



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



GABRIEL RIGUETO FERRARI

**ESTUDO DO IMPACTO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS DE
NATUREZAS E CONCENTRAÇÕES VARIADAS SOBRE O
DESEMPENHO DO PAR TRIBOLÓGICO AÇO P410D E AISI 52100**

OURO PRETO - MG
2025

GABRIEL RIGUETO FERRARI

`gabriel.riguetto@aluno.ufop.edu.br`

`griguetoferrari@gmail.com`

**ESTUDO DO IMPACTO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS DE
NATUREZAS E CONCENTRAÇÕES VARIADAS SOBRE O
DESEMPENHO DO PAR TRIBOLÓGICO AÇO P410D E AISI 52100**

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

Professor orientador: DSc. Edson Alves Figueira Junior.

Professor coorientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles.

OURO PRETO – MG

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F375e Ferrari, Gabriel Rigueto.

Estudo do impacto de partículas abrasivas de naturezas e concentrações variadas sobre o desempenho do par tribológico aço P410D e AISI 52100. [manuscrito] / Gabriel Rigueto Ferrari. - 2025. 60 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves Figueira Junior.

Coorientador: Prof. Dr. Vinícius Carvalho Teles.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Desgaste mecânico - Abrasivos. 2. Aço inoxidável - P410D. 3. Aço - AISI 52100. 4. Sílica. 5. Desgaste mecânico - Microabrasão. I. Figueira Junior, Edson Alves. II. Teles, Vinícius Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Rigueto Ferrari

Estudo do impacto de partículas abrasivas de naturezas e concentrações variadas sobre o desempenho do par tribológico aço p410D e AISI 52100

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

Aprovada em 15 de Agosto de 2025..

Membros da banca

DSc - Edson Alves Figueira Júnior - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Vinicius Carvalho Teles - Universidade Federal de Goiás
DSc - Igor Cezar Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Diogo Antonio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto

Edson Alves Figueira Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2025, às 21:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Cezar Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/08/2025, às 08:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/08/2025, às 12:42, 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 **0962848** e o código CRC **F91F111F**.

Dedico esta conquista a Deus, fonte de força e inspiração em minha jornada. Aos meus pais, pelo apoio constante e inabalável. Aos amigos que caminharam comigo ao longo dessa trajetória e à República Olympo, que me acolheu como uma verdadeira segunda casa.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sua presença constante e por me conceder forças ao longo desta jornada, e à Nossa Senhora de Guadalupe, cuja intercessão foi essencial para a concretização desta conquista.

Aos meus pais, José e Luzia, por todo amor, acolhimento e dedicação, sendo eles minha base, meu alicerce e maiores inspirações.

Às minhas irmãs, Carolina e Vanessa, por sua constante companhia e apoio.

Aos meus Sobrinhos Maria Clara, Samuel e Rafael, por serem as maiores paixões do tio.

Ao meu orientador, DSc. Edson, e ao DSc. Vinícius, registro meu reconhecimento pela orientação e incentivo fundamentais na realização deste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, cujos ensinamentos contribuíram significativamente para minha formação acadêmica.

A DIFERENCIAL E. J. pelo aprendizado e contribuição para meu crescimento profissional.

Aos amigos de Ubá, que mesmo distantes se fazem presentes na minha vida, em especial à Karla, Lavynia, Douglas e Rafaela.

Aos Amigos que conquistei em Ouro Preto: Bino, Bianca, Delano, Estela, Nasa, Kamilla, LED, Papai Noel e Thugo, que compartilharam risadas, conversas e momentos.

À República Olympo, que me proporcionou a vivência da vida republicana e se tornou um verdadeiro lar ao longo dessa trajetória, deixando memórias e aprendizados que levarei comigo para sempre.

“A imaginação é mais importante que o conhecimento, porque o conhecimento é limitado, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.”

Albert Einstein

RESUMO

O desgaste por abrasão é um fenômeno recorrente em diversos processos industriais. Apesar de ser um tema recorrente em pesquisas, a maioria dos estudos concentra-se na investigação de um único abrasivo com características fixas de forma e tamanho. No entanto, em condições operacionais reais, é comum a presença de misturas de partículas com diferentes composições, morfologias e granulometrias. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo examinar a influência da combinação de abrasivos distintos, em diferentes proporções volumétricas, sobre os micromecanismos atuantes e a taxa de desgaste abrasivo no par tribológico formado pelo aço inoxidável ferrítico P410D e o aço AISI 52100. Os ensaios foram realizados por meio do método de microabrasão com esfera rotativa fixa, utilizando como contracorpo uma esfera de aço AISI 52100 com diâmetro de 25,4 mm. As lamas abrasivas foram preparadas com água destilada e concentrações de abrasivo em volume de 1%, 5% e 10%, nas seguintes proporções: 100% sílica; 80% sílica e 20% hematita; 50% sílica e 50% hematita; 20% sílica e 80% hematita; e 100% hematita. Durante os testes, aplicou-se uma carga normal de 1 N e rotação de 100 rpm por intervalos intermitentes de 20 minutos. Ao término, foram determinadas a taxa de desgaste e os micromecanismos prevalentes. A caracterização granulométrica indicou que as partículas de sílica apresentavam tamanho médio de 1,5 μm , enquanto as de hematita possuíam aproximadamente 0,3 μm . Os resultados deste estudo indicam que a composição da suspensão abrasiva afeta diretamente a taxa e os micromecanismos de desgaste no sistema tribológico analisado. Suspensões compostas apenas por sílica ou hematita apresentaram taxas de desgaste similares, devido à semelhança entre suas durezas; no entanto, misturas dessas partículas mostraram variações significativas, especialmente com mais de 50% de sílica, cujas partículas maiores e mais resistentes à fratura intensificam o desgaste abrasivo. Quando a proporção de sílica é reduzida, a taxa de desgaste também diminui, pois suas partículas, em menor quantidade, tendem a se fragmentar sob compressão, enquanto a menor granulometria da hematita favorece sua penetração nas zonas de contato. Além disso, verifica-se que, em baixas concentrações de abrasivo, o desgaste por deslizamento, marcado por microcortes e microsulcamentos, predomina em todas as composições, especialmente nas com alto teor de sílica, com indícios de transição para um regime misto de desgaste.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo, Micromecanismos de desgaste, Mistura de abrasivos, Aço inoxidável P410D, Aço AISI 52100, Sílica, Hematita, Microabrasão.

ABSTRACT

Abrasive wear is a recurring phenomenon in various industrial processes. Despite being a recurring research topic, most studies focus on investigating a single abrasive with fixed shape and size characteristics. However, in real-world operating conditions, mixtures of particles with different compositions, morphologies, and particle sizes are common. In this context, this Final Project aims to examine the influence of combining different abrasives, in different volumetric proportions, on the micromechanisms involved and the abrasive wear rate in a tribological pair consisting of P410D ferritic stainless steel and AISI 52100 steel. The tests were performed using the fixed rotating sphere microabrasion method, using a 25.4 mm diameter AISI 52100 steel sphere as a counterbody. Abrasive slurries were prepared with distilled water and abrasive concentrations by volume of 1%, 5%, and 10%, in the following proportions: 100% silica; 80% silica and 20% hematite; 50% silica and 50% hematite; 20% silica and 80% hematite; and 100% hematite. During the tests, a normal load of 1 N and rotation of 100 rpm were applied for intermittent intervals of 20 minutes. At the end, the wear rate and prevalent micromechanisms were determined. Particle size characterization indicated that silica particles had an average size of 1.5 μm , while hematite particles were approximately 0.3 μm . The results of this study indicate that the composition of the abrasive suspension directly affects the wear rate and micromechanisms in the tribological system analyzed. Suspensions composed solely of silica or hematite exhibited similar wear rates due to their similar hardness; however, mixtures of these particles showed significant variations, especially with silica content greater than 50%, whose larger, more fracture-resistant particles intensify abrasive wear. When the silica content decreases, the wear rate also decreases, as its smaller particles tend to fragment under compression, while hematite's smaller particle size favors penetration into contact zones. Furthermore, at low abrasive concentrations, sliding wear, characterized by microcuts and microgrooves, predominates in all compositions, especially those with a high silica content, with evidence of a transition to a mixed wear regime.

Key-words: Abrasive wear, Wear micromechanisms, Abrasive mixture, P410D stainless steel, AISI 52100 steel, Silica, Hematite, Microabrasion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desgaste abrasivo de dois-corpos e de três corpos.	5
Figura 2: Mecanismos de desgaste por rolamento (a) e deslizamento (b).	6
Figura 3: (a) Relação entre a dureza da partícula abrasiva e a dureza do material desgastado e (b) Desgaste em função da dureza da partícula abrasiva.	7
Figura 4: Tipos de micromecanismos de desgaste.	8
Figura 5: Modelo esquematizado do microindentação.	9
Figura 6: Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) corte em planta.	10
Figura 7: Perda de peso em função do comprimento da trajetória de desgaste para materiais dúcteis.	11
Figura 8: Perda de peso em função da força normal aplicada para materiais dúcteis.	12
Figura 9: Configurações do equipamento de ensaio de microabrasão.	13
Figura 10: Formas das partículas abrasivas: (a) SiC angular e (b) Vidro esférico.	14
Figura 11: Mapa de micromecanismo de desgaste em um ensaio de microabrasão de um aço ferramenta em termo de carga aplicada e concentração de abrasivo. (a) Pasta de SiC F1200. (b) Pasta de alumina F1200.	16
Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental.	21
Figura 13: Equipamento de microabrasão de esfera fixa.	24
Figura 14: Microestrutura do aço inoxidável P410D.	27
Figura 15: Curva de distribuição acumulada da sílica obtida por análise de granulometria a laser.	28
Figura 16: Curva de percentual acumulado da Hematita analisada por granulometria a laser. .	28
Figura 17: Coeficiente de desgaste para cada proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e Nylon.	30
Figura 18: Coeficiente de desgaste para cada proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e Aço AISI 52100.	31

Figura 19: Coeficiente de desgaste para cada proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e Zircônia.	32
Figura 20: Coeficiente de desgaste para cada concentração e proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e aço AISI 52100.	33
Figura 21: Esquema do comportamento das partículas abrasivas entre as duas superfícies.	34
Figura 22: Análise MEV das calotas formadas para as diferentes da lama de abrasivo. (a) 100%SiO ₂ , (b) 80%SiO ₂ +20%Fe ₂ O ₃	36
Figura 23: Análise MEV das calotas formadas para as diferentes da lama de abrasivo. (a) 50%SiO ₂ +50%Fe ₂ O ₃ , (b) 20%SiO ₂ +80%Fe ₂ O ₃	37
Figura 24: Análise MEV das calotas formadas para as diferentes da lama de abrasivo 100% Fe ₂ O ₃	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa específica de cada partícula abrasiva.	17
Tabela 2: Composição química do aço inoxidável P410D.	22
Tabela 3: Propriedades das partículas de abrasivos.	23
Tabela 4: Misturas e concentrações de lamas abrasivas.	23
Tabela 5: Variáveis e indicadores para o ensaio de desgaste abrasivo.	25

LISTA DE SIMBOLOS

α	Ângulo de abertura
ρ	Massa específica
a	Raio de penetração no corte em planta
A	Área real
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
b	Diâmetro da calota
F	Fator de arredondamento da partícula
F_n	Força normal
g	gramas
H	Dureza da superfície desgastada
H_a	Dureza da partícula abrasiva
H_s	Dureza da superfície do material
HV	Dureza Vickers
K	Coefficiente de desgaste
k	Coefficiente de desgaste
m	Massa da substância
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
mg	miligramas

ml	mililitros
mm	milímetros
N	Newton
P	Perímetro
R	Raio da esfera rotativa
rpm	Rotação por minuto
S	Distância de deslizamento
v	Volume ocupado da substância
V	Volume de material removido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Desgaste abrasivo	5
2.2	Microabrasão	7
2.2.1	Micromecanismo de desgaste.....	7
2.2.2	Ensaio de microabrasão	12
2.3	Efeito das partículas abrasivas.....	14
2.3.1	Efeito da forma e tamanho das partículas abrasivas.....	14
2.3.2	Concentração das partículas abrasivas	16
2.4	Aço Inoxidável	18
3	METODOLOGIA.....	20
3.1.1	Tipo de pesquisa	20
3.2	Materiais e Métodos	21
3.2.1	Preparação das amostras	21
3.2.2	Concentração volumétrica dos abrasivos	22
3.2.3	Ensaio de desgaste microabrasivo	24
3.2.4	Análise da dureza, microestrutura e micromecanismos de desgaste	25
3.3	Variáveis e Indicadores	25
3.4	Instrumentação e Coleta de Dados	26
3.5	Tabulação e Análise de Dados.....	26
3.6	Considerações Finais	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Caracterização da Microestrutura da Amostra	27
4.2	Análise da Granulometria.....	28
4.3	Ensaio de Microabrasão.....	29

4.3.1	Resultados anteriores	29
4.3.2	Resultado da Taxa de desgaste	32
4.4	Micromecanismo de desgaste	35
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	39
5.1	Conclusão	39
5.2	Recomendações	40
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Conforme Eyre (1978) estima-se que aproximadamente 50% dos desgastes ocorridos no ambiente industrial sejam decorrentes de mecanismos abrasivos e que, embora o desgaste raramente resulte em falhas catastróficas, seus efeitos são significativos, pois comprometem a eficiência operacional, elevam os custos com manutenção, intensificam as perdas energéticas e aumentam o consumo de lubrificantes.

O desgaste de um material, segundo Hutchings e Shipway (2017), é a perda gradual de material da superfície de um sólido devido ao contato e ao movimento em relação a outros sólidos, líquidos ou gases, na qual tais fenômenos estão relacionados à dissipação de energia e à remoção progressiva de material ao longo do tempo. Todavia, consoante com Zum Gahl (1987), o atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim consequências da interação de um sistema como todo. As superfícies de contato, os elementos intermediários a eles e o meio onde estão inseridos são compreendidos como tribossistema (CZICHOS,2020).

De acordo com Teles *et al.* (2017), Trezona *et al.* (1999) e Rutherford & Hutchings (1995), em análises laboratoriais de desgaste abrasivo é comum a utilização de abrasivos homogêneos e padronizados. Contudo, esses autores afirmam que, em aplicações reais, o meio abrasivo é heterogêneo, composto por partículas de distintas composições, morfologias, granulometrias e concentrações distintas. Tais simplificações são essenciais para obter um maior controle sobre o experimento laboratorial, possibilitando uma compreensão mais precisa dos resultados (TELES *et al.*, 2017; TREZONA *et al.*, 1999; RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1995).

Todavia, recentemente, houve a condução de alguns trabalhos envolvendo a mistura de partículas abrasivas: ora de mesmo material com granulometrias diferentes, como o carbetto de silício (SiC) de 2 e 6 μm em diferentes proporções no par tribológico aço ASTM 1020 e aço AISI 52100 s (GOMEZ *et al.*, 2015; e ESTEVES *et al.*, 2021), ora uma mistura de materiais diferentes, como hematita (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2) no corpo de aço inoxidável P410D e contracorpos de aço AISI 52100, nylon e zircônia (LISBOA, 2022; CEZAR, 2022; ROWE, 2023). Esses trabalhos mostraram que quando a lama abrasiva é composta de 80% sílica e 20%

hematita a taxa de desgaste é máxima. Também foi observado que à medida que o volume de sílica diminui a taxa de desgaste diminui.

É evidente que a grande quantidade de variáveis envolvidas torna o processo de desgaste abrasivo complexo e de difícil previsão. Nesse sentido, a investigação do desgaste abrasivo utilizando misturas de partículas abrasivas e diferentes concentrações volumétricas podem contribuir para uma compreensão mais aprofundada dos sistemas tribológicos. Diante disso, este trabalho busca responder à seguinte questão:

Qual é a influência da combinação de partículas abrasivas de naturezas e concentrações volumétricas diferentes sobre os micromecanismos e a taxa de desgaste abrasivo no sistema tribológico composto por aço inoxidável P410D e aço AISI 52100?

1.2 Justificativa

Em concordância com Hutchings e Shipway (2017), a remoção de material e mudança de forma gerados a partir do desgaste abrasivo é um estudo constante no setor industrial para amenizar custos de manutenção e gastos energéticos. Assim como descreve Zum Gahr (1987) que o desgaste abrasivo não é intrínseco ao material e sim ao sistema tribológico como todo, a compreensão do comportamento dos materiais sob os efeitos da diversidade do meio à qual ela está inserida faz-se necessário para a seleção de materiais resistentes ao desgaste e para o desenvolvimento de tecnologias na área.

A maioria dos trabalhos conduzidos a este segmento empregam-se apenas partículas abrasivas de mesma natureza. No entanto, em situações reais, ocorre a atuação simultânea de diversos tipos de partículas abrasivas, que promovem o desgaste do material ao mesmo tempo. Em estudo recente (LISBOA, 2022; CEZAR, 2022; ROWE, 2023) observou-se que a pasta abrasiva com 80% de sílica e 20% hematita resultou no desgaste mais elevado, ao passo que a lama contendo somente hematita apresentou o menor coeficiente de desgaste.

Segundo Trezona *et al.* (1999), a concentração de partículas abrasivas pode alterar os mecanismos de desgaste abrasivo em microabrasão. Para altas cargas e baixas concentrações o mecanismo predominante foi o deslizamento das partículas, na qual as partículas se fixam na superfície da esfera causando riscos paralelos na superfície da amostra. Porém, baixas cargas e altas concentrações acarreta o rolamento das partículas entre a esfera e o corpo e causando indentações múltiplas. Para valores de carga e concentrações intermediárias ocorre um misto entre os dois mecanismos de desgaste, deslizamento e rolamento das partículas abrasivas. Os

resultados desse autores também mostraram que, para uma mesma força normal, à medida que aumenta a concentração de abrasivos aumenta-se a taxa de desgaste até um determinado valor. Para concentrações maiores a esse valor as taxas de desgaste começam a cair.

Embora os resultados mostrem que as misturas de partículas abrasivas tornam o sistema mais complexo, ainda não infere sobre os efeitos da concentração volumétrica de partículas abrasivas ao par tribológico composto por aço inoxidável P410D e aço AISI 52100. Diante disso, fez-se necessário este estudo para melhor compreensão do tribossistema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Investigar a influência da combinação de partículas abrasivas de diferentes naturezas e concentrações volumétricas sobre os mecanismos de desgaste e o coeficiente de desgaste em ensaios de microabrasão aplicados ao aço inoxidável ferrítico P410D.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o desgaste por microabrasão, os tipos de partículas abrasivas e as propriedades do aço inoxidável ferrítico P410D;
- Desenvolver uma metodologia experimental para analisar os micromecanismos de desgaste e a taxa de desgaste abrasivo no sistema tribológico composto por aço inoxidável P410D e aço AISI 52100;
- Investigar a influência da lama abrasiva, composta por misturas de sílica e hematita, com concentrações volumétricas distintas, nos micromecanismos e na taxa de desgaste, considerando as características granulométricas das partículas;
- Avaliar os micromecanismos atuantes e a taxa de desgaste em ensaios de microabrasão sob diferentes condições experimentais.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em cinco capítulos que delineiam de forma lógica e coesa o desenvolvimento da pesquisa. O Capítulo 1 corresponde à introdução, na qual são apresentados o contexto do estudo, a delimitação do problema, a justificativa da pesquisa, os objetivos: geral e específicos, além da descrição da estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão de literatura, abordando os fundamentos teóricos sobre desgaste abrasivo e microabrasão, os principais micromecanismos envolvidos, os métodos de ensaio utilizados e a influência das partículas abrasivas nos processos de desgaste.

No Capítulo 3, são descritos os procedimentos metodológicos adotados, incluindo os materiais, os parâmetros dos ensaios e a abordagem experimental para avaliar os efeitos das diferentes proporções volumétricas de partículas abrasivas.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos quanto às taxas de desgaste e aos micromecanismos predominantes, com base na análise crítica dos dados experimentais. Por fim, o Capítulo 5 contempla as considerações finais, destacando as principais conclusões do estudo e propondo direções para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desgaste abrasivo

Zum Gahr (1987) e Hutchings & Shipway (2017) definem o desgaste abrasivo como o processo de remoção ou deslocamento de material de uma ou ambas as superfícies em contato, submetidas a movimento relativo, em decorrência da ação de partículas duras ou de protuberâncias rígidas presentes na superfície oposta. O desgaste por abrasão é classificado de duas maneiras principais: na abrasão à dois-corpos, o material é removido por partículas duras ou saliências rígidas aderidas à superfície oposta; já na abrasão à três-corpos, partículas abrasivas soltas se interpõem entre duas superfícies em movimento relativo, podendo tanto rolar quanto deslizar entre elas (ZUM GAHR, 1987, GATES, 1998; TREZONA *et al.*, 1999; HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017). A Figura 1 mostra as diferenças do desgaste abrasivo de dois-corpos com a de três-corpos.

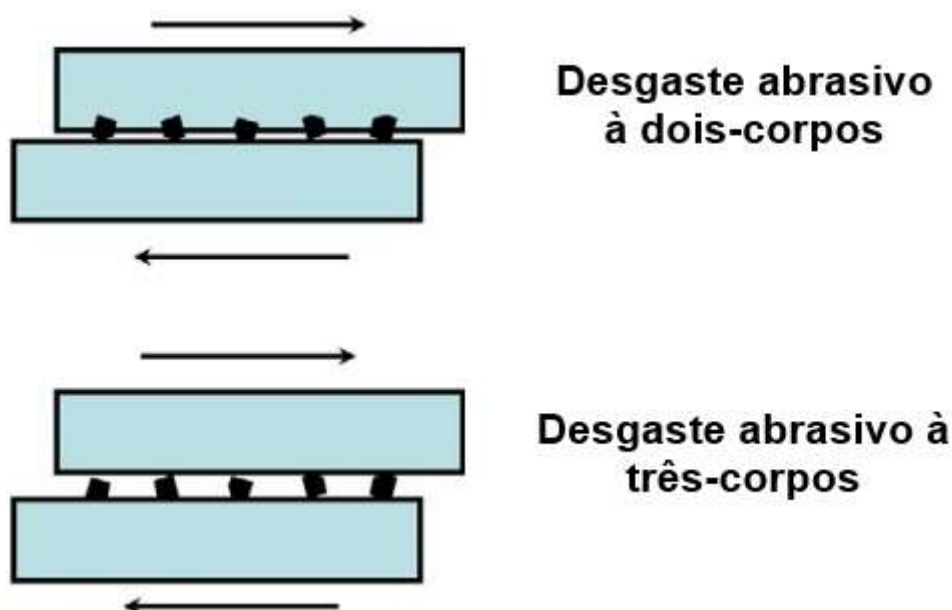


Figura 1: Desgaste abrasivo de dois-corpos e de três corpos.
Fonte: Adaptado de Hutchings & Shipway (2017).

Conforme ilustrado na Figura 1, no desgaste do tipo dois-corpos, partículas duras ou saliências rígidas presentes no contracorpo deslizam diretamente sobre a superfície, promovendo a remoção ou deformação de material da superfície do corpo. Um exemplo desse processo é o lixamento metalográfico de amostras. Já no desgaste à três-corpos, a ação ocorre por meio de partículas abrasivas soltas que se interpõem entre as superfícies que podem rolar entre as superfícies ou deslizar. Um exemplo prático seria o processo de polimento de amostras na metalografia. No entanto, Trezona *et al.* (1999) ressaltam que a distinção entre partículas

fixas e soltas não é suficiente para descrever completamente o desgaste abrasivo, pois partículas soltas podem tanto deslizar quanto rolar entre as superfícies e esse dinâmica dependerá da força normal e fração volumétrica de abrasivos no contato. Em alguns casos, uma mesma partícula pode alternar entre esses dois tipos de movimento ao longo da região de contato. A figura 2 mostra os mecanismos de desgaste por deslizamento e de rolamento.

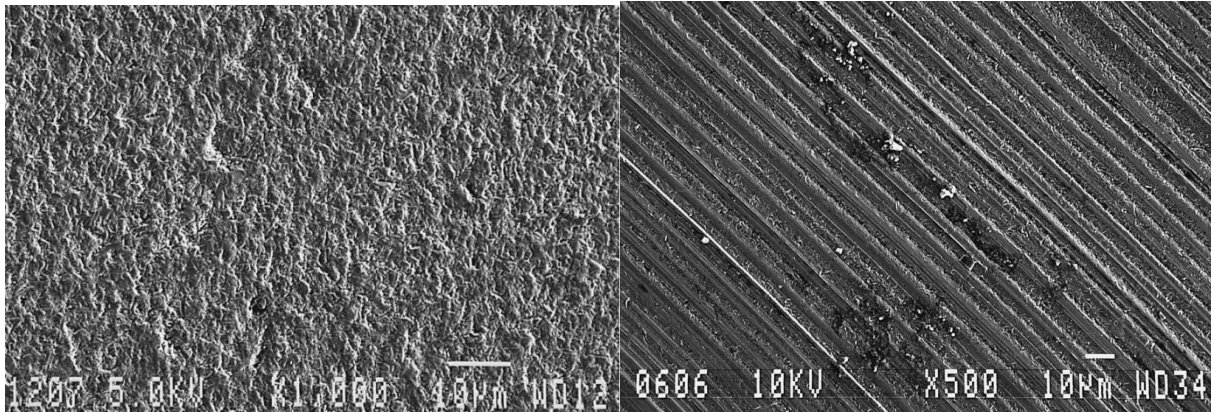


Figura 2: Mecanismos de desgaste por rolamento (a) e deslizamento (b).
Fonte: Adaptado de Trezona (1999).

De acordo com a figura 2, os mecanismos de desgaste de rolamento (a) apresentam indentações múltiplas (semelhante a impressão de dureza), enquanto o desgaste por deslizamento apresenta uma série de riscos paralelos. Apesar disso, segundo Hutchings e Shipway (2017) os mecanismos desgaste abrasivo pode apresentar de forma mista.

O desgaste abrasivo pode ser classificado de acordo com sua intensidade em abrasão severa ou suave. Na abrasão suave, as partículas abrasivas sofrem fratura devido à alta tensão aplicada, fragmentando-se durante o processo e, por outro lado, na abrasão severa, as partículas mantêm sua integridade estrutural (ZUM GARH, 1987; HUTCHINGS & SHIPWAY, 2017).

Conforme os estudos de Uetz e Fohl (1969) e Wellinger (1955), a severidade do desgaste abrasivo está diretamente relacionada à razão entre a dureza da partícula abrasiva (H_a) e a dureza da superfície do material que sofre o desgaste (H_s). Essa razão, H_a/H_s , influencia o modo como o material é removido da superfície: quando a dureza da partícula é apenas ligeiramente superior à da superfície, o desgaste tende a ocorrer de forma mais branda, com pouca fratura da partícula e, à medida que essa razão aumenta, o desgaste se torna mais agressivo, caracterizando um regime de abrasão severa, com maior remoção de material e possível fraturamento das partículas abrasivas. A Figura 3 ilustra a taxa de desgaste durante a transição entre os regimes de abrasão suave e severa, tanto para materiais homogêneos quanto para materiais heterogêneos com dureza equivalente, destacando como a microestrutura também pode influenciar o comportamento do desgaste.

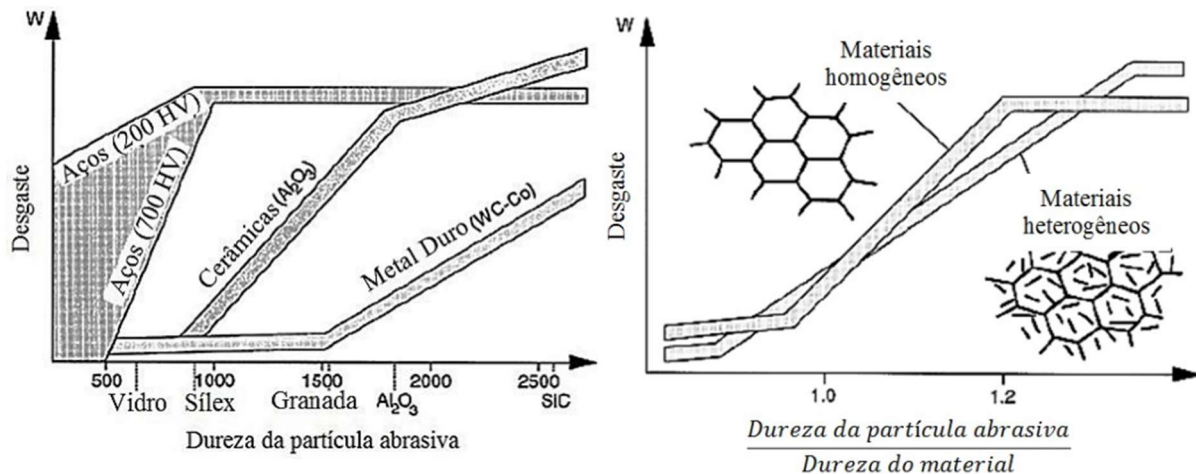


Figura 3: (a) Relação entre a dureza da partícula abrasiva e a dureza do material desgastado e (b) Desgaste em função da dureza da partícula abrasiva.
Fonte: Adaptado de Zum Garh (1987).

A Figura 3 mostra que, em materiais homogêneos, quando a dureza do abrasivo é igual ou inferior à da superfície ($H_a/H_s \leq 1$), o desgaste ocorre de forma branda devido à degradação das partículas abrasivas. No entanto, quando o abrasivo é significativamente mais duro, o desgaste torna-se severo, com maiores taxas de remoção de material. Em materiais heterogêneos, a presença de fases duras torna essa transição mais gradual. Além disso, observa-se que, com abrasivos de alta dureza (acima de 1000 HV), as diferenças nas taxas de desgaste entre aços se tornam pouco perceptíveis, mesmo em ligas de alta dureza. Já para cerâmicas e metais duros, é necessário utilizar partículas abrasivas com dureza superior a 1000 HV e 1500 HV, respectivamente, para que se possa avaliar adequadamente suas propriedades tribológicas (ZUM GAHR, 1998).

2.2 Microabrasão

2.2.1 Micromecanismo de desgaste

Segundo Zum Gahr (1987) e Silva (2008), o desgaste abrasivo está associado a cinco micromecanismos de desgaste abrasivo: microcorte, microsulcamento, microfadiga, microtrinca e indentações múltiplas, na qual cada um desses mecanismos representa um tipo específico de interação entre as partículas abrasivas (ou asperidades) e a superfície do material, resultando em diferentes padrões de desgaste. Silva (2008) indaga que a compreensão desses processos é fundamental para a correta interpretação dos fenômenos envolvidos na abrasão. A Figura 4 apresenta quatro desses modos de interação durante o movimento deslizante das partículas entre as superfícies em contato.

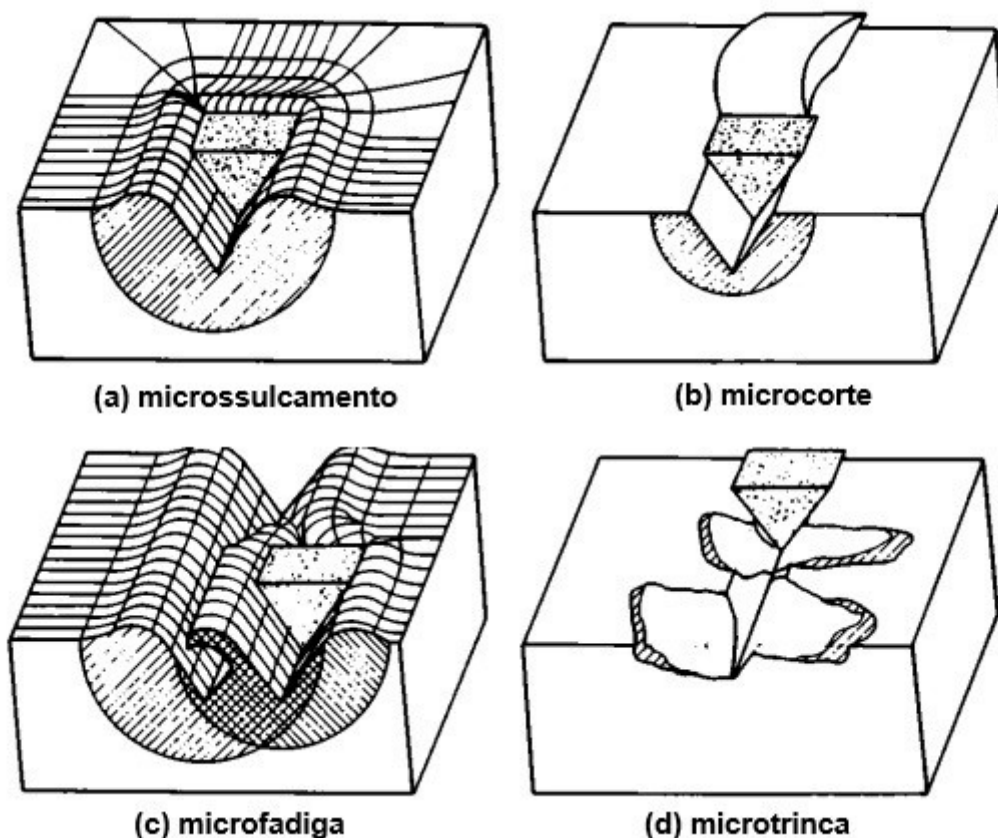


Figura 4: Tipos de micromecanismos de desgaste.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Segundo Mulhearn & Samuels (1962) e Zum Gahr (1987), no microsulcamento ideal, uma única partícula abrasiva apenas deforma o material, deslocando-o lateralmente sem removê-lo.

No entanto, Zum Gahr (1987) destaca que, sob a ação repetida de múltiplas partículas abrasivas, o material pode sofrer fratura por fadiga de baixo ciclo, o que resulta na perda progressiva de massa em virtude do destacamento de fragmentos. Por sua vez, o micromecanismo de microcorte atua de forma distinta, removendo material diretamente por cisalhamento e formando sulcos cuja profundidade e volume estão diretamente relacionados à severidade do desgaste (ZUM GAHR, 1987).

O microtrincamento ocorre, sobretudo, em regiões sujeitas a elevadas concentrações de tensões, favorecendo a nucleação e a propagação de trincas, principalmente em materiais de comportamento frágil. (MULHEARN e SAMUELS, 1962; ZUM GAHR, 1987).

Já em materiais dúcteis, observa-se uma predominância de microsulcamento e microcorte como principais mecanismos de remoção de material. Ressalta-se que a transição entre esses micromecanismos depende, entre outros fatores, do ângulo de ataque das partículas

abrasivas durante o contato com a superfície. Além dos micromecanismos previamente mencionados, há também aquele associado ao desgaste abrasivo por rolamento, denominado microindentação. Esse mecanismo está representado de forma esquemática na Figura 5.

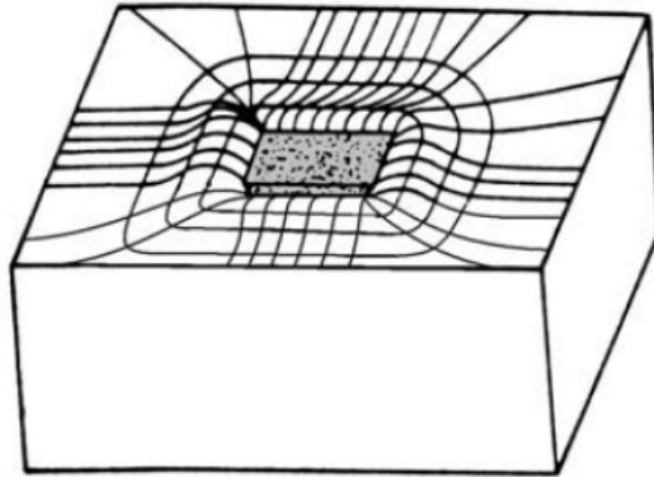


Figura 5: Modelo esquematizado do microindentação.
Fonte: da Silva (2008).

De acordo com Silva (2008), no mecanismo de microindentação, a remoção de material ocorre quando partículas abrasivas entram em contato com a superfície sob determinada carga, sem apresentar movimento relativo significativo (deslizamento). Conforme o autor, esse contato provoca deformações plásticas localizadas. À medida que múltiplas partículas atuam sobre a superfície, ocorre o acúmulo de deformações até o esgotamento da capacidade plástica do material, resultando na perda de massa.

Segundo Hutchings e Shipway (2017), os micromecanismos envolvidos no desgaste abrasivo podem incluir tanto deformação plástica quanto fratura frágil. O autor indaga que, embora, em certas condições, a deformação plástica ocorra de forma isolada, é comum que ambos os mecanismos atuem simultaneamente, inclusive em materiais com comportamento aparentemente frágil. Apesar de existirem modelos desenvolvidos para descrever separadamente cada um desses mecanismos, ainda não se considera, de forma integrada, a influência mútua entre eles. A figura 6 sugere um modelo para o desgaste abrasivo em materiais dúcteis.

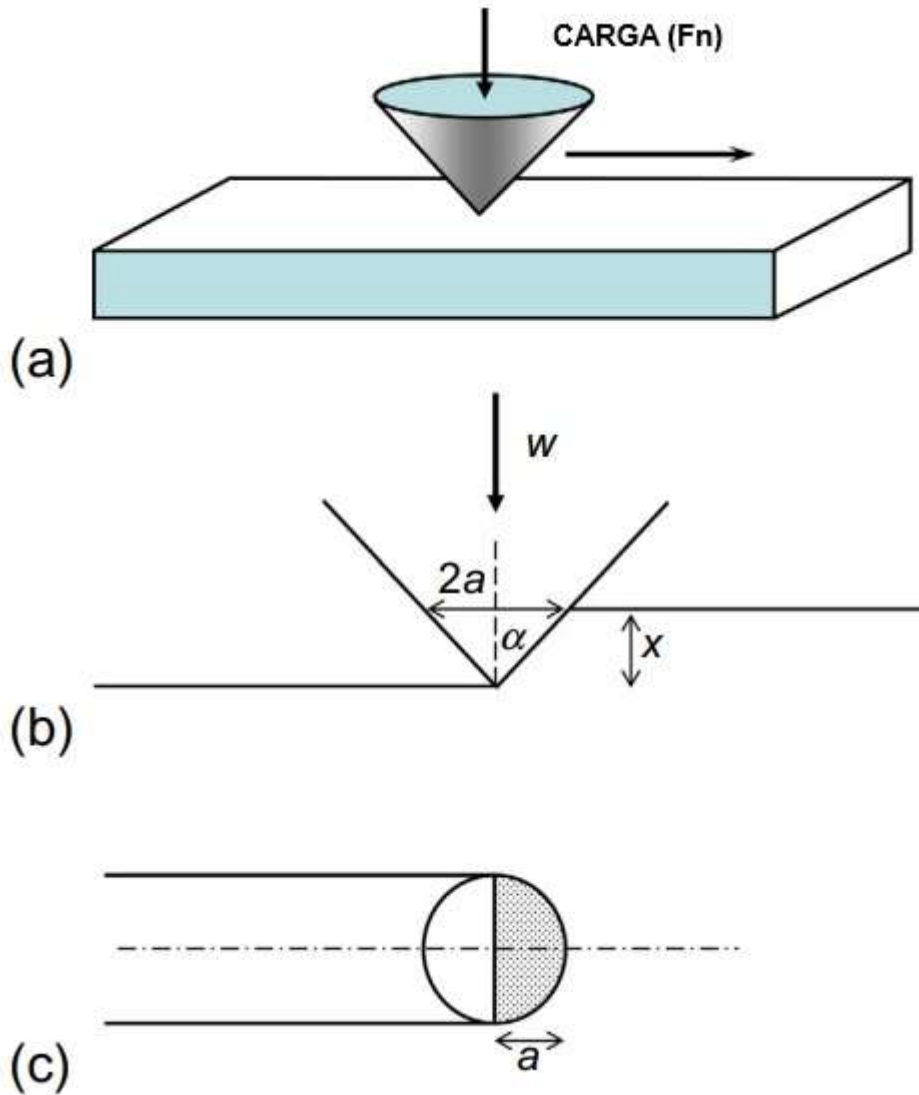


Figura 6: Geometria de contato entre uma partícula abrasiva cônica idealizada e uma superfície: (a) vista em perspectiva; (b) seção em elevação; (c) corte em planta.

Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017, p. 175).

O modelo apresentado na figura 6 considera uma partícula abrasiva com geometria cônica e ângulo de abertura α , que se desloca sobre a superfície de um material dúctil sob a ação de uma força normal F_n , promovendo a formação de um sulco no material (HUTCHINGS E SHIPWAY,2017). O volume perdido é descrito pela equação 1.

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

Onde V representa o volume de material removido, K é o coeficiente de desgaste, S a distância deslizada, F_n a força normal aplicada sobre a partícula e H a dureza da superfície desgastada. O coeficiente de desgaste K , que é adimensional, serve para quantificar a intensidade do desgaste abrasivo (HUTCHINGS E SHIPWAY,2017). Para Rabinowicz, Dunn

e Russell (1961) em testes comparativos realizados em condições semelhantes (carga, tamanho do abrasivo, distância deslizada, etc.), observa-se que o valor de K para desgaste abrasivo de dois corpos varia entre 10^{-1} e 10^{-2} , enquanto no desgaste de três corpos esse valor é cerca de uma ordem de magnitude menor, situando-se entre 10^{-2} e 10^{-3} considerando que a geometria dos grãos abrasivos é a mesma em ambos os casos. Esses autores acreditam que, nos testes de três corpos os abrasivos passam aproximadamente 90% do tempo rolando, sem causar desgaste, e apenas cerca de 10% do tempo deslizando, o que resulta na remoção de material tanto do corpo quanto do contracorpo (RABINOWICZ, DUNN e RUSSELL, 1961).

Usualmente, a equação 1 pode ser simplificada, de forma a facilitar a comparação das durezas de diferentes materiais, para a equação 2.

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

Na qual k é o coeficiente de desgaste, porém, nesse caso, possui unidade de medida dada em $\text{m}^3/\text{N.m}$ (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017). Misra e Finnie (1981) demonstram, de forma experimental, a relação da perda de massa para amostras de aço AISI 1020, alumínio e cobre em função do comprimento da trajetória de desgaste, nas quais são descritas no gráfico apresentadas na figura 7.

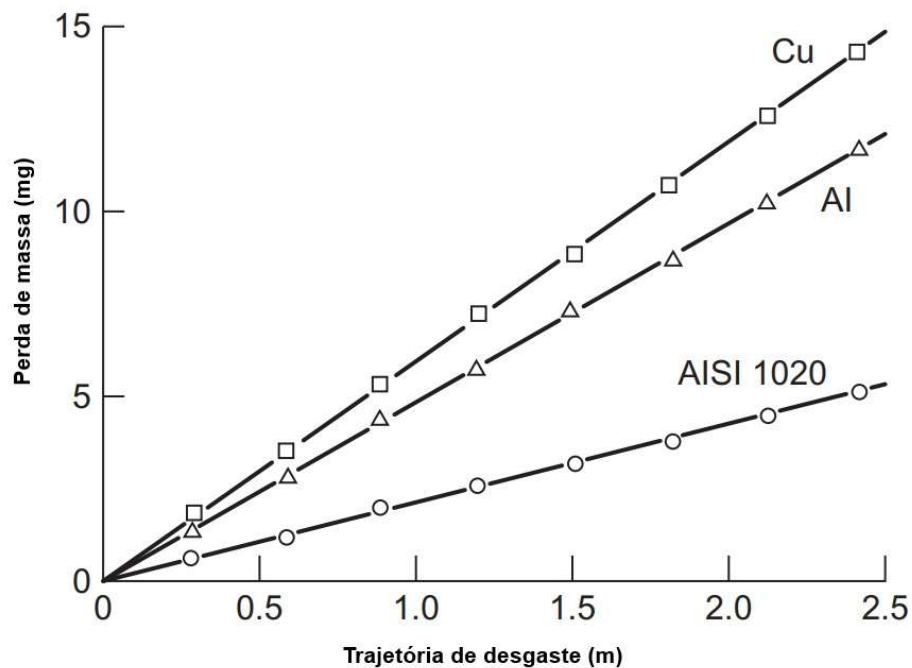


Figura 7: Perda de peso em função do comprimento da trajetória de desgaste para materiais dúcteis. Fonte: Adaptado de Misra e Finnie (1981).

Conforme a Figura 7, observa-se uma relação linear da perda de massa com a distância deslizada para os tribosistemas estudados. A inclinação das retas é um indicativo do coeficiente de desgaste, cujo quanto mais inclinado a reta for maior é o valor de k .

Além disso, Missa e Finnie (1891) observaram a relação da perda de massa em relação a força normal aplicada. A figura 8 mostra o gráfico dessa relação.

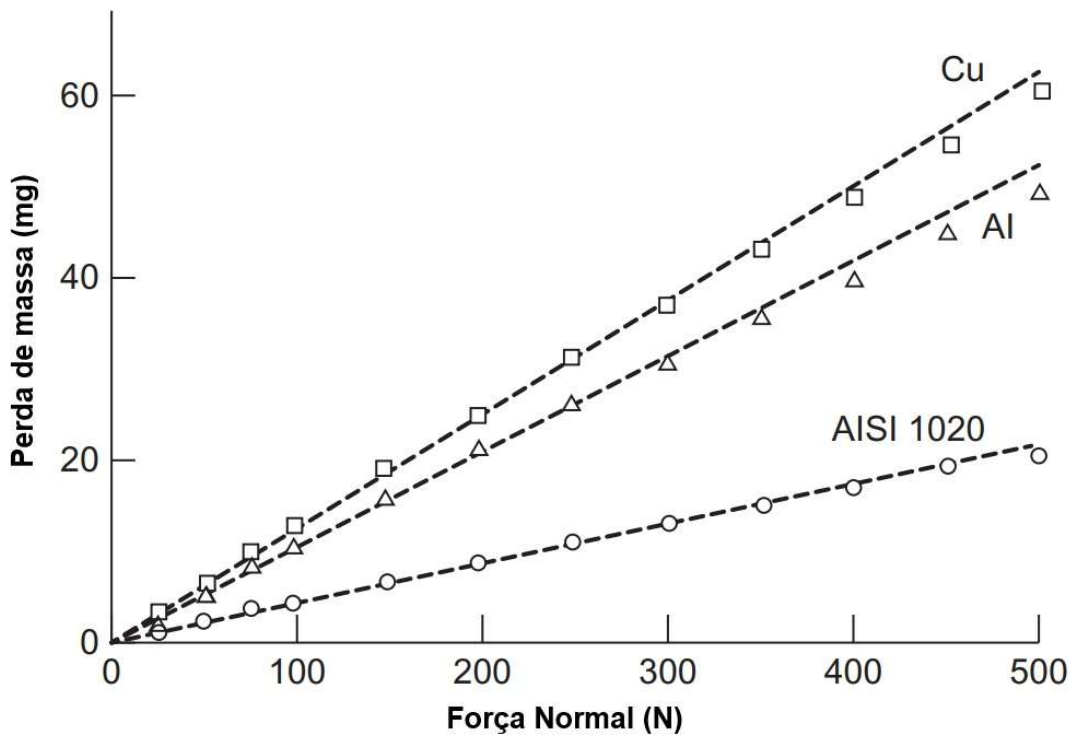


Figura 8: Perda de peso em função da força normal aplicada para materiais dúcteis.
Fonte: Adaptado de Misra e Finnie (1981).

Pelo gráfico da figura 8, também pode ser visto que a perda de massa exibe uma variação linear em função da carga. Tais constatações corroboram a experiência prévia, validando a expressão da taxa de desgaste como a perda volumétrica por unidade de carga e por unidade de distância percorrida (MISRA E FINNIE, 1981).

2.2.2 Ensaio de microabrasão

De acordo com Rutheford e Hutchings (1996), com o avanço da tecnologia, observa-se uma tendência à miniaturização de sistemas, componentes e peças, além da aplicação localizada de materiais especiais. Os autores indagam que essa evolução gerou a necessidade de desenvolver técnicas de ensaio capazes de avaliar pequenas quantidades de material, já que os métodos convencionais de abrasão não são adequados para volumes reduzidos. Em resposta a

essa demanda, foram criados ensaios em escala micrométrica para caracterização do desgaste, conhecidos como ensaios de microabrasão (Rutherford e Hutchings, 1996).

Segundo Gava *et al.* (2013), a microabrasão é um método tribológico em escala reduzida que permite a realização de testes de desgaste abrasivo de forma rápida, econômica e pontual, sendo especialmente útil para amostras de pequenas dimensões. De acordo com Rutherford e Hutchings (1996), esse ensaio consiste na rotação de uma esfera de raio R sobre a superfície da amostra, com a presença de uma suspensão abrasiva entre ambos. À medida que a esfera gira, forma-se uma cratera na amostra, cuja geometria reflete o contorno esférico do corpo contracorpo. A figura 6 apresenta as configurações básicas do equipamento.

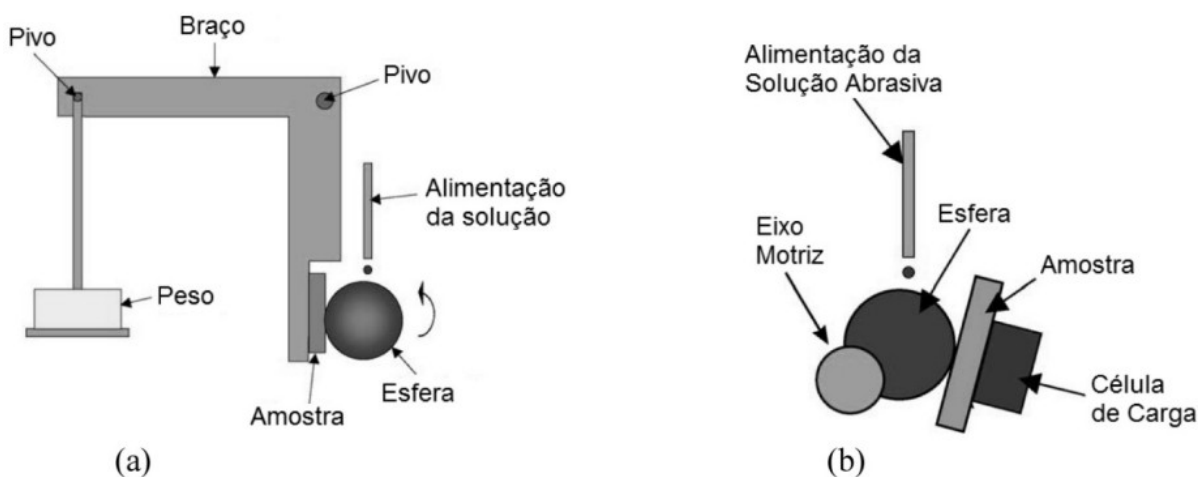


Figura 9: configurações do equipamento de ensaio de microabrasão.
Fonte: Adaptado de Santos (2015)

A figura 9 (a) apresenta a configuração do equipamento com esfera fixa, enquanto o equipamento (b) possui a configuração de esfera livre. Conforme Rutherford & Hutchings (1997) e Trezona *et al.* (1999), enquanto a primeira configuração a força normal é aplicada por um sistema de alavanca e peso morto, no segundo a força normal depende da massa da esfera e da inclinação da superfície da amostra com o contracorpo.

Além disso, Rutherford e Hutchings (1997) indagam que, para o ensaio de microabrasão, é necessário o controle da rotação da esfera entre 100 e 150 rpm, o que corresponde a uma velocidade tangencial em torno de 0,1 m/s, sendo a suspensão abrasiva aplicada à razão de aproximadamente 3 a 5 gotas por segundo. A região de desgaste resultante assume a forma de uma calota esférica, cujo raio corresponde ao da esfera utilizada no ensaio. (RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1997).

O volume do material desgastado pode ser estimado a partir da equação 3:

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

De acordo com a equação 3, o volume do material desgastado (V) pode ser mensurado a partir da função do diâmetro da calota desgastada (b) e o raio da esfera (R) que o originou. Com isso, através da relação entre as equações 2 e 3 e realizando as transformações algébricas, é possível calcular a taxa de desgaste k, descrita na equação 4.

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

Segundo Trezona *et al.* (1999), o ensaio de microabrasão se destaca entre outros testes de abrasão porque permite controlar o mecanismo de desgaste dominante, seja ele o deslizamento ou o rolamento das partículas abrasivas. É fundamental ressaltar que o mecanismo de desgaste final é significativamente influenciado pelos materiais da amostra, do contra corpo e da própria partícula abrasiva (TREZONA *et al.*, 1999).

2.3 Efeito das partículas abrasivas

2.3.1 Efeito da forma e tamanho das partículas abrasivas

Segundo Hutchings e Shipway (2017), a forma e o tamanho das partículas abrasivas são fatores essenciais que afetam diretamente os mecanismos e as taxas de desgaste, pois partículas angulosas e irregulares promovem maior corte e sulcamento em comparação às esféricas, enquanto partículas maiores intensificam a perda de massa; contudo, essa relação não é linear, já que partículas muito pequenas (abaixo de 100 µm) tendem a reduzir a taxa de desgaste, estabilizando-se acima desse tamanho. A figura 10 apresenta a imagem dos dois tipos de forma de partículas no seu estado extremo.

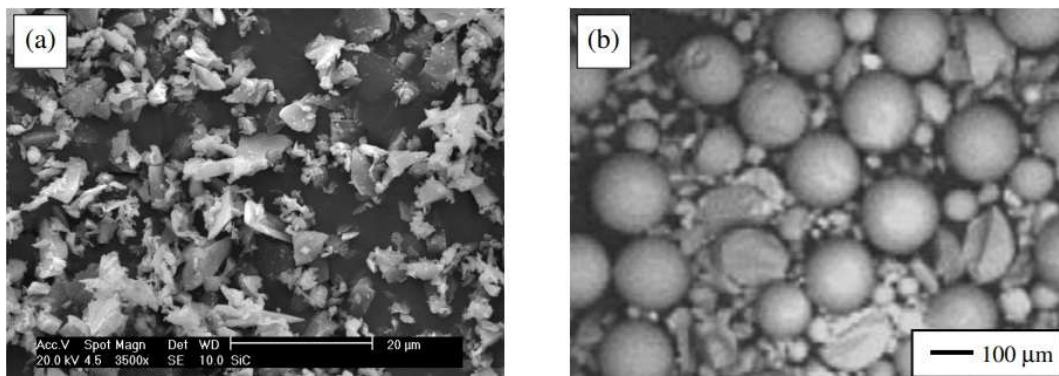


Figura 10: Formas das partículas abrasivas: (a)SiC angular e (b)Vidro esférico.
Fonte: Adaptado de Cozza (2011).

Conforme a figura 10, as partículas de SiC apresentam formas angulares, enquanto as partículas de vidro possuem formas mais esféricas. Kelly e Hutchings (2001) investigaram a correlação entre a morfologia das partículas abrasivas e o volume de material removido por ação abrasiva. Os resultados obtidos indicaram que a geometria das partículas exerce papel determinante na magnitude das taxas de desgaste (KELLY E HUTCHINGS, 2001).

Hutchings e Shipway (2017) propuseram o fator de arredondamento da partícula, representado por F , conforme a equação 5.

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

O parâmetro apresentado na equação 5 baseia-se no perímetro e na área da projeção dimensional da partícula formada a partir de imagens geradas em microscopia. O valor F é obtido pela razão entre a área real (A) da projeção da partícula abrasiva e a área de um círculo de mesmo perímetro (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), o parâmetro F quantifica o quanto a forma da partícula se aproxima de um círculo: valores de F próximos a 1 indicam que a projeção bidimensional da partícula possui formato semelhante ao de um círculo, enquanto valores mais baixos, próximos a 0, refletem geometrias mais irregulares e angulosas. Conforme Fang et al. (1993), partículas com contornos mais arredondados tendem a se fixar com maior facilidade na superfície do material, promovendo o deslizamento. Em contraste, partículas com geometria mais angulosa, apresentam comportamento predominantemente associado ao rolamento.

Misra e Finnie (1981) indagam que os processos de desgaste abrasivo envolvem a remoção de material superficial por meio de ações como sulcamento, microcorte ou rolamento, causadas por partículas duras. Em aplicações industriais, há uma ampla faixa de tamanhos de partículas envolvidas: desde partículas micrométricas, utilizadas em polimento, até partículas de várias dezenas ou centenas de milímetros, presentes em desgastes severos. Apesar dessa diversidade, a maior parte do desgaste abrasivo é atribuída a partículas com dimensões entre 5 e 500 μm , que combinam dureza suficiente com tamanho adequado para promover remoção significativa de material (MISRA e FINNIE, 1981; HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

Segundo Hutchings e Shipway (2017), diversos fatores contribuem para o efeito do tamanho das partículas na abrasão e erosão de metais, sem que haja um único mecanismo dominante. Os autores explicam que parte desse fenômeno está relacionada a um efeito de escala na resistência do metal, onde a dificuldade de nucleação e movimento de discordâncias

em volumes reduzidos eleva a tensão de escoamento local, reduzindo o desgaste por deformação plástica. Além disso, a geometria real das partículas, cujos cantos angulosos são frequentemente arredondados, também influencia esse comportamento (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

2.3.2 Concentração das partículas abrasivas

Trezona *et al.* (1999) observaram que não há registros sistemáticos sobre os efeitos da concentração de partículas abrasivas nos micromecanismos e na taxa de desgaste, mas destacaram no estudo que, ao utilizar suspensões de carbetto de silício, óxido de alumínio e partículas de diamante em água destilada, com concentrações variando de 0,0001 a 1,0 g/cm³. A figura 11 mostra o mapa da variação dos micromecanismos de desgaste em relação da força normal e concentração de partículas abrasivas.

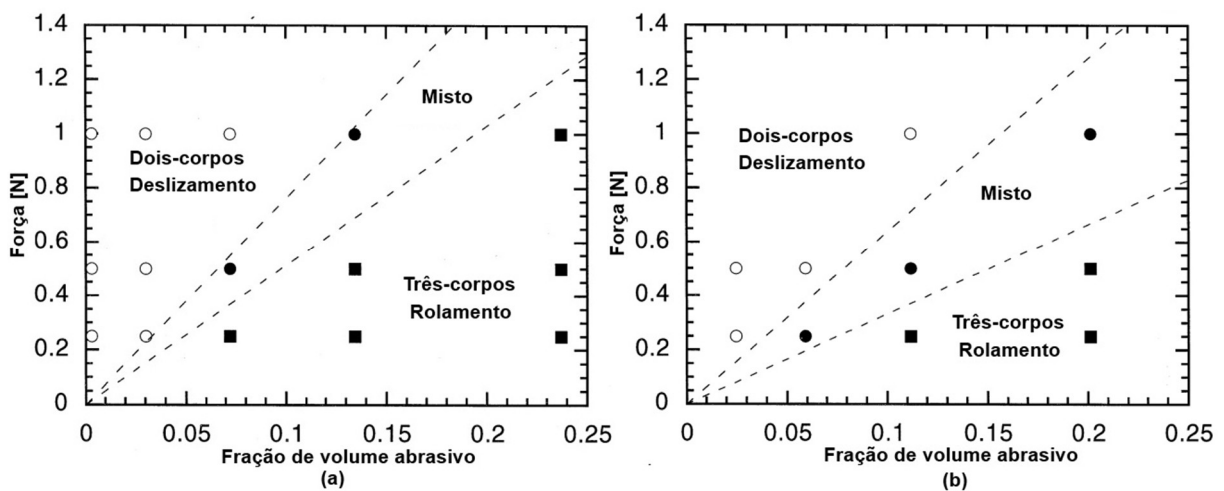


Figura 11: Mapa de micromecanismo de desgaste em um ensaio de microabrasão de um aço ferramenta em termo de carga aplicada e concentração de abrasivo. (a) Pasta de SiC F1200. (b) Pasta de alumina F1200. Fonte: Adaptado de Trezona et al (1999).

Conforme a figura 11, é possível observar que, para a aplicação de uma força normal constante, observa-se que, em baixas concentrações de partículas abrasivas, predomina o desgaste por deslizamento, enquanto concentrações mais altas favorecem o desgaste por rolamento. Em níveis intermediários de concentração, pode ocorrer um regime misto de desgaste sob a mesma condição de carregamento (TREZONA *et al.*, 1999).

Enquanto Tezona *et al.* (1999) concentraram-se em avaliar lamas abrasivas compostas por um único tipo de partícula, estudos mais recentes, como os de Lisboa (2022), Cezar (2022) e Rowe (2023), avançaram ao realizar ensaios com misturas de partículas em diferentes proporções, utilizando combinações de hematita (Fe₂O₃) e sílica (SiO₂) em testes com corpo de prova de aço inoxidável P410D e contracorpos de aço AISI 52100, nylon e zircônia.

De acordo com o trabalho de Lisboa (2022), a lama composta exclusivamente por partículas de sílica apresentou maior abrasividade em comparação à lama formada apenas por partículas de hematita. Para as misturas com concentrações intermediárias, as taxas de desgaste foram estatisticamente próximas, indicando que, nesse sistema tribológico, a hematita teve influência predominante no mecanismo de desgaste. Cezar (2022), ao realizar ensaios semelhantes aos de Lisboa (2022) utilizando esfera de aço ABNT 52100 como contracorpo, também verificou maior desgaste para a lama 100% sílica em relação à de hematita. No entanto, para as misturas, observou-se que a redução na proporção de sílica resultou em uma diminuição gradual das taxas de desgaste.

No entanto, esses estudos consideraram a mistura das partículas abrasivas com base em proporções mássicas em relação ao volume da solução. É importante destacar que a sílica (SiO₂) possui massa específica relativamente baixa à temperatura ambiente, enquanto a hematita (Fe₂O₃) é maior (CALLISTER e RETHWISCH, 2020). A tabela 1 mostra a comparação das massas específicas.

Tabela 1: Massa específica de cada partícula abrasiva

Partículas	Massa específica (g/cm ³)
SiO ₂	2,6
Fe ₂ O ₃	5,25

Fonte: Adaptado Sigma-Aldrich (2024) e Supelco (2025).

De acordo com a Tabela 1, a massa específica da hematita é aproximadamente três vezes maior do que a da sílica, relação representada na equação 6. Em função dessa diferença, ao se adotar proporções mássicas para as misturas, o volume de partículas de hematita acaba sendo cerca de um terço do volume equivalente de partículas de sílica.

$$\rho = \frac{m}{v} \tag{6}$$

A equação 6 define a massa específica (ρ) como a razão entre a massa da substância (m) e o volume por ela ocupado (v) (MILHOMEN e DA LUZ, 2016). Dessa forma, para garantir uma proporcionalidade adequada entre os volumes das partículas abrasivas, as misturas serão preparadas considerando suas concentrações volumétricas. Assim, busca-se avaliar a influência dessa variável na taxa de desgaste e nos micromecanismos envolvidos, conforme o objetivo deste estudo.

2.4 Aço Inoxidável

Para a realização dos ensaios, foi utilizado o aço inoxidável P410D, fornecido pela empresa Aperam, localizada em Timóteo – MG. Esse material foi escolhido por suas amplas aplicações industriais, destacando-se nos setores hospitalares, aeroespaciais, e automobilístico devido a sua resistência a ataques químicos (CALLISTER e RETHWISCH, 2020; PADILHA e GUEDES, 1994). Trata-se de uma liga ferro-carbono que pode apresentar diferentes composições em função da adição de elementos de liga e dos tratamentos térmicos aplicados, sendo sua classificação baseada na concentração de carbono ou de outros elementos (CHIAVERINI, 2008).

Conforme descrito por Lo *et al.* (2009) e Callister *et al.* (2020), os aços inoxidáveis podem apresentar três microestruturas fundamentais: ferrítico, austenítico e martensítico. Segundo os autores, essas microestruturas são determinadas principalmente pela composição química do material e pelos tratamentos térmicos aos quais o aço é submetido durante sua fabricação. A partir dessas estruturas básicas, os aços inoxidáveis são classificados em diversas famílias, entre as quais se destacam: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex, endurecíveis por precipitação e os austeníticos modificados por substituição de manganês e nitrogênio (Mn-N) (Lo *et al.*, 2009).

Conforme descrito por Callister e Rethwisch (2021), o cromo é o principal elemento de liga nos aços inoxidáveis, estando presente em concentrações superiores a 10,7%. A presença desse elemento confere às ligas ferrosas elevada resistência à corrosão e à oxidação em diferentes meios, especialmente em atmosferas ambientes, devido à formação de uma fina e estável camada de óxido passivador na superfície do material (CHIAVERINI, 1977). Ressalta-se ainda que a adição de níquel e molibdênio contribui para o aprimoramento das propriedades de resistência à corrosão dessas ligas (CALLISTER e RETHWISCH, 2020).

Labiaparari (2015) e Chaverini (2008) indagam que os aços inoxidáveis ferríticos são ligas à base de ferro que contêm entre 11% e 30% de cromo, com baixo teor de carbono (até 0,20%), o que impede a formação da fase austenítica e, conseqüentemente, o endurecimento por têmpera. Além disso, os autores ressaltam que tais aços podem apresentar pequenas adições de elementos como nitrogênio, níquel e carbono.

Labiaparari (2015) diz que a composição química, especialmente o teor de cromo, determina suas aplicações, que variam desde utensílios domésticos e ornamentos automotivos até componentes industriais e sistemas de exaustão veicular. Ligas com maiores teores de cromo

e adição de molibdênio apresentam excelente resistência à corrosão localizada em meios com cloretos, como água do mar, sendo recomendadas para ambientes agressivos e tubulações industriais (LABIAPARARI, 2015).

Smith (1977) destaca que os aços inoxidáveis austeníticos, compostos por 16 a 25% de cromo e 7 a 20% de níquel, apresentam superior resistência à corrosão, além de elevada conformabilidade, tenacidade e ductilidade. Conforme o autor, os aços inoxidáveis martensíticos atingem seu endurecimento adequado quando submetidos a tratamentos térmicos a aproximadamente 980°C, apresentando, contudo, menor resistência em ambientes agressivos.

Dessa forma, observa-se que a compreensão do desgaste abrasivo, de suas classificações e dos micromecanismos associados é essencial para o entendimento dos efeitos das partículas abrasivas no par tribológico. Ademais, destaca-se a relevância de conhecer as propriedades e aplicações dos aços inoxidáveis, visto que tais materiais ocupam posição de destaque no mercado e apresentam potencial para diferentes contextos industriais.

3 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de pesquisa

Conforme Creswell (2020), as abordagens de pesquisa correspondem à forma como o estudo é estruturado, incluindo o planejamento e os procedimentos adotados. Elas envolvem uma série de escolhas que vão desde as concepções teóricas que orientam a investigação até as técnicas específicas utilizadas para coletar, analisar e interpretar os dados. Gil (2002) complementa que um modelo de pesquisa pode ser usado em situações em que há falta de informações suficientes para fornecer uma resposta a uma questão ou quando essas informações são insuficientes para compreender a causa fundamental de uma situação.

Minayo (2021) afirma que a pesquisa qualitativa se concentra em examinar a realidade que não pode ser quantificada, ou seja, tudo o que envolve significados, motivações, aspirações, crenças, valores e atitudes. A pesquisa quantitativa, por outro lado, baseia-se em métodos estatísticos que permitem uma abordagem numérica e oferecem um grau significativo de precisão, conforme explicado por Gil (2008). Todavia, Creswell (2020) elucida que as abordagens qualitativa e quantitativa não são opostas ou completamente separadas, mas pontos em um mesmo contínuo. Um estudo pode se inclinar mais para um lado do que para o outro, enquanto a pesquisa de métodos mistos combina elementos de ambas.

As pesquisas podem ser categorizadas de acordo com seus objetivos, de acordo com Gil (2002). O objetivo das pesquisas descritivas é descrever as características de um grupo e fenômenos associados, utilizando métodos como observação e coleta de dados. O autor indaga que, por outro lado, o objetivo das pesquisas explicativas é aumentar nossa compreensão da realidade identificando os elementos que influenciam os fenômenos estudados. Por fim, as pesquisas exploratórias têm como objetivo construir hipóteses, adquirir familiaridade com o problema e usar um planejamento adaptável que envolve a análise da literatura e a manipulação de variáveis de interesse. Em resumo, a pesquisa exploratória visa aplicar e desenvolver hipóteses para melhorar a compreensão de um assunto e permitir a melhoria de conceitos.

Em se tratando dos tipos de pesquisa segundo os procedimentos, de acordo com Severino (2007), Ruiz (1996) e Rampazzo (2010), os tipos de pesquisa podem ser experimental, bibliográfica, documental, de campo, ex-post-facto, levantamento, com pesquisa, estudo de caso, participante, ação de pesquisa, etnografia e etnometodologia, entre outros.

Com base na bibliografia sobre a metodologia de pesquisa, o trabalho é considerado exploratório porque abordou os mecanismos de desgaste de um par tribológico de aço inoxidável ferrítico P410D e um aço AISI 52100 de forma experimental, pois é uma pesquisa de ciências naturais. Os procedimentos técnicos usados são de natureza bibliográfica e experimental. O uso de referenciais teóricos ajuda a compreender os fenômenos relacionados à interface e ao movimento relativo entre as superfícies de contato do par tribológico. Quando se trata da abordagem do material, o trabalho é classificada como mista, uma vez que tanto os métodos estatísticos, como o cálculo da taxa de desgaste, quanto a análise dos micromecanismos de desgastes baseadas em fatores teóricos, serão importantes para o desenvolvimento do trabalho

3.2 Materiais e Métodos

Este tópico apresenta o fluxograma, ilustrado na Figura 12, o qual orienta as etapas previstas para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, define-se a questão-problema destacada na introdução, que será respondida por meio da coleta e análise dos dados obtidos ao longo do estudo. Em seguida, realiza-se a revisão da literatura abordando os temas relevantes para fundamentar a investigação.

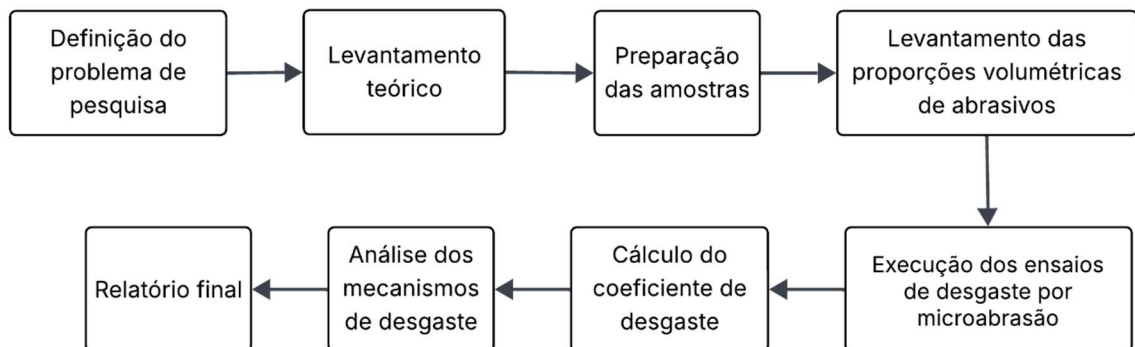


Figura 12: Fluxograma do procedimento experimental.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

3.2.1 Preparação das amostras

O aço inoxidável P410D, fornecido pela empresa Aperam, com sede em Timóteo, Minas Gerais, foi selecionado como material para os ensaios deste estudo. O mesmo foi empregado na condição "como recebido", sem qualquer alteração prévia em sua microestrutura.

Segundo Labiapari (2015), o aço inoxidável ferrítico P410D, devido ao seu baixo teor de cromo, apresenta um custo mais acessível. Conforme o autor, esse material é especialmente

indicado para aplicações em ambientes úmidos e sob condições de desgaste abrasivo e corrosivo, mostrando-se uma alternativa mais eficiente em comparação ao aço carbono. Dessa forma, o P410D tem sido progressivamente adotado para substituir outros o aço carbono em diversas aplicações industriais (LABIAPARI, 2015).

A composição química foi analisada utilizando diversas técnicas complementares, como absorção no infravermelho (Leco, CS444s), condutividade térmica (Leco, TC436s), espectrometria de fluorescência de raios X (Thermo ARL, 9900) e espectrometria de emissão óptica (Thermo ARL, 4460), cujos resultados são apresentados na Tabela 2. A combinação desses métodos garantiu a identificação completa dos elementos presentes na liga, uma vez que cada técnica é capaz de detectar diferentes componentes, evitando omissões na análise.

Tabela 2: Composição química do aço inoxidável P410D

Elemento	C	Cr	Mn	Si	Ni	P	N	Mo	S
% em peso	0,0107	11,33	0,5332	0,5260	0,3046	0,0271	0,0128	0,0116	0,0005

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

3.2.2 Concentração volumétrica dos abrasivos

Conforme apresentado na revisão de literatura, o material constitutivo das partículas abrasivas exerce influência significativa tanto nos micromecanismos de desgaste quanto nas taxas de remoção de material, sendo variáveis relevantes a dureza, a concentração volumétrica, a forma e o tamanho dessas partículas. Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pela utilização de dois tipos de abrasivos: dióxido de silício (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3). Ressalta-se que tais partículas são comumente encontradas em condições reais de operação, especialmente na indústria sucroalcooleira, o que justifica a escolha desses materiais como meio abrasivo representativo.

A Tabela 3 apresenta algumas das propriedades dos abrasivos empregados. As informações foram obtidas com base em dados disponíveis na literatura especializada de Hutchings e Shipway (2017), Silva (2003) e junto ao fabricante dos materiais Sigma-Aldrich (2021).

Tabela 3: Propriedades das partículas de abrasivos.

ABRASIVO	DUREZA (HV)	TAMANHOS NOMINAIS
Sílica (SiO₂)	750 – 1200	Tamanho da partícula: 0,5 - 10 µm aproximadamente 80% entre 1 - 5µm
Hematita (Fe₂O₃)	739 – 1500	Tamanho da partícula: 96% < 5 µm

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

Destaca-se que os valores de dureza para os abrasivos apresentados na tabela 2 são estimados e servem como referência para a análise. A caracterização da granulometria das partículas foi conduzida utilizando o equipamento Bettersize2000, fabricado pela Bettersize Instruments, seguindo o procedimento padrão do sistema, que estabelece que a amostra seja adicionada em um béquer até atingir um índice de obscuração entre 15 % e 20 %.

Para a preparação das misturas abrasivas, as partículas foram suspensas em água destilada, resultando em lamas com concentrações de 1%, 5% e 10% em volume de abrasivo. Para viabilizar o manuseio dos materiais, essas concentrações volumétricas foram convertidas em valores mássicos, utilizando a equação 6 apresentada no item 2.3.2 do capítulo 2 deste trabalho. A Tabela 4 apresenta as cinco formulações de lamas abrasivas geradas, juntamente com suas respectivas concentrações, que foram empregadas nos ensaios de desgaste.

Tabela 4: Misturas e concentrações de lamas abrasivas.

Para 100 ml de fluido					
100%			80% Silica 20% Hematita		
Concentração	Massa (g)		Concentração	Massa (g)	
%	silica	hematita	%	silica	hematita
0,01	2,5	5	0,01	2	1
0,05	13	26	0,05	10,4	5,2
0,1	26	53	0,1	20,8	10,6
50% Silica 50% Hematita			20% Silica 80% Hematita		
Concentração	Massa (g)		Concentração	Massa (g)	
%	silica	hematita	%	silica	hematita
0,01	1,25	2,5	0,01	0,5	4
0,05	6,5	13	0,05	2,6	20,8
0,1	13	26,5	0,1	5,2	42,4

Fonte: Pesquisa direta (2025)

3.2.3 Ensaio de desgaste microabrasivo

O teste de desgaste por microabrasão foi conduzido em um dispositivo de ensaio na configuração de esfera fixa, conforme mostrado na Figura 13. Esse equipamento foi desenvolvido e construído pelo Laboratório de Tribologia vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFOP.



Figura 13: Equipamento de microabrasão de esfera fixa
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Foi empregada uma esfera de aço AISI 52100, com diâmetro de 25,4 mm. Antes da execução de cada ensaio, a esfera foi submetida a um procedimento de limpeza, envolvendo imersão em álcool etílico seguida de limpeza ultrassônica com duração de cinco minutos.

A força normal aplicada durante os ensaios foi de 1 N, com a esfera operando a uma velocidade de rotação de 100 rpm. A lama abrasiva foi continuamente fornecida à região de contato por meio de uma bomba peristáltica, mantida a uma taxa de gotejamento de uma gota a cada cinco segundos. Além disso, cada ensaio teve duração total de 20 minutos, sem interrupções.

Ao final do teste, o diâmetro da calota de desgaste foi medido com o auxílio de um microscópio óptico. A possibilidade de cálculo do volume perdido e a taxa de desgaste estão descritas nas Eq. 3 e 4, definidas na seção 2.2.

3.2.4 Análise da dureza, microestrutura e micromecanismos de desgaste

A análise microestrutural dos corpos de prova foi realizada por meio de ataque químico utilizando o reagente de Vilella, preparado com 1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorídrico e 100 ml de álcool etílico, com tempo de aplicação de 80 segundos. A observação das estruturas resultantes foi efetuada em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51M.

Para investigar os micromecanismos de desgaste gerados nos ensaios de abrasão, também se recorreu à microscopia óptica. Antes dessa etapa, as amostras foram submetidas a limpeza em ultrassom para garantir a remoção de contaminantes superficiais.

A verificação da dureza do aço P410D foi realizada no Laboratório de Ensaios Metalográficos vinculado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, utilizando o equipamento modelo M4C025G3, da fabricante Emco Test, com carga aplicada de 5 kg e indentador do tipo Vickers.

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Lakatos e Marconi (2003), identificar os diferentes valores de uma variável é fundamental, pois eles representam as quantidades observadas no fenômeno analisado. As variáveis, conforme os autores, podem ser classificadas como independentes, quando exercem influência, ou como dependentes, quando são afetadas por outros fatores. Na investigação de fenômenos, os pesquisadores focam na variável dependente para entender como ela se relaciona com as variáveis independentes, considerando ainda fatores como fixidez e temporalidade (LAKATOS e MARCONI, 2003). Rampazzo (2010) destaca que a análise dos mecanismos de medição e das variáveis é essencial para garantir maior controle e qualidade à pesquisa.

A tabela 5 lista as variáveis e seus respectivos indicadores utilizados no ensaio de desgaste abrasivo para demonstrar os resultados apresentados no próximo capítulo.

Tabela 5: Variáveis e indicadores para o ensaio de desgaste abrasivo

VARIÁVEIS	INDICADORES
Tipos de lamas abrasivas	• Taxas de desgastes • Mecanismos de desgastes
Concentração volumétrica de cada tipo de abrasivo	
Concentração volumétrica total de abrasivo	

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

3.4 Instrumentação e Coleta de Dados

Os métodos de coleta de dados utilizados pela pesquisa serão discutidos neste tópico. Os dados foram coletados observando diretamente os fenômenos de desgaste e revisando obras de outros autores, como livros, teses e dissertações. Além disso, foi realizada pesquisa direta para coletar informações sobre o material usado no corpo de prova e o tipo de abrasivo usado no ensaio. Isso permitiu a coleta de dados que eram essenciais para o desenvolvimento do estudo.

3.5 Tabulação e Análise de Dados

O recurso de tabulação de dados usado neste estudo foi o Microsoft Excel. As variáveis foram inseridas e organizadas de forma sequencial nisso, tornando-se mais fácil entender sua influência no sistema. O uso significativo do Microsoft Excel foi motivado por sua versatilidade e capacidade de plotar gráficos.

Os programas auxiliares poderão ser utilizados, além do Microsoft Excel, para facilitar o entendimento dos dados e a criação de modelos demonstrativos. Para melhorar a análise e a comunicação dos resultados, foram necessários esses recursos adicionais.

3.6 Considerações Finais

O tipo de pesquisa e a metodologia usadas foram discutidos neste capítulo. Também foram discutidos os materiais, métodos e procedimentos usados durante o experimento. Além disso, foi apresentado detalhes sobre as variáveis e indicadores analisados no laboratório, bem como a instrumentação e o processo de coleta de dados utilizados para obter os dados necessários.

Além disso, o software que foi usado para a realização das análises comparativas e extrair conclusões a partir dos resultados também foi mostrado. Todas as etapas do estudo são descritas no capítulo, que fornece informações importantes para apoiar as conclusões tomadas ao final da pesquisa.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de microabrasão. Tais resultados são analisados comparativamente com as propriedades mecânicas informadas em catálogos técnicos dos materiais estudados. Por fim, realiza-se a caracterização dos mecanismos de desgaste predominantes, com base na morfologia observada nas crateras formadas durante os testes.

4.1 Caracterização da Microestrutura da Amostra

A Figura 14 apresenta a microestrutura característica do aço inoxidável P410D, material selecionado como amostra para os ensaios realizados neste estudo.

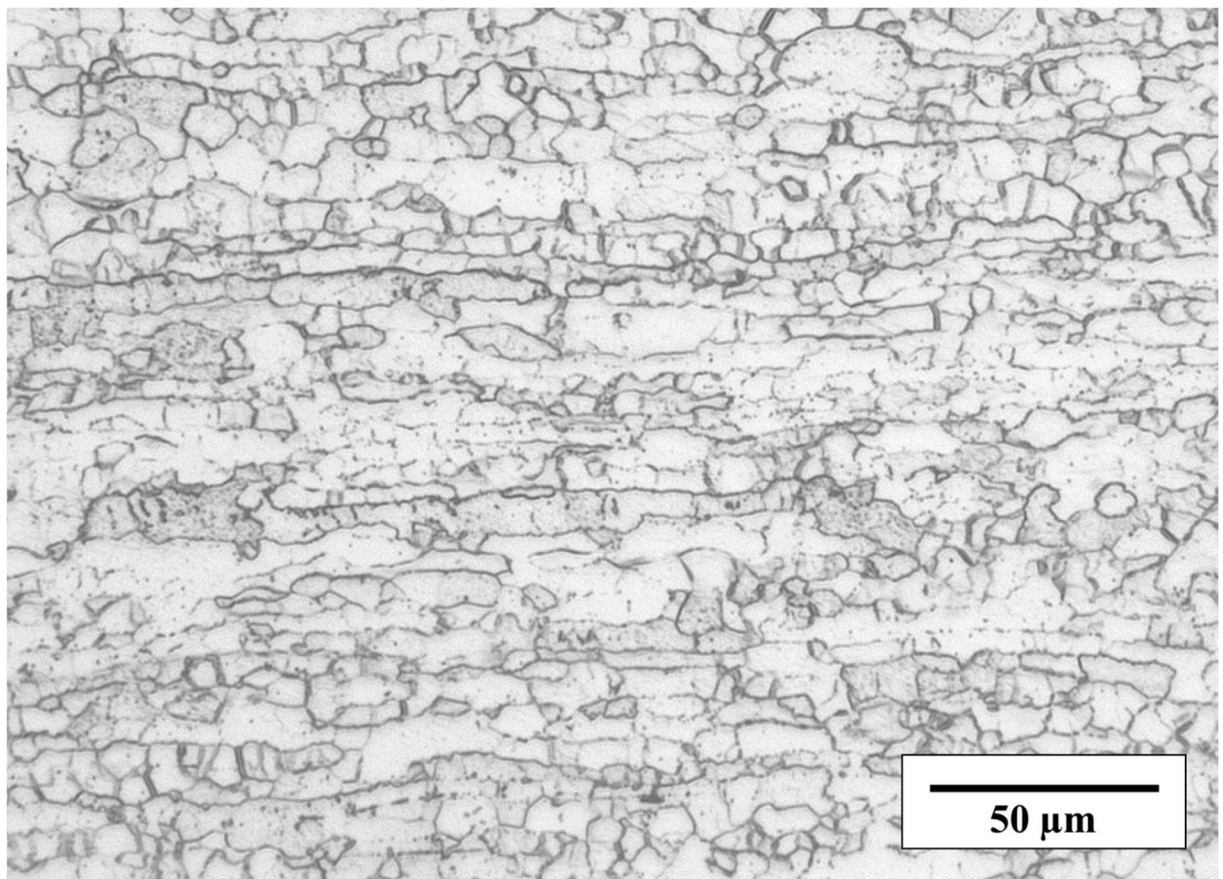


Figura 14: Microestrutura do aço inoxidável P410D.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 14 revela que a microestrutura do material é majoritariamente ferrítica, resultado da ausência de tratamentos térmicos prévios, evidenciado por uma morfologia superficial composta por grãos homogêneos. Essa configuração microestrutural está associada a uma dureza de 181 ± 2 HV, valor informado pelo fabricante.

4.2 Análise da Granulometria

. A caracterização da distribuição granulométrica das partículas abrasivas de SiO_2 e Fe_2O_3 utilizadas neste estudo foi realizada por difração a laser, empregando o analisador de partículas *Bettersize 2000*, fornecido pela *Bettersize*. Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 15 e 16.

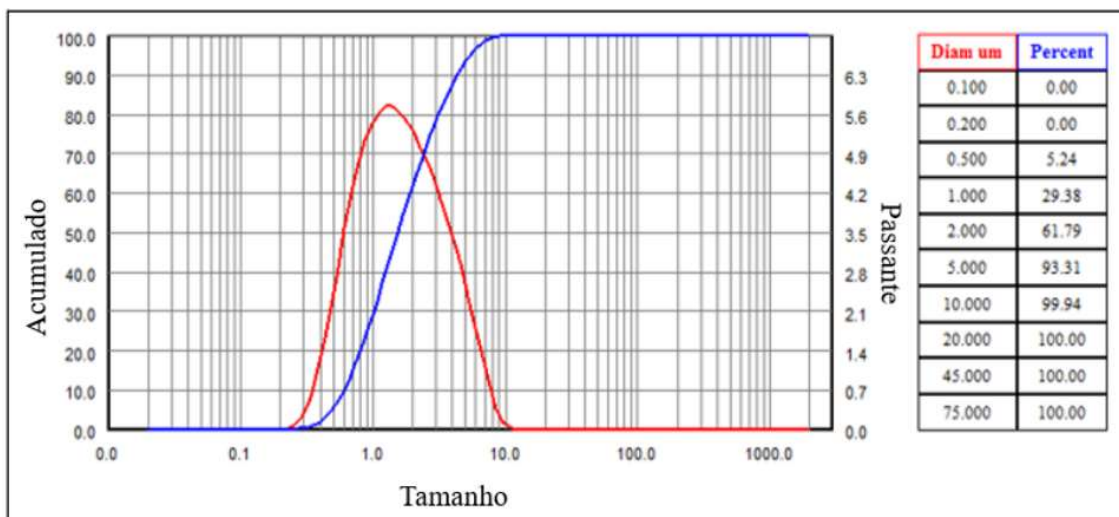


Figura 15: Curva de distribuição acumulada da sílica obtida por análise de granulometria a laser.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Conforme apresentado no gráfico da Figura 15, a análise granulométrica das partículas de sílica revelou uma distribuição próxima da normal, com diâmetro médio de 1,5 μm . Os resultados indicam que 50% das partículas possuem tamanho inferior a 1,5 μm , enquanto 90% apresentam diâmetro menor que 4 μm , sendo que a totalidade das partículas tem dimensão inferior a 10 μm . Em contrapartida, a Figura 16 mostra a distribuição granulométrica das partículas de hematita, que não seguiu um perfil normal, evidenciando uma tendência bimodal.

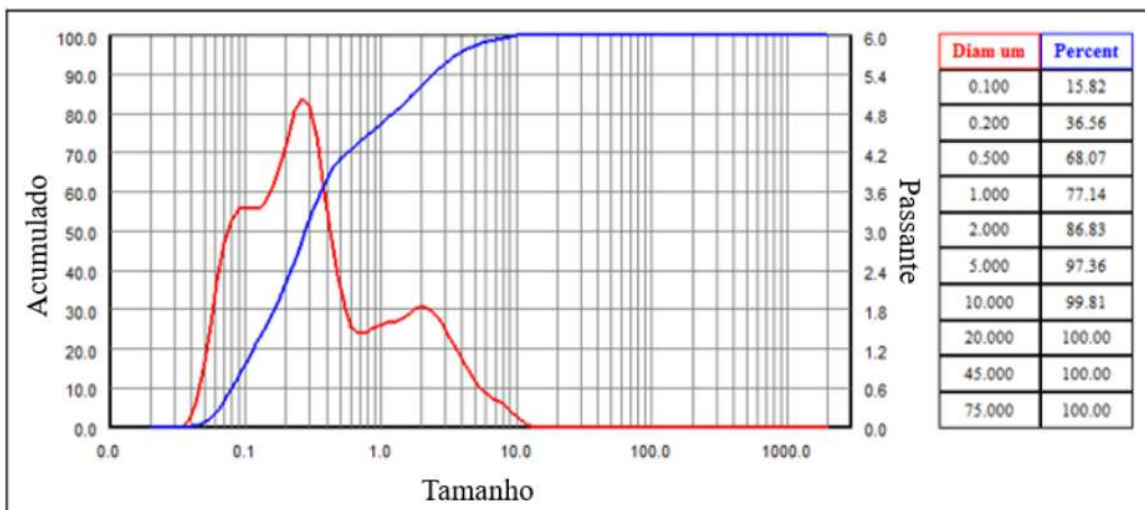


Figura 16: Curva de percentual acumulado da Hematita analisada por granulometria a laser.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Conforme a figura 16, observou-se, nesse caso, uma concentração predominante de partículas com diâmetro médio em torno de $0,3\ \mu\text{m}$; 50% delas são menores que $0,3\ \mu\text{m}$, 90% apresentam tamanho abaixo de $2,5\ \mu\text{m}$ e 100% das partículas analisadas possuem diâmetro inferior a $10\ \mu\text{m}$. Esses resultados reforçam a diferença de comportamento entre os dois tipos de partículas em relação à distribuição de tamanho, o que pode influenciar diretamente nos mecanismos de desgaste observados nos ensaios.

4.3 Ensaio de Microabrasão

Para a condução deste estudo, foram realizados ensaios laboratoriais considerando diferentes concentrações de partículas de hematita e sílica. O sistema tribológico empregado nos experimentos foi composto por:

- Corpo de prova: Aço inoxidável ferrítico P410D
- Contracorpo: Esfera de aço AISI 51200;
- Lama abrasiva com 1%, 5% e 10 % em volume de abrasivos.
- Força normal aplicada: 1 N

Os ensaios de microabrasão foram conduzidos sob as mesmas condições para todas as lamas abrasivas, preparadas com concentrações de 1%, 5% e 10% em volume de abrasivo suspenso em água. Para cada concentração, foram realizados três testes, cada um com duração intermitente de 20 minutos, sendo o diâmetro da calota formado após o ensaio devidamente medido.

4.3.1 Resultados anteriores

O estudo de Lisboa (2022) investigou a influência da combinação de sílica e hematita na taxa de desgaste do par tribológico composto por aço inoxidável P410D e nylon. Para isso, foram empregadas misturas com 10% em massa de abrasivos, sob uma força normal de 1 N. A Figura 17 apresenta os valores do coeficiente de desgaste (k) obtidos para cada proporção de abrasivos utilizada.

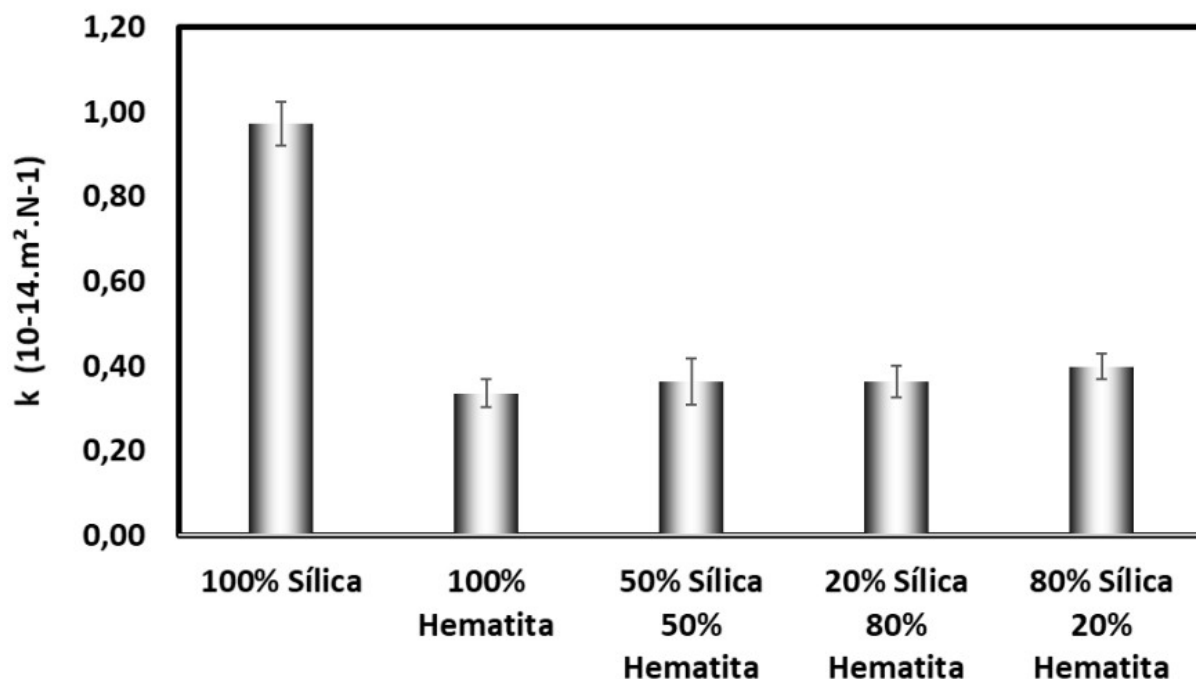


Figura 17: Coeficiente de desgaste para cada proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e Nylon.

Fonte: Adaptado de Lisboa (2022)

Conforme demonstrado na Figura 17, Lisboa (2022) afirma que a lama abrasiva constituída integralmente por partículas de sílica apresentou o mais elevado coeficiente de desgaste abrasivo, enquanto a amostra composta exclusivamente por hematita registrou o menor valor entre as condições avaliadas. A autora ainda indaga que as misturas contendo 20%, 50% e 80% de hematita exibiram coeficientes de desgaste muito próximos ao da lama de 100% hematita, o que evidencia que, neste sistema tribológico, as partículas de hematita exercem predominância no mecanismo de desgaste, mesmo quando presentes em proporções reduzidas.

Enquanto isso, Cezar (2022) analisou as mesmas condições de força normal e concentração, bem como diferentes proporções de misturas de abrasivos, aplicando-as ao par tribológico formado por aço inoxidável P410D e aço AISI 52100. Os resultados obtidos para o coeficiente de desgaste (k) desse par tribológico encontram-se apresentados no gráfico da Figura 18.

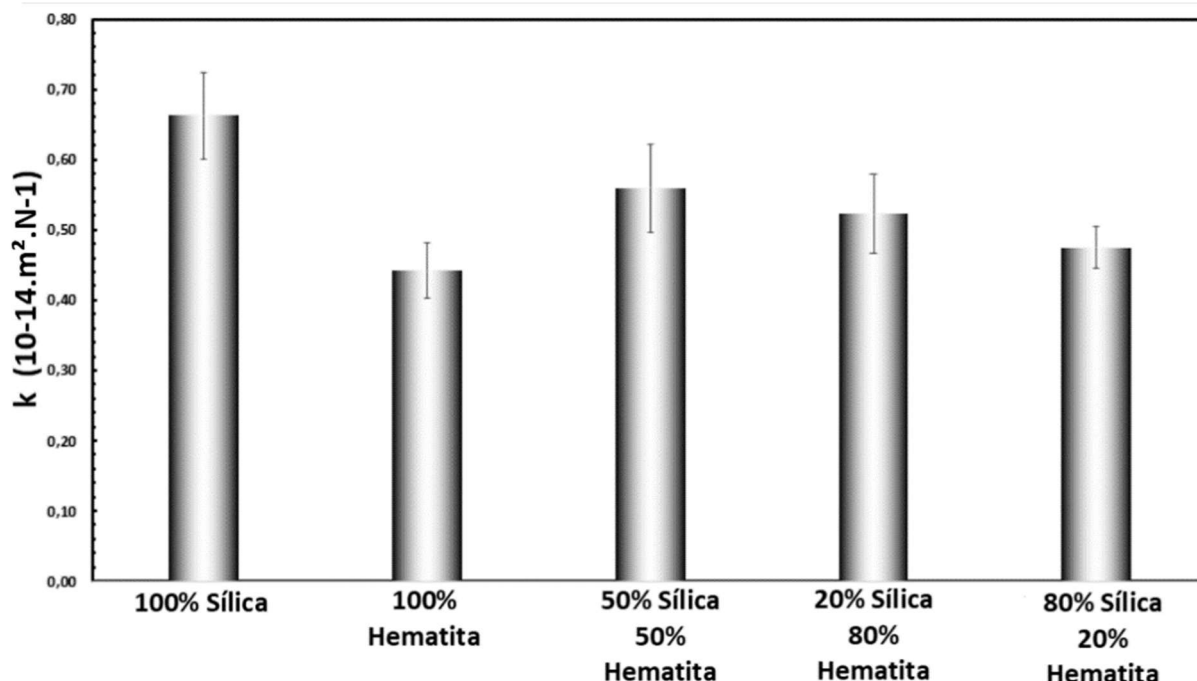


Figura 18: Coeficiente de desgaste para cada proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e Aço AISI 52100.

Fonte: Adaptado de Cezar (2022).

De acordo com a figura 18, Cezar (2022) observou que a lama composta por 100% de sílica apresentou a maior taxa de desgaste, enquanto a de 100% de hematita teve o menor valor, sugerindo que, apesar da forma esférica, a sílica pode ser mais abrasiva do que a hematita de formato anguloso, como também apontado por Gava et al. (2013). As misturas intermediárias de sílica e hematita apresentaram taxas de desgaste proporcionais ao volume de sílica na lama, confirmando que quanto maior sua concentração, maior o desgaste (CEZAR, 2022).

Lisboa (2022) obteve resultados semelhantes ao utilizar nylon como contracorpo, constatando que as partículas maiores de hematita resistiram melhor, limitando o efeito da sílica; já neste estudo, o uso do contracorpo de aço 52100 resultou na fratura das partículas de hematita, permitindo maior ação abrasiva da sílica e aumentando a taxa de desgaste, evidenciando a influência do material do contracorpo sobre o mecanismo de desgaste.

A pesquisa de Rowe (2023) foi conduzida sob as mesmas condições experimentais adotadas por Cezar (2022) e Lisboa (2022), mas avaliou a taxa de desgaste no par tribológico formado por aço inoxidável P410D e zircônia. Os resultados do coeficiente de desgaste (k) obtidos para esse par encontram-se apresentados no gráfico da Figura 19.

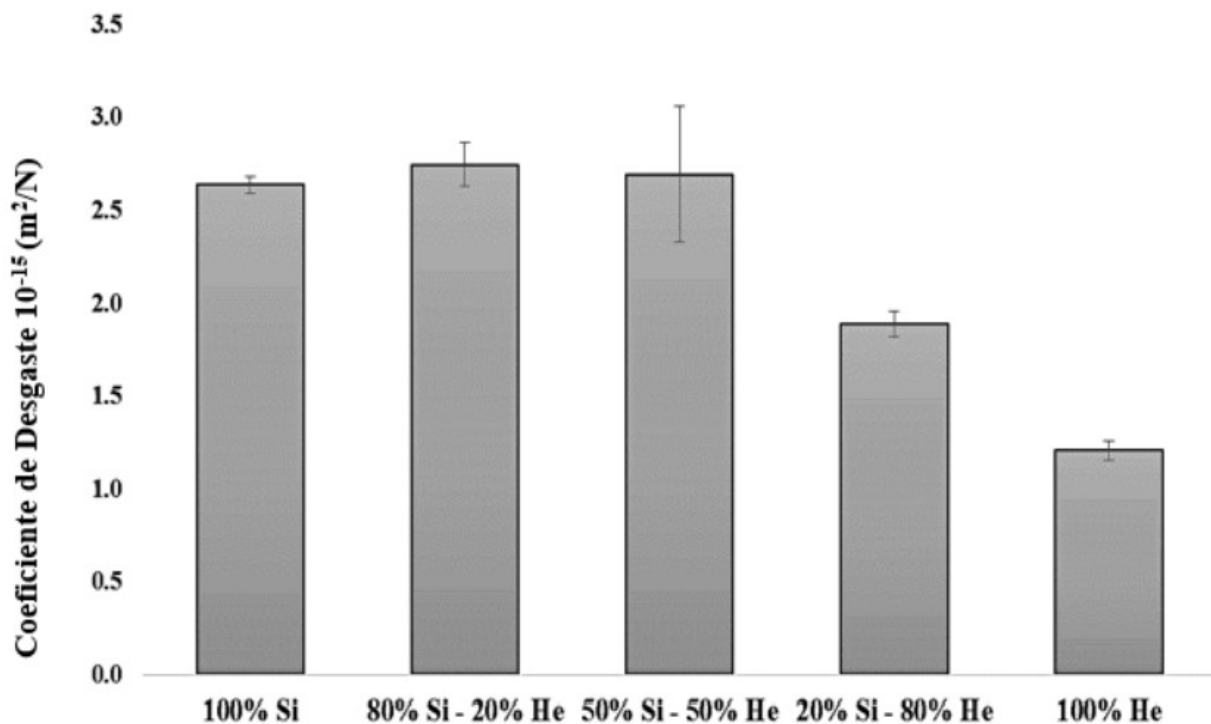


Figura 19: Coeficiente de desgaste para cada proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e Zircônia.

Fonte: Adaptado de Rowe (2023).

Conforme a figura 19, Rowe (2023) observa que as lamas com maior concentração de sílica, especialmente acima de 50%, apresentaram os maiores coeficientes de desgaste, enquanto aquelas com maior teor de hematita registraram os menores valores. De acordo com a autora, a diferença na abrasividade está associada, principalmente, ao tamanho médio das partículas, já que a sílica possui partículas maiores que a hematita.

Essa tendência foi observada em diversos ensaios, independentemente do tipo de contracorpo utilizado — seja de aço, zircônia ou nylon — embora o comportamento varie em função da dureza e da ductilidade do material. Nos testes com contracorpos mais duros, como zircônia e aço, as partículas de sílica tendem a fraturar com maior facilidade e têm menor capacidade de penetração, o que faz com que a taxa de desgaste diminua conforme a proporção de sílica na lama é reduzida. Por outro lado, quando o contracorpo é de nylon, que apresenta maior ductilidade, as partículas de sílica conseguem se alojar mais facilmente na superfície, mantendo sua ação abrasiva mesmo em concentrações menores.

4.3.2 Resultado da Taxa de desgaste

Para a realização deste estudo, foram conduzidos ensaios de microabrasão em laboratório utilizando diferentes concentrações de partículas abrasivas de hematita e sílica (1%,

5% e 10% em volume, suspensas em água), sob condições padronizadas. O sistema tribológico adotado foi composto por corpo de prova em aço inoxidável ferrítico P410D e contracorpo em forma de esfera de aço AISI 52100, com força normal aplicada de 1 N. Para cada concentração, realizaram-se três ensaios com duração intermitente de 20 minutos, sendo o diâmetro da calota gerada mensurado ao final de cada teste. A figura 20 mostra a taxa de desgaste (k) obtidos.

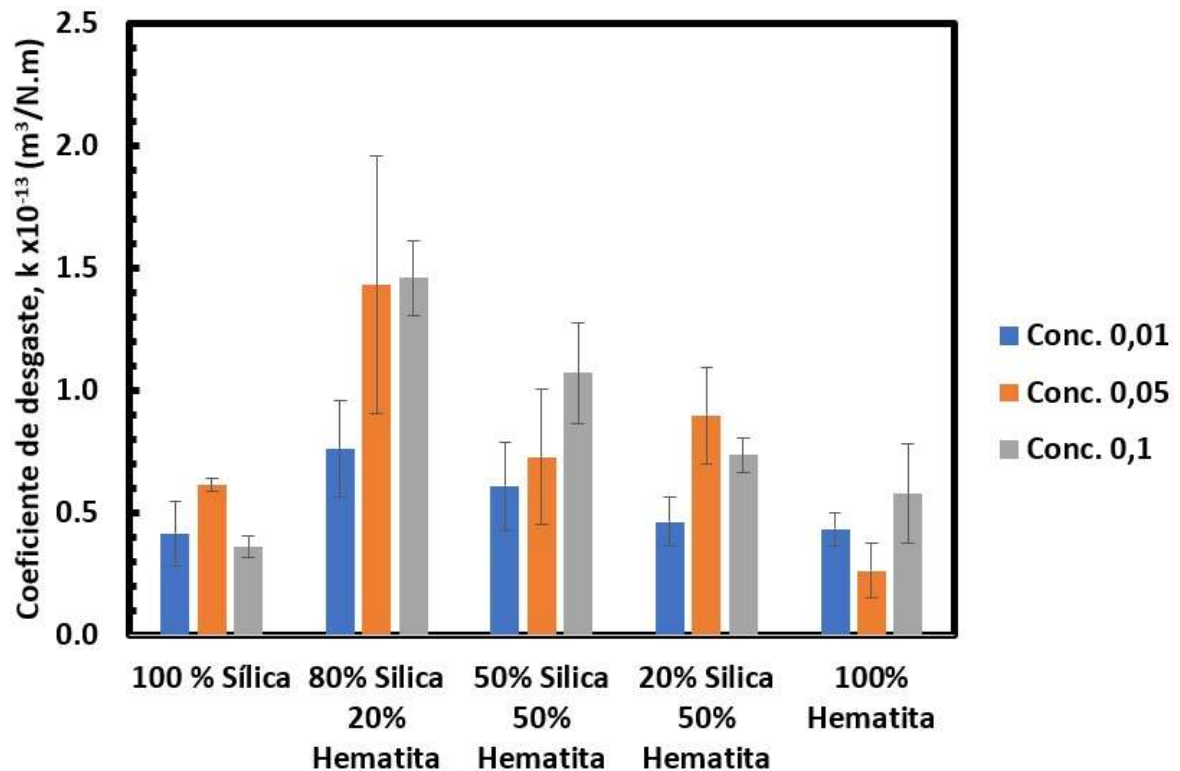


Figura 20: Coeficiente de desgaste para cada concentração e proporção de mistura de abrasivos no par tribológico aço inoxidável P410D e aço AISI 52100.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

De acordo com os dados da Figura 20, a taxa de desgaste abrasivo observada para a lama composta exclusivamente por partículas de sílica (100%) é praticamente igual àquela registrada para a lama contendo apenas partículas de hematita (100%). Essa semelhança pode ser explicada pela proximidade entre as durezas das duas partículas, conforme apresentado na Tabela 3 do item 3.2.2 do Capítulo 3, o que contribui para comportamentos mecânicos similares durante o ensaio de desgaste. Embora as partículas de hematita sejam menores — característica que, isoladamente, tenderia a reduzir o desgaste — sua morfologia mais angulosa favorece mecanismos abrasivos mais agressivos do que os provocados por partículas arredondadas, como as de sílica. Assim, considerando a combinação desses fatores, é coerente que ambas apresentem taxas de desgaste comparáveis.

No entanto, ao se analisar misturas contendo diferentes proporções dessas partículas abrasivas, verifica-se uma variação significativa na taxa de desgaste, especialmente quando a concentração de sílica ultrapassa 50%. Nessas condições, a taxa de desgaste aumenta consideravelmente, o que pode ser explicado pelo tamanho médio das partículas de sílica, que é superior ao das partículas de hematita, conforme demonstrado no item 4.2 deste capítulo. A figura 21 mostra, de forma esquematizada, o comportamento das partículas abrasivas entre as duas superfícies.

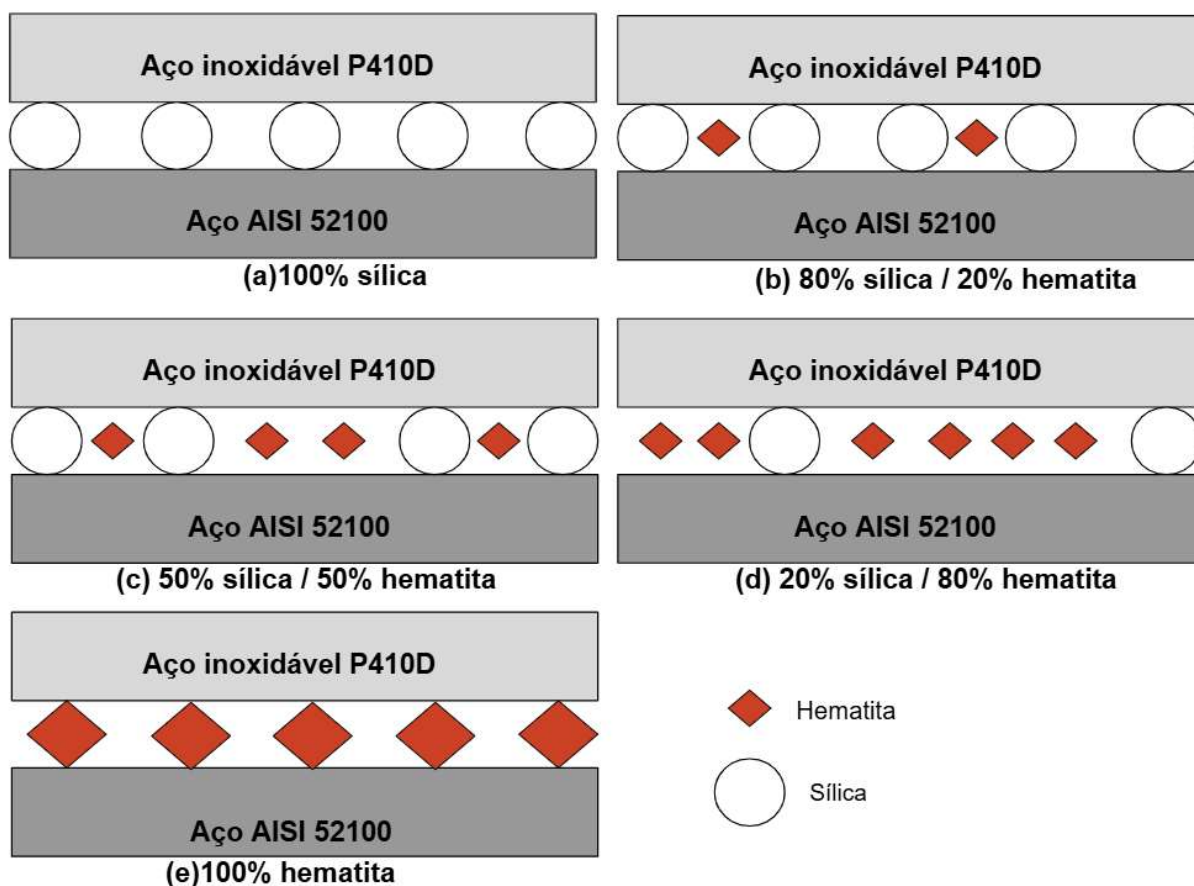


Figura 21: Esquema do comportamento das partículas abrasivas entre as duas superfícies.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Conforme o esquema da figura 21, quando a concentração de sílica excede 50%, a carga total é suportada predominantemente pelas partículas de sílica, que possuem maior tamanho em comparação às de hematita. Com a redução da quantidade de sílica, a carga começa a ser compartilhada com as partículas de hematita, o que pode levar à fratura das partículas de sílica por sobrecarga ou à sua maior penetração na amostra. Além disso, como a mistura é definida com base em proporções volumétricas, o aumento da fração de sílica implica diretamente na redução da quantidade de partículas de hematita presentes, o que reforça ainda mais a influência da sílica nesses casos.

De acordo com o esquema ilustrado na Figura 21, quando a suspensão abrasiva é composta exclusivamente por partículas de sílica (100%), a carga aplicada pela esfera — neste estudo, equivalente a 1 N — é distribuída de maneira uniforme entre as partículas em contato. Nesse cenário, a carga suportada por cada partícula depende diretamente da quantidade de partículas sob a esfera. Caso a carga individual ultrapasse a resistência à fratura da sílica, ocorre sua fragmentação e consequente redução de tamanho. Do contrário, as partículas penetram nas superfícies em contato, sendo a penetração mais pronunciada naquela de menor dureza.

Na mistura contendo 80% de sílica e 20% de hematita, a maior parte da carga continua sendo absorvida pelas partículas de sílica, devido ao seu maior tamanho, que limita o acesso das partículas menores de hematita à região de contato. Como há menos partículas sustentando o esforço, a carga por partícula aumenta, favorecendo uma penetração mais profunda — comportamento semelhante ao observado em ensaios convencionais de dureza — e, consequentemente, intensificando o desgaste, desde que não haja fratura significativa das partículas. Porém, à medida que a concentração de hematita aumenta, as partículas de sílica passam a ser menos numerosas e, embora ainda suportem boa parte da carga, tornam-se mais suscetíveis à fratura devido ao esforço concentrado. Esse fenômeno ajuda a explicar o pico de desgaste observado na proporção de 80% de sílica e 20% de hematita: acima dessa proporção, a carga individual é menor, resultando em eventos menos severos; abaixo dela, a carga excede o limite de resistência das partículas de sílica, provocando sua fratura e, assim, reduzindo sua efetividade no desgaste.

Por outro lado, quando a proporção de sílica na lama abrasiva é inferior a 50%, observa-se uma queda na taxa de desgaste, que tende a se aproximar dos valores obtidos com 100% de hematita. Esse comportamento está relacionado à maior fragilidade da sílica sob cargas elevadas e à elevada dureza do corpo e contracorpo, o que favorece sua fragmentação e reduz sua contribuição no processo de desgaste, tornando a ação da hematita mais relevante. Além disso, conforme discutido por Esteves *et al.* (2021), quando a hematita passa a dominar a suspensão — devido à sua menor granulometria — o espaçamento entre as superfícies se torna insuficiente para permitir a inserção efetiva das partículas maiores de sílica na zona de contato, restringindo ainda mais sua participação no mecanismo abrasivo.

4.4 Micromecanismo de desgaste

A avaliação dos micromecanismos de desgaste presentes nas calotas geradas durante os ensaios de microabrasão foi conduzida por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura 22 apresenta as imagens obtidas, para os diferentes teores de abrasivo nas lambras analisadas: 100% sílica e 80% sílica e 20% hematita, com concentração de 1% de abrasivo.

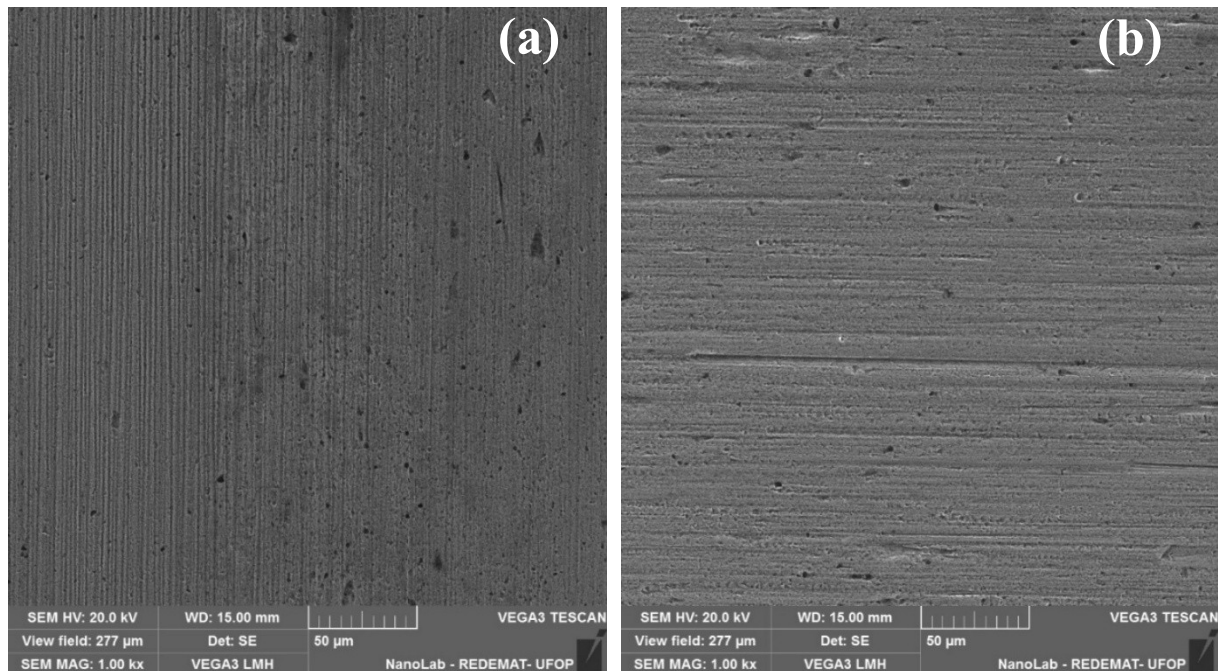


Figura 22: Análise MEV das calotas formadas para as diferentes da lama de abrasivo. (a) 100%SiO₂, (b) 80%SiO₂+20%Fe₂O₃.

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Conforme os resultados apresentados por Trezona et al. (1999), em condições de baixa concentração de abrasivos associadas a altas cargas, o desgaste por deslizamento tende a ser predominante. Essa tendência é evidenciada na figura 22, onde se observa que, para as lambras com 1% de abrasivo, especialmente nas composições de 100% sílica e 80% sílica com 20% de hematita, o micromecanismo de desgaste predominante foi o microcorte ou microsulcamento, como indicam os riscos e sulcos formados nas superfícies analisadas. A figura 23 mostra as imagens obtidas, para a concentração de 1% de abrasivo, com diferentes teores: 50% sílica e 50% hematita; 20% sílica e 80% hematita.

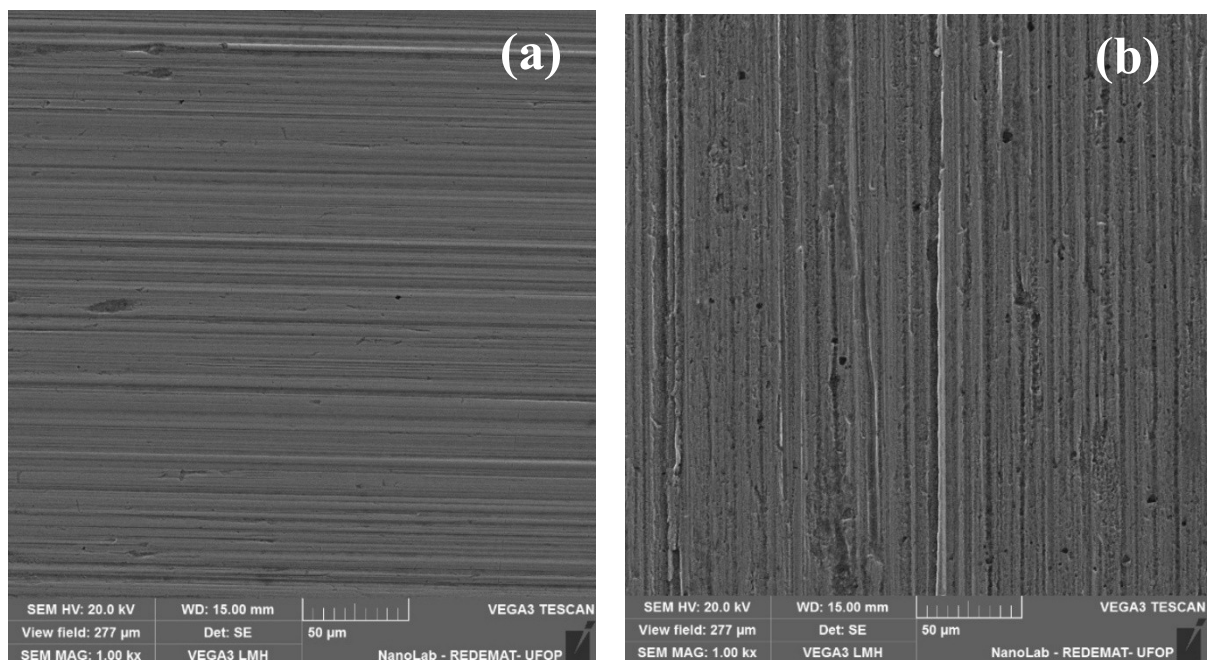


Figura 23: Análise MEV das calotas formadas para as diferentes da lama de abrasivo. (a) 50%SiO₂+50%Fe₂O₃, (b) 20%SiO₂+80%Fe₂O₃.

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A análise das superfícies desgastadas, apresentadas na Figura 22, revela que, nas lamas com 1% de abrasivo, as composições contendo 50% de sílica e 50% de hematita, bem como aquelas com 20% de sílica e 80% de hematita, exibem predominantemente micromecanismos de desgaste por microcorte ou microssulcamento. Além disso, observam-se pontos isolados de microindentações, indicando o início de uma transição para um regime de desgaste misto. Apesar disso, o desgaste por deslizamento permanece como o mecanismo principal sob essas condições. A figura 24 mostra as imagens obtidas em MEV para mistura de 100% hematita.

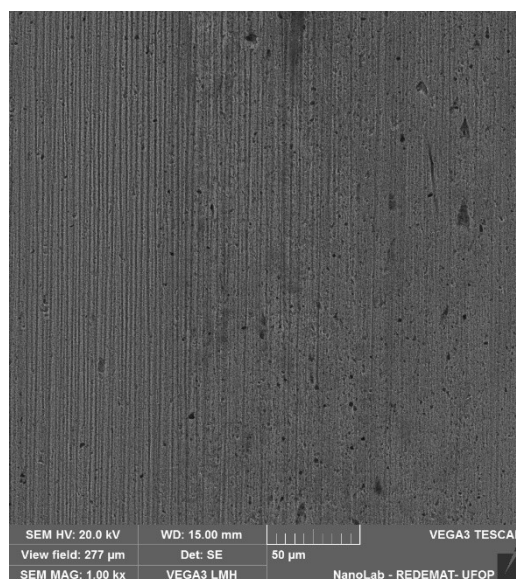


Figura 24: Análise MEV das calotas formadas para as diferentes da lama de abrasivo 100% Fe₂O₃.

Fonte: Pesquisa direta (2025)

A Figura 24 evidencia, de forma predominante, a ocorrência de desgaste por microcorte e microsulcamento, além de sinais mais marcantes de microindentações. De acordo com Fang *et al.* (1993), partículas com morfologia mais arredondada tendem a deslizar entre as superfícies, enquanto partículas angulosas favorecem o rolamento. Ainda segundo os autores, partículas com arestas pronunciadas podem fraturar durante esse processo. Nesse contexto, observa-se que o regime de desgaste se mantém majoritariamente por deslizamento, mas com indícios de transição para um regime misto.

De modo geral, os resultados obtidos evidenciaram que a variação da composição e da concentração volumétrica das partículas abrasivas exerce influência significativa tanto na taxa de desgaste quanto nos micromecanismos atuantes, caracterizando de forma clara as particularidades do tribossistema formado pelo aço inoxidável P410D e o aço AISI 52100.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Este estudo teve como finalidade principal investigar como a variação na composição e na concentração de partículas abrasivas afeta os mecanismos de desgaste e o coeficiente de microabrasão no sistema tribológico constituído pelo aço inoxidável ferrítico P410D e o aço AISI 52100. A motivação para a realização deste trabalho surgiu da constatação de que, embora novos estudos tenham sido desenvolvidos nos últimos anos, ainda há escassez de informações sobre os efeitos das misturas de abrasivos em diferentes concentrações volumétricas. Os resultados obtidos permitiram alcançar o objetivo proposto, evidenciando de forma clara que a presença e a proporção dos diferentes abrasivos influenciam significativamente tanto os micromecanismos atuantes no processo quanto as taxas de desgaste observadas.

Com base nos resultados obtidos nesse estudo, conclui-se que a composição da suspensão abrasiva exerce influência direta sobre a taxa de desgaste no sistema tribológico avaliado. Embora as lamas compostas exclusivamente por sílica ou hematita apresentem taxas de desgaste semelhantes — devido à proximidade entre as durezas dos abrasivos —, as misturas dessas partículas revelam comportamentos distintos, principalmente quando a concentração volumétrica de sílica ultrapassa 50%. Nesses casos, a maior granulometria da sílica, aliada à sua resistência à fratura, favorece uma atuação mais agressiva no processo de desgaste, tornando-a o abrasivo dominante na interação com o par tribológico.

Por outro lado, quando a proporção de sílica na mistura é reduzida, a taxa de desgaste também diminui, aproximando-se dos valores observados para 100% hematita. Isso ocorre porque as partículas de sílica, em menor quantidade e submetidas a maiores níveis de compressão, se fragmentam com mais facilidade, diminuindo seu efeito abrasivo. Além disso, a menor granulometria da hematita favorece sua penetração nas zonas de contato, especialmente quando predomina na suspensão, restringindo a atuação da sílica. Dessa forma, os dados reforçam que não apenas o tipo de abrasivo, mas também sua distribuição volumétrica e características físicas, como tamanho de partícula, são determinantes na definição dos micromecanismos e da intensidade do desgaste abrasivo.

Por fim, os resultados obtidos demonstram que, nas condições de baixa concentração de abrasivo (1%), o desgaste por deslizamento, manifestado principalmente por microcorte e microsulcamento, é o mecanismo predominante em todas as composições analisadas, com destaque para aquelas contendo altos teores de sílica. As análises das superfícies desgastadas

evidenciam, além dos sulcos característicos desse regime, a presença de microindentações isoladas, indicando o início de uma transição para um regime de desgaste misto.

5.2 Recomendações

Com base nos resultados deste estudo, sugerem-se as seguintes diretrizes que podem servir como referência para pesquisas futuras relacionadas à temática explorada:

- Estudo do impacto de partículas abrasivas de naturezas e concentrações volumétricas variadas sobre o desempenho do par tribológico aço P410D e contracorpo de nylon e zircônia;
- Análise dos micromecanismos e da taxa de desgaste no sistema tribológico composto pelos aços P410D e AISI 52100, submetido a distintas intensidades de força normal.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 10.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CEZAR, BRUNO SILVA. **Estudo do efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas nos mecanismos e coeficientes de desgaste na microabrasão do aço inoxidável P410D**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2022.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 4.ed. São Paulo: ABM, 1977.

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

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

DA SILVA, W. M. J. **Simulação do Desgaste Abrasivo Via Interações Múltiplas**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

ESTEVES, P. J. et al. **Combined effect of abrasive particle size distribution and ball material on the wear coefficient in micro-scale abrasive wear tests**. *Wear*, v. 476, 2021.

EYRE, T. S. **The mechanisms of wear**. *Tribology International*. v. 11, n. 2, p. 91–96, 1978.

FANG, L.; ZHOU, Q. D.; LI, Y. J. **An explanation of the relation between wear and material hardness in three-body abrasion**. *Wear*, v. 151, p. 313-321, 1991.

GAVA, G. H. S. et al. **Effect of load partition and particle distribution on micro-abrasive wear mapping of two-phase metal matrix composites**. *Wear*, v. 301, p. 130-136, 2013.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019. p. 230.

GOMES, V. A. O. et al. **Effect of abrasive particle size distribution on the wear rate and wear mode in micro-scale abrasive wear tests**. *Wear*, v. 328-329, p. 536-568, 2015.

HUTCHINGS, I. M, SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Butterworth-Heinemann, 2017.

KELLY, D. A.; HUTCHINGS, I. M. **A new method for measurement of particle abrasivity**. *Wear*, v. 250, p. 76-80, 2021.

- 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.
- LISBOA, R. G. **Estudo do efeito da mistura de diferentes partículas abrasivas no mecanismo e coeficiente de desgaste no par tribológico aço inoxidável P410D e nylon**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022.
- LO, K. H.; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. **Recent developments in stainless steels**. Materials Science and Engineering: R: Reports. v. 65, p. 39–104, 2009.
- MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. p. 354.
- MILHOMEN, F. O.; DA LUZ, J. A. M. **Experimentos simples para estudo de granéis**. Holos. vol. 3, p. 114-131, 2016.
- MINAYO, M. C. da S. **Ética das pesquisas qualitativas segundo suas características**. São Paulo: Revista Pesquisa Qualitativa, 2021. v. 9, n. 22, p. 521–539.
- MISRA, A., FINNIE, I. **Correlations between two-body and three-body abrasion and erosion of metals**. Wear, v. 68, p 33 – 39, 1981.
- MULHEARN, T. O.; SAMUELS L. E. **The Abrasion of Metals: A Model of the Process**. Wear, v.5, 1962, p. 478 – 498, 1962.
- PADILHA, A. F. e GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus Editora Limitada, 1994.
- ROWE, T. C. **Avaliação dos micromecanismos e taxa de desgaste abrasivo no par tribológico aço P410D e zircônia com diferentes lamas abrasivas**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2023.
- RABINOWICZ, E.; DUNN, L. A.; RUSSELL, P. G. **A study of abrasive wear under threebody conditions**. Wear, v. 4, n. 5, p. 345-355, 1961.
- RAMPAZZO, L. **Metodologia científica: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação**. 5. ed. São Paulo: Edições Loyola, 2010.
- RUIZ, J. A. **Metodologia científica: guia para eficiência nos estudos**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

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

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

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico.** 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** São Paulo: Pearson. 6.ed. 2008.

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

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

WELLINGER, K.; UETZ, H. **Gleitverschleiß, Spiilverschleiß, Strahlverschleiß unter der Wirkung von kzrnigen Stoffen.**VD1-Forschungsheft t 4 4 9B, Bd.2 1. 1955.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials.** Tribology Series, v. 10. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1987.

ZUM GAHR, K. H. **Wear by hard particles.** Tribology International, v. 31, n. 10, p. 587–596, 1998.

