o ensaio em um estudo da resistência a abrasão do revestimento e do substrato. O princípio de funcionamento do teste é demonstrado pelos mesmos autores conforme Figura 15.

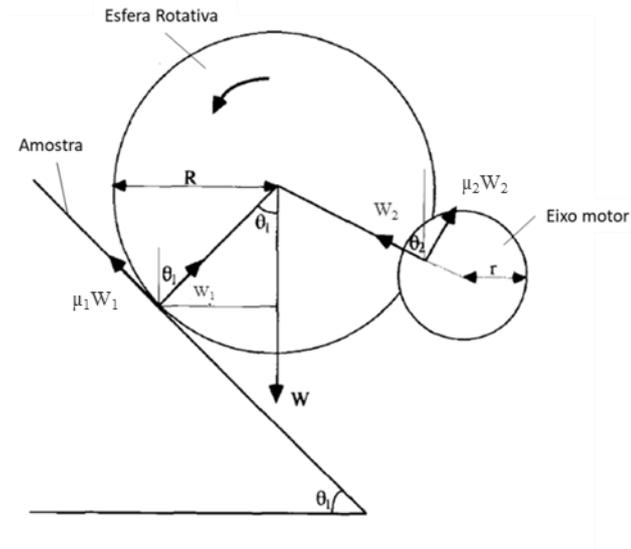


Figura 15 – Diagrama de força para o contato entre a esfera e o corpo de prova para uma configuração de equipamento de “esfera livre”.
Fonte: Adaptado de Rutherford e Hutchings (1996).

A Figura 15 ilustra um ensaio de microabrasão por esfera livre. Neste método, a esfera de raio R é girada contra a amostra por meio de um eixo giratório, a força normal (W) entre o corpo de prova e a esfera é oriunda do próprio peso da esfera e uma lama de partícula abrasiva é mantida na região de contato. Logo, a variação da componente da força aplicada sobre a amostra é dada em função da distância e da inclinação da amostra em relação a esfera (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996).

Além do teste apresentado acima, existem equipamentos com configuração para realização do teste de desgaste microabrasivo por “esfera-fixa”, apresentado na Figura 16 (COZZA, 2011).

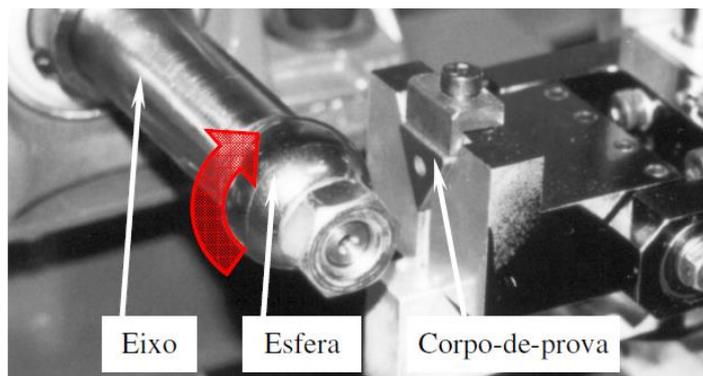


Figura 16 – Equipamento de ensaio de desgaste de microabrasão por esfera rotativa fixa.
Fonte: Cozza (2011).

No funcionamento do equipamento na configuração apresentada na Figura 16, “esfera fixa”, o movimento da esfera rotativa para o ensaio de desgaste ocorre em conjunto com o eixo no qual a esfera é fixada (COZZA, 2011).

Trezona *et al* (1999) e Adachi *et al* (2003) abordam que em um ensaio de microabrasão com utilização de partículas livres é possível encontrar dois modos de desgastes: por deslizamento de partículas abrasivas e por rolamento de partículas abrasivas. O desgaste por deslizamento de partículas abrasivas ou abrasão a dois corpos é obtido quando as partículas não se movem em relação a esfera, tornando-se protuberâncias fixas movendo-se através da amostra provocando sulcos paralelos e finos. Já o desgaste por rolamento de partículas abrasivas ocorre quando as partículas permanecem soltas para rolar entre as duas superfícies originam indentações sem direcionalidade (ADACHI; HUTCHINGS, 2003; TREZONA *et al*, 1999).

Trezona *et al* (1999) relatou forte influência da carga aplicada e do volume de abrasivo no modo de desgaste dominante. Segundo os mesmos autores, quando se têm altas cargas e/ou baixas concentrações de abrasivo o mecanismo dominante é de ranhura na superfície do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 17 .

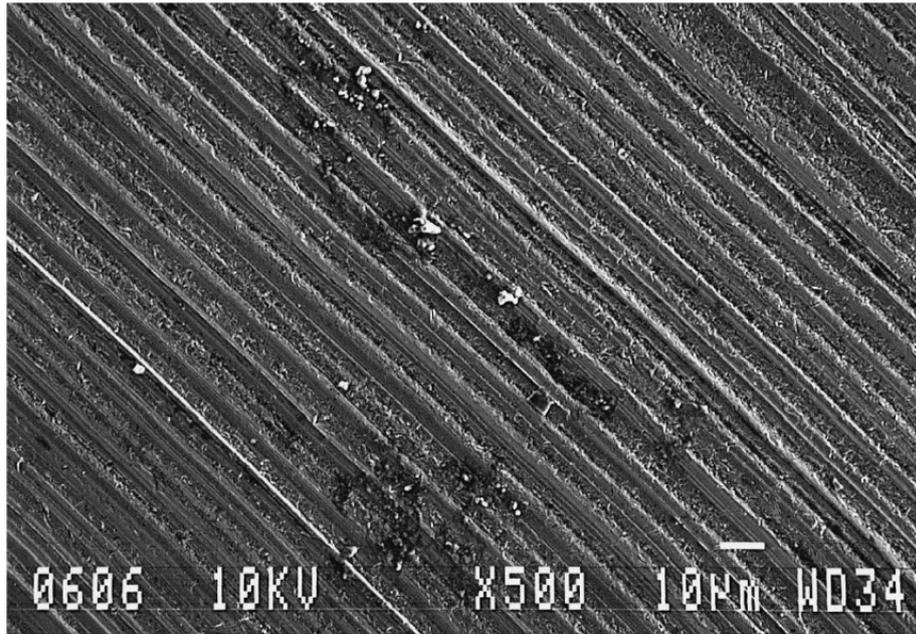


Figura 17 – Imagem MEV da superfície produzida por altas cargas e baixas concentrações de abrasivo. Superfície desgastada de um aço ferramenta temperado e revenido produzido por microabrasão com carga de 0,25 N e submetido a pasta de diamante de 3 μm .
Fonte: Adaptado de Trezona *et al* (1999).

A Figura 17 mostra as ranhuras em uma superfície do corpo de prova de aço ferramenta. Os sulcos são finos, paralelos, íngremes e correspondem ao tamanho das partículas abrasivas utilizadas, o que sugere que os sulcos foram formados pelas partículas e não por aspereza da superfície da esfera (TREZONA *et al*, 1999).

Já o mecanismo predominante para cargas baixas e/ou altas concentrados de pasta abrasiva, é o de um processo de três corpos. A Figura 18 apresenta uma superfície oriunda dessas condições (TREZONA *et al*, 1999).

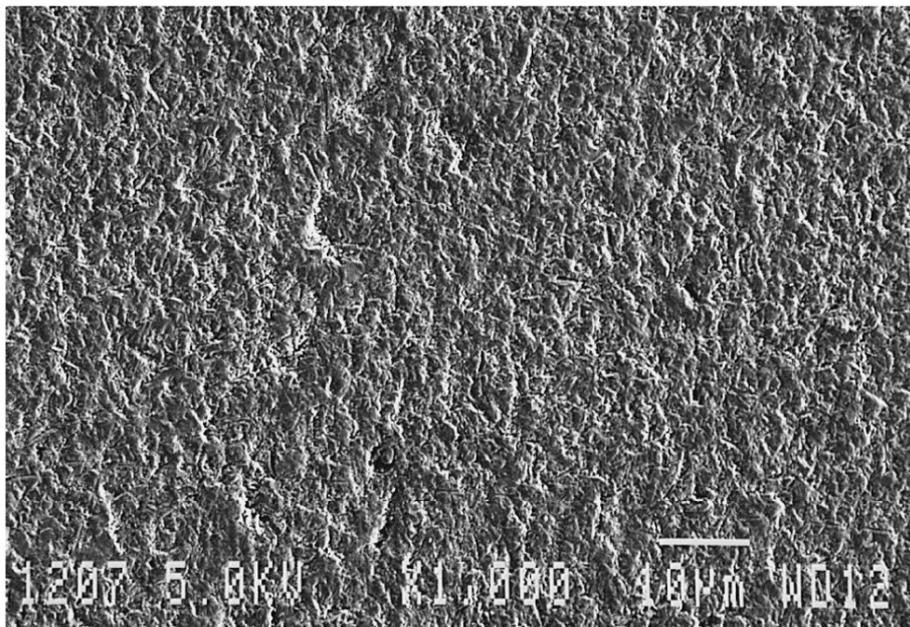


Figura 18 – Imagem MEV da superfície produzida por baixas cargas e altas concentrações de abrasivo. Superfície desgastada de um aço ferramenta temperado e revenido produzido por microabrasão com carga de 0,25 N e submetido a pasta abrasiva de SiC F1200.
Fonte: Adaptado de Trezona *et al* (1999).

Na Figura 18 é possível observar uma superfície altamente deformada e com indentações sem direcionalidade.

Por fim, Trezona *et al* (1999) informa que em cargas e concentrações de lama abrasiva intermediárias é possível obter uma superfície de caráter misto, com presença de ranhuras no centro da amostra e rolagem nas laterais.

A Figura 19 apresenta o mapa de mecanismo de desgaste obtido por Trezona *et al* (1999) em seus ensaios de microabrasão em uma amostra de aço ferramenta.

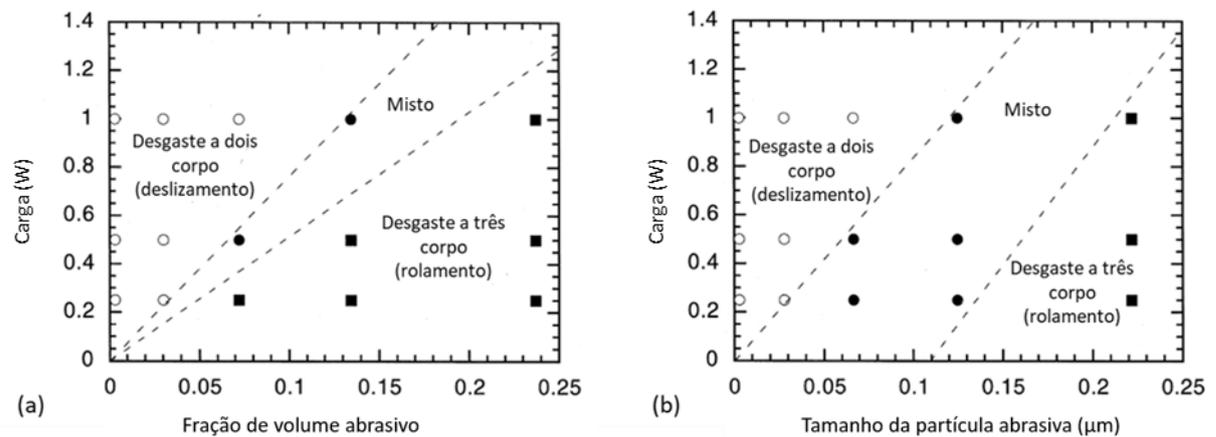


Figura 19 – Mapa de mecanismo de desgaste em um ensaio de microabrasão de um aço ferramenta em termo de carga aplicada e concentração de abrasivo. (a) Pasta de SiC F1200. (b) Pasta de diamante de 3 μm .
Fonte: Adaptado de Trezona *et al* (1999).

Os mapas de mecanismos apresentados na Figura 19 mostram como ocorre a variação do mecanismo de desgaste em relação a carga aplicada e a concentração de abrasivo de SiC F1200 e diamante de 3 μm . Na Figura 19a, é possível observar a transição do desgaste de deslizamento para o de rolamento ocorre quase que respeitando uma relação constante entre carga e concentração. Já na Figura 19b, há uma variação muito maior na relação entre os dois parâmetros.

2.4 Aços Inoxidáveis

Os aços são ligas de ferro-carbono que podem conter concentrações de elementos de ligas com diferentes composições e/ou tratamento térmico. A classificação dos aços pode ser com base na concentração de carbono ou de acordo com a concentração de outros elementos de liga (CHIAVERINI, 2008).

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro e cromo altamente resistentes à corrosão (ferrugem) e oxidação em diversos ambientes, especialmente na atmosfera ambiente, e por isso o seu grande emprego em segmento de cutelaria, peças automotivas, aeroespaciais, utensílios hospitalares, entre outros (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

O principalmente elemento de liga presente no aço inoxidável é o cromo. Exige-se uma concentração de pelo menos 11% em peso de Cr para que seja possível atingir a passividade, que é a capacidade de permanecer inalterado no meio circunvizinho, e conferir a resistência a

corrosão característica desse material. A resistência à corrosão também pode ser melhorada pela adição de níquel e molibdênio (CALLISTER; RETHWISCH, 2020; CHIAVERINI, 2008).

A proteção a corrosão é conferida por meio de película protetora de óxido na superfície do aço que separa o metal do meio ambiente. O cromo possui a capacidade de formar essa camada a partir da absorção de gás oxigênio pelos átomos de cromo e manter uma película de óxido extremamente estável, devido as forças atômicas, com elevada resistência a ataques químicos (CHIAVERINI, 2008).

Callister *et al* (2020) divide, a partir da microestrutura, os aços inoxidáveis em três classes: martensíticos, ferríticos e austeníticos. As classes se diferem na composição química, propriedades mecânicas e aplicação. A partir desta divisão, ASM e Santandréa *apud* Labiaparari (2015) separa em cinco grandes grupos, são eles: aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis duplex, aços inoxidáveis martensíticos e aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

No grupo de aços inoxidáveis ferríticos o cromo é o principal elemento de liga em concentrações que variam de 11 à 30%, podendo ter pequenas adições de elementos austenitizantes como o C, N e Ni. Como o teor de carbono é baixo — máximo de 0,20% — a fase austenítica fica totalmente eliminada e, em consequência, esses aços não são endurecidos pela têmpera (CHIAVERINI, 2008; LABIAPARARI, 2015).

Este grupo de aços tem uma vasta aplicabilidade desde pias, talheres, geladeira, até peças automotivas, e o que difere o seu uso é a quantidade de Cr presente. Os aços inoxidáveis ferríticos com altos teores de Cr e com Mo possuem elevada resistência a corrosão concentrada em meios contendo cloreto, onde os aços inoxidáveis austenítico possuem uma performance ruim. Devido a isso, este grupo de materiais é indicado para aplicação em tubulações de soluções aquosas contendo cloreto ou água do mar, aplicações que exigem alta resistência a corrosão e oxidação (LABIAPARARI, 2015).

Já os aços inoxidáveis ferríticos com concentração mínima de cromo, 11% Cr, são usados, por exemplo, em sistema de exaustão de automóveis de baixa motorização. Por fim, os que possuem média concentração, de 16 à 18% Cr, são usados em ornamento automotivos e utensílios de cozinha (LABIAPARARI, 2015).

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento e realização deste trabalho. A estrutura e o temas abordados são o tipo de pesquisa, os materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados, tabulação dos dados e as considerações finais.

3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Creswell (2021), o projeto de pesquisa envolve desde decisões acerca do tema, até métodos detalhados, análise e interpretação dos dados. Para que isso ocorra são necessários planejamento e procedimentos que juntos formam a abordagem da pesquisa. O mesmo autor apresenta que abordagem de pesquisa pode ser categorizada em qualitativa, quantitativa ou mista (CRESWELL, 2021).

A pesquisa qualitativa consiste em perguntas, procedimentos, coleta, análise dos dados e interpretações do pesquisador acerca dos significados dos dados. Já a pesquisa quantitativa procurar testar teorias objetivas, examinando relações entre variáveis e os dados numéricos resultantes são analisados por meio de procedimentos estatísticos (CRESWELL, 2021).

Gil (2019) complementa dizendo que a pesquisa qualitativa é baseada na pressuposição que existem múltiplas perspectivas acerca da realidade com base, por exemplo, da influência do contexto em que os dados foram obtidos, na análise profunda e detalhada dos dados e no foco na descrição dos resultados, já a pesquisa quantitativa admite uma única realidade objetiva.

Desse modo, este trabalho pode ser compreendido como uma pesquisa mista, ou seja, envolve a coleta de dados quantitativos e qualitativo, visto que, foi analisado os coeficientes de desgastes obtidos nos ensaios com amostras de aço inoxidável P410D e uma análise qualitativa dos mecanismos de desgaste resultante de acordo com a lama abrasiva. Este tipo de pesquisa de método mistos permite uma melhor compreensão das informações comparado aos resultados obtidos pelos outros métodos isoladamente (CRESWELL, 2021).

Gil (2019) divide a pesquisa, com base em seu objetivo específico, em três níveis, são eles: estudos exploratórios, descritivas e explicativas. A pesquisa exploratória, muitas vezes utilizada para estudo pouco genérico, tem como objetivo desenvolver, esclarecer, modificar conceitos e ideias e levantar hipóteses, procedimentos de amostragem e técnicas quantitativas

de dados são pouco utilizadas para essa pesquisa. A pesquisa descritiva tem como característica a descrição de um fenômeno a partir das relações entre as variáveis podendo, além de identificar, também determinar a natureza da relação. Por fim, a pesquisa explicativa visa identificar fatores que determina ou contribuem para ocorrência de um fenômeno (GIL, 2019).

Com base no exposto acima, a presente pesquisa se enquadra como explicativa porque busca apresentar a influência dos fatores que causaram os fenômenos de desgastes e descritiva, porque busca descrever os fenômenos obtidos e sua relação com as variáveis do teste.

Lakato e Marconi (2021) diz que as técnicas de pesquisas são ferramentas essenciais que garantem a qualidade dos resultados obtidos. O mesmo autor classifica diferentes tipos de técnicas e dentre as apresentadas, têm-se a pesquisa bibliográfica e experimental.

A pesquisa bibliográfica abarca toda bibliografia acerca de determinado assunto, seja livros, monografias, teses, artigos científicos, entre outros (LAKATO; MARCONI, 2021). A pesquisa experimental define variáveis que podem influenciar no objeto de estudo, as formas de controle e o a observação dos efeitos dessas variáveis no objeto (GIL, 2002).

Sendo assim, aquelas que melhor se encaixam neste trabalho são a pesquisa bibliográfica devido a revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2 e a experimental, visto que nos ensaios experimentais foram feitos testes nas amostras variando os tipos e as concentrações de partículas abrasivas.

3.2 Materiais e Métodos

As etapas que constituem metodologia utilizada neste trabalho estão apresentadas na Figura 20.

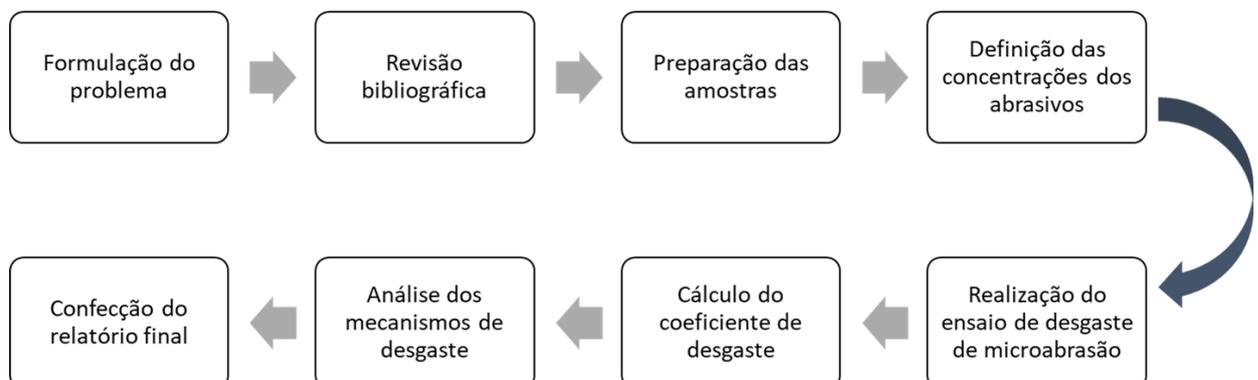


Figura 20 – Fluxograma das etapas do método de pesquisa.
Fonte: Pesquisa Direta (2021).

O fluxograma da Figura 20 apresenta as etapas seguidas para a realização da pesquisa. Primeiramente é definida a pergunta problema a ser respondida com a análise dos dados obtidos durante a pesquisa. Posteriormente é realizada uma revisão bibliográfica dos temas de estudo do trabalho. Já as etapas subsequentes estão descritas abaixo.

3.2.1 Preparação das amostras

O material escolhido para o presente trabalho foi o aço inoxidável ferrítico P410D fornecido pela empresa Aperam com sede na cidade de Timóteo – MG.

A escolha do material foi justificada devido sua grande utilização na indústria sucroalcooleira, revestimentos internos e tubulações. Além disso, conforme Labiapari (2015), são aços inoxidáveis de baixo custo, devido ao baixo teor de cromo, com grande aplicabilidade em ambientes abrasivo-corrosivos, principalmente em ambientes úmidos, se mostrando como uma excelente opção frente ao aço carbono comum.

A composição química do aço foi avaliada 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). A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inoxidável ferrítico.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável ferrítico.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
% em peso	0,0107	0,5332	0,526	0,0271	0,0005	11,1334	0,3046	0,0116	0,0128

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

As amostras foram fabricadas com dimensões aproximadas de 30 mm x 20 mm x 6 mm. A superfície de teste foi preparada com o intuito de padronizar a topografia. Para isso, a face

de teste foi lixada com lixas d'água de mesh: #240, #320, #400 e #600. A Figura 21 mostra a amostra do material aço inoxidável ferrítico P410D.

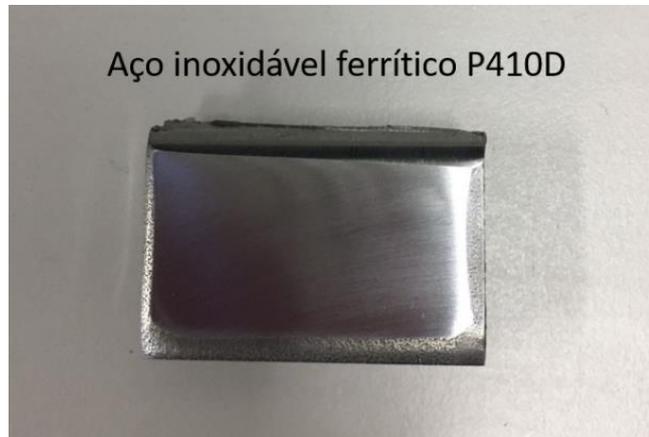


Figura 21 – Amostra do material aço inoxidável P410D.
Fonte: Pesquisa Direta (2021).

3.2.2 Definição da concentração de abrasivos

O material das partículas abrasivas influencia diretamente no mecanismo de desgaste resultante e nas taxas de desgaste. As principais variáveis são: dureza, concentração, forma e tamanho. Para este trabalho foram selecionados dois tipos de abrasivos: Dióxido de silício (SiO_2) e Hematita (Fe_2O_3). A escolha destes abrasivos se justifica devido à presença em diversas situações reais, por exemplo, no processo de moagem de minério de ferro com diversos teores de sílica.

A Tabela 2 apresenta as principais características dos abrasivos baseado na literatura de Hutchings e Shipway (2017), Silva (2003) e no fabricante Sigma-Aldrich.

Tabela 2 – Características de dureza dos abrasivos

ABRASIVO	DUREZA (HV)	DADOS NOMINAIS
Sílica (SiO_2) Sigma-Aldrich	750 -1200	Tamanho da partícula: 0,5 - 10 μm aproximadamente 80% entre 1 - 5 μm

Hematita (Fe₂O₃) Sigma-Aldrich

739 - 1500

Tamanho da partícula: 96% < 5 µm

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Como pode ser observado na tabela, ambos os abrasivos apresentam valores de dureza próximos, conforme literatura, e possuem tamanhos nominais de partículas de aproximadamente 5 µm.

A lama abrasiva é formada pela partícula abrasiva e água. Para este trabalho foram produzidas lamas abrasivas com concentração de 10 % em massa de abrasivo em suspensão em água, conforme mostra a Figura 22.



Figura 22 – Preparação da lama abrasiva em uma balança de precisão.
Fonte: Pesquisa Direta (2021).

As lamas abrasivas foram feitas misturando, com diferentes proporções, as partículas abrasivas de Sílica e hematita. A Tabela 3 mostra as cinco lamas abrasivas empregadas neste trabalho e suas respectivas concentrações de cada abrasivo.

Tabela 3 – Concentrações de abrasivos na lama

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

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

3.2.3 Ensaio de desgaste microabrasivo

O ensaio de desgaste abrasivo foi realizado em um equipamento de teste de microabrasão na configuração de esfera fixa, conforme Figura 23.

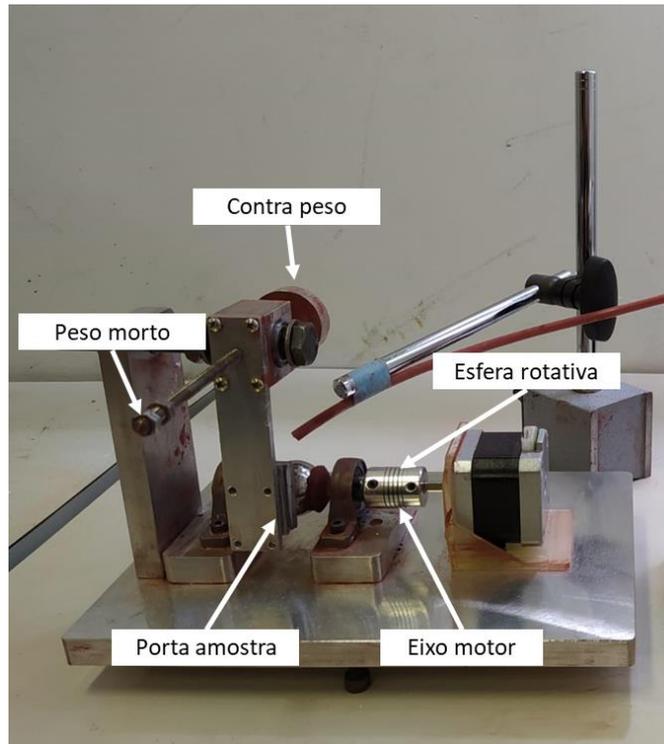


Figura 23 – Ensaio de microabrasão na configuração esfera fixa.
Fonte: Pesquisa Direta (2021).

No equipamento, apresentado na Figura 23, a esfera é movimentada por um conjunto eixo motor no qual a amostra é fixada no porta-amostra. A esfera utilizada foi de nylon, com diâmetro de 25,4 mm e a cada teste a mesma era limpa com água e algodão para remoção de resquícios de abrasivos do ensaio anterior.

A Figura 24 apresenta a configuração do ensaio com todos os equipamentos envolvidos.

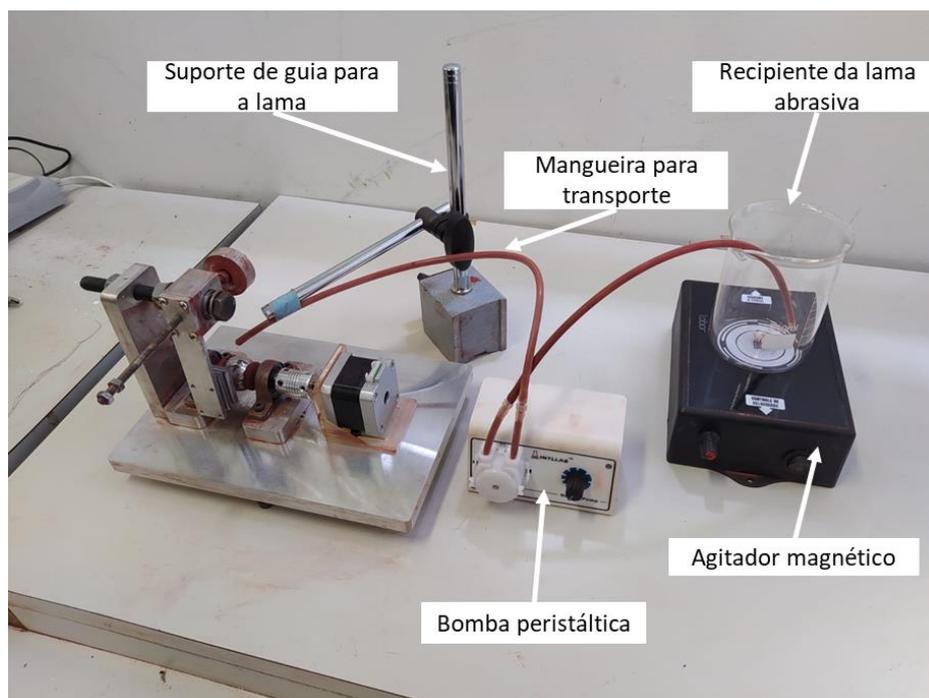


Figura 24 – Ensaio de microabrasão na configuração esfera fixa.
Fonte: Pesquisa Direta (2021).

No equipamento, demonstrado na Figura 24, primeiramente a lama abrasiva é preparada no recipiente que, posteriormente, é colocado no agitador contínuo para evitar decantação das partículas abrasivas. A bomba peristáltica é a responsável por bombear a lama abrasiva até a esfera rotativa. Neste transporte, é utilizado um suporte para ajudar a guiar a lama e direcionar para o local desejado.

Para esta pesquisa, adotou-se um bombeamento da lama abrasiva de 1 gota a cada 5 segundos, a rotação do eixo motor foi fixada em 100 rpm e a força normal adotada de 1,0 N.

Foram realizados três testes para cada concentração de abrasivo com duração total de 15 minutos. O teste foi interrompido a cada 3 minutos para avaliar o diâmetro da calota formada, o que permitiu acompanhar a evolução da taxa de desgaste ao longo do teste.

3.2.4 Cálculo do coeficiente de desgaste

Para o tipo de teste utilizado a rotação da esfera na presença de partículas abrasivas resulta em uma impressão de desgaste com a geometria de uma calota esférica (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996).

Com base nisso, o volume desgastado pode ser calculado com base nas dimensões da cratera formada na amostra e do raio da esfera, conforme mostrado na Figura 25.

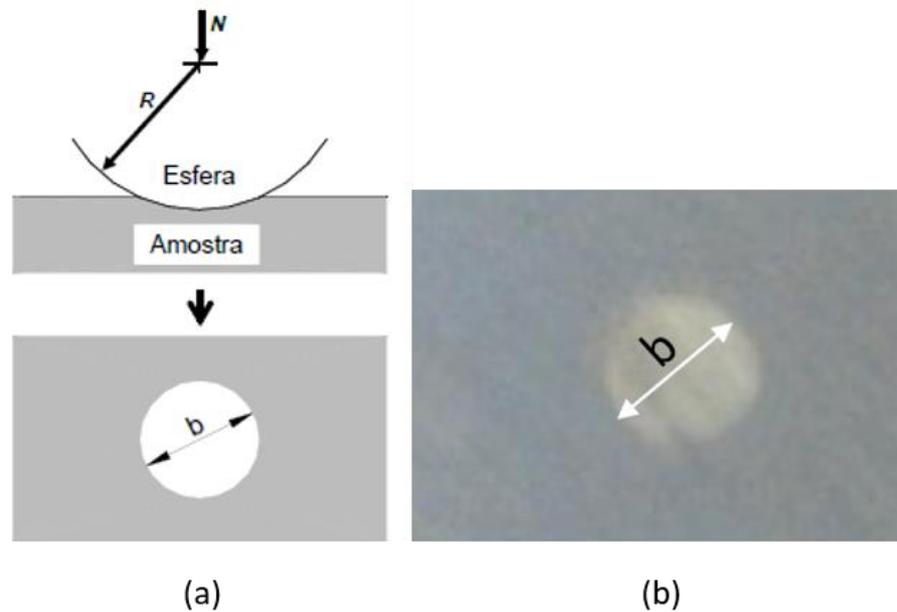


Figura 25 – Impressão de desgaste. (a) Impressão esquemática de cratera. (b) Cratera de desgaste de uma amostra de aço inoxidável P410D. Fonte: Silva (2003) e Pesquisa Direta (2021).

Logo, 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, Eq. (5) (TREZONA *et al* (1999)).

$$V \approx \frac{\pi b^4}{64R} \quad \text{para } b \ll R \quad (5)$$

Segundo Trezona *et al* (1999), para materiais homogêneos e não revestidos o volume desgastado é em função da distância de deslizamento (S), da carga normal de contato (W) e da taxa de desgaste (k), equação equivalente à de Archard para desgaste por deslizante, conforme apresentado na Eq. (6).

$$V = k S W \quad (6)$$

Onde k é o coeficiente de desgaste dado em $\text{m}^3(\text{N.m})^{-1}$. A resistência ao desgaste abrasivo é o inverso de k .

Sendo assim, utilizando as Eq. (5) e (6) é possível isolar o coeficiente de desgaste instantâneo de modo que fique em função de variáveis conhecidas no ensaio. Logo, o coeficiente de desgaste pode ser expresso pela Eq. (7) (TREZONA *et al*, 1999; RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997).

$$k = \frac{\pi b^4}{64 R S W} \quad \text{para } b \ll R \quad (7)$$

O coeficiente de desgaste para cada lama foi definido como sendo a média dos três últimos pontos coletados dentro do regime permanente de desgaste, conforme Figura 26.

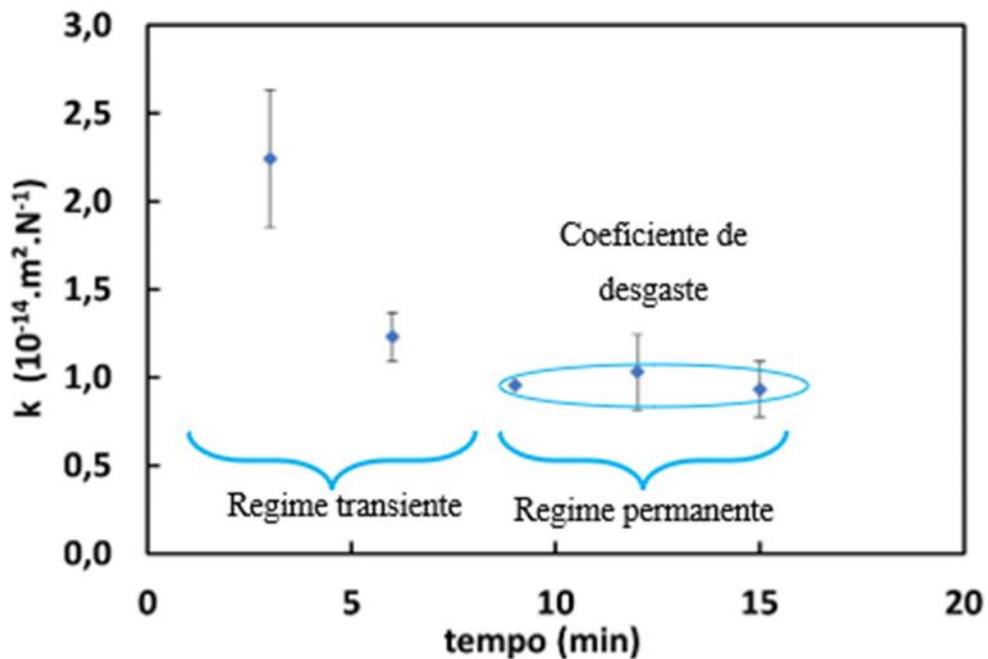


Figura 26 – Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de teste. Lama abrasiva 100% sílica e esfera de nylon.

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

A Tabela 4 apresenta um resumo dos principais parâmetros de ensaio.

Tabela 4 – Parâmetros de Ensaio

Esfera de Nylon	25,4 mm
Abrasivo	Sílica (SiO ₂) e Hematita (Fe ₂ O ₃)

Concentração de abrasivo	10%
Força normal (N)	1 N
Rotação do eixo motor	100 rpm
Gotejamento de abrasivo	1 gota/5 segundos
Tempo de ensaio por teste	15 min
Número de testes por concentração	3

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

3.2.5 Análise da Microestrutura

A análise da microestrutura da amostra foi realizada por ataque químico Vilella que consiste em 1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorídrico e 100 ml de álcool etílico, por 80 segundos.

3.2.6 Análise de Granulometria

A análise granulométrica das partículas abrasivas foi realizada através da técnica de granulometria a laser empregando o equipamento *Mastersize 3000E* do fabricante Malvern Panalytical.

As partículas foram dosadas em um béquer até atingir um índice de obscuração entre 15 à 20% definido pelo método padrão de análise do equipamento.



Figura 27 - Análise de partículas Mastersize 3000E.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

3.2.7 Análise dos mecanismos de desgaste

O estudo dos mecanismos de desgaste ocorridos nos testes de abrasão foi realizado através de um microscópio óptico Olympus modelo BX51M.

As amostras, antes de serem analisadas, passaram por um processo de limpeza utilizando ultrassom.

3.2.8 Interferometria

As crateras de desgaste obtidas na microabrasão foram avaliadas através da técnica de interferometria a laser 3D. Foi utilizado o equipamento da marca OPM – Hyperion System e sensor confocal KF3. Utilizou-se uma densidade de pontos de 1000 x 400 pontos por milímetro, taxa de medição de 250 pts/s e área de medição de 2,5 por 2,5 mm.

Em uma área de 3 x 3mm com densidade de 1000 x 400 pontos por milímetro, foi realizada a análise da rugosidade também através da interferometria laser 3D. Nesse caso, foi avaliado o parâmetro de rugosidade superficial quadrática média (S_q).

A análise da topografia e das crateras foi realizada usando o programa Digital Surf Mountains Map Universal.

3.3 Variáveis e Indicadores

Variável provém da matemática e, conforme Gil (2019), é qualquer coisa que pode ser classificada em duas categorias. Lakatos e Marconi (2021) acrescenta que uma variável pode ser uma classificação ou medida; uma quantidade; propriedade; fator, ou seja, aquilo que seja mensurável. Para a pesquisa científica, de acordo com Sampieri *apud* Lakatos e Marconi (2021), as variáveis adquirem valor quando conseguem se relacionar com outras variáveis, complementando hipóteses ou teoria.

Os indicadores são elementos observáveis que permitem definir e mensurar as variáveis da pesquisa. Sendo assim, para cada variável é necessário selecionar o indicador mais adequado e possíveis de medições pelos meios que dispõe o pesquisador (GIL, 2019).

Sendo assim, as variáveis e indicadores para este trabalho estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis e indicadores

VARIÁVEIS	INDICADORES
<p style="text-align: center;">TIPOS DE PARTÍCULAS ABRASIVAS</p>	<p>Coeficiente de desgaste</p> <p>Mecanismo de desgaste</p>

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados para esta pesquisa foi feita por meio do equipamento de ensaio de microabrasão, microscópio digital, planilha e bibliografia.

3.5 Tabulação dos dados

Para tabulação dos dados deste trabalho, foi utilizado o *software* Microsoft Excel para calcular e documentar os dados do ensaio.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento de um ensaio de microabrasão por esfera fixa. Além disso, foram apresentadas todas as variáveis e indicadores envolvidos no teste e os instrumentos para coleta e tratamento dos dados. No capítulo seguinte, serão apresentadas as análises e discussão dos resultados obtidos no ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados e discussões de todas as etapas do ensaio de microabrasão, desde a caracterização da microestrutura da amostra até a análise dos mecanismos de desgastes resultantes.

4.1 Caracterização da Microestrutura

A Figura 28 apresenta a microestrutura observada do aço P410D como recebido.

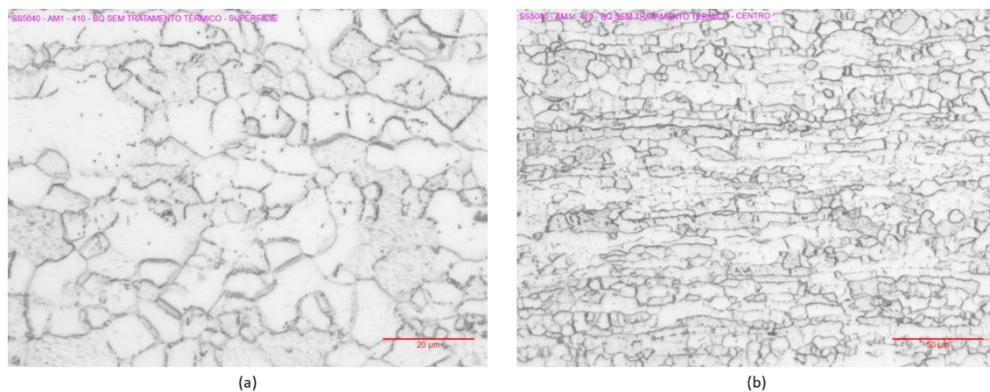


Figura 28 – Microestrutura da amostra contendo 11%Cr. (a) superfície. (b) centro.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como pode ser observado na Figura 28 a microestrutura do material é predominantemente ferrítica, pois não passou por nenhum tratamento térmico. A Figura 28(a) mostra a microestrutura da superfície com grãos homogêneos ao passo que a Figura 28 (b) apresenta a microestrutura no centro da amostra onde os grãos são alongados na direção de laminação. Esta microestrutura proporcionou ao material uma dureza 181 ± 2 HV.

A topografia da amostra é apresentada na Figura 29.

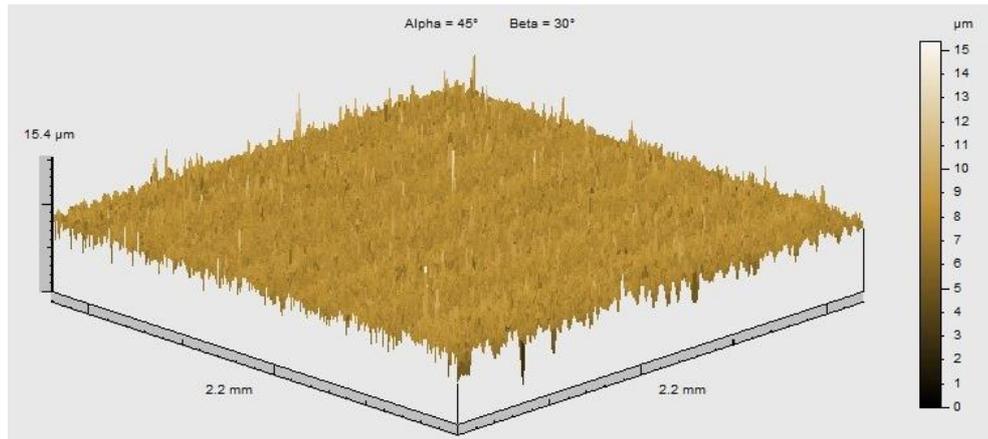


Figura 29 – Topografia da amostra.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Conforme pode ser observado na imagem 3D a topografia foi homogênea e resultou em um valor de rugosidade superficial quadrática (S_q) medida na amostra de $0,724 \mu\text{m}$.

4.2 Análise da Granulometria

A distribuição granulométrica das partículas abrasivas de SiO_2 e Fe_2O_3 utilizada neste trabalho, foi obtida a laser, utilizando o equipamento *Mastersizer* do fabricante *Malvern Panalytical*, e o resultado é apresentado na Figura 30.

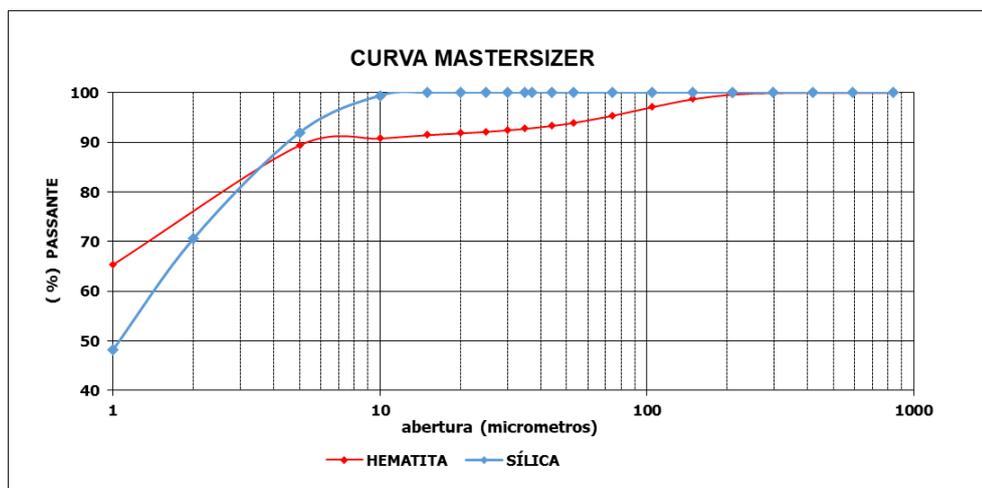


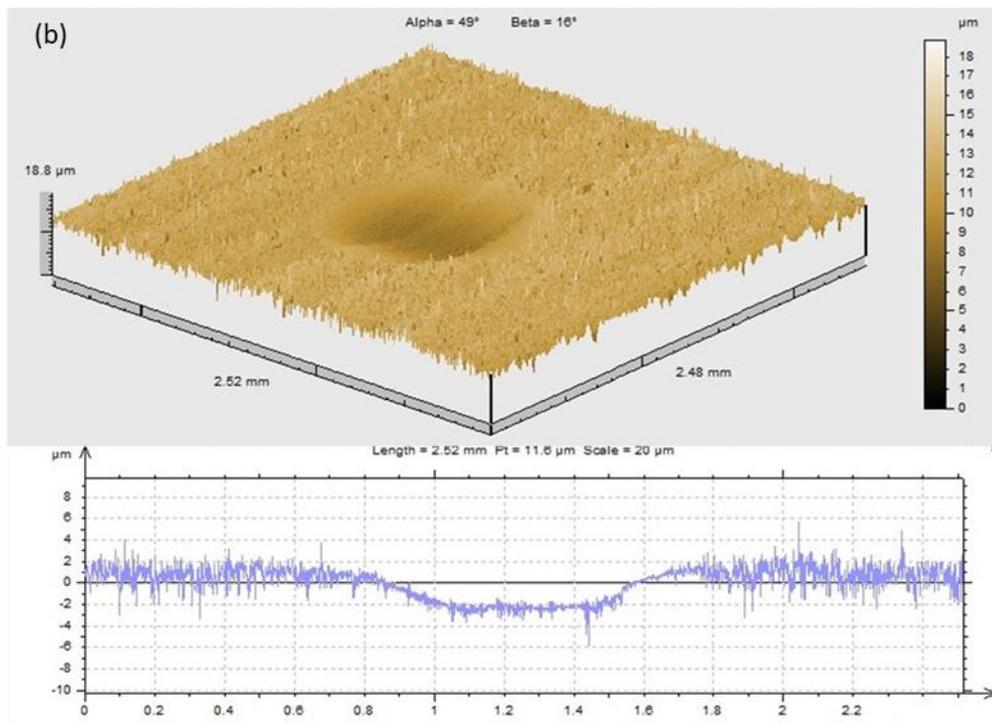
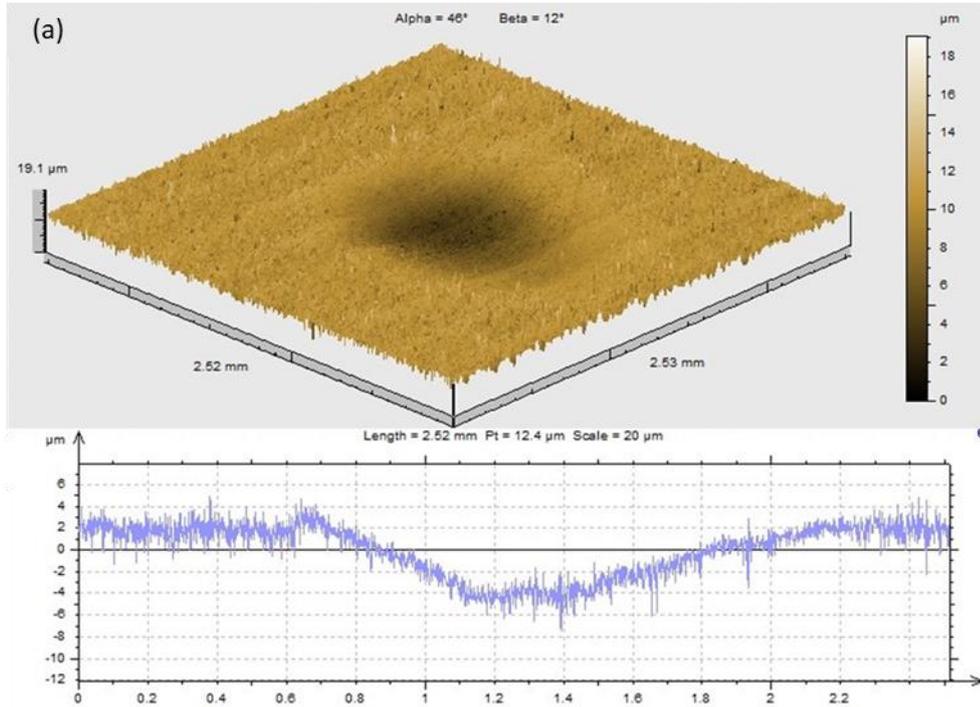
Figura 30 – Curva de percentual acumulado da Hematita e Sílica analisada por granulometria a laser.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Em análise da curva granulométrica da Figura 30 é possível confirmar os dados entregues pelos fabricantes no qual ambos os materiais abrasivos 90% das partículas apresentam tamanho médio menor que 5 μm . Também é possível identificar que aproximadamente 10% das partículas abrasivas de hematita possuem um diâmetro acima de 10 μm , sendo que 5% delas possuem cerca de 100 μm de diâmetro. Em contrapartida, as partículas de sílica apresentaram diâmetro bem inferior, sendo que cerca 50% da sílica apresentou diâmetro abaixo de 1 μm .

4.3 Ensaio de Microabrasão

Neste estudo foi empregado o contracorpo esférico de nylon compondo o sistema tribológico junto com a amostra de aço inoxidável ferrítico P410D e diferentes lamas abrasivas. O ensaio de microabrasão foi realizado em condições iguais para todas as lamas abrasivas: 10% em massa de abrasivo em suspensão em água. Para cada lama abrasiva foram realizados 3 testes com duração de 15 minutos divididos em intervalos de 3 minutos, medindo-se o diâmetro da calota formada.

A Figura 31 mostra a imagem 3D obtida por interferometria a laser da cratera formada no ensaio de microabrasão com lama abrasiva composta de 100% Sílica, 100% de hematita e 50% Sílica e 50% Hematita.



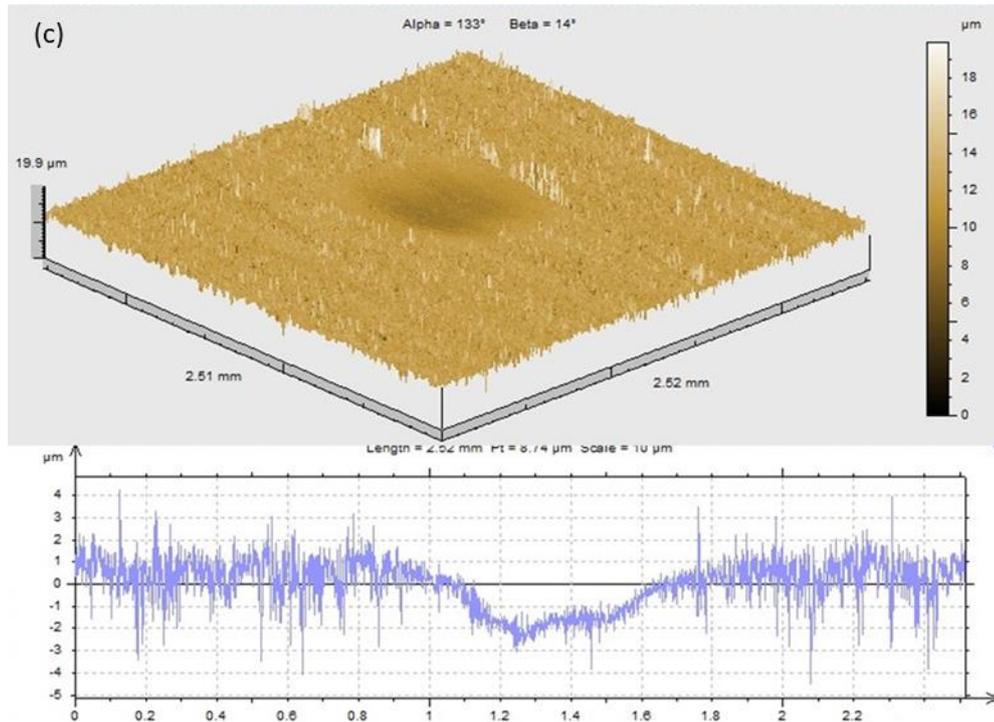


Figura 31 – Interferometria laser da cratera de desgaste produzida com lama abrasiva, respectivamente, imagem 3D da cratera e perfil na região do centro da cratera. (a) lama abrasiva 100% Sílica. (b) 100% Hematita. (c) 50% Sílica e 50% Hematita.

Fonte: Pesquisa direta (2022).

A Figura 31 mostra que a forma da cratera se assemelha a forma da esfera empregada. Isso é fundamental, pois as equações empregadas para calcular o volume removido levam em consideração o raio da esfera (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997; TREZONA *et al*, 1999). Além disso, é possível observar que a lama abrasiva composta por 100% de partículas de sílica, apresentou uma maior profundidade e diâmetro da calota formada comparado as outras lamas.

O valor de coeficiente de desgaste (k) em função do tempo de teste para cada lama abrasiva é apresentado na Figura 32.

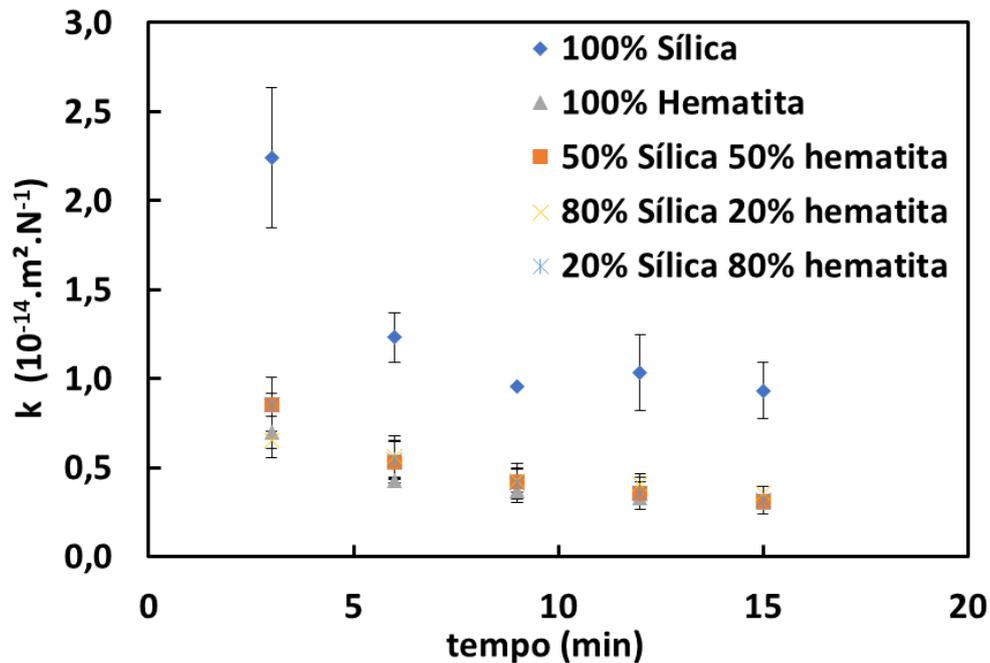


Figura 32 – Coeficiente de desgaste (k) em função do tempo para cada concentração de abrasivo. Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A Figura 32 apresenta a taxa de desgaste obtida a partir da cratera formada em cada intervalo de 3 minutos durante os 15 minutos totais de teste, sendo uma curva para cada concentração de lama abrasiva. Observa-se que em todas as lamas abrasivas o regime permanente é alcançado após 10 minutos de teste.

Blau (2005) explica que ao provocar um contato de deslizamento entre duas superfícies sólidas não desgastadas há mudanças iniciais no atrito, temperatura e taxa de desgaste e esse início é chamado de regime transiente de desgaste. Um exemplo é o contato entre duas superfícies recém usinadas: o contato inicial é apenas pelos picos das irregularidades. Sendo assim, a área de contato é muito pequena, no entanto, conforme o movimento ocorre as irregularidades vão sendo removidas e a área de contato aumenta progressivamente, como resultado, tem-se um desgaste inicial severo, mas, à medida que a área de contato aumenta a taxa de desgaste reduz até estabilizar (BLAU, 2005).

Essas deformações iniciais irreversíveis provocadas nas asperezas são muitas vezes necessárias para garantir o ajuste entre as duas superfícies. O processo de deformação pode provocar mudanças nas orientações cristalográficas, no estado de encruamento e no acúmulo de detritos (BLAU, 2005).

O contato inicial entre as duas superfícies interfere no tempo necessário para atingir o regime permanente do processo de desgaste (BLAU, 2005). Sendo assim, não existe uma distância de deslizamento ou um tempo de teste padrão para se obter o estado estacionário, visto que, além de ser influenciado pelos materiais envolvidos no par tribológico; a força normal, dureza, forma, tamanho e concentração das partículas abrasivas também podem influenciar (COZZA, 2011).

Desta forma, o coeficiente de desgaste para as respectivas lamas abrasivas foi calculado a partir da média dos três últimos valores de taxa de desgaste, correspondente a zona de regime permanente para este teste, como pode ser visualizada nas curvas apresentadas na Figura 32 (BLAU, 2005).

O coeficiente de desgaste (k) é apresentado na Figura 33.

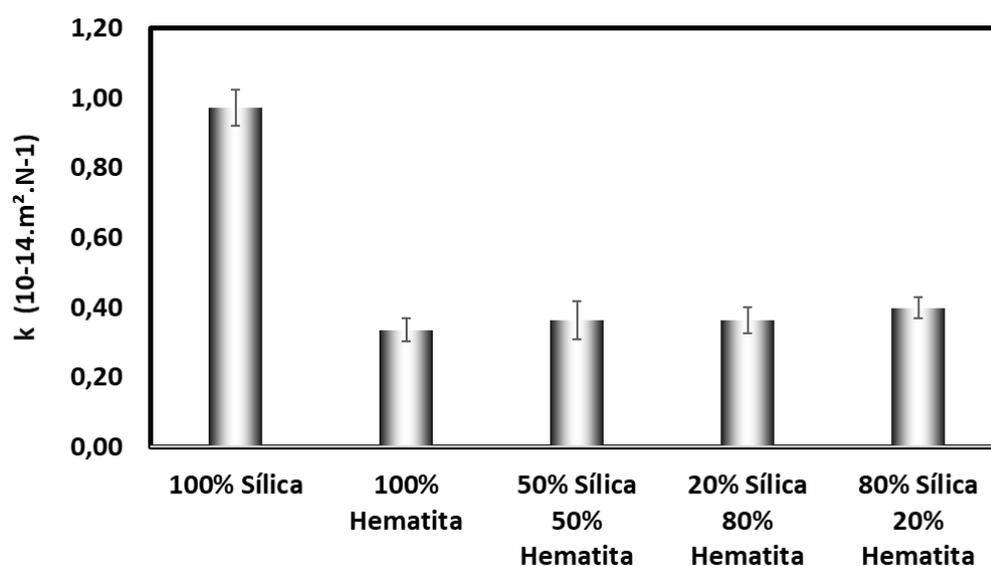


Figura 33 – Coeficiente de desgaste para cada concentração de abrasivo na amostra de aço inoxidável ferrítico P410D.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Conforme pode ser observado na Figura 33 a lama abrasiva 100% sílica apresentou o maior coeficiente de desgaste abrasivo, enquanto a amostra de 100% de hematita apresentou o menor valor. As lamas abrasivas com 50%, 80% e 20% de hematita apresentaram coeficientes de desgaste próximos aos da lama de 100% hematita. Este resultado sugere que as partículas abrasivas de hematita são mais dominantes neste sistema tribológico.

Como pode ser visto na Figura 33 as taxas de desgaste para as lamelas que possuem hematita foram semelhantes, assim, foi realizado a Análise de Variância (ANOVA) para conferir se as médias são estatisticamente iguais, Tabela 6.

Tabela 6 – Análise de Média e Variância

GRUPOS	CONTAGEM			SOMA	MÉDIA	VARIÂNCIA
100% hematita	9			3,011874	0,334653	0,001710
50% sílica 50% hematita	9			3,262222	0,362469	0,004956
20% sílica 80% hematita	9			3,263522	0,362614	0,008274
80% sílica 20% hematita	9			3,580294	0,397810	0,003276
FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	gl	MQ	F	valor P	Fcrítico
Entre grupos	0,018073	3	0,006024	1,322854	0,284091	2,901120
Dentro de grupos	0,145727	32	0,004554			
Total	0,163800	35				

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Conforme pode ser visto na Tabela 6, o teste de ANOVA confirmou que os valores de coeficientes de desgastes obtidos para as diferentes concentrações de abrasivos são estatisticamente idênticos com 95% de confiabilidade, pois o valor de $F_{crítico}$ é maior que o valor de F .

Conforme Shipway e Hutchings (2017) e Gahr (1987) a dureza, forma e tamanho são as principais características das partículas abrasivas que influenciam nas taxas de desgaste.

Para Shipway e Hutchings (2017) a dureza das partículas abrasivas influencia na taxa de desgaste em que o comportamento esperado é: partículas com dureza inferior a dureza da superfície causam menos desgaste, partículas mais duras que a superfície da amostra provocam maiores desgastes. Gahr (1987) também mostrou em seus estudos o comportamento dos materiais homogêneos e heterogêneos quanto a transição da severidade suave para severa.

Para a amostra de aço inoxidável ferrítico P410D utilizada neste trabalho, a dureza é de 181 ± 2 HV. As amostras de abrasivos de sílica e hematita possuem dureza próximas, conforme pode ser visto na Tabela 2.

A severidade é dada pela relação H_a/H_s , sendo H_a dureza do abrasivo e H_s dureza da superfície. Empregando uma média ponderada da dureza das partículas abrasivas, Eq. (5), pode-se calcular a severidade para todas as lamelas abrasivas

$$H_a = V_{\text{sílica}}H_{\text{sílica}} + V_{\text{Hematita}}H_{\text{Hematita}} \quad (5)$$

Onde $V_{\text{sílica}}$ é o volume de sílica na lama e V_{hematita} é o volume de hematita na lama.

A Tabela 7 mostra o valor de severidade para as lamas abrasivas.

Tabela 7 – Valores da relação H_a/H_s de severidade para as lamas abrasivas estudadas.

LAMA	CONCENTRAÇÃO	H_A	H_s	SEVERIDADE
1	100% Sílica	750 - 1200	181	4,14 – 6,63
2	100% Hematita	739 - 1500	181	4,08 – 8,29
3	20% Sílica 80% Hematita	741,2 – 1440	181	4,10 – 7,96
4	80% Sílica 20% Hematita	747,8 - 1260	181	4,13 – 6,96
5	50% Sílica 50% Hematita	744,5 – 1350	181	4,11 – 7,46

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

A severidade mínima em relação ao coeficiente de desgaste (k), são apresentados na Figura 34.

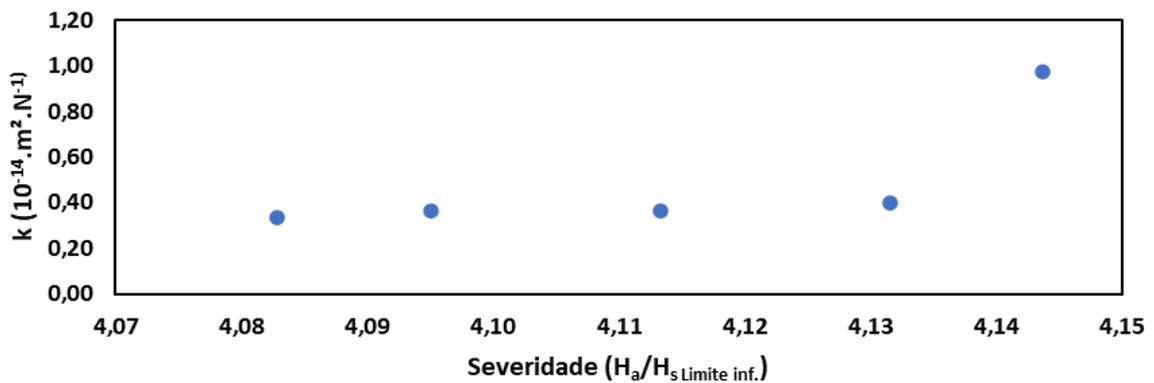


Figura 34 – Coeficiente de desgaste para cada concentração de abrasivo versus severidade.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Conforme pode ser visto na Figura 34 houve pouca ou nenhuma relação entre o coeficiente de desgaste, k, e severidade em abrasão.

Para Shipway e Hutchings (2017) e Garh (1987) as partículas abrasivas de qualquer formato e ou dureza causam arranhões na superfície da amostra. Quando $H_a/H_s > 1,2$ é chamado de abrasão severa, já para a condição de $H_a/H_s < 1,2$ é chamado de abrasão suave, conforme demonstrado na Figura 35.

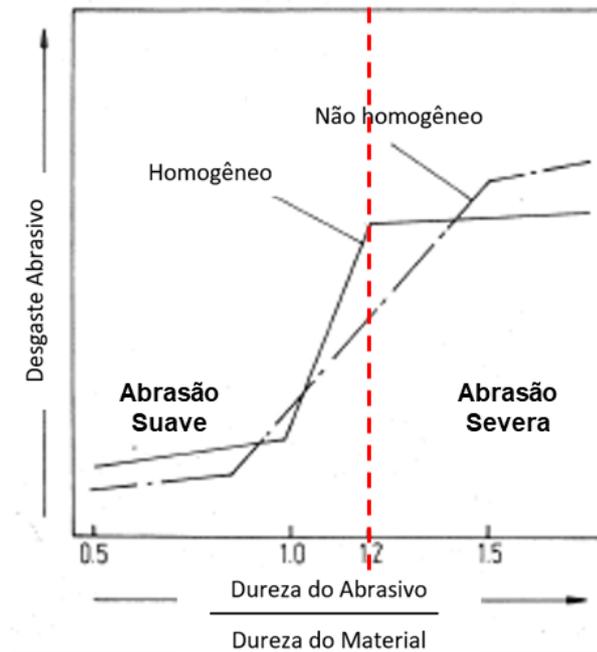


Figura 35 – Severidade em abrasão em função da relação da dureza da partícula e da superfície.

Fonte: Adaptado Gahr (1987, p. 94).

Para os regimes moderado e severo, conforme Figura 35, o aumento ou a diminuição do H_a ou H_s causam variações pequenas nas taxas de desgaste, porém, no regime de transição qualquer variação em umas dessas variáveis faz com que a quantidade material removida, ou seja, o desgaste provocado, suba ou caia de maneira significativa (COZZA, 2011).

Em análise as escalas de regime de severidade apresentados na Tabela 7, todas as lamas abrasivas estão dentro do regime severo de desgaste e as pequenas diferenças na dureza das partículas abrasivas vão ter pouca influência nas taxas de desgaste.

Embora as partículas possuam forma, normalmente, equiaxiais, elas podem assumir outras formas a depender do seu processo de fabricação (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Conforme literatura de Hutchings e Shipway (2017), as partículas angulares causam maiores desgastes que as partículas arredondas.

A Figura 36 apresenta a morfologia de partículas de sílica e hematita encontrado por Silva Júnior (2003). Não são imagens das partículas utilizadas neste trabalho, mas são partículas do mesmo fabricante e com as mesmas características das empregadas neste trabalho.

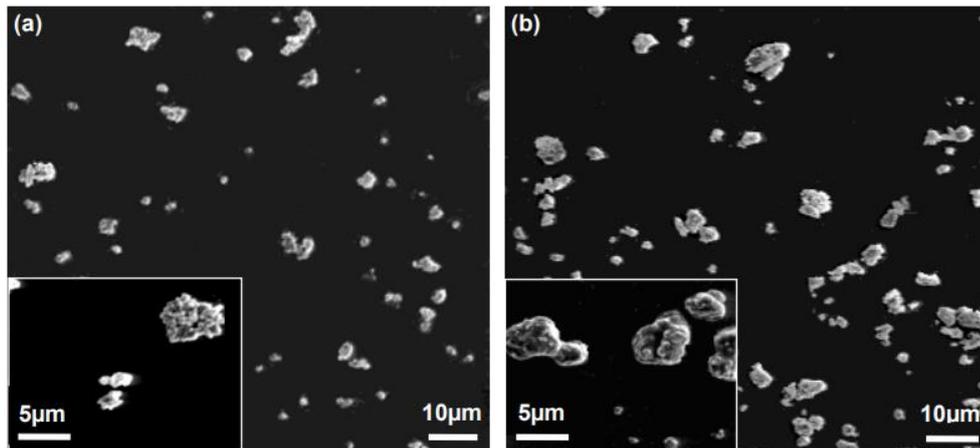


Figura 36 – Morfologia das partículas abrasivas. (a) Hematita. (b) Sílica.
Fonte: Adaptado Silva Júnior (2003).

É possível observar na Figura 36 que as partículas de sílicas apresentam características mais arredondas, ou equiaxiais, que as de hematitas. Sendo assim, é esperado que a sílica provoque menor desgaste em relação as partículas de hematita, para uma mesma granulometria. No entanto, neste trabalho, conforme apresentado na Figura 33, o resultado obtido foi o oposto, a sílica apresentou maior taxa de desgaste.

Por fim, outro fator importante é o comportamento do desgaste abrasivo em função do tamanho da partícula. Mirsa e Finnie (1987) mostraram que o desgaste abrasivo a três corpos e a dois corpos a taxa de desgaste aumento à medida que o diâmetro da partícula aumenta até um valor limite de aproximadamente 100 μm. Para partículas maiores que 100 μm a taxa de desgaste é constante, pois a tensão ou carga por partícula é muito alta e causa a fratura delas.

Gava *et al* (2013) realizou ensaios de microabrasão com três lambras abrasivas diferentes: sílica (SiO₂), carbeto de silício (SiC) e hematita (Fe₂O₃). O tamanho médio das partículas de SiO₂ foi de 2 μm e Fe₂O₃ de 1 μm. O coeficiente de desgaste (k) para as partículas de sílica e hematita encontrado por eles é apresentado na Figura 37.

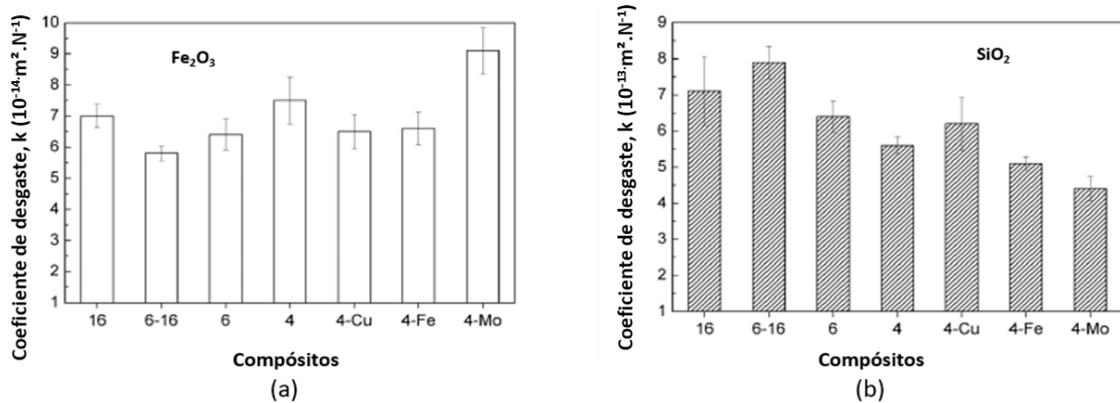


Figura 37 – Coeficiente de desgaste para as partículas abrasivas. (a) Fe₂O₃ (b) SiO₂.
Fonte: Adaptado Gava *et al* (2013).

A Figura 37 mostra que o coeficiente de desgaste obtido utilizando sílica foi uma ordem de grandeza maior que os obtidos com hematita (GAVA *et al*, 2013) em concordância com os resultados do presente trabalho.

Conforme mostrado anteriormente, a hematita foi dominante nos resultados do coeficiente abrasivo para as lamas abrasivas contendo 80%, 50% e 20% de hematita, Figura 33. A dureza bem como a forma das partículas influenciou pouco nos resultados. Portanto, a principal hipótese para as partículas de hematita dominarem o tribosistema pode estar relacionado a diferença de tamanho das partículas.

O resultado de granulometria, Figura 30, mostra que 10% das partículas de hematita possuem tamanho média superior a 10 μm o que não acontece com a sílica. Assim, essas partículas maiores suportam toda a carga de contato o que impede a atuação das partículas menores. A Figura 38 ilustrado esse fenômeno de forma esquemática.

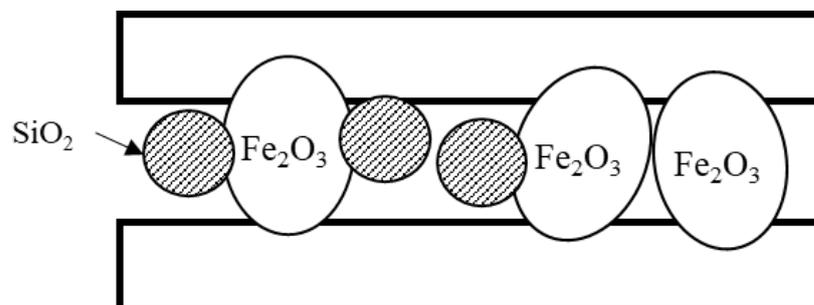


Figura 38 – Comportamento da granulometria das partículas abrasivas entre as duas superfícies.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Como pode ser visto, mesmo que as partículas de sílica apresentam uma maior abrasividade elas não atuam durante o desgaste, algo semelhante ao notado por Williams e Hyncica (1992) ao empregar um filme lubrificante mais espesso que o tamanho médio das partículas. Além disso, de acordo com Mirsa e Finnie (1987), as partículas pequenas têm seu contato com a superfície restrito com a fina camada endurecida, enquanto as partículas suficientemente grandes são capazes de penetrar pela camada dura e deformar um material mais macio e, portanto, desgastam mais.

4.4 Mecanismos de desgaste

Os micromecanismos de desgaste demonstram a forma de interação entre os elementos envolvidos no sistema tribológico estudado, ou seja, as características das partículas abrasivas e da superfície do material, que levam a remoção do material (SILVA JÚNIOR, 2008).

As análises dos mecanismos de desgaste das crateras formadas pelas diferentes concentrações de abrasivos foram conduzidas a partir da microscopia óptica. As Figuras 39-42 apresentam as imagens dos micromecanismos de desgaste para as lamas: 100% sílica; 100% hematita; 80% sílica e 20% hematita; 20% sílica e 80% hematita e 50% sílica e 50% hematita.

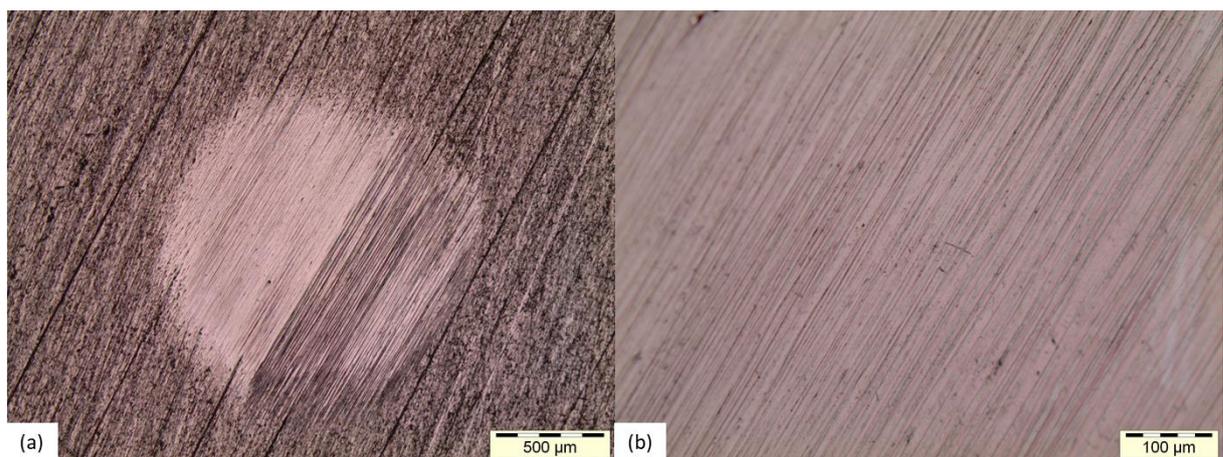


Figura 39 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 100% de Sílica. (b) ampliação do centro da calota.

Fonte: Pesquisa Direta (2022).

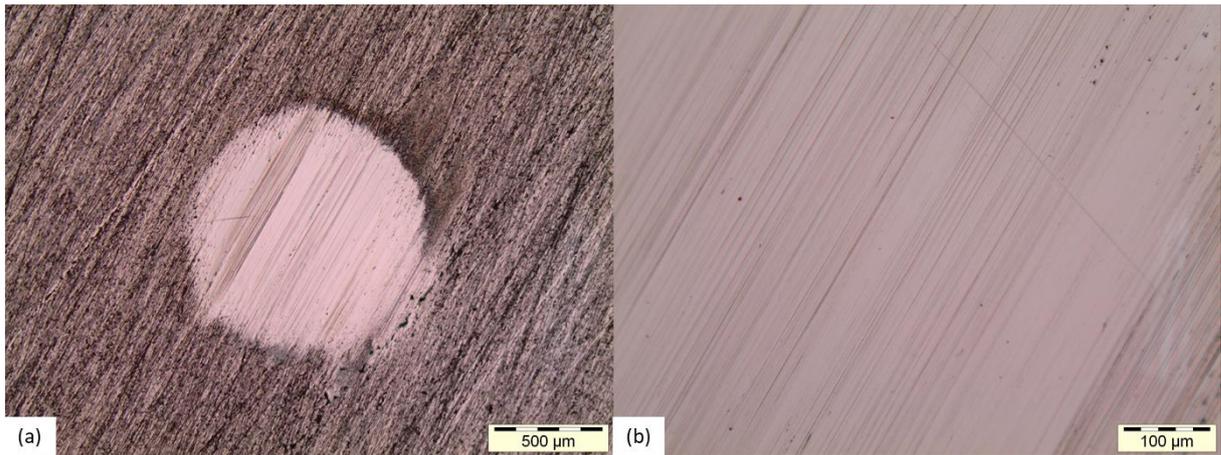


Figura 40 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 100% de Hematita. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

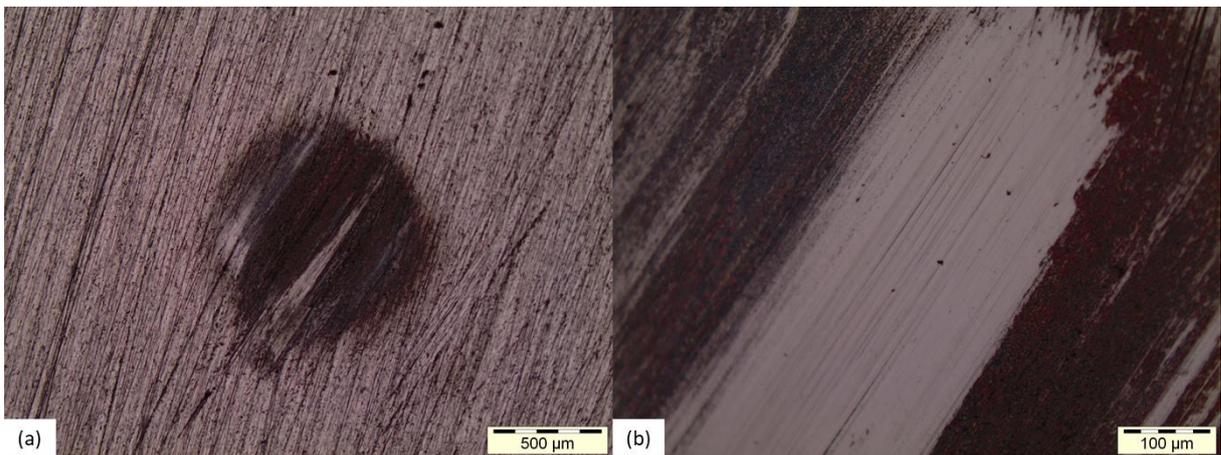


Figura 41 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 80% de Hematita e 20% Sílica. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

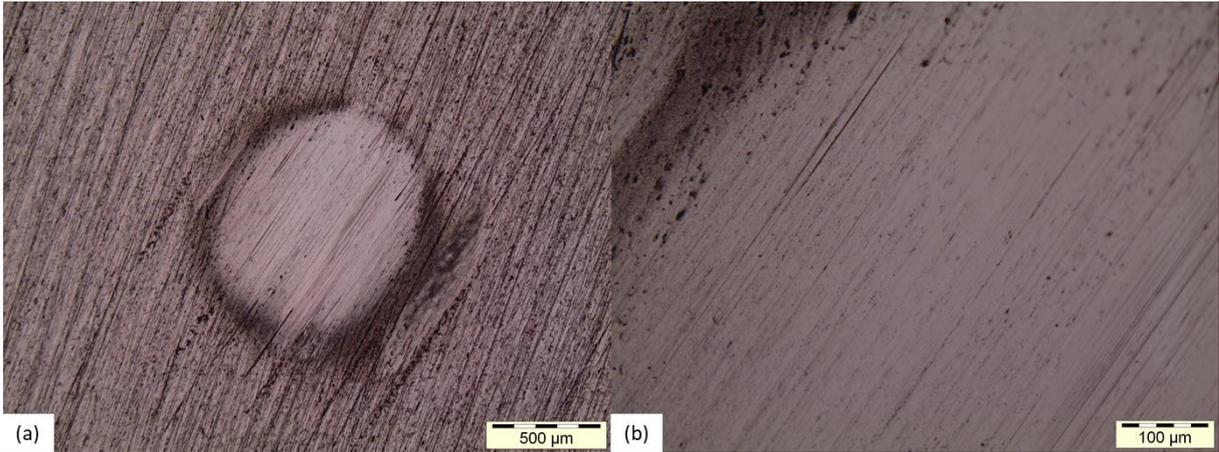


Figura 42 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 20% de Hematita e 80% Sílica. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

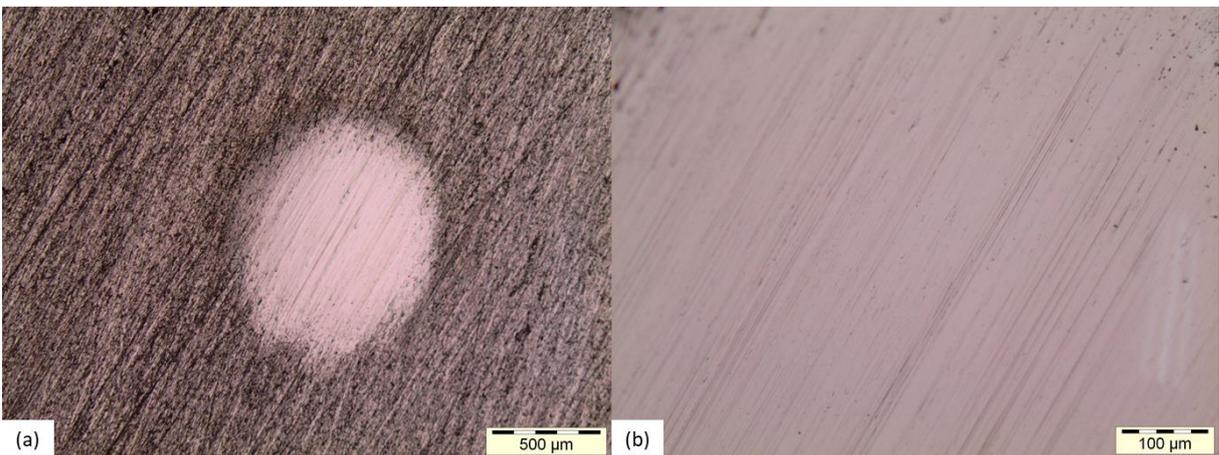


Figura 43 – Análise via microscópio óptico. (a) calota esférica formada pela lama abrasiva composta de 50% de Hematita e 50% Sílica. (b) ampliação do centro da calota.
Fonte: Pesquisa Direta (2022).

Conforme pode ser observado, o modo de desgaste predominante para as diferentes concentrações de lama abrasiva é o riscamento, facilmente identificado pela grande presença de riscos nas superfícies das crateras formadas, ranhuras paralelas e com direcionalidade. Coerente com os estudos de Trezona *et al* (1999), o modo de desgaste foi conforme esperado, visto que, o riscamento é predominante em situações de baixas concentrações de abrasivos e altas cargas.

Os micromecanismos analisados foram microcorte e microsulcamento, ambos estão relacionados ao desgaste moderado e severo, conforme Marin (2010). Além disso, esses micromecanismos estão associados ao modo de desgaste dominante neste trabalho, eles são

oriundos das partículas abrasivas que são arrastadas pelo contato esfera e permanecem, preferencialmente, fixas na superfície da esfera (ADACHI; HUTCHINGS, 2003).

5 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi a análise da taxa de desgaste e dos mecanismos de desgaste do aço inoxidável P410D submetido ao ensaio de microabrasão com lamas abrasivas composta por misturas de sílica e hematita. O motivador foi a pequena quantidade de estudos nesta área que analisam ensaios com mais de uma partícula abrasiva, sendo que esta é uma situação que mais se aproxima do cenário real.

A lama abrasiva composta de 100% sílica apresentou uma taxa de desgaste 190% maior que a lama abrasiva composta exclusivamente de hematita. Resultado semelhante também ao observado na literatura o que sugere que a sílica apresenta uma maior abrasividade que a hematita.

As lamas abrasivas compostas de misturas de sílica e hematita apresentaram valores de taxa de desgaste estatisticamente iguais ao da lama 100% hematita. O que indica uma dominância das partículas abrasivas de hematita. Isso por estar relacionado ao maior tamanho média das partículas abrasivas de hematita que impediram as partículas de sílica de atuarem no contato.

Ao empregar uma mistura de materiais abrasivos na lama o tamanho média das partículas abrasivas se mostrou mais influente que a forma ou dureza das partículas, pelo menos em sistemas de baixa tensão como na microabrasão, pois, as partículas maiores conseguem suportar a carga total e impedem a atuação de partículas menores.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I.M. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. **Wear Elsevier**, Cambridge, v. 255, p. 23-29, set. 2003.

BLAU, Peter J. On the nature of running-in. **Tribology International**, [S.L.], v. 38, n. 11-12, p. 1007-1012, nov. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020>.

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. Laboratório de Tribologia e Materiais, Departamento de Ciências Físicas, Universidade Federal de Uberlândia.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2021. 701 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2008.

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: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021. 222 p.

CZICHOS, H. **Tribology a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. [S.l.: s.n.], 1978.

CZICHOS, Horst. Overview of Tribology: application of measurement and testing to the determination and presentation of friction and wear data. In: CZICHOS, Horst;

HABIG, Karl-Heinz. **Tribologie-Handbuch: tribometrie, tribomaterialien, tribotechnik**. 5. ed. Berlin: Springer Vieweg, 2020. Cap. 1. p. 3-30.

GAHR, K. C. **Microstructure and Wear of Materials**. 10. ed. Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p.

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.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Reino Unido: Elsevier, 2017. 388 p.

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.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 354 p.

MARIN, J. J. C. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MASSOLA, C. P. **Abrasão - Corrosão Em Corpos Moedores Na Moagem De Minério De Ferro**. 2015. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas e Petróleo, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Universidade São Paulo, São Paulo, 2015.

PINTAÚDE, Giuseppe. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaio instrumentados de dureza**. 2002. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, L. M. Theory and Application of a Micro-Scale Abrasive Wear Test. **Journal Of Testing And Evaluation**, Cambridge, v. 25, p. 250-260, mar. 1997.

SILVA JÚNIOR, Washington Martins da. **Efeito da pressão de compactação e tamanho do pó de ferro na abrasão do ferro sinterizado oxidado a vapor**. 2003. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

SILVA JÚNIOR, Washington Martins da. **Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas**. 2008. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Ub, 2008.

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 Elsevier**, Cambridge, v. 1, p. 205-214, maio 1999. University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy.

WILLIAMS, A. J.; HYNICICA, A. M. Abrasive wear in lubricated contacts. **Conference Paper**, Cambridge, v. 25, p. 81-90, 1992. Cambridge University Engineering Department.

WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts. **Wear Elsevier**, Cambridge, v. 152, p. 57-74, jul. 1992. Cambridge University Engineering Department.