



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



OTAVIO BRAGA GOULART

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE COMPÓSITOS DE
ALUMÍNIO COM DIFERENTES TEORES DE REJEITO DE MINÉRIO
DE MANGANÊS**

OURO PRETO - MG
2023

OTAVIO BRAGA GOULART
otavio.goulart@aluno.ufop.edu.br

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE COMPÓSITOS DE
ALUMÍNIO COM DIFERENTES TEORES DE REJEITO DE MINÉRIO
DE MANGANÊS**

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

Professor orientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles

OURO PRETO – MG
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G694r Goulart, Otavio.

Resistência ao desgaste abrasivo de compósitos de alumínio com diferentes teores de rejeito de minério de manganês. [manuscrito] / Otavio Goulart. - 2023.

51 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Teles.

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

1. Desgaste mecânico - Desgaste abrasivo. 2. Materiais compostos - Alumínio. 3. Rejeitos (Metalurgia) - Minérios de manganês. 4. Abrasivos - Partículas abrasivas. I. Teles, Vinícius. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Otávio Braga Goulart

Resistência ao desgaste abrasivo de compósitos de alumínio com diferentes teores de rejeito de minério de manganês

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 31 de julho de 2023

Membros da banca

Dr - Vinícius Carvalho Teles - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Margarida Márcia Fernandes Lima - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Paulo Henrique Vieira Magalhães - 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 03/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/08/2023, às 15:09, 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 **0567719** e o código CRC **1AFB2B58**.

A Deus dedico a conclusão dessa etapa,
Aos meus pais Márcio e Geusa, e meu
irmão Pedro pelo apoio.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por ter me dado forças para conquistar meus objetivos.

Aos meus pais por todo suporte e amor que me dão.

Ao meu irmão pelo companheirismo e fidelidade sempre.

Ao meu orientador DSc. Vinícius Carvalho Teles por todos os ensinamentos, orientação e disponibilidade e paciência.

A professora DSc. Margarida Márcia Fernandes Lima por disponibilizar as amostras utilizadas nesse trabalho, por todos os ensinamentos e por aceitar o convite de fazer parte da banca examinadora.

Ao professor DSc. Paulo Henrique Vieira Magalhães por aceitar integrar a banca avaliadora desse trabalho e por todo conhecimento passado durante o curso.

Aos meus professores do curso de Engenharia Mecânica por todos os ensinamentos passados, que puderam me desenvolver profissionalmente e pessoalmente.

Ao Laboratório de Metalografia e Ensaaios Mecânicos da UFOP.

Ao Engenheiro Marconi pela ajuda na utilização dos equipamentos do laboratório

Aos meus amigos de curso por todos os momentos compartilhados e companheirismo.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

ISAAC NEWTON

RESUMO

A prática da mineração é essencial para a sustentação do mundo atualmente, porém ela traz consigo alguns problemas relacionados ao descarte do rejeito do minério. O acúmulo de rejeito de minério em barragens traz vários problemas ambientais e as comunidades que moram próximo a elas, como foi o caso de Bento Rodrigues e Brumadinho. Esse trabalho tem como objetivo dar uma utilidade e reaproveitar o rejeito de minério de manganês, analisando sua influência no desgaste abrasivo de compósitos de alumínio reforçados com ele. As amostras utilizadas nos ensaios, incluindo a de alumínio puro, foram compactadas na pressão de 140Mpa e sinterizadas nas temperaturas de 600 e 610°C durante 120 e 180min. As amostras têm 5, 10 e 15% de reforço de rejeito de minério de manganês, além da amostra de alumínio puro usada para comparação. Foram feitos os ensaios de microabrasão com esfera rotativa fixa, com a esfera tendo 25,4mm de diâmetro e a força normal aplicada de 1,5N. A lama abrasiva consistia em uma solução de 10% de dióxido de silício (SiO₂) e 90% de água destilada, o tamanho das partículas abrasivas é em média 5µm. Os ensaios de desgaste abrasivo feitos possibilitaram a medição da cratera de desgaste e a observação dos mecanismos de desgaste presente nas amostras. Os compósitos de alumínio aumentaram sua resistência ao desgaste à medida que a porcentagem de partículas de reforço aumentou, porém, as amostras de alumínio puro apresentaram maior resistência ao desgaste que todos compósitos, exceto para condição de sinterização na temperatura de 610°C. Os micromecanismos de desgaste observados foram os de microcorte e microsulcamento. Os resultados obtidos mostram que o aumento da quantidade de rejeito de minério de manganês contribuiu para a resistência ao desgaste, porém se as partículas não estiverem bem aderidas a matriz de alumínio elas podem ser arrancadas, aumentando o desgaste no material.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Compósitos de matriz de alumínio. Rejeito de minério de manganês. Partículas abrasivas.

ABSTRACT

The practice of mining is essential for sustaining the world today, but it brings with it some problems related to the disposal of ore tailings. The accumulation of ore tailings in dams brings several environmental problems and the communities that live near them, as was the case of Bento Rodrigues and Brumadinho. This research aims to give a utility and reuse the manganese ore waste, analyzing its influence on the abrasive wear of aluminum composites reinforced with it. The samples used in the tests, including pure aluminum, were compacted at the pressure of 140Mpa and sintered at temperatures of 600 and 610 C during 120 and 180min. The samples have 5, 10 and 15% manganese ore tailings reinforcement, in addition to the pure aluminum sample used for comparison. Microabrasion tests were performed with fixed rotating ball, with the sphere having 25.4mm in diameter and the normal force applied of 1.5N. The abrasive sludge consisted of a solution of 10% silicon dioxide (SiO₂) and 90% distilled water, the size of the abrasive particles is on average 5µm. The abrasive wear tests made allowed the measurement of the wear crater and the observation of the wear mechanisms present in the samples. Aluminum composites increased their wear resistance as the percentage of reinforcing particles increased, however, pure aluminum samples showed higher wear resistance than all composites, except for sintering condition at the temperature of 610 C. The micromechanisms of wear observed were the microcut and microsulcation. The results show that the increase in the amount of manganese ore tailing contributed to the wear resistance, but if the particles are not well adhered to the aluminum matrix they can be pulled, increasing the wear in the material.

Key-words: Abrasive wear. Aluminum matrix composites. Manganese ore tailings. Abrasive particles.

LISTA DE SIMBOLOS

- b** – Diâmetro da Calota
- CMC** – Compósito de Matriz Cerâmica
- CMM** – Compósito de Matriz Metálica
- CMP** – Compósito de Matriz Polimérica
- CNT** – Carbon Nanotubes
- F** – Fator de Circularidade
- Ha** – Dureza da Partícula Abrasiva
- Hs** – Dureza da Partícula Superfície
- k** – Coeficiente de Desgaste
- MEV** – Microscópio Eletrônico de Varredura
- Mt** – Megatoneladas
- NbC** – Carboneto de nióbio
- R** – Raio da Esfera
- rpm** – Rotação por Minuto
- S** – Distância Deslizada
- SiC** – Carboneto de Silício
- SiO₂** – Dióxido de Silício
- V** – Volume Desgastado
- W** – Força Normal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das características geométricas e espaciais das partículas da fase de reforço que podem influenciar nas propriedades de um compósito.	5
Figura 2 - Classificação dos compósitos quanto ao reforço.	6
Figura 3 - Mecanismos que resultam no dano de um componente ou estrutura.	13
Figura 4- Classificação dos processos de desgaste pelo modo de desgaste.	14
Figura 5 - Diferenças entre (a) Desgaste por riscamento e (b) Desgaste por rolamento.	15
Figura 6 - Superfície de um corpo-de-prova de aço ferramenta que sofreu desgaste abrasivo por (a) riscamento por partículas de diamante (b) rolamento por partículas de SiC.	15
Figura 7 – Tipos de micromecanismos de desgaste abrasivo.	16
Figura 8 – Taxa de desgaste no eixo y e distância de deslizamento no eixo x para tamanho de abrasivo 50 μm	18
Figura 9 – Evolução da perda de massa em função da distância percorrida de ensaio para compósitos de alumínio com 5, 10 e 15% de SiC como reforço, e do alumínio puro.	19
Figura 10 - Fluxograma das etapas do trabalho.	23
Figura 11 - Amostra de compósito de alumínio reforçada com rejeito de manganês.	25
Figura 12 - Ensaio de microabrasão do tipo esfera fixa.	26
Figura 13 - (a) Exemplo de configuração de desgaste; (b) exemplo de impressão de desgaste após 25 min em amostra de alumínio puro sinterizado a 600°C por 120 min.	27
Figura 14 – Microestrutura das amostras sinterizadas a 600°C durante 120min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV.	30
Figura 15 - Microestrutura das amostras sinterizadas a 600°C durante 180min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV.	30
Figura 16 - Microestrutura das amostras sinterizadas a 610°C durante 120min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV.	31
Figura 17 - Microestrutura das amostras sinterizadas a 610°C durante 180min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV.	31

Figura 18 - Valores de microdureza Vickers versus condição de sinterização das amostras de	32
Figura 19 - Coeficiente de desgaste (k) em função do intervalo de tempo.	33
Figura 20 – (a) Cratera de desgaste com borda bem definida obtida neste trabalho. (b) Cratera de desgaste com borda difusa.	34
Figura 21 - Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 600°C durante 120min.	36
Figura 22 - Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 600°C durante 180min.	36
Figura 23 – Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 610°C durante 120min.....	37
Figura 24 – Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 610°C durante 180min.....	37
Figura 25 – Esquema simplificado da influência dos carbonetos massivos na perda de volume pelo desgaste abrasivo em ferros fundidos brancos. a) Perda de volume em função do tamanho do carboneto pela ranhura de desgaste e pela dureza das partículas abrasivas. b) Perda de volume em função da fração de volume de carbonetos e dureza das partículas abrasivas. c) Perda de volume em função da fração de volume de carbonetos e dureza dos carbonetos.....	39
Figura 26 – Resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos testados em roda de borracha úmido com sílica de 50 – 70 mesh, em função da fração de volume de carbonetos massivos M7C3.	41
Figura 27 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 600°C durante 120 minutos.	42
Figura 28 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 600°C durante 180 minutos.	42
Figura 29 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 610°C durante 120 minutos.	43
Figura 30 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 610°C durante 180 minutos.	43
Figura 31 – (a) Cratera de desgaste obtida para a amostra de compósito de alumínio reforçada com 5% de rejeito de manganês e sinterizada à 610°C durante 120 min. (b) ampliação do centro da calota em escala de 200 μ m. (c) ampliação do centro da calota em escala de 100 μ m.	44
Figura 32 – (a) Cratera de desgaste obtida para a amostra de compósito de alumínio reforçada com 10% de rejeito de manganês e sinterizada à 610°C durante 120 min. (b) ampliação do	

centro da calota em escala de 200 μm . (c) ampliação do centro da calota em escala de 100 μm	45
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades mecânicas de materiais compósitos de matriz de liga de alumínio	10
Tabela 2 - Minerais de manganês de importância econômica.....	11
Tabela 3 - Amostras utilizadas e suas características.....	24
Tabela 4 - Características do abrasivo.....	26
Tabela 5 - Parâmetros do ensaio de desgaste microabrasivo.....	28
Tabela 6 - Indicadores e variáveis	29
Tabela 7 - Cálculo do volume e da taxa de desgaste a partir do diâmetro das crateras.....	35

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	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Materiais Compósitos	5
2.1.1	Classificação dos compósitos referente ao reforço.....	6
2.1.2	Tipos de matrizes de compósitos.....	8
2.2	Minério de manganês.....	11
2.3	Desgaste.....	13
2.3.1	Desgaste abrasivo	14
2.3.2	Micromecanismos de desgaste abrasivo.....	16
2.4	Desgaste abrasivo em compósitos de alumínio	17
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	Tipo de Pesquisa.....	22
3.2	Materiais e Métodos	23
3.2.1	Preparação das amostras.....	23
3.2.2	Microabrasão	25
3.2.3	Cálculo do coeficiente de desgaste	27
3.2.4	Mecanismos de desgaste.....	28
3.3	Variáveis e indicadores.....	28
3.4	Instrumento de coleta de dados	29
3.5	Tabulação de dados	29
3.6	Considerações finais	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Microestrutura do material	30
4.2	Microdureza.....	31
4.3	Coeficiente e taxa de desgaste	32

4.4	Mecanismos de desgaste.....	44
5	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A exploração de minérios pelos humanos para utilização em diversas finalidades está presente desde o início da vida do homem no planeta terra. Na chamada Idade dos Metais, o ser humano já praticava a fabricação de ferramentas para auxílio em caça e pesca. Atualmente os minerais fazem parte de diversas áreas da sociedade, sendo de extrema importância para o funcionamento do sistema capitalista e produtivo (DE OLIVEIRA *et al.*, 2020).

De acordo com IBRAM (2021), a mineração no Brasil registrou um aumento de 62% no faturamento quando comparado à 2020, atingindo um valor total de 333,1 bilhões de reais (excluindo-se petróleo e gás).

O crescimento da aplicação de medidas pró-ambientais e o incentivo da prática de prevenção dos impactos ambientais relacionados a rejeitos de minérios presentes em barragens de mineração tem incentivado pesquisas e estudos que buscam a reutilização desses elementos que são descartados e armazenados nas barragens. Um exemplo desse reaproveitamento é na utilização desses rejeitos para a fabricação de compósitos (VIVEIROS *et al.*, 2017, FARIA, 2011, LINHARES, 2012).

De acordo com Callister (2012), com surgimento no século XX, os compósitos são materiais que proporcionam a obtenção de uma combinação de propriedades entre as fases que os compõe. Ainda segundo o autor, através dessa junção das melhores características, os compósitos multifásicos surgem como um diferencial, permitindo serem aplicados em situações em que materiais tradicionais não atendem.

Segundo Neto e Pardini (2016) o uso de metais como elementos matrizes em compósitos é bastante comum devido à combinação de características como a alta resistência mecânica, a resistência a corrosão, boa condutividade térmica e tenacidade a fratura. O alumínio, titânio e magnésio são exemplos de metais que apresentam propriedades adequadas para formar a matriz de um compósito, aliado ao fato de possuírem uma baixa massa específica. Compósitos formados por essas matrizes juntamente com materiais e particulados mais duros formam uma combinação muitas vezes bastante benéfica, alcançando uma estabilidade térmica maior e uma maior resistência ao desgaste, incluindo o abrasivo.

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), a tribologia é definida como o ramo da ciência e tecnologia preocupado com a interação de superfícies em movimento relativo e com

assuntos associados. Os mesmos autores ainda destacam que a tribologia estuda o atrito, desgaste e lubrificação, através do movimento de um material sobre o outro, e seu estudo é de extrema importância para o entendimento do funcionamento de vários tipos de mecanismos, sendo eles, artificiais ou naturais. São raras as situações que em um sistema mecânico não há deslizamento e contato entre as superfícies presentes, por isso os avanços alcançados na área da tribologia têm contribuído bastante para o progresso da engenharia no mundo.

O desgaste ocorre sempre que uma superfície se movimenta sobre outra e sob a influência do atrito, causando geralmente a perda progressiva de material, acarretando dano à uma das superfícies envolvidas ou à ambas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A compreensão do desgaste é de suma importância visto que sua presença contribui para pequenas perdas de matéria podendo chegar em até falhas catastróficas (ZUM GAHR, 1987).

Dentre os tipos de desgastes, tem-se o desgaste abrasivo, sendo definido como “o desgaste devido a partículas duras ou protuberâncias duras forçadas contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida” (ASTM G40, 1996).

O desgaste abrasivo de materiais compósitos é bastante complexo, pois, comumente, envolve duas ou mais fases com propriedades mecânicas diferentes (ZUM GAHR, 1987). Segundo Zum Gahr (1987), a resistência ao desgaste abrasivo de materiais compósitos, matriz metálica e particulado, pode ser regida pela regra das misturas em que a resistência a abrasão vai depender da fração volumétrica do particulado e de suas propriedades mecânicas, mas não é de forma linear. Outras variáveis são: do tipo de particulado (sua resistência a abrasão), tamanho, forma e distribuição.

Nesse trabalho, é proposto o estudo da resistência ao desgaste abrasivo dos compósitos de matriz de alumínio reforçados com partículas de rejeito de minério de manganês. Assim, tem-se a seguinte problemática:

**Qual a resistência ao desgaste abrasivo de compósitos de alumínio reforçados
com diferentes frações de rejeito de minério de manganês?**

1.2 Justificativa

Conforme Silva Júnior (2019), os rejeitos de minério armazenados em barragens, têm sido motivo para grande preocupação no mundo atual. Segundo o mesmo autor, as chances de prejuízos materiais e a ameaça a vida das pessoas e comunidades em geral que se situam

próximas as barragens de minério, além da agressão ambiental, fizeram com que alternativas fossem buscadas para dar fim a esse perigo eminente ocasionado pelo armazenamento excessivo de resíduos em barragens.

Os compósitos de matriz metálica reforçados com partículas trazem algumas vantagens, como maior resistência mecânica, maior rigidez e melhor estabilidade dimensional, comparados ao metal puro (SMITH; HASHEMI, 2012). O alumínio é um material bastante utilizado para matriz de compósitos e é fácil de ser processado, por isso ele foi escolhido nesse trabalho junto ao rejeito de minério.

Alguns estudos realizados em compósitos de alumínio com rejeito de manganês sinterizados foram feitos com o propósito de melhorar as propriedades em relação ao alumínio puro e ainda assim dar uma utilidade aos resíduos de minério que são um problema ambiental (LIMA *et al*, 2020; ALVES, 2020; RIBEIRO, 2021).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Determinar a resistência ao desgaste abrasivo de compósitos de alumínio reforçados com diferentes frações de rejeito de minério de manganês.

1.3.2 Específicos

- Avaliar o efeito da temperatura e tempo de sinterização na resistência ao desgaste abrasivo;
- Avaliar a influência da porcentagem de rejeito de minério de manganês dos compósitos na resistência ao desgaste abrasivo.
- Estudar os micromecanismos de desgaste predominante.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho é composto por cinco capítulos, começando pela introdução, seguida da referência bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões, e por fim a conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

No primeiro capítulo, é apresentado o tema e o contexto em forma de introdução, através da formulação do problema, da justificativa para a realização do estudo do trabalho, seguidos do objetivo geral e dos específicos.

A revisão bibliográfica acerca dos assuntos mais relevantes que compõe o trabalho, conceituando e utilizando-se de uma base teórica para a inserção do leitor no estudo é abordada no segundo capítulo.

O capítulo terceiro trata da metodologia usada para a realização do experimento é detalhada e explicada.

No quarto capítulo, são mostrados os Resultados e Discussão, utilizando-se de toda teoria apresentada durante o trabalho para validar e discutir os resultados obtidos.

No quinto capítulo, as Conclusões do estudo são feitas, destacando os pontos principais do trabalho a serem comentados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Segundo Callister (2012), materiais compósitos são aqueles que possuem duas ou mais fases; sendo que muitos deles apresentam somente duas fases, a fase matriz, que é contínua e envolve a outra fase, a fase dispersa. De acordo com o mesmo autor, um compósito manifesta uma proporção significativa das propriedades de cada fase que o constitui, possibilitando uma combinação que aproveita as melhores características. Assim, a possibilidade de ganhos através da criação desses materiais é imensurável; na área da aeronáutica, por exemplo, os engenheiros sempre procuram por materiais que sejam resistentes a impacto, abrasão, cargas excessivas e ao mesmo tempo tenham uma massa específica pequena.

Materiais compósitos vem sendo desenvolvidos obtendo-se ótimas combinações e, conseqüentemente, substituindo materiais tradicionais, como madeira e aços, como cita Moreira (2009). Segundo ele, algumas vantagens desses compósitos são altas relações de resistência/peso e rigidez/peso, a maior resistência à corrosão, desgaste e fadiga. Todos esses fatores contribuem para que esses materiais sejam cada vez mais utilizados e aprimorados na engenharia.

As propriedades do compósito são dependentes da geometria das fases, das propriedades de cada fase e da concentração de cada uma (CALLISTER, 2012). Na Figura 1 é possível observar as diferentes formas que a fase dispersa pode ser distribuída na matriz.

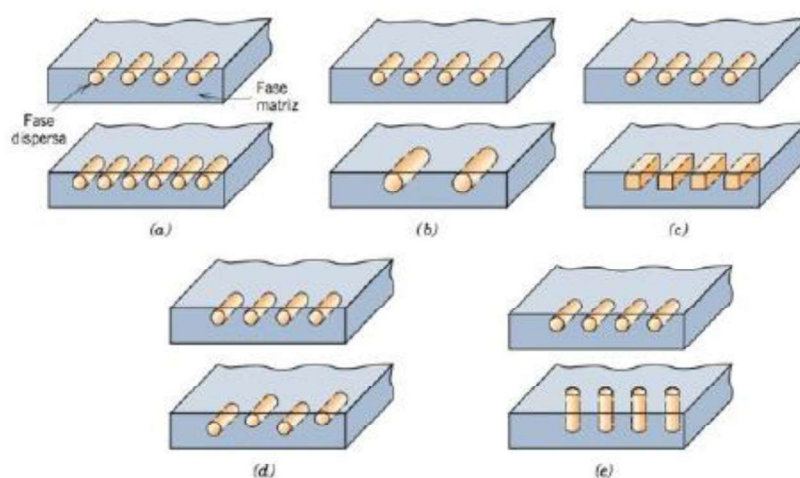


Figura 1 - Representação das características geométricas e espaciais das partículas da fase de reforço que podem influenciar nas propriedades de um compósito.
 Fonte: Callister (2012).

A fase matriz de um compósito pode ser formada por uma cerâmica, um metal ou um polímero. Essa fase envolve a fase dispersa, preenchendo os espaços vazios (CALLISTER, 2012).

2.1.1 Classificação dos compósitos referente ao reforço

Os compósitos podem ser classificados em três formas diferentes quanto à sua fase reforço. Eles são identificados como compósitos com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais. Além dessa classificação, cada divisão possui outras duas subdivisões no mínimo, como é mostrado na Figura 2 (CALLISTER, 2012).

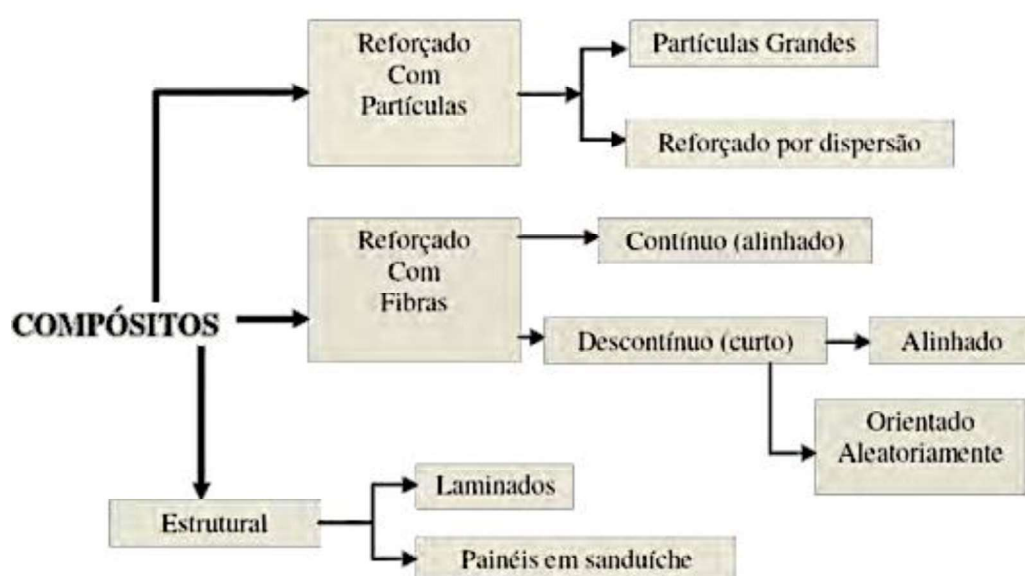


Figura 2 - Classificação dos compósitos quanto ao reforço.
Fonte: Adaptado de Callister (2012).

Para os compósitos reforçados com partículas, existem duas subdivisões, os reforçados com partículas grandes e os reforçados por dispersão (CALLISTER, 2012).

Nos compósitos reforçados, as partículas de reforço são mais duras e rígidas que a fase matriz, atuando como obstáculos e restringindo a movimentação da matriz. A combinação da fase matriz e reforço deve formar uma interface entre elas que adeque a rigidez do reforço com a ductilidade da matriz (VENTURA, 2009). Segundo Callister (2012), a geometria dos

particulados pode ser de várias formas: quadradas, arredondadas, triangulares etc.; mas, para maior eficiência do reforço, é necessário que as partículas tenham tamanhos semelhantes, sejam pequenas e estejam distribuídas uniformemente pela matriz. O autor complementa que, as propriedades mecânicas do compósito são influenciadas pelo tamanho das partículas e concentração, além da influência que o material da matriz exerce sobre o compósito.

Outra forma de reforço com partículas, de acordo com Callister (2012), é através do reforço por dispersão. Nesse tipo de reforço as partículas possuem entre 10 e 100nm de diâmetro. Esses particulados dificultam a deformação plástica e fratura do compósito, pois impedem ou atrapalham a movimentação das discordâncias.

Além do reforço com partículas, Askeland e Wedelin (2019) afirmam que os compósitos podem ser reforçados com fibras. Segundo eles, em termos de tecnologia, os compósitos reforçados com fibras são os mais relevantes, elas colaboram para o aumento da força da matriz, destacando bem as propriedades de cada uma das duas fases. Ao incorporar fibras mecanicamente mais resistentes que o material da matriz, os compósitos ganham maior resistência mecânica, resistência à fadiga, resistência específica e módulo de Young. A incorporação de uma matriz mais dúctil com fibras frágeis, porém altamente resistentes, forma uma ótima combinação. As fibras absorvem as tensões da matriz e resistem à força aplicada, e a matriz evita que haja difusão das espécies, como por exemplo oxigênio e umidade, protegendo as propriedades das fibras. As fibras de reforço podem ser contínuas ou descontínuas (curtas) (ASKELAND; WENDELIN, 2019).

De acordo com Askeland e Wendelin (2019), os compósitos laminares possuem diversas aplicações, como por exemplo, recobrimentos muito finos, protetores mais espessos, blindagens, bimetálicos, laminados, entre outras. Ainda segundo os autores, os compósitos laminados, são uma subdivisão dos compósitos estruturais, muito desses compósitos são criados para se obter uma melhor resistência a corrosão do material por um baixo custo, e propiciar um compósito mais leve e com alta resistência. Resistência ao desgaste, ao desgaste abrasivo e melhor acabamento superficial, são também outros benefícios que estes materiais podem possuir.

Nas estruturas sanduíche, o compósito é formado por camadas finas externas que funcionam como chapas de faceamento e entre essas faces há um enchimento de material mais leve, como a espuma polimérica. O papelão corrugado é um exemplo desse tipo de compósitos, possuindo um núcleo corrugado de papel que é forrado por papel grosso e liso. Apesar dos dois materiais não serem rígidos, a combinação entre os dois possui essa característica. Dois

principais tipos de estruturas sanduíche são as do tipo colmeia e os materiais revestidos, sendo o primeiro tipo muito usado na engenharia aeronáutica, constituindo grande parte dos principais materiais de construção de aeronaves. Já no tipo de materiais revestidos, o compósito tem um núcleo metálico revestido por camada externa de outro metal. Esse material tem grande aplicabilidade na indústria, um exemplo são as ligas de alumínio de alta resistência (ASKELAND E WENDELIN, 2019; SMITH E HASHEMI, 2012).

2.1.2 Tipos de matrizes de compósitos

Existem três tipos de matrizes: metálicas (CMM), poliméricas (CMP) e cerâmicas (CMC). Geralmente, as matrizes metálicas e poliméricas são escolhidas pela sua maior ductilidade, para contrapor com um reforço mais duro e frágil. No entanto, para as matrizes cerâmicas, o material utilizado no reforço tem como objetivo aumentar a tenacidade do compósito (CALLISTER, 2012).

Segundo Callister (2012), com os novos desenvolvimentos de compósitos cerâmicos, a tenacidade desses materiais tem melhorado consideravelmente, através da inserção de reforços particulados, fibras ou whiskers. O autor ressalta que essa melhora na resistência a fratura desses compósitos se dá pela interação entre as trincas e a fase dispersa, pois ao se iniciar na fase matriz a propagação dessas trincas é retardada pelas partículas, fibras ou whiskers. Segundo ele, os compósitos de matriz cerâmica vêm sendo desenvolvidos através da evolução da nanotecnologia, aprimorando as propriedades mecânicas, químicas e elétricas do material através a integração de nanotubos de carbono na microestrutura de alumina convencional. De acordo com Smith e Hashemi (2012), pesquisas que vem sendo feitas já chegaram a produzir um compósito de cerâmica de alumina com teor de 5 a 10% de nanotubos de carbono e 5% de nióbio moído. O compósito criado atingiu um valor de tenacidade a fratura cinco vezes maior que a cerâmica de alumina pura e pode chegar a uma taxa de condução elétrica 10 trilhões de vezes maior.

Os compósitos de matriz de polímeros são utilizados em diversas aplicações e são os mais empregados dentre os materiais compósitos, tudo isso em decorrência das suas boas propriedades a temperatura ambiente, custo baixo e sua facilidade de fabricação. Os reforços mais comuns são vidro, aramida e carbono (CALLISTER, 2012).

Os compósitos de matriz metálica possuem propriedades excelentes como por exemplo, alta resistência, alto módulo específico e estabilidade térmica. Muitas pesquisas nesse tipo de material vêm sendo realizadas nas últimas décadas, pois suas excelentes características somadas a disponibilidade de reforços mais baratos (KHAN; NISAN, 2022). De acordo com Askeland e Wedelin (2019), a indústria aeroespacial, principalmente, tem se aproveitado bastante desses compósitos como parte de componentes para motores de aeronaves e foguetes. Segundo eles, existem superligas de compósitos de matriz metálica com fibras cerâmicas (SiC e B₄N) que suportam temperaturas altas, aumentando a eficiência dos motores de avião a jato. Além da aeronáutica, outras áreas como a automotiva, agricultura e mineração, também tem usado esses materiais.

Materiais com menores temperatura de fusão, como é o caso do magnésio e alumínio, são muitas vezes utilizados como matriz metálica de um compósito, pois são mais fáceis de serem processados. Já para aplicações em altas temperaturas de trabalho e em um cenário sujeito a fadiga térmica, ligas de aço e titânio são usadas (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Em relação ao tipo de reforço destacam-se os reforços com partículas e com fibras (contínuas e descontínuas). Os CMMs reforçadas por fibras contínuas alcançam maiores níveis de rigidez em relação aos compostos de fibras descontínuas ou particulados. O reforço com fibras de boro em matriz de liga de alumínio foi um dos primeiros compósitos de matriz metálica com fibras contínuas criado. Outros exemplos são CMMs reforçadas com fibras contínuas de carboneto de silício, as de tungstênio, as de grafita, e as de alumina (SMITH; HASHEMI, 2012).

Usando o alumínio como exemplo, a partir de uma matriz de liga de alumínio AL6061, pode-se observar na Tabela 1 as propriedades para diferentes tipos de reforços (fibras descontínuas, partículas, sem reforço). É possível perceber que a tensão de ruptura da liga AL6061 e o módulo de elasticidade aumentam para os CMMs reforçados com partículas e fibras descontínuas à medida que é adicionado 20% de SiC. O mesmo ocorre para a liga AL2124 (SMITH; HASHEMI, 2012).

Tabela 1- Propriedades mecânicas de materiais compósitos de matriz de liga de alumínio

	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
CMMs de fibras descontínuas			
Al 2124-T6 (20% SiC)	650	127	2,4
Al 6061-T6 (20% SiC)	480	115	5
CMMs com partículas			
Al 2124 (20% SiC)	552	103	7
Al 6061 (20% SiC)	496	103	5,5
Sem reforço:			
Al2124-F	455	71	9
Al6061-F	310	68,9	12

Fonte: Adaptado de Smith (2012).

Estudos feitos utilizando compósitos de matriz de liga de alumínio utilizando rejeito de minério como reforço mostram mudanças nas propriedades do material, além de ter uma vantagem em reduzir danos ao meio ambiente e reaproveitar minérios que seriam alocados em barragens. Ribeiro (2021) confeccionou compósitos de alumínio reforçados com partículas dispersas de rejeito de manganês, variando o percentual de reforço de 5, 10 e 15%. As amostras foram compactadas e sinterizadas ao ar natural em temperaturas de 550°C e 600°C. Como resultado observou-se que em todas as amostras houve aumento no limite de escoamento quando comparada ao alumínio puro, com seu valor máximo nos compósitos com 10% de reforço. As amostras sinterizadas a 550°C apresentaram maior limite de escoamento.

Lima *et al.* (2020) sinterizaram compósitos de matriz de alumínio reforçados com 5, 10 e 15% de rejeito de minério de manganês. Os compósitos foram compactados e sinterizados em temperaturas de 600°C e 610°C durante 120 e 180 minutos. Em pequenas deformações os compósitos apresentaram maior resistência à compressão do que o alumínio, porém para valores de deformação maiores que 30%, o encruamento do alumínio se mostrou maior, proporcionando uma maior resistência à compressão. Em geral, todos os compósitos exibiram valores maiores de dureza que as amostras de alumínio puro, destacando-se aqueles com 10% de reforço, que obtiveram o maior valor.

2.2 Minério de manganês

O manganês está na décima segunda posição dos elementos mais abundantes no planeta terra, ele está presente na natureza juntamente com outros elementos, constituindo minerais, em sua maioria óxidos. Eles existem na forma de óxidos, silicatos, hidróxidos e carbonatos, totalizando mais de cem minerais com manganês em sua composição, porém, poucos desses minerais são minerais de minério (DIAS, 2018).

O minério de manganês é utilizado na fabricação de diversas ligas metálicas, Aproximadamente 90% desse elemento é utilizado na indústria siderúrgica, usado em combinação com elementos como o cobre, chumbo, zinco, alumínio, estanho e especialmente o ferro para produção de aço (DIAS, 2018).

O Brasil possui 116 Mt de reservas de minério de manganês, possuindo 18,3% da reserva mundial. Alguns dos depósitos de manganês mais abundantes e importantes do país são o depósito de Urucum no Mato grosso, Serra do Navio no Amapá, jazida do Azul no Pará e Morro da Mina em Minas Gerais (DIAS, 2018; LIMA; NEVES, 2016).

O manganês é um elemento químico do grupo de metais de transição. Dentre os diversos minerais que contém esse elemento, de acordo com Luz & Lins (2008), os mais importantes são a pirolusita, psilomelano e a manganita, que são dióxidos de muita importância econômica no mercado. Na tabela 2, são mostrados alguns minerais que contém manganês que são relevantes economicamente.

Tabela 2 - Minerais de manganês de importância econômica

Mineral	Fórmula Química	Teor de Mn típico(%)
Bementita	$\text{Mn}_8\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_{10}$	43,2
Bixbyta	$(\text{Mn}, \text{Fe})_2\text{O}_3$	52,1
Braunita	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6\text{SiO}_{12}$	66,6
Psilomelano	$(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2\text{Mn}_5\text{O}_{10}$	45 – 60
Criptomelano	$\text{K}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_{16}$	Função do teor de K

Espessartita	$\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	33,3
Hausmanita	Mn_3O_4	72
Jacobsita	Fe_2MnO_4	23,8
Holandita	$\text{Ba}(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{2+})_8\text{O}_{16}$	42,5
Litioforita	$(\text{Li}, \text{Al})\text{MnO}_2(\text{OH})$	Função da água de hidratação
Manganita	$\text{MnO}(\text{OH})$	62,5
Nsutita	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Mn}^{3+}, \text{Mn}^{4+})(\text{O}, \text{OH})_2$	62,9
Pirocroíta	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	61,7
Pirolusita	$\beta\text{-MnO}_2$	63,2
Piroxmangita	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{SiO}_3$	38,3
Romanechita	$(\text{Ba}, \text{Mn}^{2+})_3(\text{O}, \text{OH})_6\text{Mn}_{18}\text{O}_{16}$	45 – 60
Ramsdellita	MnO_2	63,2
Rodocrosita	MnCO_3	47,6
Rodonita	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ca})\text{SiO}_3$	38,3
Tefroíta	Mn_2SiO_4	54,3
Todorokita	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})(\text{Mg}, \text{Mn}^{2+})\text{Mn}_5\text{O}_{12} \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Função da água de hidratação

Fonte: Dias (2018).

2.3 Desgaste

Um material pode falhar ou se danificar através da deformação plástica, propagação de trincas, corrosão ou desgaste, como é mostrado na Figura 3.

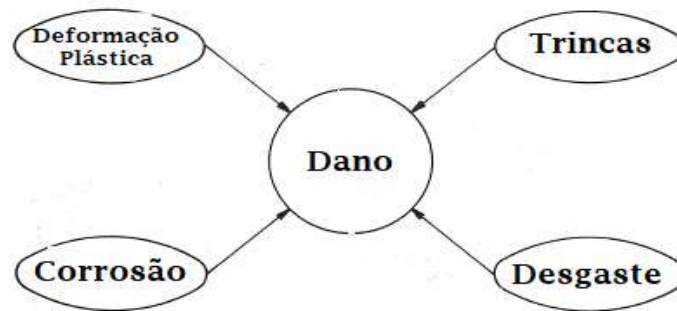


Figura 3 - Mecanismos que resultam no dano de um componente ou estrutura.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

O desgaste é caracterizado por danificar primeiramente a estrutura do material, podendo causar vibração, mudanças na geometria, ruídos, e desgaste de debris. Assim, inviabilizando ou prejudicando a funcionalidade de um componente (ZUM GAHR, 1987).

Sempre que uma superfície se move contra outra, uma delas ou ambas sofrerão danos, e geralmente ocorrerá a perda progressiva de material. O desgaste pode surgir de maneira imperceptível, como na maioria das vezes, porém também pode ocorrer e se propagar rapidamente. O desgaste é prejudicial na maioria das vezes, ocasionando folgas no movimento dos componentes essenciais para um sistema, ou também, perda de precisão ou até falhas em máquinas. Muitos desastres e acidentes da engenharia podem ter como raiz do problema o desgaste que estava presente em alguma máquina ou estrutura do sistema (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O movimento de ação e interação dos elementos podem variar bastante, assim, tem-se um diferente processo de desgaste para cada situação de acordo com a relação do movimento de contato entre os dois corpos. Os processos de desgaste quanto ao movimento são de deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, como representado na Figura 4 (ZUM GAHR, 1987).

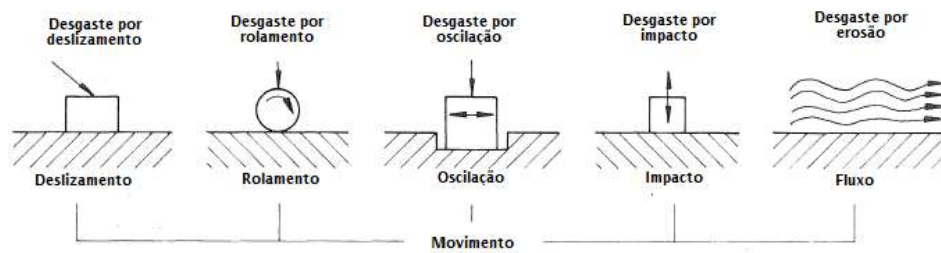


Figura 4- Classificação dos processos de desgaste pelo modo de desgaste.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

2.3.1 Desgaste abrasivo

Existem quatro tipos de mecanismos de desgaste de acordo com Zum Gahr (1987), sendo eles: o desgaste abrasivo, o desgaste por adesão, fadiga superficial e reação triboquímica. Esses mecanismos de desgaste podem ocorrer separadamente ou ao mesmo tempo em um processo de desgaste.

No desgaste abrasivo, duas diferentes situações são usadas para classificar a abrasão, a primeira descrição, chamada no inglês de “three body abrasive wear” ou “rolling wear”, em português podendo ser escrita como desgaste abrasivo por rolamento ou abrasão por três corpos, descreve um caso onde as partículas duras que estão livres arrancam parte do material da superfície do corpo em questão; em contrapartida, no segundo caso, os termos utilizados para nomear o modo de desgaste são “two body abrasive wear” ou “grooving wear”, no Português, é chamado de desgaste abrasivo por riscamento ou abrasão por dois corpos, nesse modo há a remoção de material por protuberâncias duras na contraface que desliza sobre a superfície do outro corpo (COZZA, 2006; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Esses dois tipos de remoção de material são frequentemente usados para descrever a abrasão e estão representados na Figura 5.

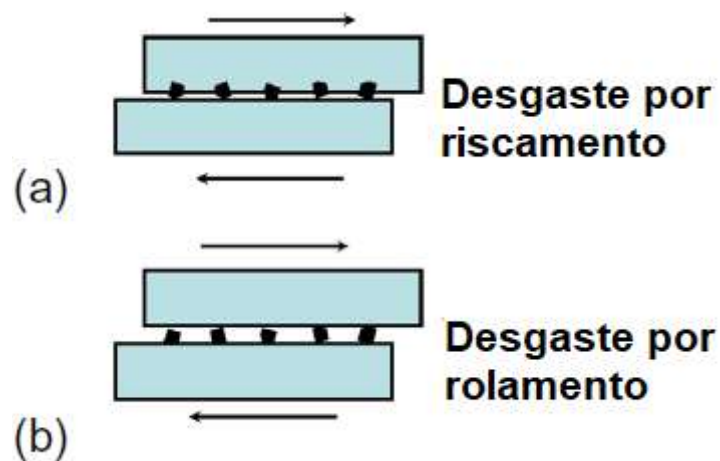


Figura 5 - Diferenças entre (a) Desgaste por riscamento e (b) Desgaste por rolamento. Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

Hutchings e Shipway (2017) ressaltam que esses dois modos de desgaste não são suficientes para descrever o processo de desgaste. Em altas cargas de ensaio de microabrasão e menores concentrações de abrasivo, as partículas soltas podem acabar se incrustando na superfície e deslizar sobre a superfície do material, produzindo ranhuras e sulcos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; TREZONA *et al.*, 1999).

Na Figura 6, é possível observar como fica a superfície de um material (a) após sofrer desgaste por riscamento (deslizamento) e (b) por rolamento. Hutchings e Shipway (2017) destacam que no desgaste por rolamento, as taxas de desgaste geralmente são mais baixas do que por deslizamento. Os autores também acrescentam que em algumas situações, os dois modos de desgaste podem ocorrer ao mesmo tempo, as partículas podem deslizar em algumas regiões e rolar em outras.

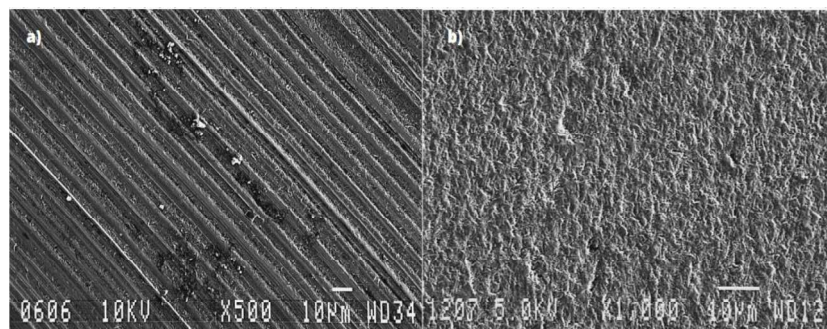


Figura 6 - Superfície de um corpo-de-prova de aço ferramenta que sofreu desgaste abrasivo por (a) riscamento por partículas de diamante (b) rolamento por partículas de SiC. Fonte: Trezona *et al.* (1999).

O desgaste abrasivo pode ser descrito por outra forma também, sendo por alta tensão (high-stress abrasion) e baixa tensão (low-stress abrasion). No desgaste abrasivo de alta tensão as partículas se fraturam devido as altas cargas exercidas sobre elas, já no de baixa tensão elas permanecem inteiras (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.3.2 Micromecanismos de desgaste abrasivo

Os micromecanismos de desgaste estão relacionados na forma com que o material é removido e a superfície do material é desgastada durante o processo de desgaste abrasivo (GREGOLIN, 1990). Microsulcamento, microcorte, microtrincas e microfadiga são os principais micromecanismos observados nos materiais (ZUM GAHR, 1987). Na Figura 7 é possível observá-los.

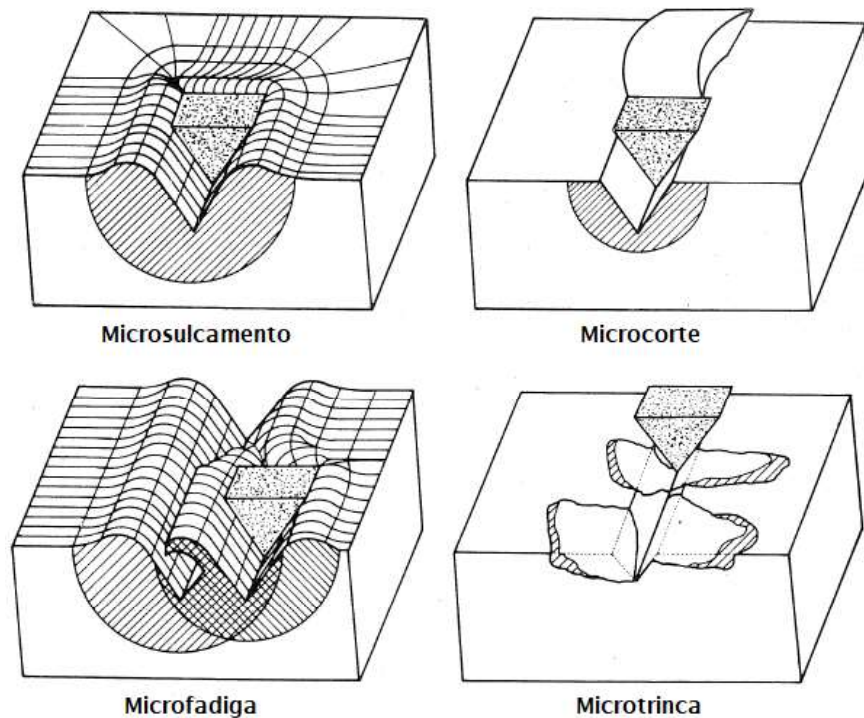


Figura 7 – Tipos de micromecanismos de desgaste abrasivo.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

No microsulcamento, a partícula abrasiva não é capaz de remover o material em apenas uma única passagem, é formado então um sulco e o material se deforma arrastando para os lados. No entanto, a passagem repetitiva das partículas pela região e os microsulcamentos sucessivos podem ocasionar a remoção do material posteriormente por microfadiga (ZUM GAHR, 1987).

O microcorte se dá pela formação de pequenos cavacos, em altas tensões de cisalhamento que ocasionam remoção de material (GREGOLIN, 1990). O microcorte puro resulta em uma perda de material igual ao volume do risco no material (ZUM GAHR, 1987).

Por fim, as microtrincas ocorrem quando as partículas abrasivas exercem uma alta tensão concentrada na superfície do material, ocasionando a formação e propagação de trincas (ZUM GAHR, 1987).

Os micromecanismos de sulcamento e corte são mais comuns em materiais dúcteis, ao contrário das microtrincas que surgem em materiais frágeis (ZUM GAHR, 1987; GREGOLIN, 1990). A relação entre o deslocamento para os lados do material no microsulcamento ou a remoção pelo microcorte depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva (ZUM GAHR, 1987).

2.4 Desgaste abrasivo em compósitos de alumínio

O alumínio é um material que possui algumas boas propriedades, como resistência a oxidação e corrosão, sendo também fácil de ser processado mecanicamente, possui boa condutividade elétrica e é largamente reciclado. Apesar de serem materiais dúcteis, sua dureza pode ser melhorada significativamente através de alguns métodos de endurecimento, como o de dispersão, com reforço de partículas grandes, por envelhecimento e trabalhado a frio (ASKELAND; WEDELIN, 2019).

O alumínio tem uma vasta gama de aplicação, principalmente na indústria automotiva, devido sua elevada resistência em relação ao seu peso (YADAV *et al.*, 2021). Muitos estudos no desenvolvimento de compósitos de matriz de alumínio foram e têm sido realizados, como por exemplo, em ligas de alumínio reforçadas por diferentes tipos de cerâmica (KHAN; NISAR, 2022). Os compósitos de alumínio com carbetos de silício (SiC) são um bom exemplo desses materiais desenvolvidos, sendo aplicados na indústria ferroviária, aeronáutica, automotivas e muitas outras (KHAN; NISAR, 2022; ASKELAND; WENDELIN, 2019).

Segundo Yadav *et al.* (2021), as taxas de desgaste abrasivo por riscamento ou rolamento em compósitos de alumínio são menores que a liga pura. Esses compósitos possuem uma boa interface entre as duas fases. As partículas de reforço protegem e reduzem a área afetada pelo desgaste causado através do contato das duas superfícies, com isso o desgaste e o coeficiente de fricção são menores nos compósitos de alumínio em comparação com a liga pura. Por esse motivo, o desenvolvimento de compósitos com a utilização de reforços mais duros que a matriz pode oferecer uma melhora significativa no aumento da resistência ao desgaste abrasivo, como no caso do alumínio.

Yadav *et al.* (2021) analisaram o efeito da adição de carboneto de silício no processo de desgaste em compositos de alumínio. A comparação foi feita entre a liga de alumínio ADC12 e a mesma liga reforçada com 10% de SiC. O equipamento de desgaste utilizado para teste foi o de deslizamento de pino sobre disco. O ensaio foi realizado para vários parâmetros de carga aplicada (2N, 6N e 10N), tamanho do abrasivo (30 μ m, 50 μ m e 70 μ m), distância de deslizamento (40m, 60m, 80m, 100m) e velocidade do disco de 500 rpm. Na Fig. 8, é mostrado um dos resultados de taxa de desgaste abrasivo encontrada para todas as cargas e distância de deslizamento, utilizando tamanho de abrasivo de 50 μ m.

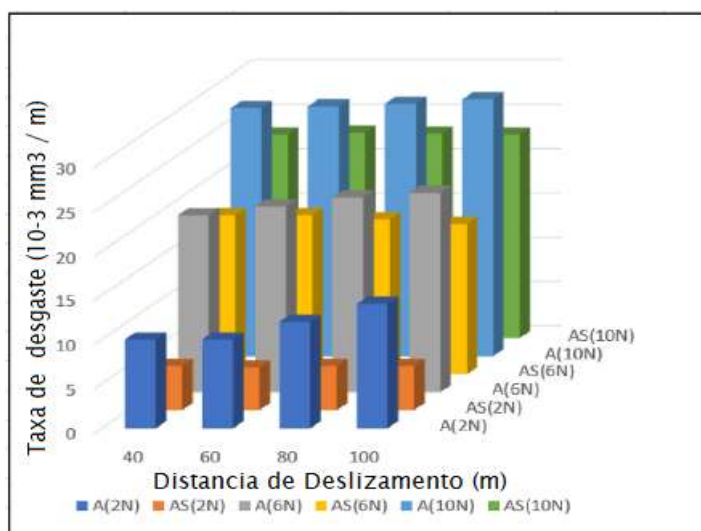


Figura 8 – Taxa de desgaste no eixo y e distância de deslizamento no eixo x para tamanho de abrasivo 50 μm .

Fonte: Adaptado de Yadav *et al.* (2021).

No gráfico observa-se que a presença de 10% de SiC nos compósitos de liga de alumínio ADC12 promoveu maior resistência ao desgaste abrasivo em relação a liga pura em todos os

paramêntros observados. A fig. 8 representa apenas a taxa de desgaste para os ensaios realizados com abrasivos de tamanho de 50 μ m, porém, para tamanhos de 30 e 70 μ m, a adição de reforço também se mostrou eficaz no ganho de resistência ao desgaste, para todos os valores de carga aplicada e distância de deslizamento.

Jesus (1998) obteve compósitos de matriz metálica de alumínio comercialmente puro reforçados com 5, 10 e 15% de carboneto de silício através do processo da metalurgia do pó. Foi feito teste de desgaste do tipo de deslizamento pino sobre disco sem lubrificação, e após os testes verificou-se que quanto maior a quantidade partículas de partículas de SiC no material, maior foi sua resistência ao desgaste, como é possível observar na Fig. 9.

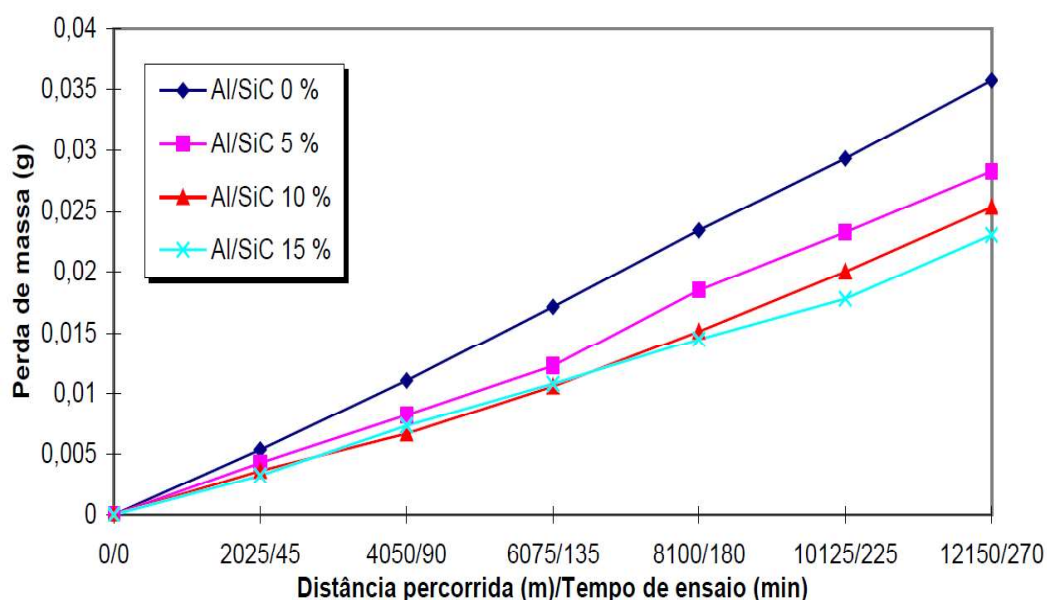


Figura 9 – Evolução da perda de massa em função da distância percorrida de ensaio para compósitos de alumínio com 5, 10 e 15% de SiC como reforço, e do alumínio puro.

Fonte: Jesus (1998).

Batista (2022) desenvolveu três compósitos diferentes com nanotubos de carbono (CNTs): (i) alumínio comercialmente puro, (ii) com a liga AA750 e (iii) compósito híbrido contendo os três materiais. Observou-se que nos compósitos de alumínio puro, o teor de CNTs era limitado por um valor máximo, pois ao passar de certa quantidade, o material ficava frágil e sua conformação mecânica era prejudicada. Também se observou um ganho de dureza e resistência ao desgaste abrasivos nos compósitos em geral. Nos compósitos 0,25%_m CNT/Al houve uma redução de 50% na perda de massa após feito teste de abrasão em borracha, isso se explica pela função lubrificante dos nanotubos e pelo seu efeito reforço na matriz, porém para

valores mais altos de CNTs a perda de massa foi maior que o alumínio puro, uma explicação para esse acontecimento é pelo fato de a presença de vazios e trincas.

Arendarchuck (2022) desenvolveu compósitos com matriz da liga de alumínio A380 e reforços cerâmicos NbC (carbonetos de nióbio), a fim de se obter melhoria nas propriedades mecânicas do material e aumentar sua resistência ao desgaste. Foi utilizado na confecção dos compósitos o processo de stir casting para fundição, globularização e tixotrofia, e as amostras utilizadas continham 5%, 10% e 15% de NbC, além das amostras sem reforço. O ensaio de desgaste abrasivo foi feito no equipamento de roda de borracha de acordo com a norma ASTM G65. Como resultado, percebeu-se a diminuição na perda de volume do material no teste de desgaste e a redução na taxa de desgaste em função do tempo de ensaio devido à inserção de NbC como reforço. Nas amostras que passaram pela tixotrofia, observou-se um pequeno crescimento na perda de volume e taxa de desgaste para as amostras com 5% e 10% de NbC e naquelas sem reforço, já nos compósitos com 15% de reforço houve uma redução de 7% na perda volumétrica. Nas amostras sem reforço, notou-se uma maior quantidade de mecanismos de entalhe e ranhura, observou-se também a redução desses mecanismos com o aumento da porcentagem de NbC.

Em um estudo realizado por Verran (1994), foram produzidos CMMs de alumínio utilizando as ligas Al12Si3Mg e Al3Mg reforçadas com partículas cinzas de carvão variando de 1 a 7% em peso. Os resultados mostraram que houve uma melhora na resistência ao desgaste e perda de volume de material à medida que era acrescido o valor de cinzas de carvão no material. Também se observou que para a liga Al3Mg, o aumento da resistência ao desgaste se deu pela mudança de mecanismo de desgaste no material, que era puramente adesivo para a liga base e se tornou predominantemente abrasivo para os compósitos com porcentagens de 5 a 10 de cinzas de carvão.

Outro estudo que foi observado o aumento de resistência ao desgaste em compósitos de alumínio foi o trabalho feito por Rahimian *et al.* (2010). Nesse artigo, os autores estudaram a influência do tamanho das partículas de alumina e também sua quantidade nas propriedades mecânicas dos compósitos de alumínio. As amostras foram obtidas pelo processo de metalurgia do pó, variando quantidades de 5, 10 e 20% de reforço, e também de 3, 12 e 48µm para o tamanho das partículas de alumina. Em relação a resistência ao desgaste das amostras foi observado que ele aumentou à medida que foram adicionadas as partículas de reforço. Também se verificou que nas amostras com 10% de alumina, após uma distância de 400m, quando

aumentada o tamanho das partículas de reforço de 3 para 12 μm , houve uma redução de 9% na perda de volume e taxa de desgaste no material.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentada toda metodologia usada para o desenvolvimento desse trabalho. Os temas abordados são: tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumento de coleta de dados, tabulação de dados e por fim as considerações finais.

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa científica é de grande valor na área da ciência e educacional, através dela é possível chegar em respostas, soluções e buscar o desenvolvimento de determinado estudo e segmento. Gil (2002, p. 17) diz: “a pesquisa é requerida quando não se dispõe de informação suficiente para responder ao problema, ou então quando a informação disponível se encontra em tal estado de desordem que não pode ser adequadamente relacionada ao problema”. Bastos e Keller (1995, p. 53) definem: “a pesquisa científica é uma investigação metódica acerca de um determinado assunto com objetivo de esclarecer aspectos em estudo”.

Existem três formas de fazer uma pesquisa, quantitativa, qualitativa e mista. A quantitativa trabalha com resultados que podem ser expressos em números, podendo utilizar de métodos estatísticos ou levantamentos de dados de acordo com a pesquisa de campo. Já a forma qualitativa se baseia em questionamentos, procedimentos de coleta e análise de dados e interpretações por parte do pesquisador a partir dos dados obtidos, possibilitando a descrição de fenômenos que não podem ou são muito difíceis de serem representados matematicamente (CRESWELL, 2021).

O presente trabalho utilizou-se da forma mista para se obter os resultados a partir dos dados coletados no estudo. A forma qualitativa foi usada para a realização da análise dos mecanismos de desgastes gerados pelo ensaio de microabrasão e a quantitativa esteve presente no cálculo do coeficiente de desgaste abrasivo nas amostras de compósito de alumínio reforçados com rejeito de minério de manganês.

De acordo com Gil (2002), as pesquisas também podem ser classificadas com base em seus objetivos gerais, sendo elas exploratórias, descritivas e explicativas. Ainda segundo o mesmo autor, a pesquisa exploratória geralmente trabalha com pesquisa bibliográfica ou estudo de caso, que geram uma aproximação e intimidade com o problema, auxiliando na busca do desenvolvimento e evolução das ideias ou a descoberta de intuições. A pesquisa descritiva

descreve algum fenômeno ou população e estabelece relação entre as variáveis, nesse tipo de pesquisa muitas vezes se utiliza de uma coleta de dados padronizada. Por fim, a explicativa é a mais complexa, pois tem como objetivo identificar e explicar um comportamento de um fenômeno. Esse tipo de pesquisa explica cientificamente o porquê das coisas.

Este trabalho utiliza uma pesquisa descritiva, pois relaciona a variação mássica de rejeito de minério de manganês nos compósitos de alumínio e argumenta o motivo da variação no coeficiente de desgaste calculado a partir da coleta de dado nos ensaios de desgaste microabrasivo.

A pesquisa bibliográfica agrupa diversas referências teóricas de diversos autores já publicadas para embasar a argumentação no estudo e fornecer os assuntos mais relevantes do estudo. A pesquisa experimental observa as relações de causa-efeito, a partir de da utilização de variáveis e a relação delas com o resultado (DA FONSECA, 2002).

Quanto ao modo de pesquisa, este trabalho utiliza da pesquisa bibliográfica, que aborda sobre o tema e palavras chaves do estudo e a pesquisa experimental, a partir dos testes de ensaio microabrasivo realizados nas 9 amostras com diferentes teores mássicos de rejeito de minério de manganês.

3.2 Materiais e Métodos

Para melhor visualização da metodologia aplicada no presente trabalho, foi feito um fluxograma, como pode ser observado na Figura 10.



Figura 10 - Fluxograma das etapas do trabalho.
Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.2.1 Preparação das amostras

As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas em trabalhos anteriores, de Lima *et al.* (2020).

Os compósitos possuem pó de alumínio com $D_{90}=73,43\mu\text{m}$ e rejeito de minério de manganês com $D_{90} = 44,14\mu\text{m}$. Lima *et al.* (2020) moeram o minério de manganês a seco em um moinho de bolas durante 12h. Os pós de alumínio e rejeito de minério foram homogeneizados em um grau de ágata, assim os autores obtiveram uma mistura contendo alumínio e adições de rejeito de minério de manganês de 5, 10 e 15%. Ao todo foram estudadas 16 amostras. As amostras foram obtidas com pressão de compactação de 140MPa e sinterizadas nas temperaturas de 600°C e 610°C durante 120min e 180min em atmosfera de ar natural.

As amostras estão descritas na Tabela 3. É possível observar a porcentagem mássica de reforço em cada uma delas, pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização.

Linhares *et al.* (2012) caracterizaram o rejeito de minério de manganês das amostras utilizadas nesse trabalho. Segundo os autores a maior parte do minério utilizado é composto por silicatos, sendo 20% composto por espessartita. Também há na composição carbonatos, como a rodocrosita, e os hidratados, como micáceos e a monazita.

Tabela 3 - Amostras utilizadas e suas características.

Amostras	% Mássica de reforço	Pressão de compactação (MPa)	Temperatura de Sinterização (°C)	Tempo de sinterização (Min)
Alumínio puro	0%	140	600	120
Alumínio puro	0%	140	600	180
Alumínio puro	0%	140	610	120
Alumínio puro	0%	140	610	180
Compósito de Alumínio + rejeito	5, 10 e 15 %	140	600	120
Compósito de Alumínio + rejeito	5, 10 e 15 %	140	600	180
Compósito de Alumínio + rejeito	5, 10 e 15 %	140	610	120
Compósito de Alumínio + rejeito	5, 10 e 15 %	140	610	180

Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2020).

Todos os corpos de prova são cilindros com 15,24mm de diâmetro e altura em torno de 10mm, sendo variável conforme a massa de mistura utilizada. Pode ser observado de forma mais detalhada o aspecto geral das amostras sinterizadas na Figura 11.



Figura 11 - Amostra de compósito de alumínio reforçada com rejeito de manganês.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

A superfície de teste de cada amostra foi lixada com lixas d'água de 320, 400 e 600, com o objetivo de padronizar a topografia.

3.2.2 Microabrasão

Os ensaios de microabrasão, foram realizados em um equipamento de esfera fixa, apresentado na Figura 12. O equipamento encontra-se no laboratório de tribologia do DEMEC-UFOP. Nesse sistema a esfera gira devido a rotação do eixo motor em contato com a amostra.



Figura 12 - Ensaio de microabrasão do tipo esfera fixa.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Foram realizados três testes para cada amostra, sendo que a concentração de abrasivo foi a mesma para todos os corpos de prova. A força normal adotada nos ensaios foi de 1,5 N, a rotação do eixo motor utilizada foi de 100 rpm e a lama abrasiva foi bombeada a 1 gota a cada 5s. O tempo dos testes realizados foi de 25min, com intervalos a cada 5min para avaliação e acompanhamento da cratera gerada pelo desgaste abrasivo.

A lama abrasiva consistia em uma mistura de partículas abrasivas de dióxido de silício (SiO_2) misturada com água destilada, com o abrasivo compondo 10% de concentração mássica da solução. Algumas características do (SiO_2) são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do abrasivo.

Abrasivo	Dureza (HV)	Tamanho nominal
Dióxido de Silício SiO_2	750-1260	5 μm

Fonte: Hutchings (1992).

3.2.3 Cálculo do coeficiente de desgaste

No ensaio de microabrasão, o contato da esfera fixa com a amostra resulta na formação de uma cratera com a geometria semelhante a esfera que a originou. A cratera de desgaste pode ser observada na Figura 16, sendo: (a) o esquema da impressão de desgaste e (b) uma amostra submetida ao teste de microabrasão por esfera rotativa. As calotas foram fotografadas junto a uma escala para referência e sua área e diâmetro foi encontrada pelo software ImageJ.

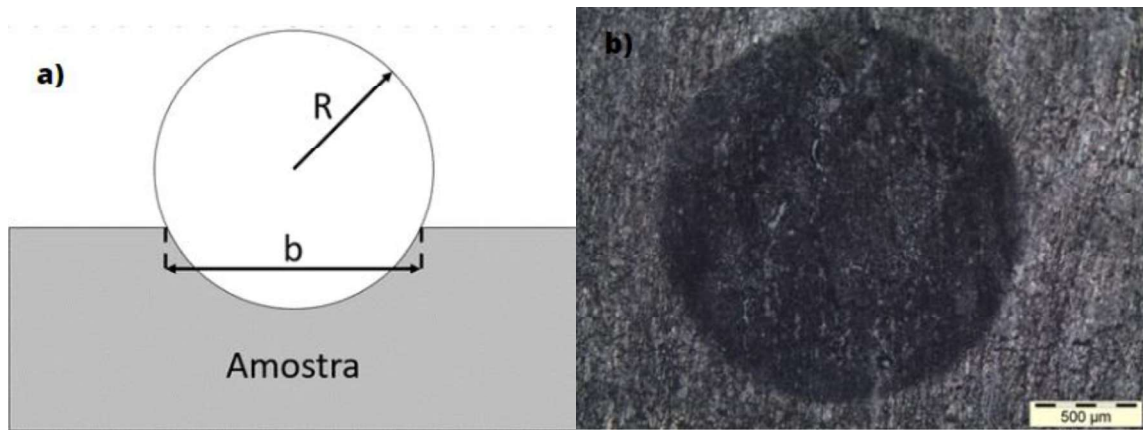


Figura 13 - (a) Exemplo de configuração de desgaste; (b) exemplo de impressão de desgaste após 25 min em amostra de alumínio puro sinterizado a 600°C por 120 min.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Para o cálculo do volume da cratera formada devido ao desgaste ocorrido foi utilizada a Eq. (1), que depende diretamente do valor b (diâmetro da cratera gerada) e o raio da esfera que foi utilizada no ensaio (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997; TREZONA *et al.*, 1999).

$$V \approx \frac{\pi b^4}{64R} \quad \text{para } b \ll R \quad (1)$$

Para materiais homogêneos e não revestidos o cálculo do volume de desgaste abrasivo pode ser encontrado por meio da Eq. (2) (TREZONA *et al.*, 1999).

$$V = k S W \quad (2)$$

Sendo k o coeficiente de desgaste, S é a distância total de deslizamento e W é força normal aplicada.

A partir das Eq. (1) e (2) é possível encontrar o coeficiente de desgaste k , Eq. 3 (RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1997; TREZONA *et al.*, 1999).

$$k = \frac{\pi b^4}{64RSW} \quad \text{para } b \ll R \quad (3)$$

Os parâmetros do teste de micro abrasão são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do ensaio de desgaste microabrasivo.
Esfera de aço 52100(mm) 25,4mm

Abrasivo	SiO ₂
Concentração do abrasivo	10% em água destilada
Tempo de ensaio (min)	25
Força normal (N)	1,5
Rotação da esfera (rpm)	100
Distância de deslizamento (m)	199,49
Gotejamento do abrasivo	1 gota/5 seg
Número de repetições por amostra	3

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

3.2.4 Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste decorrentes do ensaio microabrasivo por esfera fixa foram analisados por meio de um microscópio óptico Olympus modelo BX51M.

3.3 Variáveis e indicadores

As variáveis e indicadores são expressas na Tabela 6.

Lakatos e Marconi (2003, p. 137) afirmam que:

Uma variável pode ser considerada como uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um conceito operacional, que contém ou apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração.

Para Ferreira *et al.* (2009, p. 24) indicador é

Uma medida, de ordem quantitativa ou qualitativa, dotada de significado particular e utilizada para organizar e captar as informações relevantes dos elementos que compõem o objeto da observação. É um recurso metodológico que informa empiricamente sobre a evolução do aspecto observado.

Tabela 6 - Indicadores e variáveis

Indicadores	Variáveis
Coefficiente de desgaste Mecanismo de desgaste Dureza Microestrutura	Teor de rejeito de magnésio Temperatura de sinterização Tempo de sinterização

Fonte: Pesquisa direta (2023).

3.4 Instrumento de coleta de dados

Os instrumentos para coleta de dados utilizados foram o equipamento de ensaio de desgaste, o microscópico óptico, o software ImageJ e a revisão bibliográfica.

3.5 Tabulação de dados

Todas as atividades relacionadas aos dados, como organização, tratamento e análise foram feitas pelo software Excel da Microsoft.

3.6 Considerações finais

Nesse capítulo foi abordado todos procedimentos e metodologia feitos para a realização do ensaio de desgaste abrasivo dos compósitos. Além disso, também foi citado os materiais utilizados e descrita as variáveis presentes no processo, assim como também, os indicadores. No próximo capítulo, os resultados serão abordados e discutidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Microestrutura do material

As amostras utilizadas nesse trabalho foram confeccionadas por Lima *et al.* (2020). Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 é possível observar a microestrutura desses materiais, para cada condição de sinterização. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

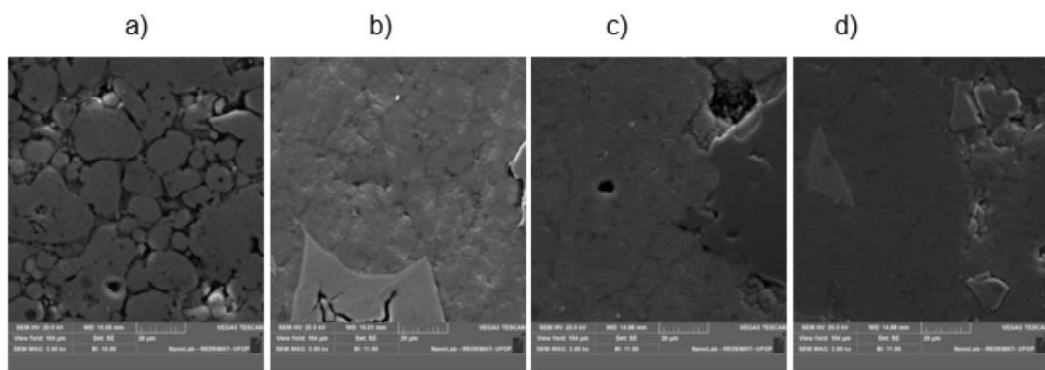


Figura 14 – Microestrutura das amostras sinterizadas a 600°C durante 120min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV
Fonte: Lima *et al.* (2020).

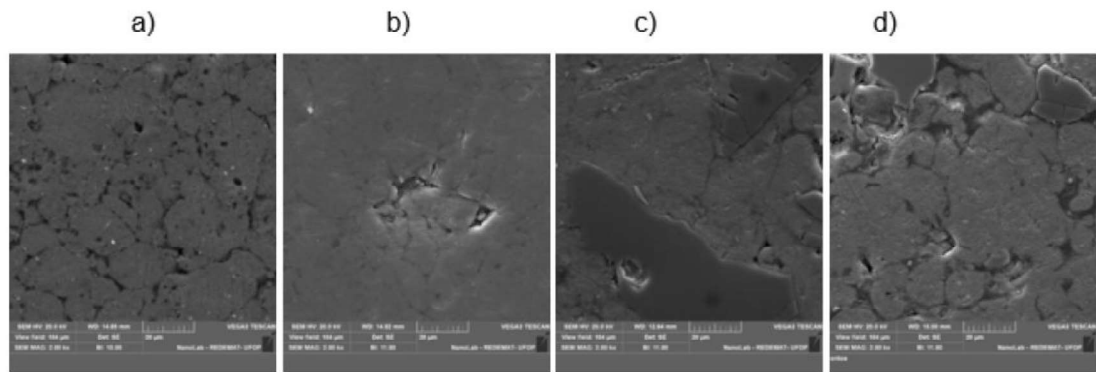


Figura 15 - Microestrutura das amostras sinterizadas a 600°C durante 180min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV
Fonte: Lima *et al.* (2020).

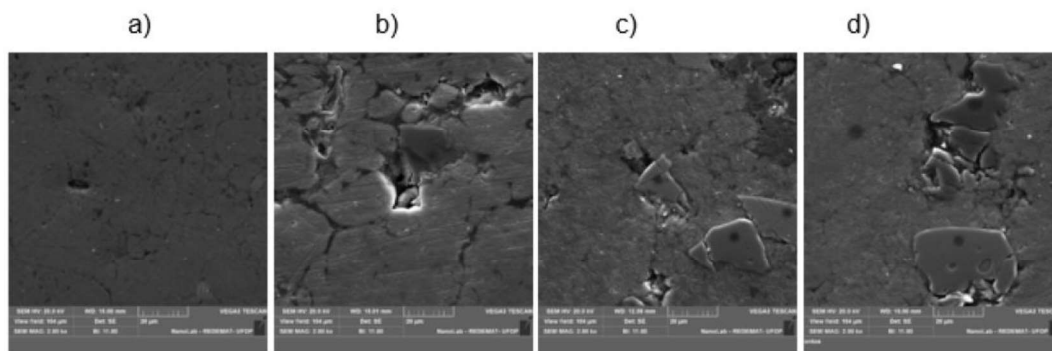


Figura 16 - Microestrutura das amostras sinterizadas a 610°C durante 120min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV
Fonte: Lima *et al.* (2020).

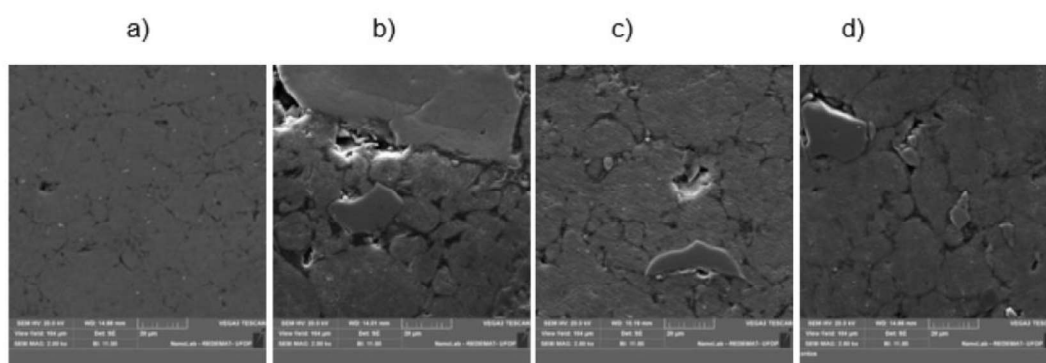


Figura 17 - Microestrutura das amostras sinterizadas a 610°C durante 180min - (a) Al Puro; b) Al-5% de reforço; c) Al-10% de reforço; d) Al-15% de reforço. MEV
Fonte: Lima *et al.* (2020).

Observa-se que as partículas de reforço de minério de manganês, na maioria das vezes, são maiores que os grãos de alumínio. De forma geral, as amostras mostraram uma boa homogeneidade, com alguns poros na microestrutura.

4.2 Microdureza

É possível observar na Fig. 18 os valores de microdureza.

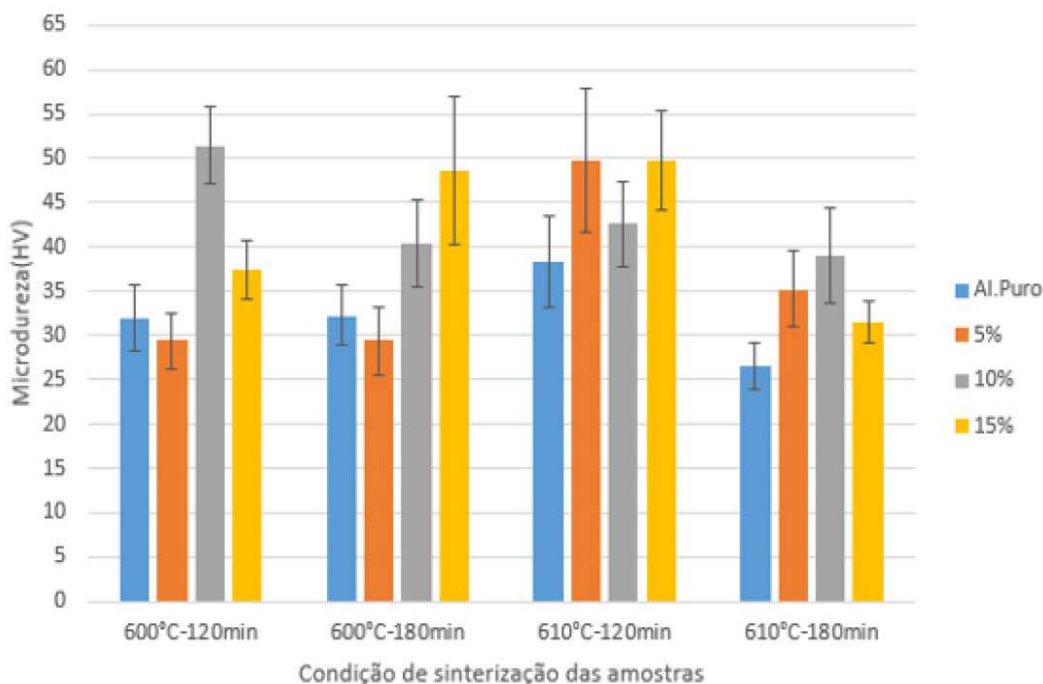


Figura 18 - Valores de microdureza Vickers versus condição de sinterização das amostras de alumínio puro e dos compósitos.
Fonte: Lima *et al.* (2020).

Observa-se que, de forma geral, o reforço do alumínio com o rejeito de minério de manganês ocasionou o aumento da dureza desses materiais em relação ao alumínio puro, exceto para os compósitos com 5% de reforço sinterizados na temperatura de 600°C. Para uma maior temperatura de sinterização, o valor de dureza dos compósitos comparado ao alumínio puro foi superior, independentemente da quantidade de rejeito adicionado.

Os desvios padrões dos resultados de microdureza das amostras foram bem elevados, isso é devido a presença de poros no material e má fixação das partículas de rejeito com a matriz em algumas regiões e pelo fato da microdureza poder estar concentrada em uma fase mais que na outra. O ideal seria fazer uma macrodureza, mas o equipamento não permitiu resolução nem nitidez para avaliar o tamanho da impressão de dureza.

4.3 Coeficiente e taxa de desgaste

Nos testes de desgaste abrasivo, a cada 5min a calota gerada era observada, fotografada e medida, totalizando 5 pausas e 25min de ensaio. Dessa forma, foi possível observar o avanço do desgaste em relação ao tempo de ensaio.

Na Figura 19, é possível ver a taxa de desgaste a cada 5 min durante os 25min de teste. Nota-se que após 15min de teste, o regime permanente foi alcançado.

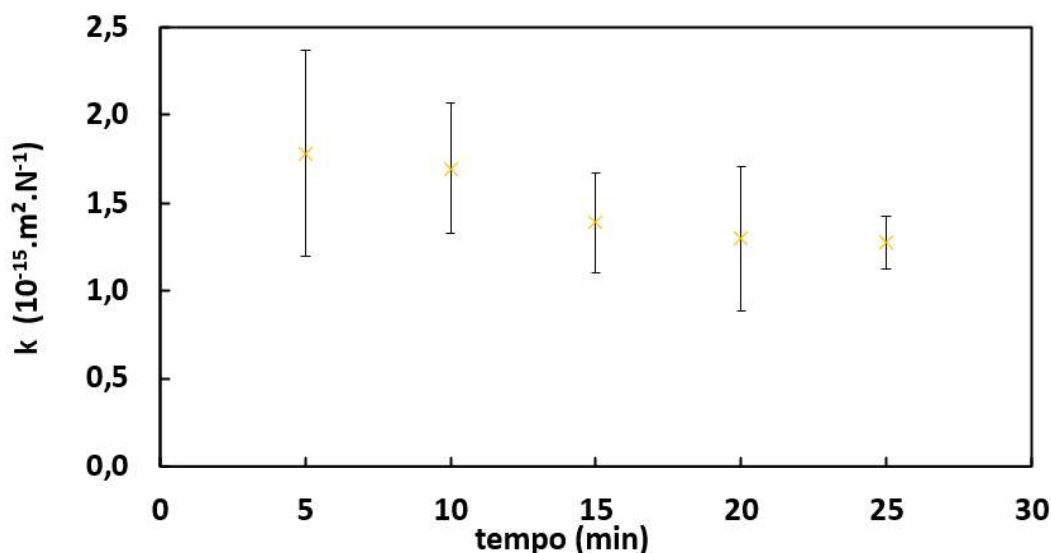


Figura 19 - Coeficiente de desgaste (k) em função do intervalo de tempo.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Não existe um valor de distância de deslizamento ou de tempo de ensaio para o processo de desgaste atingir o regime permanente. Existem algumas variáveis que influenciam no regime permanente, como o material das amostras e da esfera que realiza o ensaio. As partículas abrasivas utilizadas, o tamanho, forma, dureza, força normal aplicada, sua vazão e concentração também interferem para se atingir o regime permanente (COZZA, 2011).

De acordo com Cozza *et al.* (2005), quando a distância de deslizamento é baixa, o regime permanente não é alcançado e isso é visível nas bordas da cratera, pois essas não apresentaram bordas bem definidas, e sim difusas. Todas as crateras formadas nas amostras deste presente trabalho tiveram bordas definidas o que reforça o fato de que o regime permanente foi alcançado. Na Figura 20, é mostrada uma cratera obtida nesse trabalho que alcançou o regime permanente, e abaixo dela a exemplo comparativo a imagem de uma cratera retirada de Trezona e Hutchings (1999) que não alcançou o regime permanente, a diferença nas bordas entre as duas é visível.

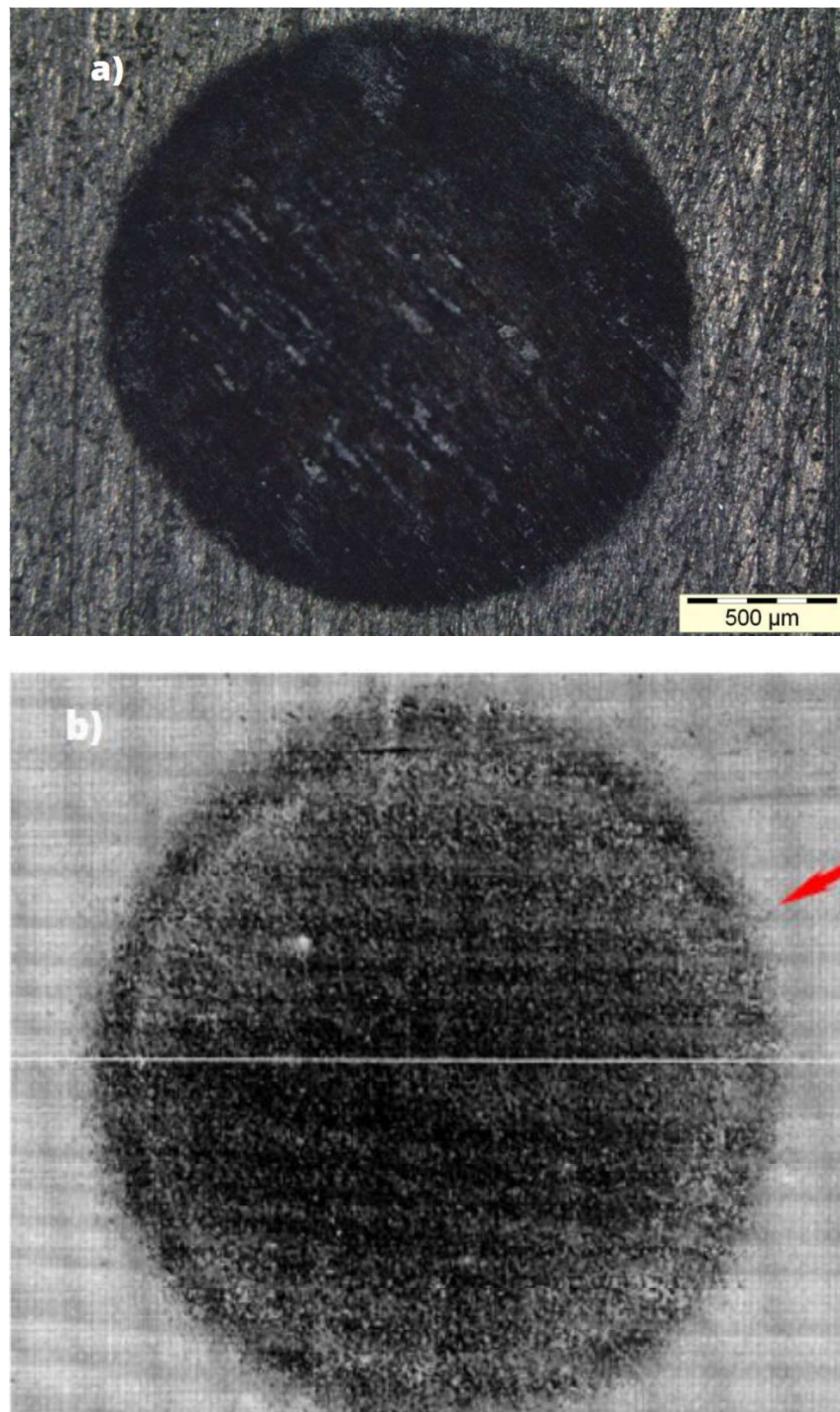


Figura 20 – (a) Cratera de desgaste com borda bem definida obtida neste trabalho. (b) Cratera de desgaste com borda difusa.

Fonte: Adaptado de Trezona e Hutchings (1999).

A área das calotas geradas foi medida pelo software ImageJ, utilizando-se uma escala como referência de medição. A partir desse valor foram calculados o volume e taxa de desgaste da amostra através das Eq. (1) e (3), como é mostrado na Tabela 7. Em cada amostra foram feitos três ensaios, gerando consequentemente três calotas, e os resultados foram obtidos através da média dos últimos três valores dessas impressões de desgaste presentes no material, pois estes estão no regime permanente.

Tabela 7 - Cálculo do volume e da taxa de desgaste a partir do diâmetro das crateras.

Ensaio	Tempo [min]	S [m]	SN [m.N]	b [m]	V [m ³]	k [m ² /N]	k x 10 ⁻¹⁴
1	5	39,90	59,85	5,76E-04	4,26E-13	7,12E-15	0,71
	10	79,80	119,69	6,97E-04	9,13E-13	7,63E-15	0,76
	15	119,69	179,54	7,95E-04	1,54E-12	8,60E-15	0,86
	20	159,59	239,39	8,93E-04	2,46E-12	1,03E-14	1,03
	25	199,49	299,24	9,40E-04	3,03E-12	1,01E-14	1,01
2	5	39,90	59,85	6,51E-04	6,93E-13	1,16E-14	1,16
	10	79,80	119,69	7,78E-04	1,42E-12	1,18E-14	1,18
	15	119,69	179,54	8,81E-04	2,33E-12	1,30E-14	1,30
	20	159,59	239,39	9,14E-04	2,70E-12	1,13E-14	1,13
	25	199,49	299,24	9,52E-04	3,17E-12	1,06E-14	1,06
3	5	39,90	59,85	6,85E-04	8,53E-13	1,43E-14	1,43
	10	79,80	119,69	8,03E-04	1,61E-12	1,34E-14	1,34
	15	119,69	179,54	8,66E-04	2,17E-12	1,21E-14	1,21
	20	159,59	239,39	9,84E-04	3,62E-12	1,51E-14	1,51
	25	199,49	299,24	1,02E-03	4,11E-12	1,37E-14	1,37
média	5	39,90	59,85		0,00E+00	1,10E-14	1,10
	10	79,80	119,69		0,00E+00	1,10E-14	1,10
	15	119,69	179,54		0,00E+00	1,12E-14	1,12
	20	159,59	239,39		0,00E+00	1,22E-14	1,22
	25	199,49	299,24		0,00E+00	1,15E-14	1,15

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Nas Figuras 21 até 24 é possível observar os coeficientes de desgaste de cada amostra, os gráficos foram separados por grupos de compósitos sinterizados nas mesmas condições de

temperatura e tempo. O coeficiente de desgaste é a média dos valores de taxa de desgaste dentro do regime permanente.

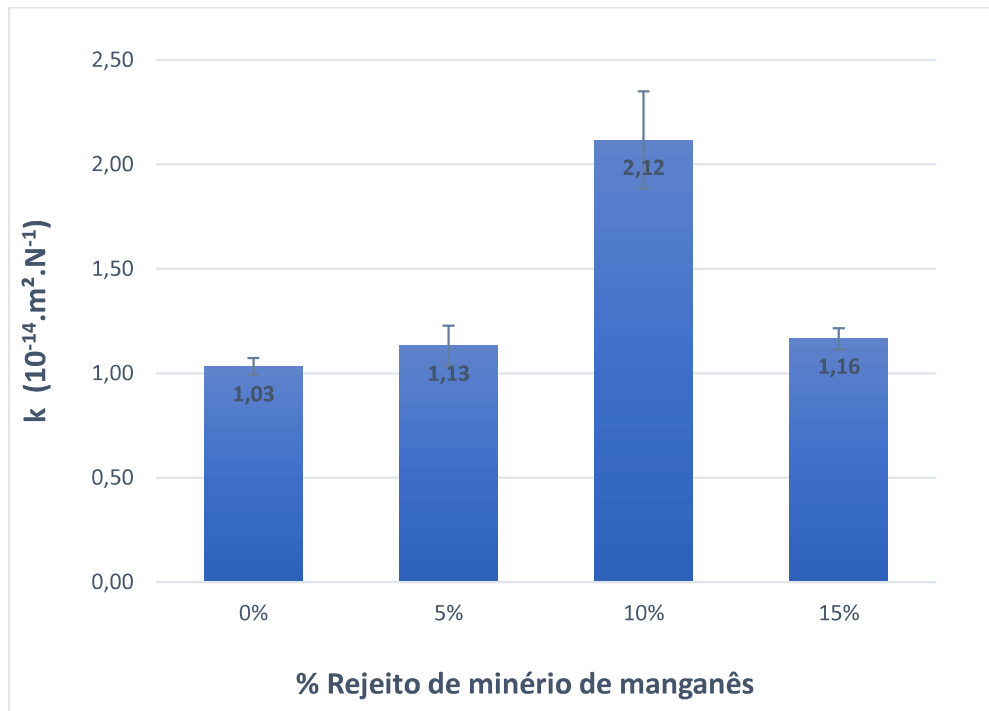


Figura 21 - Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 600°C durante 120min.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

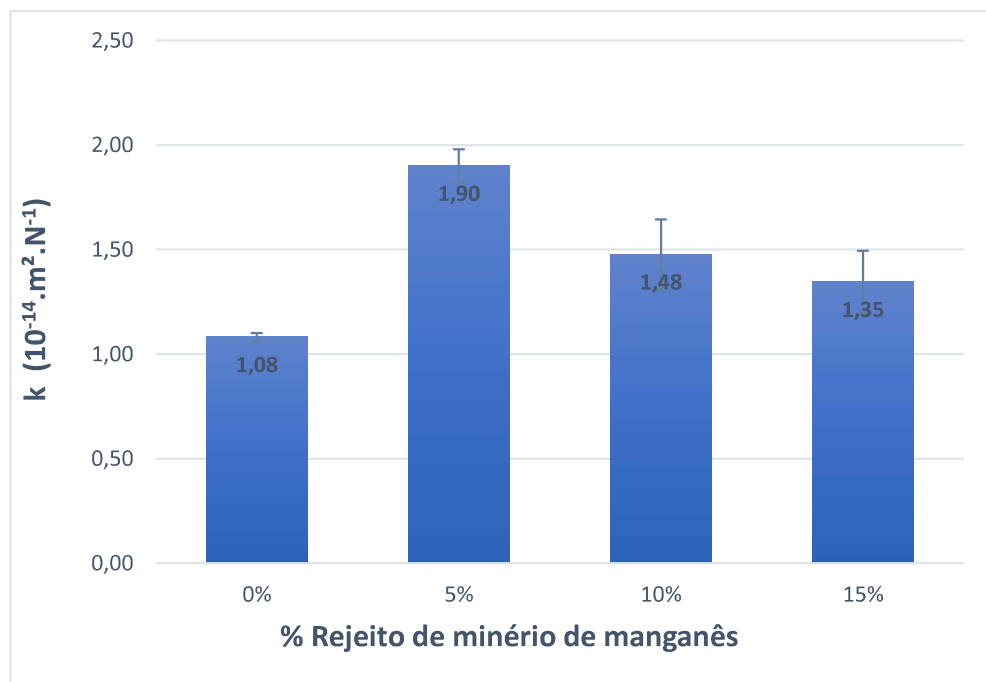


Figura 22 - Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 600°C durante 180min.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

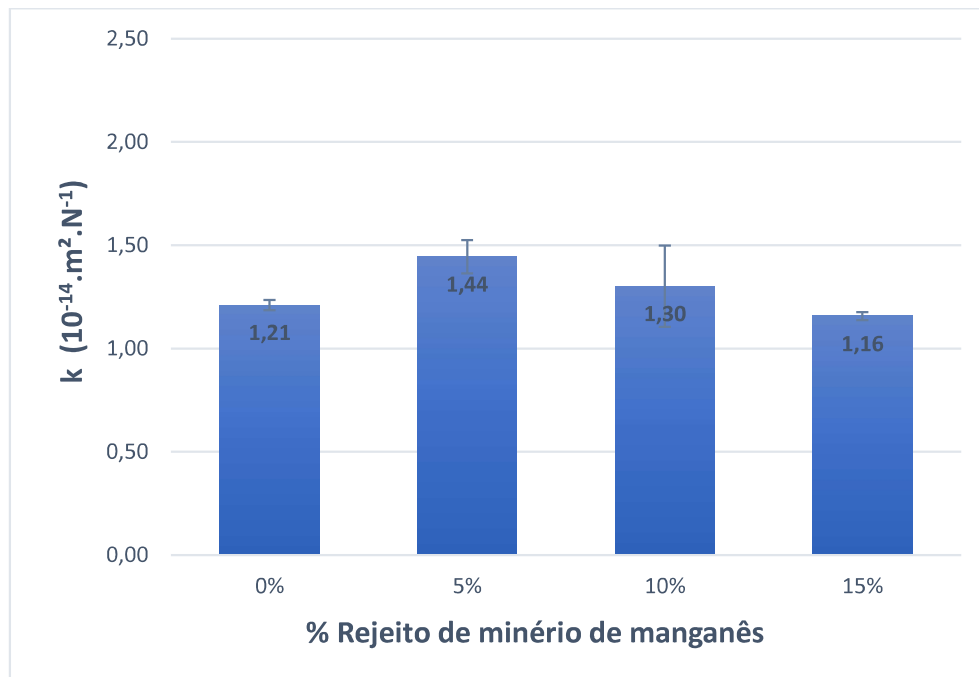


Figura 23 – Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 610°C durante 120min.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

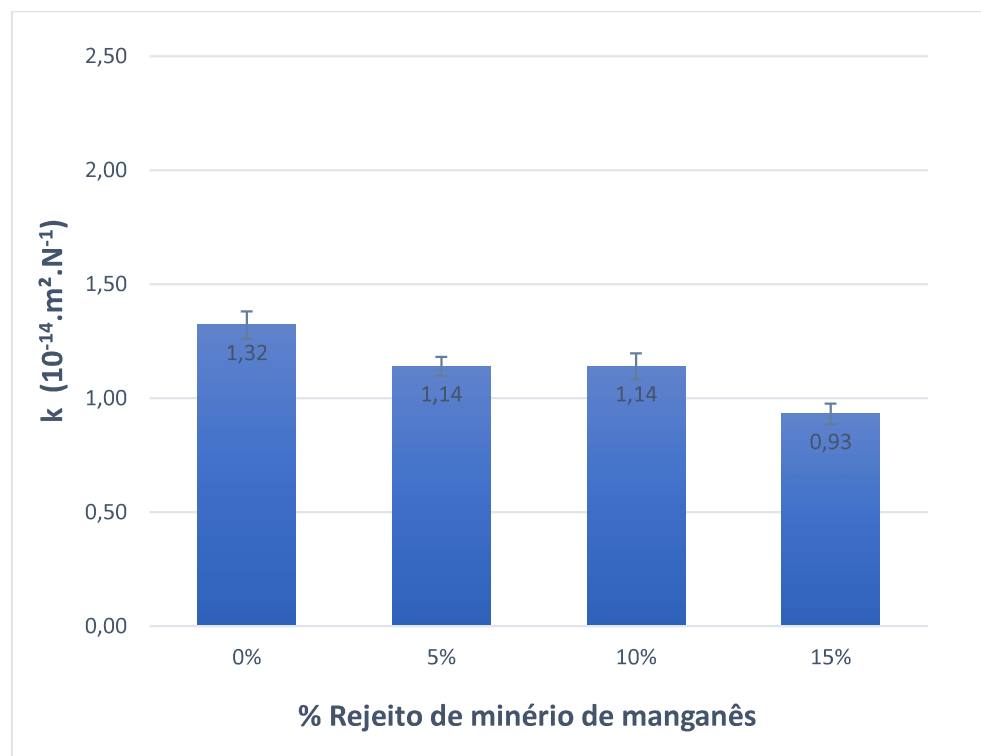


Figura 24 – Coeficiente de desgaste em amostras sinterizadas a 610°C durante 180min.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Primeiramente, com a exceção das amostras sinterizadas a 610 °C durante 180 minutos, a amostra de alumínio puro apresentou a maior resistência ao desgaste. Este resultado pode estar conectado a maior homogeneidade dessas amostras comparada aos seus pares com rejeito.

É possível também observar que em quase todas as condições de sinterização o valor do coeficiente de desgaste dos compósitos diminuiu à medida que a porcentagem de reforço de rejeito é acrescida. Apenas para os compósitos sinterizados na temperatura de 600°C durante 120 minutos a amostra com maior taxa de desgaste foi a com 10% de rejeito, seguida pelas amostras com 15%, 5% e o alumínio puro.

Na temperatura de 600°C o aumento do tempo de sinterização acarretou um maior coeficiente de desgaste por parte das amostras, exceto para o compósito com 10% de rejeito de manganês. Já para 610°C, para um tempo maior de sinterização os materiais compósitos acabaram ganhando mais resistência ao desgaste.

Os valores de desvio padrão na amostra de 10% foram bem maiores que o das outras amostras em todas as condições de sinterização, enquanto para o alumínio puro, esses valores foram menores em quase todas as situações, exceto para sinterização de maior temperatura e tempo, onde seu valor ficou levemente maior, que os compósitos de 5 e 15% de rejeito, porém essa diferença não é relevante.

Na Figura 25, é possível observar a influência dos carbonetos no desgaste em ferros fundidos brancos, apesar de que nesse trabalho as amostras estudadas são de compósitos de alumínio reforçadas com rejeito de minério de manganês, a relação do comportamento dos carbonetos e das partículas de reforço no compósito quanto ao desgaste abrasivo são parecidas.

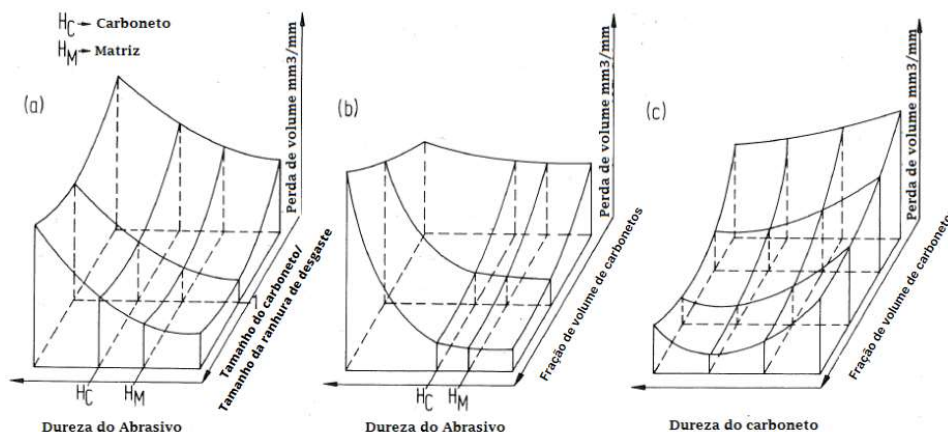


Figura 25 – Esquema simplificado da influência dos carbonetos massivos na perda de volume pelo desgaste abrasivo em ferros fundidos brancos. a) Perda de volume em função do tamanho do carboneto pela ranhura de desgaste e pela dureza das partículas abrasivas. b) Perda de volume em função da fração de volume de carbonetos e dureza das partículas abrasivas. c) Perda de volume em função da fração de volume de carbonetos e dureza dos carbonetos.

Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Zum Gahr (1987) mostra que carbonetos menores que a largura e profundidade das ranhuras causadas pelo processo de desgaste no material são arrancados da matriz, facilitando o aumento do desgaste. Para carbonetos maiores isso não acontece, podendo contribuir para a redução do desgaste. Ao mesmo tempo, o aumento do tamanho dos carbonetos e do caminho livre entre os poros pode estar ligado a um crescimento na perda de massa das amostras. Ainda segundo Zum Gahr (1987), carbonetos muito grandes podem ser quebrados por um abrasivo de maior dureza, e seus pedaços podem ajudar ainda mais na propagação do desgaste pelo material. Um maior caminho livre entre os poros também pode permitir que as partículas abrasivas entrem e ataquem a matriz.

Muitos fatores podem influenciar a mudança na taxa de desgaste. Além da quantidade e distribuição das partículas, elas têm que estar bem aderidas a matriz para produzir uma maior resistência ao desgaste. Dessa forma, o entorno da matriz de alumínio será desgastado, mas a taxa de desgaste será controlada pelas partículas de reforço até que elas se desconectem (KORKUT, 2004).

Arendarchuck (2022) conseguiu visualizar através do perfil tridimensional de amostras de compósito de alumínio reforçadas com NbC irregularidades nos picos e vales nas condições com NbC. Esse efeito se deve pela grande concentração de partículas reforço que ao serem arrancadas levaram um grande volume de material, deixando a superfície mais fragilizada e

contribuindo para o aumento do desgaste. Para partículas mais bem distribuídas pela amostra, houve mais resistência ao desgaste evitando a perda de material.

Todos esses fatores, como a quebra das partículas de reforço pelas partículas abrasivas, o tamanho do caminho médio entre poros e a má fixação do reforço na matriz podem ter contribuído para que a taxa de desgaste nos compósitos reforçados tenha sido maior que no alumínio puro em quase todas as condições de sinterização, exceto para 600°C e 180 minutos.

Além disso Lima *et al.* (2020) citam a presença de descontinuidades nas amostras e uma má fixação da matriz com os rejeitos de minério de manganês em certas regiões. O fato de a matriz englobar as partículas de rejeito e não haver ligações químicas entre matriz e partículas de reforço facilita que essas partículas de rejeito sejam arrancadas. Isso explica um maior desvio padrão no coeficiente de desgaste e uma maior taxa de desgaste em algumas delas.

Durante o processo de lixamento das amostras algumas partículas de reforço podem ter se desconectado de material e deixado vazios antes mesmo do ensaio de microabrasão ser realizado, contribuindo para uma cratera maior.

Para as amostras com reforço, a tendência foi com o aumento da quantidade de reforço houve o aumento da resistência ao desgaste das amostras. Arendarchuck (2022), Rahimian, Parvin e Ehsani (2010), Jesus (1998), Verran (1994) também observaram o aumento da resistência ao desgaste em compósitos de alumínio através do aumento da quantidade de reforço.

A Figura 26 mostra que o aumento da fração de volume de carbonetos contribui para a resistência ao desgaste até certo ponto. Apesar da figura exemplificar um ferro fundido branco, o reforço do alumínio com rejeito de minério de manganês funciona de forma semelhante, contribuindo também para a diminuição do desgaste do material.

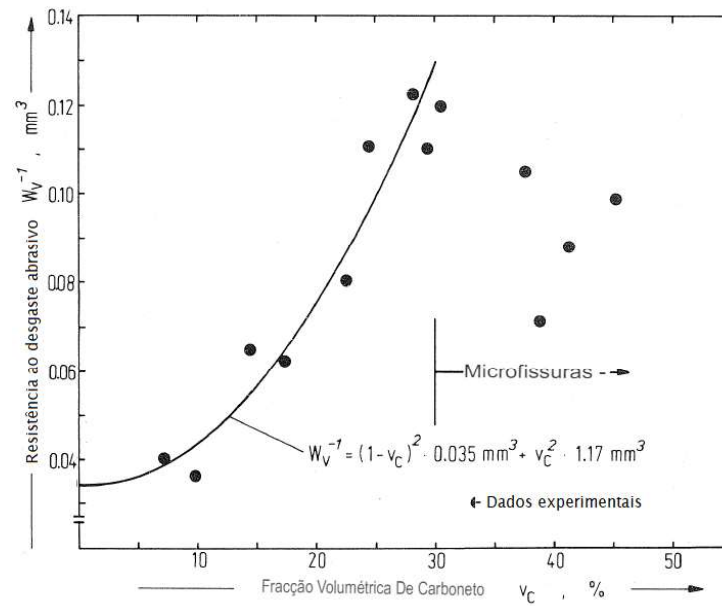


Figura 26 – Resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos testados em roda de borracha úmido com sílica de 50 – 70 mesh, em função da fração de volume de carbonetos massivos M7C3.

Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

Aproveitando os valores de microdureza, foi feita a relação da dureza com o coeficiente de desgaste para cada condição de sinterização, como é mostrado nas Figuras 27, 28, 29 e 30.

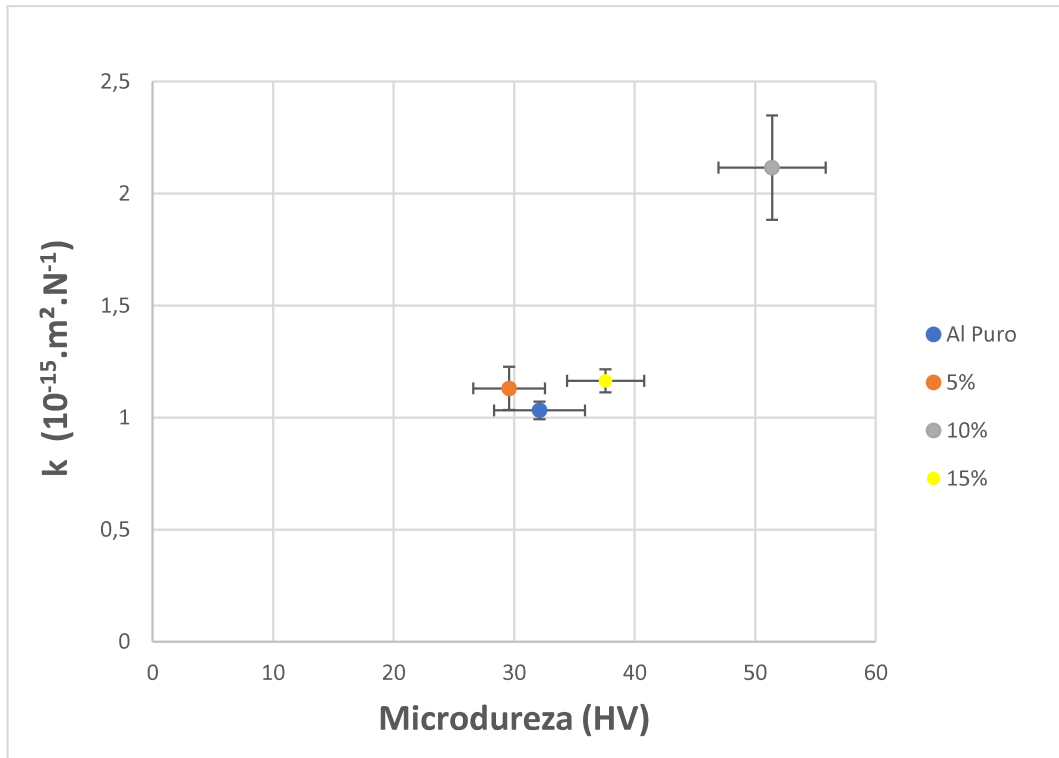


Figura 27 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 600°C durante 120 minutos.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

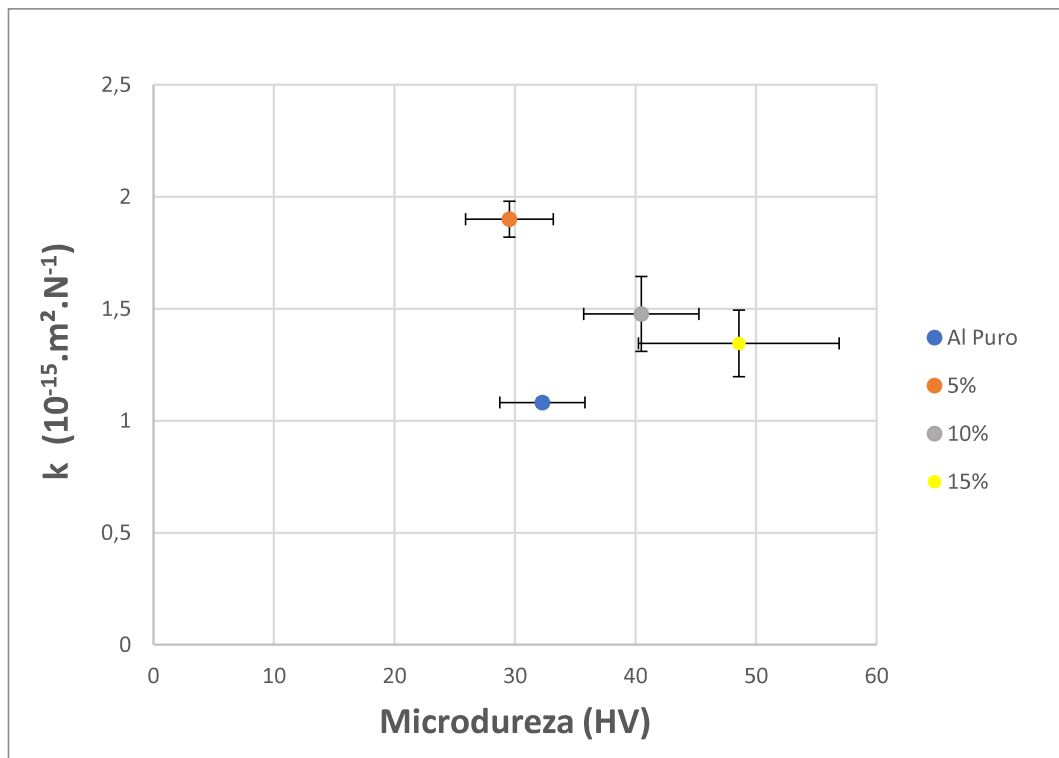


Figura 28 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 600°C durante 180 minutos.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

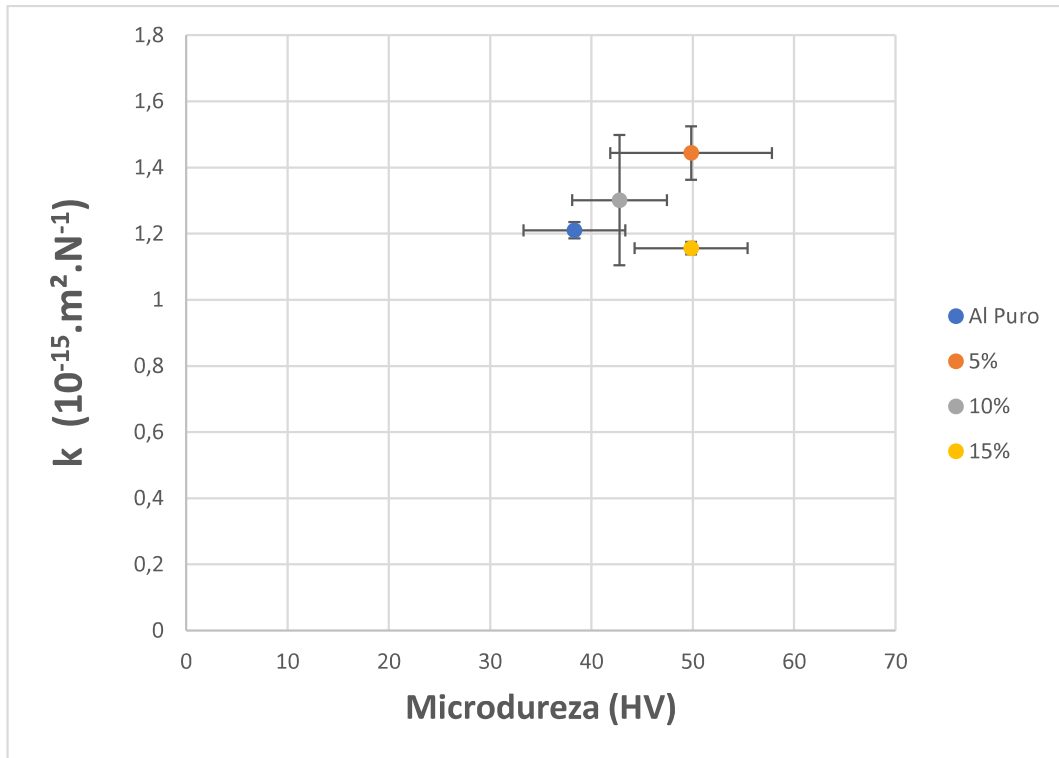


Figura 29 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 610°C durante 120 minutos.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

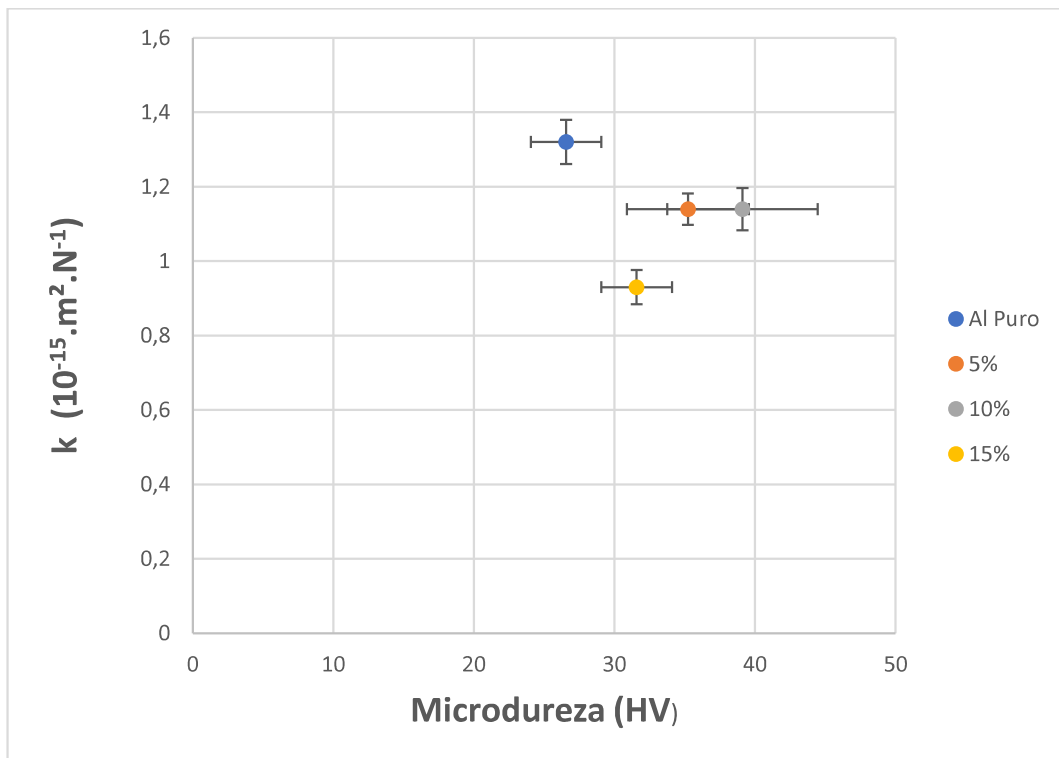


Figura 30 – Coeficiente de desgaste x Microdureza (HV) em amostras sinterizadas em 610°C durante 180 minutos.

Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Para as amostras sinterizadas em 600°C durante 120 minutos o maior desgaste foi no compósito de 10% de rejeito de minério, que possuía a maior dureza. Enquanto isso, para a mesma temperatura durante 180min, a maior taxa de desgaste foi observada na amostra de menor dureza, contendo 5% de reforço. Além disso, na temperatura de 610°C durante 120min, as amostras com 5 e 15%, apesar de terem quase o mesmo valor de dureza, apresentaram o maior e o menor desgaste, respectivamente.

4.4 Mecanismos de desgaste

Nas figuras 31 e 32 são mostradas imagens obtidas através da observação por um microscópico de uma amostra de compósito de alumínio utilizada neste trabalho.

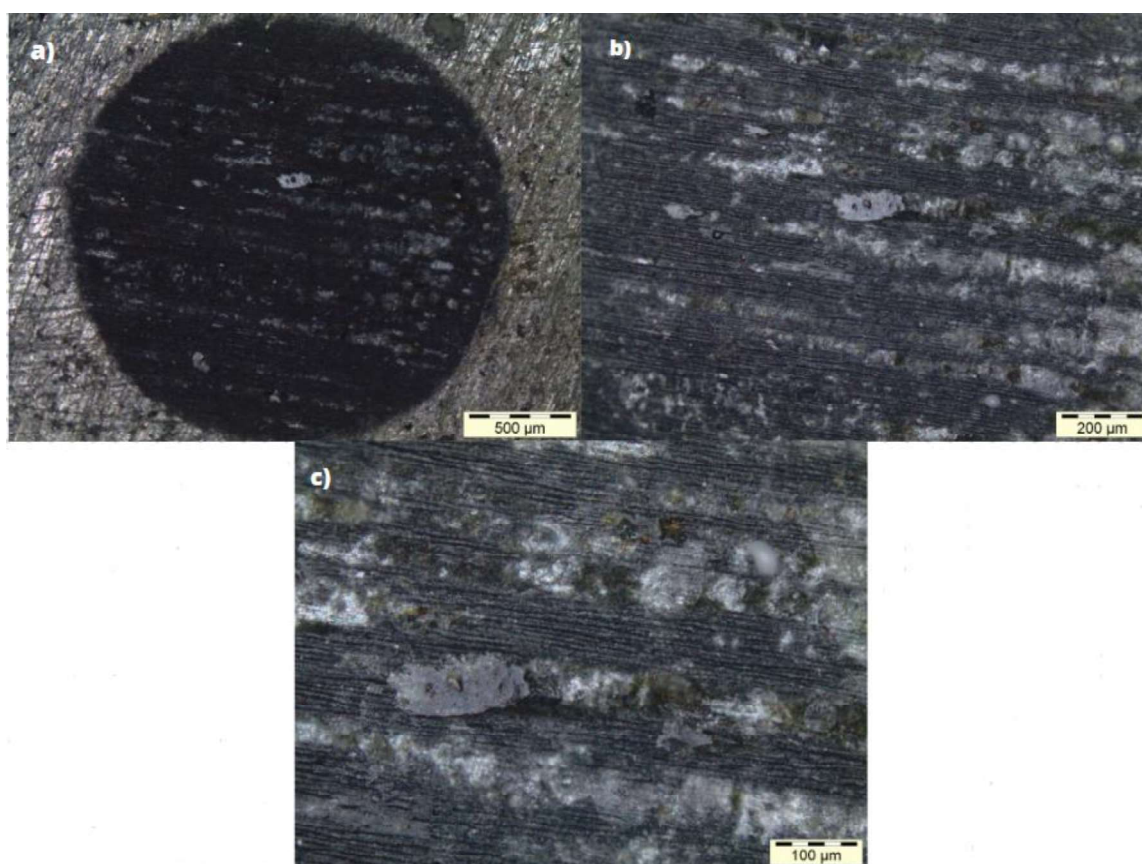


Figura 31 – (a) Cratera de desgaste obtida para a amostra de compósito de alumínio reforçada com 5% de rejeito de manganês e sinterizada à 610°C durante 120 min. (b) ampliação do centro da calota em escala de 200 µm. (c) ampliação do centro da calota em escala de 100 µm.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

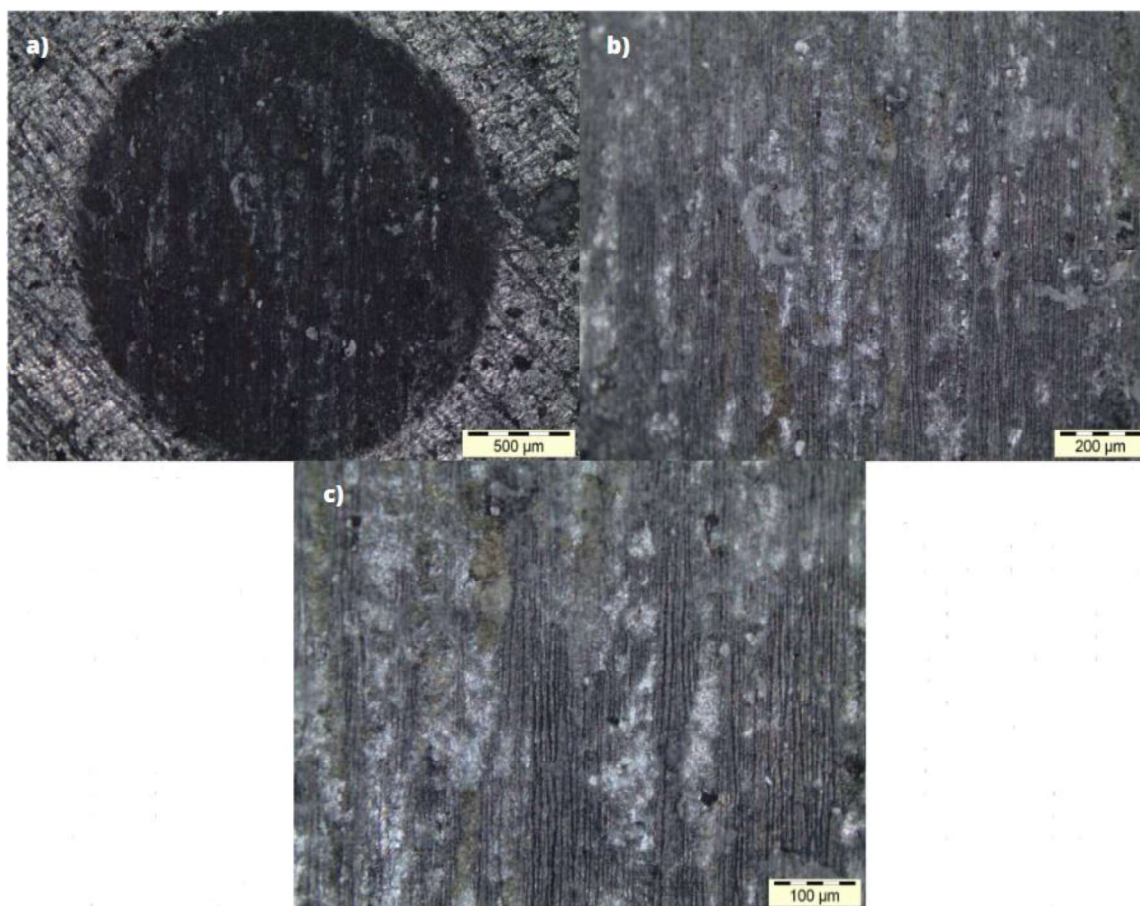


Figura 32 – (a) Cratera de desgaste obtida para a amostra de compósito de alumínio reforçada com 10% de rejeito de manganês e sinterizada à 610°C durante 120 min. (b) ampliação do centro da calota em escala de 200 μm. (c) ampliação do centro da calota em escala de 100 μm.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Todas as amostras sofreram desgaste abrasivo por microriscamento e microsulcamento na matriz de alumínio; com o aumento disponível não foi possível observar riscos sobre as partículas de rejeito de manganês.

As ranhuras encontradas na matriz de alumínio já eram esperadas, pois para pequenas concentrações de abrasivos e altas forças normais há uma predominância do desgaste abrasivo por riscamento (TREZONA *et al.*, 1999).

De acordo com Gregolin (1990), o microsulcamento e o microcorte são pertencentes a materiais dúcteis, sendo a matriz de alumínio um material dúctil, os micromecanismos encontrados neste trabalho foram coerentes. Além disso, o autor também ressalta que a presença desses dois micromecanismos em materiais dúcteis dependem das características das partículas abrasivas, forma, orientação, ângulo crítico, e a inclinação da face de corte.

Nas figuras 31 e 32 é possível observar também alguns pontos fora de foco e isso pode ser um indicativo que a partícula de rejeito ou parte dela foi removida e no local ficou um vazio.

Como os microscópios óticos apresentam distância focal muito pequena, assim, um vazio deixado pela partícula de rejeito poderia causar a alteração na imagem. Uma partícula pode ser removida devido o desgaste preferencial ao redor dela, quando a partícula perde o suporte dado pela matriz ela se solta.

5 CONCLUSÕES

Para as condições de trabalho realizadas, conclui-se que:

Ao adicionar as partículas de rejeito de minério de manganês, o coeficiente de desgaste diminui com o aumento de reforço de rejeito de minério de manganês nos compósitos. Porém, com a exceção da amostra de alumínio puro sinterização de 610°C durante 180 minutos, a adição de rejeito prejudicou a resistência ao desgaste abrasivo dos compósitos. Este comportamento pode estar conectado ao fato de as partículas não terem se aderido à matriz e foram removidas facilmente.

O aumento da temperatura de sinterização de 600 °C para 610 °C diminuiu a resistência a abrasão de amostras de alumínio em até 28%. Para as amostras com adição de rejeito não houve um padrão: para 120 minutos o aumento da temperatura diminuiu a resistência enquanto para o tempo de sinterização de 180 minutos houve um ganho de resistência.

Não houve correlação entre o valor da microdureza e taxa de desgaste. Este resultado pode ser função da técnica empregada para medir a dureza, pois é uma dureza muito localizada e não represente a dureza do compósito.

O micromecanismo de desgaste predominante na matriz de alumínio foi o microsulcamento/microcorte. Já nas partículas de rejeito não foi possível observar o micromecanismo com o aumento empregado.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALVES, Lucas de Assis. **Utilização de resíduos de minério de manganês em compósitos de matriz metálica obtidos por sinterização em atmosfera de argônio**. Monografia (Bacharelado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.
- ARENDARCHUCK, Bruno Edu et al. **Avaliação da tixotrofia e desgaste abrasivo do compósito A380/NbC obtido pelo método stir casting**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- ASKELAND, Donald R.; WENDELIN, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Cengage Learning, 2019.
- ASTM G 40 – 96 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion
- BASTOS, C. L.; KELLER, V. **Aprendendo a aprender**. Petrópolis: Vozes, 1995.
- BATISTA, Luana Araújo *et al.* **Desenvolvimento de compósitos de nanotubos de carbono com matrizes metálicas de alumínio e a liga AA7050**. 2022.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- 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.
- COZZA, Ronaldo Câmara. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- COZZA, Ronaldo Câmara; SOUZA, Roberto Martins de; TANAKA, Deniol Katsuki. Wear mode transition during the micro-scale abrasion of WC-Co P20 and M2 tool steel. **COBEM 2005: proceedings**, 2005.
- CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021. 222 p.
- DA FONSECA, João José Saraiva. **Apostila de metodologia da pesquisa científica**. João José Saraiva da Fonseca, 2002.

DE OLIVEIRA REIS, Matheus et al. **Panorama dos rompimentos de barragens de rejeito de minério no mundo**. Caderno de Geografia, v. 30, n. 61, p. 368-368, 2020.

DIAS, Tatiana Gonçalves; CALIXTO, F. Manganês. **Recursos Minerais de Minas Gerais, Ministério das Minas e Energia**: Brasília, p. 16, 2018.

FARIA, Geraldo Lúcio de. Estudo geometalúrgico de granulados e pelota de minério de manganês. 302 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FERREIRA, Helder Rogério Sant'Ana; CASSIOLATO, Maria Martha de Menezes Costa; GONZALEZ, Roberto Henrique Sieczkowski. **Uma experiência de desenvolvimento metodológico para avaliação de programas**: o modelo lógico do programa segundo tempo. 2009.

FM VENTURA, Ana Mafalda. **Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas**. 2009.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. Ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GREGOLIN, Jose Angelo Rodrigues. **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) resistentes ao desgaste**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Campinas, 1990. [sn].

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

JESUS, Edilson Rosa Barbosa de. **OBTENÇÃO, USINAGEM E DESGASTE DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA PROCESSADOS VIA METALURGIA DO PÓ**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KHAN, Mohammad Mohsin; NISAR, Mehak. Effect of in situ TiC reinforcement and applied load on the high-stress abrasive wear behaviour of zinc–aluminum alloy. **Wear**, v. 488, p. 204082, 2022.

KORKUT, M. H. Effect of particulate reinforcement on wear behaviour of aluminium matrix composites. **Materials Science and Technology**, v. 20, n. 1, p. 73-81, 2004.

LIMA, M. M. F., INCALADO, V. M., QUEIROZ, R. R. U., LIMA, R. M. F. SINTERIZAÇÃO AO NATURAL DE COMPÓSITOS COM MATRIZ DE ALUMÍNIO REFORÇADOS COM 5%p, 10%p e 15%p DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE MANGANÊS. Em: **Ciência e**

Tecnologia: Estudos sobre as Propriedades, Processamento e Produção de Materiais. [s.l.] Editora Artemis, 2020. p. 98–117.

LINHARES, É. P, LIMA, M. M. F., LIMA, R. M. F. **Making Sinter from Low-Grade Manganese Ore**, 2012. In: 20 ° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT 2012). 04 a 08 novembro de 2012. Joinville - Santa Catarina-Brasil. Inst.promotora/financiadora: <http://www.metallum.com.br/20cbecimat/>.

LUZ, A.B.(Ed.); LINS, F. A.F.(Ed). **Rochas & minerais Industriais: usos e especificações**. 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MOREIRA, Anabela Mendes. **Materiais compósitos**. Área de construção, 2009.

NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2016.

PARDINI, Luiz C.; LEVY NETO, Flaminio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2006.

RAHIMIAN, Mehdi; PARVIN, Nader; EHSANI, Naser. Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 4-5, p. 1031-1038, 2010.

RIBEIRO, Affonso Henrique Alves. **Estudo de compósitos de resíduos de minério de manganês obtidos por sinterização ao ar natural**. Monografia (Bacharelado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, 2021.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 25, n. 2, p. 250-260, 1997.

SILVA JÚNIOR, Paulo Rogério. **Rejeito de manganês, proveniente da Amazônia Oriental, em substituição parcial do agregado miúdo natural em concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, 2019.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Grupo A, 2012.

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**, p. 225–229, 1999.

TREZONA, R. I.; HUTCHINGS, I. M. Three-body abrasive wear testing of soft materials. **Wear**, v. 233, p. 209-221, 1999.

VERRAN, Guilherme Ourique. **Estudo da obtenção de compósitos com matriz metálica pelo método da dispersão de partículas cerâmicas em metal líquido: caso particular alumínio-cinzas de carvão**. Dissertação (Pós-graduação) – Programa de Pós-graduação em engenharia metalúrgica e dos materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

VIVEIROS, Danielle de Cássia Santos de et al. **Rejeito do minério de manganês como material de construção civil**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2017.

YADAV, Pradeep Kumar et al. Effect of eutectic silicon and silicon carbide particles on high stress scratching wear of aluminium composite for various testing parameters. **Wear**, v. 482, p. 203921, 2021.

ZUM GAHR, K. L. “**Microstructure and wear of materials**”. Volume 10 ed. [s.l.] Elsevier Science Publishers B. V., 1987.