UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

PPGEMec

Ata n° **10/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezoito dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dezoito horas e trinta minutos, online via webconferência, a que se submeteu o discente **YURI DE MAGALHÃES**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Análise Tribológica de Compósitos, com o seguinte título: **ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE POLIURETANO E COMPÓSITOS POLIURETANO - REJEITO MAGNÉTICO PROVINDO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSTÁTICA**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Sara Matte Manhabosco, Taíse Matte Manhabosco, Fábio Augusto Dornelles do Amaral e o convidado Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha sob a presidência da Professora Sara Matte Manhabosco. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Sara Matte Manhabosco: Aprovado
2. Taíse Matte Manhabosco: Aprovado
3. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: Aprovado
4. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha: Aprovado

Foi concedido um prazo de 60 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
   CPF: 011.313.390-10
   gov.br Documento assinado digitalmente
   SARA MATTE MANHABOSCO
   Data: 18/08/2025 21:04:50-0300
   Verifique em https://validar.iti.gov.br
2. _____
   CPF: 968.272.030-34
   gov.br Documento assinado digitalmente
   TAISE MATTE MANHABOSCO
   Data: 19/08/2025 09:36:31-0300
   Verifique em https://validar.iti.gov.br
3. _____
   CPF: 905.700.220-53
   gov.br Documento assinado digitalmente
   FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
   Data: 18/08/2025 21:09:29-0300
   Verifique em https://validar.iti.gov.br
4. _____
   CPF: 985.887.370-00
   gov.br Documento assinado digitalmente
   PEDRO HENRIQUE COSTA PEREIRA DA CUNHA
   Data: 18/08/2025 21:14:40-0300
   Verifique em https://validar.iti.gov.br

Yuri de Magalhães: _____
gov.br Documento assinado digitalmente
YURI DE MAGALHAES
Data: 19/08/2025 10:39:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

YURI DE MAGALHÃES

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE POLIURETANO E COMPÓSITO POLIURETANO-REJEITO MAGNÉTICO PROVINDO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSTÁTICA

RIO GRANDE
2025

YURI DE MAGALHÃES

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE POLIURETANO E COMPÓSITO POLIURETANO-REJEITO MAGNÉTICO PROVINDO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSTÁTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADORA: Profª. Drª. Sara Matte Manhabosco

COORIENTADORA: Profª. Drª. Taise Matte Manhabosco

Rio Grande

2025

M189a Magalhães, Yuri de
Análise tribológica de poliuretano e compósito poliuretanorejeito magnético provindo do beneficiamento de rocha fostática / Yuri de Magalhães. – 2025.
69 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientadora: Dra. Sara Matte Manhabosco.
Coorientador: Dra. Taise Matte Manhabosco.

1. Engenharia Mecânica. 2. Poliuretano. 3. Rejeitos magnéticos. 4. Tribologia. 5. Polímeros. I. Manhabosco, Sara Matte. II. Manhabosco, Taise Matte. III. Título.

CDU 621

Catalogação na fonte: Bibliotecário Clériston Ribeiro Ramos CRB10/1889

AGRADECIMENTOS

Inicio os agradecimentos citando Platão: "o começo é a parte mais importante do trabalho". Entendo que nenhum início seria tão gratificante sem o apoio incondicional das pessoas que estiveram ao meu lado.

Agradeço aos meus pais, que me ensinaram diariamente sobre a importância da disciplina, da honestidade e da perseverança, moldando o meu caráter e me ajudando a me tornar quem sou hoje. À minha companheira, pela paciência, compreensão e incentivo constante, especialmente nos momentos mais desafiadores desta jornada. Aos professores, que contribuíram para minha formação acadêmica. Vocês me incentivaram pela busca constante do aprendizado. Em especial, agradeço à minha orientadora pela dedicação, paciência e pela oportunidade de me qualificar e crescer profissionalmente durante esses anos.

MAGALHÃES, Y. **Análise tribológica de poliuretano e compósito poliuretano-rejeito magnético provindo do beneficiamento de rocha fostática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande. Orientadora: Profª. Drª. Sara Matte Manhabosco. Rio Grande. 2025. YURI DE MAGALHÃES.

RESUMO

A indústria da mineração enfrenta dois desafios principais: a necessidade de destinação sustentável dos rejeitos gerados e a demanda crescente por materiais capazes de resistir a condições operacionais extremas. Nesse contexto, o desenvolvimento de compósitos que incorporem rejeitos minerais, visando otimizar a durabilidade dos materiais, surge como uma solução promissora. Este trabalho avalia o comportamento tribológico de um compósito de Poliuretano com Adição de Rejeito Magnético (PRM), em comparação ao Poliuretano Puro (PP), demonstrando que a abordagem proporciona, simultaneamente, o reaproveitamento sustentável dos rejeitos e a criação de materiais com propriedades aprimoradas, aptos a aplicações industriais, promovendo eficiência e sustentabilidade no setor. O trabalho contempla análises mecânicas e microestruturais das amostras, realizadas por meio de ensaios de dureza e de desgaste — com destaque para o teste de abrasão por esfera — além de técnicas de caracterização como Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acoplada à Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS). Os resultados mostram que a adição de rejeitos magnéticos ao poliuretano aumentou a dureza do material, mas comprometeu sua resistência ao desgaste devido à falhas de adesão matriz-rejeito. Apesar desse aumento no desgaste, o comportamento mecânico do compósito manteve-se estável ao longo dos ensaios. Em contraste, o poliuretano puro apresentou um desgaste progressivo e contínuo, indicando menor consistência sob condições similares. A análise por MO revelou que o PP apresentou superfície homogênea, enquanto o PRM mostrou maior heterogeneidade devido à presença de partículas de rejeito. Através do MEV, observou-se que o PRM sofreu maiores danos por desgaste. O EDS revelou a presença de elementos como Alumínio (Al), Silício (Si), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe) nas áreas desgastadas do PRM, ausentes nas áreas não desgastadas. Ademais, para ambas as amostras foi observado predominância de Carbono (C) e Oxigênio (O). Conclui-se que, embora o compósito de poliuretano com rejeito magnético apresente potencial para aplicações industriais, há necessidade de otimização da interação entre os componentes para melhorar a resistência ao desgaste. Este estudo contribui para o avanço da utilização de resíduos de mineração em materiais compósitos, promovendo soluções sustentáveis e economicamente viáveis para a indústria.

Palavras-chave: Poliuretano; Rejeitos Magnéticos; Tribologia; Comportamento mecânico; Polímeros.

MAGALHÃES, Y. Tribological Analysis of Polyurethane and Polyurethane-Magnetic Waste Composite Derived from Phosphate Rock Processing. Dissertation (Master's in Mechanical Engineering) – Federal University of Rio Grande. Advisor: Prof. Dr. Sara Matte Manhabosco. Rio Grande. 2025. YURI DE MAGALHÃES.

ABSTRACT

The mining industry faces two main challenges: the need for sustainable disposal of generated waste and the increasing demand for materials capable of withstanding extreme operational conditions. In this context, the development of composites incorporating mineral waste, aiming to optimize material durability, emerges as a promising solution. This study evaluates the tribological behavior of a polyurethane composite reinforced with magnetic waste (PRM), compared to pure polyurethane (PP), demonstrating that this approach simultaneously enables sustainable reuse of the waste and the creation of materials with enhanced properties, suitable for industrial applications, promoting efficiency and sustainability in the sector. The study encompasses mechanical and microstructural analyses of the samples, carried out through hardness and wear tests — notably the ball abrasion test — as well as characterization techniques such as Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM) coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The results show that the addition of magnetic waste to polyurethane increased the material's hardness but compromised its wear resistance due to the formation of fragility zones within the structure. Despite this increase in wear, the mechanical behavior of the composite remained stable throughout the tests. In contrast, pure polyurethane exhibited progressive and continuous wear, indicating less consistency under similar conditions. he analysis using Optical Microscopy (OM) revealed that the Pure Polyurethane (PP) exhibited a homogeneous surface, while the Polyurethane with Magnetic Waste (PRM) showed greater heterogeneity due to the presence of waste particles. Through Scanning Electron Microscopy (SEM), it was observed that PRM suffered greater wear damage. The Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) revealed the presence of elements such as Aluminum (Al), Silicon (Si), Calcium (Ca), and Iron (Fe) in the worn areas of PRM, which were absent in the unworn areas. Additionally, for both samples, a predominance of Carbon (C) and Oxygen (O) was observed. It is concluded that, although the polyurethane composite with magnetic waste shows potential for industrial applications, there is a need to optimize the interaction between components to improve wear resistance. This study contributes to the advancement of the use of mining waste in composite materials, promoting sustainable and economically viable solutions for the industry.

Keywords: Polyurethane; Magnetic Waste; Tribology; Mechanical Behavior; Polymers.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CEFET-MG	Universidade Tecnológica Federal de Minas Gerais
CEME-Sul	Centro de Microscopia Eletrônica do Sul
COF	Coeficiente de atrito
DIN	*Deutsches Institut für Normung*
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
Fe	Ferro
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
g	Gramas
HB	Dureza Brinell
HK	Dureza Knoop
HR	Dureza Rockwell
HS	Dureza Shore
HV	Dureza Vickers
h	Hora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ISO	*International Organization for Standardization*
JIS	Padrões Industriais Japoneses
keV	Quiloeletrovolts
m	Metro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	Milímetros
MO	Microscopia Óptica
N	Newton
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PIB	Produto Interno Bruto
PNM	Plano Nacional de Mineração
PP	Poliuretano Puro
PRM	Poliuretano com Adição de Rejeitos Magnéticos
s	Segundo
Wr	Taxa de Desgaste
°C	Graus Celsius

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo esquemático do processo de mineração: da extração ao beneficiamento, com geração de produto e rejeitos.....16
Figura 2 - Relação entre a quantidade de desgaste acumulada e a exposição ao desgaste….....32
Figura 3 – Materiais utilizados: Poliuretano puro e rejeito magnético.....37
Figura 4 – Corpos de prova……..……..…...37
Figura 5 – Durômetro Portátil Digital Shore C.....39
Figura 6 – Acoplamento da amostra PRM ao MFT-5000.....40
Figura 7 - Comparação das amostras PP e PRM utilizando Microscopia Óptica…….....43
Figura 8 – Perda de massa percentual das amostras PP e PRM em função da distância de deslizamento após submetidas a ensaios de desgaste com tribômetro.....48
Figura 9 - Profundidade de penetração em função do tempo……...…...50
Figura 10 - Coeficiente de Atrito (COF) em Função do Tempo……..51
Figura 11 - Comparação das amostras PP e PRM utilizando MEV em áreas que não foram expostas aos ensaios de desgaste…….....52
Figura 12 - Comparação das amostras PP e PRM utilizando MEV em áreas que foram expostas aos ensaios de desgaste……....54
Figura 13 - Representação gráfica da análise elementar realizada por EDS nas amostras de Poliuretano Puro……..57
Figura 14 - Representação gráfica da análise elementar realizada por EDS nas amostras de Poliuretano com Rejeito Magnético…….....58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de Dureza Shore…….… 45
Tabela 2 – Pesagem da amostra de PRM antes e após ensaios de desgaste…….. 46
Tabela 3 – Pesagem da amostra de PP antes e após ensaios de desgaste……...….46
Tabela 4 – Comparação entre a densidade teórica e a experimental da amostra PRM.....47
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos gerados pelo Tribômetro……..... 50
Tabela 6 – Análise elementar em porcentagem em peso (Weight %)..... 55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....12
2. OBJETIVO.....14
2.1 Objetivo Geral.....14
2.2 Objetivos Específicos.....14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....15
3.1 Evolução Histórica da Geração de Rejeitos na Mineração e o Desenvolvimento de Materiais de Revestimento 15
3.2 Poliuretanos: Estrutura, Aplicações e Desempenho como Revestimento na Mineração.....18
3.3 Aplicação de Compósitos Poliméricos na Indústria.....20
3.4 Desgaste e Erosão: Conceitos, Classificações e Impactos Industriais.....22
3.5 Métodos de Medição da Dureza: Fundamentos, Aplicações e Escalas Relevantes.....24
3.6 Fundamentos da Tribologia: Atrito, Desgaste e Métodos de Avaliação.....25
3.6.1 Conceitos Básicos de Tribologia: Definições e Relevância Industrial...26
3.6.2 Mecanismos de Atrito: Tipos, Movimentos Relativos e Fatores de Influência.....26
3.6.3 Tipos de Desgaste: Mecanismos, Exemplos e Aplicações Industriais....27
3.6.4 Ensaios Tribológicos: Métodos de Avaliação do Desgaste e Caracterização de Superfícies..... 28
3.6.5 Cálculo e Interpretação da Taxa de Desgaste em Materiais.....30
3.6.6 Determinação do Coeficiente de Atrito: Tipos e Fórmulas Aplicadas...32
3.7 Análise Morfológica de Materiais por Microscopia Óptica.....33
3.8 Análise Morfológica de Materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura.....33
3.9 Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) Aplicada à Caracterização Química de Materiais Compósitos.....34
3.10 Pulverização Catódica: Técnica de Revestimento para Análise em MEV-EDS.....35
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....37
4.1 Materiais Utilizados.....37
4.2 Preparação das Amostras 38
4.3 Microscopia Óptica.....39

4.4 Ensaios de Dureza.....39
4.5 Ensaios de Desgaste e Atrito.....40
4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva.....42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....43
5.1 Caracterização Morfológica por Microscopia Óptica.....43
5.2 Efeito da Inclusão de Rejeitos Magnéticos na Dureza Shore do Poliuretano.....45
5.3 Avaliação do Desgaste e do Comportamento Tribológico do Compósito.....46
5.4 Análise Microestrutural e Elementar do Compósito Poliuretano com Rejeito: Resultados de MEV e EDS.....52
6. CONCLUSÃO.....60
7. TRABALHOS FUTUROS.....61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....62

1. INTRODUÇÃO

O interesse por materiais de revestimento aplicados em tubulações e equipamentos da mineração tem se intensificado, dado que essas estruturas são constantemente submetidas a desgaste mecânico por atrito e abrasão, fatores que reduzem a vida útil dos equipamentos e aumentam os custos de manutenção. Esse cenário se torna ainda mais preocupante após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), em 2015, que evidenciou não apenas os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de rejeitos, mas também a necessidade de soluções mais sustentáveis que aliem resistência mecânica e reaproveitamento de resíduos.

O desgaste tribológico apresenta implicações diretas na eficiência energética e econômica. Holmberg et al. (2017) demonstram que aproximadamente 23% da energia mundial é consumida em processos tribológicos, sendo 20% destinados a vencer o atrito e 3% associados à reposição de peças desgastadas e à manutenção. No setor de mineração, esse impacto é ainda mais evidente, representando 6,2% do consumo energético global, o que equivale a perdas econômicas anuais da ordem de 210 bilhões de euros, distribuídas entre perdas por atrito, produção de peças de reposição, manutenção e redução da produção.

Entretanto, mais do que apenas um problema técnico e econômico, o desgaste na mineração também está diretamente ligado a uma questão ambiental: o destino dos rejeitos gerados no beneficiamento mineral. Tradicionalmente armazenados em barragens, esses resíduos representam riscos ambientais e sociais quando não recebem tratamento ou reaproveitamento adequado. A incorporação desses rejeitos em materiais compósitos poliméricos apresenta-se como uma solução promissora, pois além de reduzir o volume descartado, confere valor agregado a um subproduto antes considerado passivo ambiental (CARNEIRO, 2020; COURA, 2018).

Nesse sentido, compósitos baseados em polímeros como o poliuretano, amplamente utilizado em revestimentos devido à sua resistência ao desgaste abrasivo, podem desempenhar papel central. Quando reforçados com partículas provenientes de rejeitos magnéticos, esses compósitos aliam eficiência técnica — aumentando a durabilidade de equipamentos — à sustentabilidade ambiental, contribuindo para a economia circular ao transformar resíduos da mineração em insumos tecnológicos.

Dessa forma, este trabalho busca abordar duas problemáticas complementares: o desenvolvimento de compósitos resistentes ao desgaste abrasivo e ao atrito em condições

extremas de operação; e a destinação sustentável dos rejeitos magnéticos oriundos do beneficiamento de rochas fosfáticas. A investigação do comportamento tribológico de compósitos de poliuretano com rejeitos, em comparação ao poliuretano puro, visa gerar subsídios que fortaleçam tanto a eficiência operacional quanto a sustentabilidade ambiental da indústria mineral.

Além do impacto direto nos custos e na durabilidade dos equipamentos, o desgaste em tubulações e bombas da mineração também se relaciona à segurança operacional. A falha prematura de sistemas críticos pode levar a acidentes ambientais e ocupacionais, ampliando os riscos e a responsabilidade socioambiental do setor. Assim, estratégias que combinem maior resistência tribológica e gestão adequada dos rejeitos ganham relevância não apenas do ponto de vista econômico, mas também ético e regulatório.

Do ponto de vista ambiental, a destinação de rejeitos é uma das maiores preocupações da mineração moderna. Estima-se que, para cada tonelada de minério extraído, sejam gerados em média de duas a três toneladas de rejeito (SANTOS, 2021). Esses materiais, quando armazenados em barragens, representam passivos ambientais de longa duração, com risco de acidentes e contaminação de solos e cursos d'água. Nesse cenário, seu aproveitamento em compósitos não apenas contribui para reduzir a pressão sobre essas estruturas de contenção, mas também cria novas cadeias de valor, em consonância com os princípios da economia circular.

Outro aspecto relevante é a adequação às políticas ambientais e às metas globais de sustentabilidade. A incorporação de rejeitos em materiais de engenharia está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (UNITED NATIONS, 2015), sobretudo os que tratam de consumo e produção responsáveis e de indústria, inovação e infraestrutura. A aplicação de soluções tecnológicas que unem desempenho mecânico e sustentabilidade ambiental contribui diretamente para que o setor mineral se torne mais competitivo e socialmente responsável.

Por fim, cabe ressaltar que o estudo tribológico de compósitos inovadores tem potencial de extrapolar a mineração, alcançando outros setores industriais, como petróleo e gás, construção civil e transporte. Isso reforça a importância de pesquisas que busquem novos materiais capazes de unir alto desempenho mecânico, redução de impactos ambientais e viabilidade econômica, ampliando o escopo e a relevância científica e tecnológica da investigação.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o comportamento tribológico e microestrutural de um compósito formado por poliuretano e rejeito magnético proveniente do beneficiamento de rocha fosfática, visando à aplicação na indústria.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar morfologicamente e estruturalmente as amostras por meio de Microscopia Óptica (MO);
- Caracterizar as amostras por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS);
- Realizar análise de desgaste com tribômetro e caracterizar as amostras quanto ao desgaste;
- Realizar análise de dureza.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Evolução Histórica da Geração de Rejeitos na Mineração e o Desenvolvimento de Materiais de Revestimento

A mineração desempenha papel estratégico na economia nacional. Estudos recentes do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME) mostram que, entre os anos 2000 e 2019, a cadeia produtiva da economia mineral representou entre 2,5% e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, movimentando valores equivalentes a R$ 150 bilhões a R$ 340 bilhões em preços de 2021 (IPEA; MME, 2023). De forma mais específica, levantamentos apontam que o setor mineral respondeu por 3,19% do PIB em 2019 e 3,18% em 2020 (SANTOS, 2021). Por meio dessa indústria, é possível a produção primária de inúmeros materiais de uso diário.

De forma geral, a mineração gera dois tipos de resíduos: estéreis e rejeitos. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento. O beneficiamento seleciona os resíduos granulometricamente, purifica ou enriquece os minérios por meio de métodos físicos ou químicos, não alterando a constituição química dos minerais. Por fim, esses rejeitos tornam-se aptos à utilização na indústria (ARAÚJO, 2006; GUIMARÃES; VALADÃO; PERES, 2012).

A partir da década de 1930, as mineradoras investiram na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos, visando à redução dos impactos ambientais. No início do século XIX, as primeiras barragens eram projetadas de forma transversal ao curso d'água. Por conseguinte, poucas delas permaneciam estáveis após fortes chuvas. Assim, a partir da década de 1930, houve a construção de barragens de contenção de rejeitos com técnicas de compactação e maior grau de segurança, tendo em vista a disponibilidade de equipamentos com mais tecnologia para a movimentação de terras, especialmente em minas a céu aberto (MELLO; PIASSENTIN, 2011).

A Figura 1 ilustra o ciclo da mineração, desde a extração do minério até a geração do produto e dos rejeitos. Após a etapa de beneficiamento, parte do material é convertido em produto final, enquanto uma fração significativa torna-se rejeito, caracterizado pelo elevado volume gerado e pelo desperdício de recursos econômicos e ambientais. Esses rejeitos, frequentemente destinados a barragens, representam não apenas um impacto ambiental expressivo, mas também um desafio de sustentabilidade para a indústria mineral, evidenciando

a necessidade de estratégias que minimizem perdas e promovam o reaproveitamento desses resíduos.

Figura 1 – Fluxo esquemático do processo de mineração: da extração ao beneficiamento, com geração de produto e rejeitos

Fonte: Adaptado da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG). FIEMG Lab. Anglo American Challenge. Como extrair o ferro presente no rejeito.

Com a globalização e o aumento da densidade demográfica, tornou-se crescente a demanda por ferro e aço no mundo, acelerando a geração de resíduos de minério de ferro e causando um grande impacto ambiental. Dentro dessa problemática, surge a possibilidade de utilização desses rejeitos em diferentes áreas, com a finalidade de reciclagem (CARNEIRO, 2020). Silva et al. (2017) fazem uma revisão bibliográfica sobre estudos que focam na reutilização de rejeitos da mineração. Neste artigo, é apresentado que 42% dos trabalhos

aplicam o rejeito na fabricação de cerâmica vermelha, seguidos de concreto (25%), argamassas (17%), filtros de barragens (8%) e agricultura (8%).

Para a extração de rejeitos de mineração, faz-se necessário o uso de peças resistentes ao atrito provocado pelo processo, evitando a inutilização dos equipamentos por desgaste prematuro. Assim, para viabilizar a reutilização desses rejeitos, os aparelhos de extração devem ser resistentes ao desgaste, evitando manutenções repetidas e gastos decorrentes.

Segundo estudos realizados pela Petrobrás, os dutos utilizados para transporte de combustível ativos no país apresentam problemas relacionados à corrosão interna (SOUUZA, 2003). A extensão e gravidade do desgaste dos materiais está relacionado ao tipo de produto transportado, condições de operação e localização, acarretando na necessidade de manutenção periódica, o que gera impacto econômico. Visando prolongar a vida útil das peças são utilizadas técnicas de revestimento com diversos materiais de acordo com a finalidade e tipo de extração (PYLES, 2012).

Segundo Pyles (2012), a primeira experiência brasileira com revestimento interno foi a aplicação de pintura interna em trechos do gasoduto Brasil-Bolívia. O sucesso desse investimento depende, entretanto, da eficiência do processo de limpeza e recuperação da superfície, do material utilizado, do procedimento de aplicação e dos resultados esperados após a aplicação (GOMES; CAMARGO, 2014).

O interesse por materiais de revestimento, especialmente para tubulações utilizadas na mineração, intensificou-se após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), em 5 de novembro de 2015, considerado o maior desastre ambiental da mineração brasileira. Estima-se que entre 43,7 e 60 milhões de m^3 de rejeitos, compostos principalmente por óxidos de ferro e sílica, tenham sido liberados, atingindo mais de 600 km de rios e devastando cerca de 1.500 hectares de vegetação nativa, com a morte de 19 pessoas e a destruição do distrito de Bento Rodrigues (MILANEZ et al., 2015; CARMIGNANI et al., 2016).

A lama contaminada provocou assoreamento, alteração da qualidade da água e mortandade em massa de peixes, além da presença de metais pesados como arsênio, manganês e chumbo, com efeitos nocivos à saúde e à biota (QUEIROZ et al., 2018). Os impactos também foram socioeconômicos, comprometendo agricultura, pesca, turismo e o abastecimento de comunidades ribeirinhas, o que evidencia a necessidade urgente de soluções tecnológicas que reduzam o acúmulo de rejeitos em barragens, como o reaproveitamento desses resíduos em materiais de engenharia.

O acúmulo de rejeitos ferrosos em barragens é algo previsto; porém, após o acidente ocorrido em Mariana, a extração dos rejeitos de mineração tornou-se uma prioridade ambiental. Assim, a busca por compósitos ideais para o revestimento de superfícies em contato com componentes abrasivos aumentou.

A crescente demanda por materiais com propriedades adequadas para aplicação na indústria tem fomentado a pesquisa de novos compósitos. Dentre as aplicações, destaca-se o revestimento interno de equipamentos envolvidos na extração, beneficiamento e transporte de minério de ferro, considerando a agressão sofrida pelos equipamentos nessas operações (SILVA; COSTA, 2018).

3.2 Poliuretanos: Estrutura, Aplicações e Desempenho como Revestimento na Mineração

Conforme discutido anteriormente, é de interesse econômico o uso de revestimentos para aumentar a durabilidade dos equipamentos utilizados no transporte e beneficiamento de minério. A variedade de materiais utilizados para o revestimento interno de tubulações é grande. Dentre eles, destacam-se: zinco, materiais plásticos, elastômeros, asfalto, concreto, vidros e porcelanas. A maioria destes revestimentos é aplicada após a fabricação do tubo, exceto o zinco, que é incorporado durante o processo de fabricação, por meio da galvanização (PYLES, 2012).

É de grande importância que o revestimento seja distribuído de forma homogênea e contínua, ou seja, que não apresente defeitos locais, cobrindo toda a superfície metálica exposta à corrosão. Defeitos na aplicação do revestimento podem causar pontos de corrosão localizada, levando à perfuração da parede metálica do tubo. Vale ressaltar que, com os revestimentos de concreto, não é possível garantir essa aplicação ideal, não sendo, portanto, recomendado o uso para tal finalidade (PYLES, 2012).

Quando não é possível fabricar tubos de plástico maciço devido às condições de segurança exigidas, como a pressão suportada ou o diâmetro do tubo, o revestimento com materiais plásticos torna-se uma solução. Esses revestimentos são facilmente aplicados em tubos com diâmetros de 80 mm ou mais, embora também seja possível utilizá-los em diâmetros menores. Dentre os principais materiais plásticos utilizados para revestimentos de tubos, destacam-se o epóxi, os fenólicos e os polímeros, como os poliuretanos (PYLES, 2012).

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Os polímeros podem ser divididos em três grandes grupos: plásticos, borrachas e fibras. Eles

podem ter origem natural ou sintética, e sua aplicação em materiais é bastante comum, sendo facilmente encontrados em utensílios domésticos e industriais. O uso frequente desse composto justifica-se pelo baixo custo e peso do produto, além da elevada resistência à corrosão (BARRETO; REPSOLD; CASAGRANDE, 2018; AKCELRUD, 2007).

Canevarolo (2006) explica, em seu livro sobre a ciência dos polímeros, que, dentre os polímeros existentes, destacam-se os poliuretanos, uma classe versátil caracterizada pela ligação -NH-CO-O-. Esses polímeros podem se apresentar na forma de termoplástico, termofixo, elastômero ou fibra.

- Termoplásticos: amolecem com o aumento da temperatura, podendo ser moldados. Novas exposições ao calor reiniciam o processo nesses plásticos, tornando-os recicláveis.
- Termofixos: quando sujeitos a um aumento substancial da temperatura, amolecem e adquirem a forma do molde. São moldados quando ainda estão na forma de pré-polímero (sem ligações cruzadas).
- Elastômeros: polímeros que, em temperatura ambiente, deformam-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retornando ao tamanho original após a normalização da temperatura.
- Fibras: termoplásticos orientados com um sentido longitudinal, denominado eixo principal da fibra. A orientação das cadeias, realizada de forma proposital durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desses materiais. Exemplo: náilons.

Dentre os polímeros existentes, o poliuretano é um dos mais utilizados como material de revestimento de superfícies desde o seu desenvolvimento, devido às melhores propriedades quando comparado aos demais e ao menor custo em relação à poliamida (COUTINHO; DELPECH, 1999). Na indústria da mineração, a aplicação de poliuretano com fins de revestimento está em ascensão, tendo em vista a elevada resistência ao desgaste por abrasão, corrosão e oxidação, especialmente quando utilizado em metais (HILL et al., 1997).

Segundo Oliveira (2022), a utilização de poliuretano em equipamentos de mineração apresenta vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens, destacam-se: a alta resistência ao desgaste, tornando-o ideal para ambientes abrasivos; a flexibilidade, que permite suportar deformações sem danos; a resistência à corrosão e a leveza, quando comparado a materiais metálicos.

Dentre as desvantagens temos a limitação do uso quando exposto a temperaturas extremas, especialmente altas temperaturas, tendo em vista um pior comportamento térmico; a

maior degradação quando exposto à luz ultravioleta; limitações quanto ao suporte de cargas pesadas, sendo inferior quando comparado a materiais metálicos; o custo inicial alto quando comparado a materiais convencionais, contudo, com vantagens a longo prazo quando considerada a durabilidade e a baixa manutenção, o que, em termos gerais, supera o investimento inicial a longo prazo.

O poliuretano foi desenvolvido em 1937 pelo químico Otto Bayer e amplamente utilizado durante a Segunda Guerra Mundial como substituto da borracha, evoluindo para aplicações industriais à medida que ocorreram avanços em sua fabricação. Em 1950, o poliuretano teve suas primeiras aplicações como revestimento, popularizando-se na década de 1980 como uma alternativa eficiente para indústrias que necessitavam de equipamentos de alta resistência, como os utilizados na mineração (OERTEL, 1993).

A primeira grande aplicação do poliuretano na mineração ocorreu em guias de correias transportadoras e raspadores, devido ao seu alto desempenho em trabalhos que requerem elevada resistência à abrasão. Posteriormente, o material passou a ser amplamente utilizado no revestimento de tubulações de polpa (SILVA; COSTA, 2018). Sabe-se que o poliuretano pode alcançar dureza entre 20 Shore A e 75 Shore D, resistência à abrasão de 67 mm^3 e alongamento na ruptura de até 70% (REVEST-BOR, 2023).

Silva e Costa (2018) estudaram o comportamento de três tipos de poliuretanos submetidos a condições de erosão semelhantes às encontradas em revestimentos de tubulações para o transporte de polpa de minério de ferro. Após a análise microestrutural, os autores observaram poros nas amostras provenientes do processo de fabricação, concluindo que essas regiões impregnavam partículas abrasivas, criando uma barreira contra a erosão e, assim, contribuindo para a redução do desgaste da superfície.

De forma geral, nos metais, quanto maior a dureza, maior é a resistência ao desgaste, embora não exista uma correlação simples e direta entre essas duas propriedades (SERBINO, 2005). Já o poliuretano, quando submetido a ensaios de abrasão, apresenta um comportamento bastante variado, não havendo correlação entre a dureza e a taxa de desgaste (SARE; MARDEL; HILL, 2001).

3.3 Aplicação de Compósitos Poliméricos na Indústria

A palavra compósito significa “formado por duas ou mais partes distintas”. Assim, qualquer material constituído de dois ou mais componentes que possuam propriedades distintas

e que não sejam miscíveis pode ser tratado como um material compósito. O termo “material compósito” surgiu por volta do século XX como uma classe de materiais promissora dentro das engenharias (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos poliméricos, formados pela adição de outros componentes aos polímeros, são misturas heterogêneas nas quais há o predomínio do polímero. O objetivo é modificar as características do material resultante (STEVENS, 1999; MANO; MENDES, 1999). A análise mecânica e microestrutural de diferentes compósitos poliméricos é bem difundida na literatura devido à sua ampla aplicabilidade (CARNEIRO, 2020; COURA, 2018; SILVA; COSTA, 2018).

O uso de compósitos com matriz polimérica melhora propriedades como a resistência à abrasão e à erosão quando aplicado como revestimento. Por exemplo, o estudo de Borisov (1998) observa o aumento da resistência ao desgaste do revestimento de polietileno de baixa densidade com adição de alumínio e liga de Fe-B, quando comparado ao polímero puro. Foi observado um aumento na resistência de 1,3 a 1,6 vezes.

As propriedades mecânicas e estruturais de compósitos com matriz polimérica, combinados com outros materiais, como carbono ou vidro, já foram estudadas previamente, com pesquisas disponíveis no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Nesses estudos, foram realizados testes de dureza e de desgaste, comparando os resultados com os do polímero puro. Observou-se um aumento da resistência ao impacto, maior rigidez e maior resistência ao desgaste (SILVA, 2007).

Diversas pesquisas investigam a adição de diferentes resíduos industriais a polímeros com o objetivo de agregar valor aos rejeitos, produzindo materiais novos e com melhor desempenho (HUANG et al., 2013). A adição de materiais granulares, como o rejeito de minério de ferro, por exemplo, a polímeros é uma técnica utilizada para o ganho de resistência mecânica do material (CARNEIRO, 2020).

Gungor (2007) fabricou compósitos baseados em Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Fe em pó por extrusão e injeção em seu estudo. O autor observou que o compósito com 5% em volume de Fe apresentou redução do limite de resistência à tração (7%), da resistência ao impacto (40%) e da deformação até a ruptura (90%), além de um aumento na dureza (4%). Ademais, notou que não houve mudanças nessas propriedades ao aumentar a proporção de Fe nos compósitos acima de 5%.

Souza (2013) fabricou compósitos utilizando resíduos de mineração em matrizes poliméricas provenientes de plásticos reciclados. Um dos objetivos do autor era determinar a

concentração limite de rejeito na matriz polimérica. Dessa forma, observou que o material foi capaz de comportar até 25% em massa de rejeito da mineração, aprimorando as propriedades mecânicas e a durabilidade. O estudo de Souza (2017) observou uma quantidade máxima de 20% em volume de rejeito de minério de ferro no compósito estudado.

Coura (2018) fabricou compósitos baseados em PEAD e rejeitos de mineração, na proporção de 80/20, respectivamente. O autor notou um aumento da resistência mecânica, cerca de 40% no módulo de Young e 11% no limite de resistência à tração, quando comparadas às propriedades do polímero puro. Coura afirma que as partículas atuaram como cargas de reforço no compósito.

Coura (2018) analisou o compósito por meio da microscopia óptica, observando a presença de diversas regiões claras, com tamanhos distintos, aparentemente envoltas pela matriz polimérica. Pode-se afirmar que esse tipo de morfologia é diferente daquela observada no polímero puro, no qual as partículas parecem estar expostas na superfície. O autor também relata que, quando a amostra foi analisada por EDS, os resultados foram semelhantes aos do polímero puro. Coura concluiu que a detecção dos elementos químicos presentes nas partículas inorgânicas é dificultada quando estas estão revestidas pelo polímero.

Festugato (2015) estudou a resposta cíclica de rejeitos de minério de ouro reforçados com fibras de polipropileno, concluindo que, sob condições de cisalhamento monotônico, a inclusão de fibras reduz a rigidez do material. Ademais, sob condições cíclicas de tensão controlada, a inserção de fibras melhora a resposta de cisalhamento do material, tornando o compósito mais rígido. No entanto, sob condições cíclicas de deformação controlada, não foi observada melhora, e a adição de fibras não teve efeito sobre a rigidez do material.

Dentre a variedade de matérias-primas que podem ser usadas para o desenvolvimento de compósitos, o uso de rejeitos provenientes da mineração viabiliza o seu reaproveitamento, diminuindo o impacto ambiental do descarte. Atualmente, esse tipo de rejeito é utilizado, principalmente, no recobrimento de vias de acesso não pavimentadas.

3.4 Desgaste e Erosão: Conceitos, Classificações e Impactos Industriais..

Na indústria de óleo e gás, um dos fenômenos mais recorrentes é a erosão, mecanismo de desgaste resultante do impacto contínuo de partículas ou da implosão de bolhas de fluido contra superfícies sólidas (BHUSHAN, 2013). Esse fenômeno é frequente na indústria de óleo

e gás, sobretudo em equipamentos envolvidos no transporte de fluidos, como bombas, turbinas, válvulas, reservatórios e, especialmente, dutos (MAGALHÃES, 2018).

Segundo Zum Gahr (1987), há seis tipos de erosão:

1) Erosão por partículas sólidas em meio gasoso;
2) Erosão por partículas sólidas em meio líquido;
3) Erosão devido à ação de líquidos;
4) Erosão-corrosão;
5) Erosão por cavitação;
6) Erosão térmica.

Existem diversas variáveis que influenciam o desgaste por erosão. As mais frequentes são: velocidade de impacto; concentração de partículas; ângulo de incidência e meio tribológico. Finnie (1995) considerou três grupos de variáveis capazes de influenciar diretamente a taxa de erosão:

- Variáveis relacionadas ao impacto;
- Variáveis da partícula erosiva;
- Variáveis relativas ao material erodido.

Quanto às variáveis de impacto, temos dois fatores determinantes: a velocidade da partícula e o ângulo de incidência. Nesse sentido, Bhushan (2013) afirma que um aumento moderado na velocidade de impacto acarreta um grande aumento na taxa de erosão, independentemente do ângulo de incidência ou da concentração de partículas erosivas. A equação (1) justifica essa afirmação, onde Ec é a energia cinética da partícula, m é a massa e V é a velocidade. De acordo com a velocidade, pode-se observar deformação plástica do material (impacto a médias velocidades) ou fratura frágil (impacto a altas velocidades).

$$Ec = (1/2) \cdot m \cdot V^2 \quad (1)$$

Quanto ao ângulo de incidência, Hutchings e Shipway (2017) afirmam que materiais dúcteis têm maior taxa de desgaste para ângulos menores, apresentando mecanismos de microcorte ou microsulcamentos predominantes. Já materiais frágeis são mais suscetíveis à erosão sob ângulos próximos de 90°, gerando deformação plástica e fratura frágil.

O fluido em si é outra variável a ser considerada. Quanto maior a concentração de partículas, mais eventos de impacto ocorrem, resultando em uma maior taxa de desgaste erosivo. Contudo, Clark (1991) afirma que a taxa de erosão pode não aumentar conforme a

concentração de partículas, devido à interferência entre elas, que se chocam umas com as outras, dissipando parte da energia de movimento.

3.5 Métodos de Medição da Dureza: Fundamentos, Aplicações e Escalas Relevantes

A dureza é uma propriedade mecânica que avalia a resistência de um material quando submetido à deformação plástica. Na prática, essa propriedade é avaliada por equipamentos específicos, como o durômetro.

Segundo Bassan (2022), e como o próprio nome sugere, o durômetro é um instrumento usado para medir a dureza dos materiais, ou seja, a resistência de um material a deformações. Existem diversas metodologias que podem ser aplicadas para calcular a dureza. De maneira geral, aplica-se um objeto contundente, denominado aqui como *penetrador*, sobre um material, com uma carga pré-selecionada, gerando uma impressão na superfície, a qual será posteriormente medida. A metodologia escolhida dependerá da finalidade do estudo e do material analisado, determinando o nome da escala de dureza aplicada.

A escala mais antiga e popular é a Dureza Brinell (HB), criada em 1900, com metodologia desenvolvida especialmente para a metalurgia. O método depende da aplicação de carga (500 a 3000 quilogramas-força) sobre a superfície do material, utilizando uma esfera padrão de aço ou tungstênio com 10 mm de diâmetro, por um tempo pré-definido de 10 a 15 segundos. Após esse período, a esfera é afastada do material, permitindo a visualização da impressão no corpo de prova. O diâmetro dessa impressão é medido utilizando um microscópio. Essa medida é fundamental para o cálculo da dureza por meio de uma fórmula matemática que considera a carga aplicada (em kgf), o diâmetro da esfera e o diâmetro da impressão na superfície do material, ambos em milímetros. Apesar de muito utilizado, o método Brinell apresenta limitações, sendo inadequado para amostras pequenas e com pouca confiabilidade de resultados em materiais heterogêneos, por exemplo (ASTM E10, 2021).

A Dureza Rockwell (HR), criada em 1919, também utiliza a medição da impressão deixada por um penetrador na superfície do material. Dentro deste teste, existem várias escalas, divididas em A, B e C, conforme a metodologia aplicada. As escalas A e C utilizam um penetrador de diamante para o estudo de materiais mais duros, sendo a carga aplicada maior na escala A do que na C. Já a escala B utiliza uma esfera de aço como penetrador, sendo indicada para materiais com menor dureza. O diferencial deste método é que a dureza é indicada

diretamente no visor do durômetro, sem a necessidade de calcular as dimensões da impressão no objeto de estudo (ASTM E18, 2019).

A Dureza Shore (HS), criada em 1920 pelo americano Albert F. Shore, é amplamente adotada para determinar a dureza de materiais elásticos, como polímeros, elastômeros, entre outros materiais flexíveis. Essa escala é dividida em Shore A, B e C, com valores variando de 0 a 100 Shore, sendo o material mais macio quando o resultado é próximo de zero e mais duro quanto mais próximo de 100 (LAL; VERMA; KALRA, 2014).

Shore A é mais utilizada para a medição de materiais macios e flexíveis, utilizando um durômetro com uma ponta de aço cônica. Shore B é aplicada para materiais mais rígidos do que os analisados na escala Shore A, utilizando uma ponta mais macia no durômetro. Já a escala de dureza Shore C é a escolhida para materiais com maior dureza e resistência à deformação (LAL; VERMA; KALRA, 2014).

A Dureza Vickers (HV), criada em 1921, apresenta maior versatilidade, sendo utilizada tanto para metais quanto para polímeros e cerâmicas. Para o teste, utiliza-se uma ponta de diamante em formato piramidal que imprime uma força com carga determinada sobre o material. O cálculo da dureza é feito com base na carga aplicada e na medida diagonal da impressão deixada pelo penetrador. Este método é aplicável a superfícies pequenas e materiais finos, como revestimentos, sendo impreciso, contudo, para materiais muito macios ou com dureza extrema (ASTM E384-16, 2016).

A Dureza Knoop (HK), criada em 1939, assemelha-se ao método Vickers, porém utiliza cargas menores, sendo ideal para amostras frágeis que não resistem a maiores tensões sem sofrer danos estruturais. Esse método também utiliza um penetrador de diamante, com a diferença de possuir uma ponta alongada em um ângulo entre 172° e 130°, sendo ideal para amostras pequenas. A dureza é expressa em unidades de força por área (como kgf/mm² ou GPa), utilizando a carga aplicada (em quilogramas-força) e o diâmetro da impressão (ASTM E384-17, 2017).

Vale destacar que alguns parâmetros podem influenciar a medição da dureza, como o tipo de penetrador, a carga aplicada e o tempo de aplicação, a temperatura do ambiente, a qualidade da preparação da superfície do material a ser analisado e variáveis decorrentes da própria manutenção do durômetro.

3.6 Fundamentos da Tribologia: Atrito, Desgaste e Métodos de Avaliação

3.6.1 Conceitos Básicos de Tribologia: Definições e Relevância Industrial

A palavra tribologia é derivada do grego *"tribo"*, que significa *"gerar atrito, friccionar, esfregar"*, e *"logos"*, que significa *"estudo"*. Segundo Jost (1960), a tribologia é o estudo que analisa a interação de superfícies em movimento relativo. É amplamente aplicada na indústria, com abordagem específica para cada setor, como o automotivo, aeroespacial e industrial, porém com o objetivo comum de controlar o atrito e o desgaste por questões de segurança e eficiência, aspectos essenciais para o avanço tecnológico.

Dentro dessa ciência, temos o estudo da lubrificação, do atrito e do desgaste. Hutchings (2017) define a lubrificação como a interação entre superfícies deslizantes influenciadas por uma substância deslizante, neste caso o lubrificante, o que gera menor tensão de cisalhamento do que a gerada apenas entre as superfícies. Já o desgaste é definido como a alteração de uma superfície sólida por perda ou deslocamento progressivo de material devido ao movimento relativo entre a superfície do material e outro com o qual entre em contato (ASTM G40-15, 2015). De acordo com Hutchings (2017), o atrito é uma força resultante da resistência encontrada por um corpo ao se mover sobre a superfície de outro corpo.

De acordo com Stachowiak (2013), a compreensão da tribologia na engenharia mecânica viabiliza a produção de maquinários com maior eficiência e durabilidade.

3.6.2 Mecanismos de Atrito: Tipos, Movimentos Relativos e Fatores de Influência

Zum Gahr (1987) afirma que o atrito é definido como a resistência ao movimento relativo, gerada pelas interações de sólidos durante o contato, e seu valor depende do par de materiais em contato e do próprio sistema tribológico. Para melhor entendimento, é necessário o estudo de dois tipos de movimento relativo: o de deslizamento e o de rolamento.

O deslizamento ocorre com o movimento entre duas superfícies que estão em contato contínuo, como, por exemplo, o deslizamento de um livro sobre a mesa. Os fatores que influenciam esse movimento são: a aspereza da superfície, que pode determinar maior resistência ao movimento; a força aplicada sobre o objeto, que pode aumentar o desgaste; a lubrificação entre os objetos; e a dureza do material desgastado (SANTOS; SALES, 2007).

Já o movimento de rolamento ocorre quando há deslocamento de uma superfície sobre a outra, sem que ocorra um deslizamento significativo. Um exemplo é o contato das rodas de um automóvel com o asfalto durante o deslocamento. Nesse caso, o coeficiente de atrito será

menor quando comparado ao movimento de deslizamento, resultando em menor desgaste e melhor eficiência energética (SANTOS; SALES, 2007).

Dentro do estudo da tribologia, o atrito pode ser classificado em atrito estático e atrito dinâmico. O atrito estático ocorre entre duas superfícies que não estão em movimento relativo, representando a resistência inicial ao movimento de um material quando aplicada uma força sobre ele. Essa resistência decorre, especialmente, das características elásticas do objeto em estudo. Já o atrito dinâmico, também conhecido como atrito cinético, ocorre entre superfícies que estão em movimento relativo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

De forma geral, o coeficiente de atrito (μ) mede a resistência ao movimento entre duas superfícies em contato. Pode ser expresso pela fórmula matemática, conforme equação (2):

$$\mu = Fa / Fn \quad (2)$$

- μ = coeficiente de atrito
- Fa = força de atrito (N)
- Fn = força normal ou perpendicular à superfície (N)

A força normal pode ser definida multiplicando-se o peso do objeto (kg) pela aceleração da gravidade, no caso de uma superfície horizontal.

3.6.3 Tipos de Desgaste: Mecanismos, Exemplos e Aplicações Industriais

O desgaste é definido como a deterioração de um material devido ao contato com outro, em movimento relativo. Dentre os tipos de desgaste, destacam-se: desgaste abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Zum Gahr (1987) afirma que o desgaste pode ocorrer por diferentes mecanismos, dependendo do meio e dos materiais envolvidos. O autor classifica os mecanismos de desgaste em: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica.

Segundo Pintaude (2022), o desgaste por adesão, como o próprio nome sugere, acontece quando duas superfícies em contato se aderem uma à outra após a aplicação de uma força externa. Ocorre, especialmente, em situações de maior atrito, o que dissipa calor e acelera o processo.

Já o desgaste por abrasão pode ocorrer de duas formas: abrasão cúbica e abrasão por deslizamento. Na primeira, o desgaste decorre de partículas sólidas presentes na superfície do

objeto, que atuam como abrasivos; na segunda, o desgaste ocorre pela diferença de dureza entre superfícies, em que uma superfície dura imprime força e movimento sobre uma superfície mais macia. Esses tipos de desgaste são comuns na mineração (PINTAUDE, 2022).

O desgaste por fadiga superficial, observado especialmente em metais, ocorre quando o material é submetido a esforços cíclicos. Por exemplo, quando duas engrenagens interagem entre si, as superfícies em contato sofrem desgaste, como escoriações, levando à diminuição da vida útil do material. Esse desgaste também pode ocorrer em materiais plásticos, como durante a flexão repetida, que provoca fissuras e, posteriormente, o rompimento (ROSA, 2000).

A reação triboquímica refere-se a alterações químicas que ocorrem entre superfícies quando expostas ao atrito, precipitado pelo calor. Um exemplo cotidiano é o ato de acender um fósforo: ao riscar o fósforo, a fricção entre as superfícies gera calor, provocando uma reação triboquímica. Em temperatura ambiente, o fósforo não acenderia sozinho, dependendo, portanto, da fricção com consequente geração de calor para desencadear a combustão (ROSA, 2000).

A compreensão de cada mecanismo de desgaste permite melhorar a performance e a durabilidade dos componentes mecânicos. Esse conhecimento possibilita o desenvolvimento de estratégias de mitigação, com o objetivo de aumentar a vida útil de diferentes materiais. Para isso, é possível realizar testes que avaliem o desgaste, a fim de desenvolver métodos de aprimoramento dos materiais, seja por meio do desenvolvimento de opções de revestimento ou pelo estudo de materiais não convencionais (ROSA, 2000).

3.6.4 Ensaios Tribológicos: Métodos de Avaliação do Desgaste e Caracterização de Superfícies

Dentre as técnicas de estudo tribológico, o teste de abrasão com esferas é amplamente utilizado na engenharia mecânica, especialmente em materiais plásticos, como o poliuretano. O princípio de funcionamento utiliza uma esfera composta por material duro, como cerâmica ou metal, que é pressionada contra o objeto de teste de forma repetida, realizando movimentos horizontais ou de rotação, a fim de simular condições de desgaste na prática. Para isso, utiliza-se um equipamento que permite a seleção de uma carga controlada, da velocidade de deslizamento da esfera e do tempo de aplicação do teste (DE VRIES, 2005).

Após a realização do teste, é possível quantificar o desgaste gerado pesando o objeto antes e depois do experimento. Outra forma de avaliação consiste na observação da superfície

do objeto, analisando a profundidade e a área desgastada. De qualquer forma, a realização de uma análise quantitativa dos resultados permite a comparação de diferentes materiais sob a mesma configuração da máquina, ou a comparação do mesmo objeto em diferentes condições de desgaste, definidas no equipamento (DE VRIES, 2005).

Segundo De Vries (2005), o teste de abrasão com esferas permite determinar a taxa de desgaste, a profundidade de desgaste e realizar a análise microestrutural da superfície estudada. A taxa de desgaste depende do volume de material perdido (em mm^3), da carga aplicada (em N) e do tempo do teste (em horas). Já a profundidade de desgaste é definida subtraindo-se a altura da superfície estudada antes do teste (em mm) da altura da superfície após o teste (em mm).

A análise microestrutural do material estudado pode ser realizada por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), revelando informações sobre o comportamento do material após o teste. A visualização das marcas na superfície pode indicar a natureza do desgaste, como adesivo ou abrasivo, por exemplo. É possível identificar o surgimento de microfissuras, a mudança na rugosidade da superfície, fenômenos de recristalização (especialmente em materiais metálicos), alterações na microestrutura e fenômenos de fadiga devido ao estresse repetitivo.

A Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), quando aplicada, permite identificar e quantificar os elementos presentes no objeto. Assim, é possível comparar o corpo de prova antes e depois da aplicação do teste, identificando cargas e qualquer material que possa ter sido incorporado ao objeto de estudo, inclusive o material da própria esfera utilizada no desgaste. Essa análise também permite identificar perdas de componentes e a formação de produtos de degradação na superfície do objeto (DEDAVID et al., 2007).

O método de abrasão por esfera possibilita a comparação da resistência ao desgaste entre diferentes materiais, com interesse especial no desenvolvimento de novos materiais de revestimento que superem as condições abrasivas. Formalmente, esse método é reconhecido pela norma internacional ASTM G65 (2015) como um dos testes para avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de materiais.

Existem outros métodos para avaliação de desgaste. Segundo Gee et al. (2003), para a realização dos testes de abrasão, podem ser utilizadas técnicas tradicionais, como o teste “pino sobre disco” ou a técnica que utiliza disco de borracha com areia seca. Contudo, quando aplicados sobre revestimentos finos e duros, esses métodos apresentam problemas na execução,

já que a espessura do material restringe a profundidade do desgaste antes que o revestimento seja perfurado, tornando o processo ineficiente.

Por outro lado, o método de abrasão por esfera possibilita ensaios com volumes pequenos de materiais e filmes finos, além de apresentar baixo custo e alta versatilidade. Dessa forma, Gee et al. (2003) explicam que, por ser um método com maiores benefícios em comparação aos demais citados, o ensaio de desgaste abrasivo por esfera está seguindo uma tendência de padronização em países como os Estados Unidos e na Europa. Com a padronização, será possível garantir a reprodutibilidade das medições de resistência ao desgaste dos materiais mundialmente, além de determinar, de forma mais clara, as características das superfícies estudadas.

Rutherford e Hutching (1997) concluíram que o teste da esfera de aço duro com micropartículas abrasivas tem sido usado para analisar a resistência de filmes finos de PVD, compósitos de fibra de vidro e revestimentos com tintas, além de metais, cerâmicas e vidros. Os autores afirmam que, seguindo os estudos teóricos, esse teste será reprodutível não só em superfícies planas, mas também em superfícies curvas, ampliando as possibilidades de análise de componentes, especialmente na engenharia mecânica.

3.6.5 Cálculo e Interpretação da Taxa de Desgaste em Materiais

Existem várias formas de estimar a taxa de desgaste de um tribossistema e, nesse cálculo, podem ser consideradas as seguintes variáveis: o volume de material desgastado ou a perda de massa decorrente do desgaste, a distância percorrida pelo tribômetro, a velocidade aplicada, a carga aplicada, a composição química do material e as particularidades de sua superfície (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O cálculo da taxa de desgaste dependerá do contexto da aplicação e das variáveis disponíveis para o cálculo. A taxa de desgaste pode ser definida de acordo com a fórmula matemática (3), em que Wr é a taxa de desgaste (mm^3/h ou mm^3/km), V é o volume de material desgastado (mm^3) e T é o tempo de operação ou os ciclos realizados/distância percorrida (h ou km). Essa abordagem é comum para avaliar o desgaste de um componente mecânico (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

$$Wr = V / T \tag{3}$$

Para aplicação deste modelo matemático, é necessário definir o volume de material desgastado. O volume pode ser inferido por medição direta através de um micrômetro, que define a espessura do desgaste, ou através da "Equação de Archard", equação (4)**,** em que V é o volume de material desgastado (mm^3), K o coeficiente de desgaste, F à carga nominal aplicada (N), L a distância percorrida (m) e H a dureza do material (Pa ou MPa). Através da interpretação da equação, Archard afirma que a taxa de desgaste pode variar linearmente com a carga aplicada (HARRIS, et al., 2002):

$$V = (K \cdot F \cdot L) / H \tag{4}$$

Por outro lado, a Taxa de desgaste (Wr) também pode ser calculada pela fórmula (5), em que a massa inicial do corpo de prova (em gramas) é subtraído da massa final, sendo a diferença encontrada expressa como ΔM, também utilizando o Tempo de operação (T), em horas, como divisor (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

$$Wr = \Delta M/T \tag{5}$$

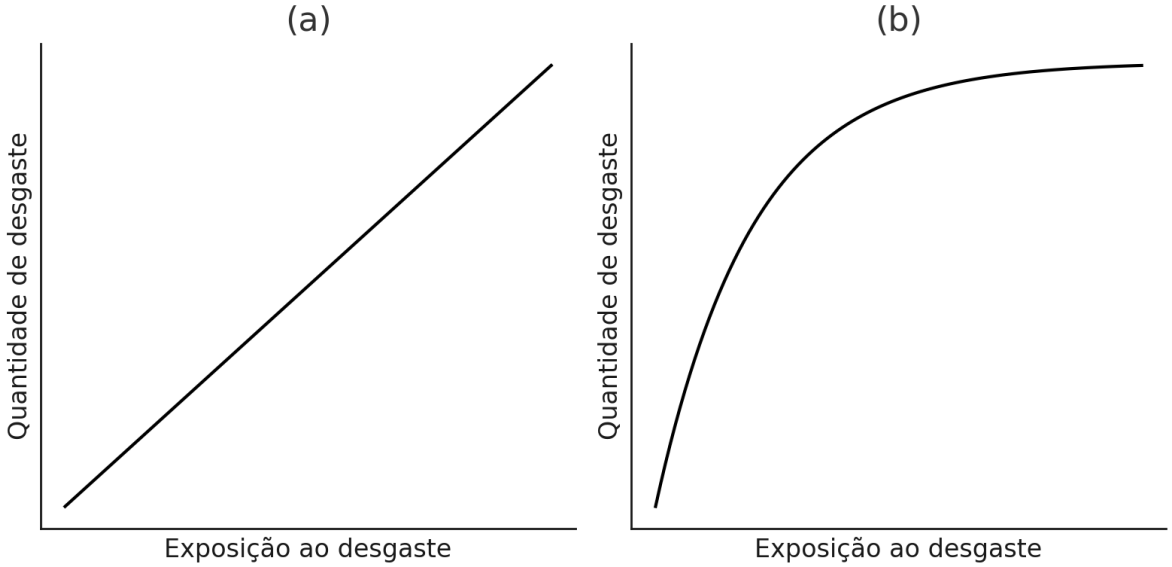
Dessa forma, observa-se que, para realizar a medida de desgaste, podem ser utilizadas fórmulas matemáticas que dependem do volume ou da massa de material removido.

Graficamente, a quantidade de desgaste ao longo do tempo pode assumir diversas formas. Apesar dessa variedade gráfica, normalmente, após um período transitório inicial, a taxa de desgaste assume um valor constante, sendo denominada taxa de desgaste em estado estacionário. A Figura 2 ilustra a relação entre a perda de massa acumulada de um material, em miligramas ou gramas (eixo Y), e a distância deslizada durante um teste de desgaste, em milímetros (eixo X), conforme apresentado no livro *Tribology*, de Hutchings e Shipway, publicado em 2017:

- Curva A: representa a taxa de desgaste constante, sem que tenha ocorrido um período transitório inicial.
- Curva B: representa um período de desgaste maior no início do teste, evoluindo para uma taxa estacionária de desgaste. O autor justifica que esse comportamento é frequentemente associado a características superficiais diferentes quando comparadas ao restante da amostra, relacionando o achado à preparação do corpo de prova. O exemplo utilizado pelo autor é de um teste realizado em uma amostra de cerâmica, na

qual a superfície poderia conter rachaduras, resultando na remoção mais rápida do material adjacente, o que gera a curva representada.

Figura 2 – Relação entre a quantidade de desgaste acumulada e a exposição ao desgaste



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

Segundo o autor, é essencial medir a quantidade de desgaste após várias exposições e compilar os dados graficamente: quantidade de desgaste versus a exposição. Assim, é possível observar com precisão a evolução do desgaste e determinar a taxa de desgaste em estado estacionário.

3.6.6 Determinação do Coeficiente de Atrito: Tipos e Fórmulas Aplicadas

O coeficiente de atrito (COF) pode ser calculado com base na Lei de Coulomb, dividindo-se a força tangencial (Ft) pela força normal (Fn), conforme a fórmula (6):

$$COF = Ft / Fn \tag{6}$$

A força normal refere-se à força perpendicular exercida por um objeto contra uma superfície horizontal, podendo ser calculada ao multiplicar a massa do objeto pela constante gravitacional. Já a força tangencial refere-se à força que a superfície de um objeto exerce contra outra superfície quando submetido a um movimento paralelo. Por fim, o coeficiente de atrito é a relação entre essas duas forças (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Existem dois tipos de coeficiente de atrito: o estático e o cinético. O primeiro ocorre antes de o objeto iniciar o movimento, representando a resistência inicial à movimentação; por outro lado, o atrito cinético ocorre durante o movimento, apresentando, geralmente, valores menores do que os encontrados para o atrito estático (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

3.7 Análise Morfológica de Materiais por Microscopia Óptica

A Microscopia Óptica (MO) permite a observação da morfologia ampliada dos materiais em estudo. Nesse ensaio, uma luz de tungstênio é incidida sobre a superfície do material, sendo transmitida ou refletida pela amostra, gerando imagens com aumentos de até 1000x. Por meio do fenômeno de difração, no qual o feixe de luz original é dividido em diversos outros, com intensidades e ângulos de propagação diferentes, torna-se possível gerar as imagens no dispositivo (ANFIKO, 2020).

Dentre as informações obtidas, destaca-se a distribuição de partículas, como pigmentos, fibras ou outros aditivos que interajam com a luz. Os pigmentos geram diminuição da amplitude dos feixes de luz por meio dos fenômenos de absorção e difusão, o que permite diferenciar a matriz polimérica das partículas presentes no material, pelo contraste gerado (ANFIKO, 2020).

3.8 Análise Morfológica de Materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite maior ampliação da imagem, podendo atingir a escala de nanômetros. Diferente da microscopia óptica, que utiliza a incidência de luz sobre uma interface para a visualização ampliada de um objeto, o MEV incide um feixe de elétrons (AKHTAR et al., 2018).

Esse feixe de elétrons interage com os átomos na superfície da amostra a ser analisada, gerando elétrons secundários e sinais que são detectados pelo equipamento, transformando essas informações em imagens de alta resolução. Tais imagens não podem ser obtidas por microscopia convencional, sendo, portanto, a ferramenta ideal para a avaliação detalhada dos materiais (AKHTAR et al., 2018).

Dentre os componentes do MEV, destacam-se: a fonte de elétrons, por onde é emitido o feixe de elétrons; as lentes eletromagnéticas, que direcionam esse feixe para a amostra a ser estudada; a câmara de vácuo, onde a amostra é acondicionada, ficando livre da interação com a atmosfera, o que garante que o feixe de elétrons não sofra difração por partículas dispersas no

ar; e os detectores, que captam os sinais emitidos pela amostra, decodificando-os em forma de imagem (AKHTAR et al., 2018).

Para garantir a qualidade da imagem, é necessário preparar a amostra antes de utilizar o equipamento. Isso porque, se a amostra for feita de um material não condutor, o feixe de elétrons utilizado pelo equipamento interage com a superfície gerando o acúmulo da carga elétrica, o que pode distorcer a imagem. Ao revestir uma amostra com material condutor, como ouro ou carbono, forma-se uma camada condutora que dissipa a carga acumulada, gerando imagens com melhor qualidade. Além disso, o revestimento protege a amostra da exposição ao feixe de elétrons (DEDAVID et al., 2007).

A escolha entre ouro ou carbono depende do tipo de análise e das características da amostra. O ouro é utilizado em materiais não condutores, sendo ideal quando o objetivo da análise é obter imagens morfológicas detalhadas. Ademais, a aplicação deste revestimento é facilitada, sendo utilizado especialmente a tecnologia por pulverização catódica, ou *sputtering*, recobrindo a amostra de forma uniforme. Contudo, o ouro apresenta picos de espectro que podem se sobrepor aos dos elementos na amostra durante as análises com Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), podendo haver interferência com elementos como o carbono, nitrogênio e oxigênio (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Já o revestimento de carbono gera imagens com inferioridade de resolução, contudo, sem tanta interação com os espectros de EDS, com exceção do próprio elemento Carbono, sendo ideal para análises da composição do material. Também há limitações na aplicabilidade do carbono na amostra, sendo mais difícil alcançar uniformidade (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

3.9 Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) Aplicada à Caracterização Química de Materiais Compósitos

A Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) é uma técnica complementar ao MEV, utilizada para identificar a composição química da amostra. O princípio de funcionamento baseia-se na excitação dos átomos na superfície da amostra pelo feixe de elétrons, gerando ionização e emissão de energia na forma de raios-X. Cada elemento químico possui um número atômico único, o que determina uma estrutura eletrônica individual, possibilitando a diferenciação entre os elementos com base nos raios-X emitidos, funcionando como uma “assinatura” para a leitura pelo equipamento (GOLDSTEIN et al., 2003).

Essa energia é captada pelo detector, que gera um gráfico determinado pela intensidade dos raios-X no eixo Y, refletindo a concentração do elemento na amostra, e pela energia no eixo X, representada em quiloeletrovolts (keV), com um comprimento de onda específico para cada elemento. No gráfico, a posição do pico de energia indica qual elemento está sendo representado, enquanto a área sob esse pico traz informações sobre a concentração do elemento. Normalmente, elementos presentes em maiores concentrações apresentam picos mais altos (GOLDSTEIN et al., 2003; THERMOFISHER SCIENTIFIC, 2023).

De forma geral, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) são técnicas complementares entre si. Essa combinação permite a diferenciação da matriz polimérica de um compósito dos incrementos metálicos adicionados, além de possibilitar a avaliação de falhas de adesão em materiais heterogêneos e a análise da disposição estrutural e química de aditivos. Apesar de amplamente utilizada, a EDS apresenta limitações na distinção de elementos com números atômicos próximos e, devido à baixa profundidade de penetração, a análise das amostras frequentemente se limita à superfície (GOLDSTEIN et al., 2003; THERMOFISHER SCIENTIFIC, 2023).

3.10 Pulverização Catódica: Técnica de Revestimento para Análise em MEV-EDS

O aparelho de pulverização catódica, ou *sputter coater*, é utilizado para revestir amostras com materiais condutores para posterior análise com MEV-EDS. O processo de revestimento ocorre por pulverização catódica (*sputtering*) de átomos de uma placa de material condutor (ouro, carbono, platina) sobre a amostra a ser revestida (GOLDSTEIN, NEWBURY, ECHLIN, 2003).

Este equipamento é formado por uma câmara de vácuo, onde a amostra a ser revestida é acondicionada em um suporte próximo do material a ser pulverizado (placa de ouro, por exemplo). O equipamento possui um sistema de gás inerte, como o Argônio (Ar) e uma fonte de alta voltagem (GOLDSTEIN, NEWBURY, ECHLIN, 2003).

O princípio de funcionamento envolve a criação de vácuo na câmara com posterior introdução do gás sob baixa pressão. Em seguida, é aplicado alta voltagem entre dois eletrodos: a placa de material condutor (cátodo) e o suporte contendo a amostra (ânodo). Sob alta voltagem, os elétrons que fluem do cátodo colidem com os átomos de argônio, formando íons de argônio positivos (Ar^+) pelo processo de ionização. Este processo gera um campo elétrico com diferença de potencial que atrai os íons Ar^+ até o cátodo em alta velocidade. O impacto

destes íons gera a ejeção dos átomos da superfície da placa utilizada, processo denominado *sputtering*. Estes átomos se depositam na superfície da amostra, sendo possível determinar a espessura da camada de revestimento ajustando o tempo de pulverização, a pressão de gás e a corrente aplicada (GOLDSTEIN, NEWBURY, ECHLIN, 2003).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais Utilizados

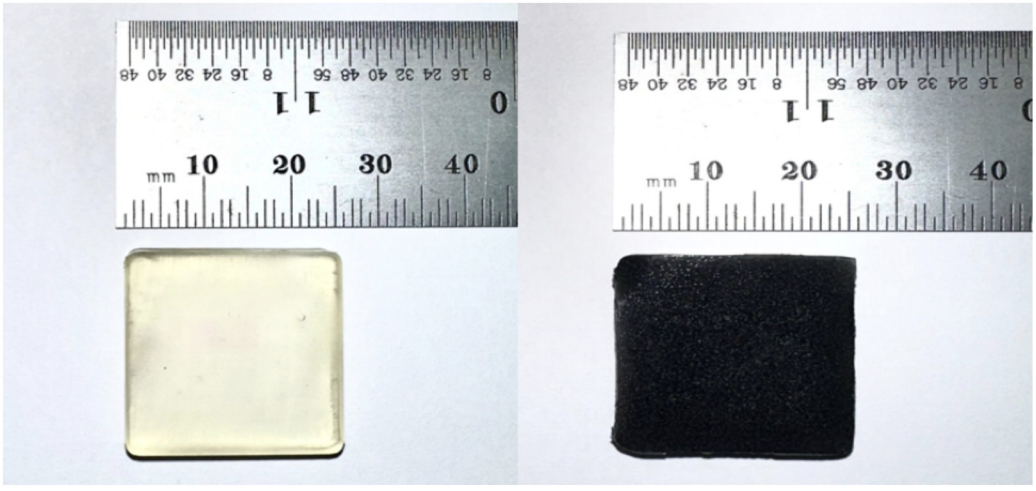
Os materiais utilizados para a elaboração dos ensaios foram duas amostras de poliuretano: uma amostra contendo poliuretano puro e outra com adição de rejeitos magnéticos provenientes do beneficiamento de rocha fosfática. A Figura 3 representa os materiais utilizados na sua forma bruta. A Figura 4 apresenta os corpos de prova que serão avaliados em quintuplicatas, denominados abaixo:

- PRM: Poliuretano com Adição de Rejeitos Magnéticos;
- PP: Poliuretano Puro.

Figura 3 – Materiais utilizados: Poliuretano puro e rejeito magnético

Nota: À esquerda: Poliuretano Puro (PP). À direita: Rejeitos Magnéticos proveniente do beneficiamento de rocha fosfática.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4 – Corpos de prova



Nota: À esquerda: Poliuretano Puro (PP). À direita: Poliuretano com Rejeitos Magnéticos (PRM) com variações de peso de, em média, 5% de rejeito magnético.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 Preparação das Amostras

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram preparadas no Laboratório de Materiais do CEFET-MG – Campus Araxá, cedidas de forma bruta pelo doutorando Fernando Brandão Rodrigues da Silva, que as produziu durante a execução de sua tese. O rejeito magnético adicionado à PRM é composto, majoritariamente, por hematita/magnetita, também apresentando ilmenita, fluorapatita, anatásio, calcita e quartzo, sendo proveniente de uma mineradora situada no Alto Paranaíba, em Minas Gerais (MG).

A granulometria do rejeito foi definida em até 150 μm, após peneiramento a seco e separação magnética, de modo a assegurar partículas suficientemente finas para favorecer a homogeneização com a matriz polimérica, sem, contudo, exigir moagem ultrafina que poderia elevar custos e alterar a morfologia das partículas. Granulometrias superiores poderiam gerar descontinuidades na matriz, comprometendo a adesão partícula-polímero, enquanto partículas muito menores dificultariam o processamento. O composto formado apresenta variações de peso entre 1% e 10% de rejeito magnético (SILVA, 2022).

Tendo em vista que as amostras foram fornecidas de forma bruta, foi necessário submetê-las a etapas de lixamento, polimento, lavagem e secagem antes do início da metalografia. Após esse processo, obtiveram-se corpos de prova retangulares com aproximadamente 20 mm x 20 mm.

Inicialmente, a face do corpo de prova foi lixada utilizando-se a seguinte sequência de lixas para o trabalho metalográfico, respectivamente: 360, 420, 600, 1000, 1200 e 1500. Com o intuito de obter uma superfície plana e sem irregularidades nas amostras, foi necessário obedecer à técnica correta de lixamento. De acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, podem surgir deformações plásticas na superfície, decorrentes de amassamento e aumento da temperatura, o que pode produzir uma imagem distorcida na amostra. Após o lixamento, foi realizado o polimento da superfície em duas etapas: com alumina suspensa de 1,0 μm e 0,5 μm.

Antes do início dos testes, e após cada ensaio de desgaste, a amostra foi limpa e seca adequadamente. Para isso, as amostras foram colocadas em um béquer, banhadas de álcool etílico, e submetidas ao banho ultrassônico pelo equipamento da marca Ya Xun, modelo YX-3060. Posteriormente, foram secadas com um jato de ar.

4.3 Microscopia Óptica

A Microscopia Óptica foi o primeiro ensaio realizado, sendo executado no laboratório de metalografia da Universidade Federal do Rio Grande – Campus FURG.

4.4 Ensaios de Dureza

Em seguida, foram realizados ensaios de dureza com o durômetro localizado no Laboratório de Metalografia, no Campus Carreiros da Universidade Federal do Rio Grande. Nesta fase, as amostras foram avaliadas em quintuplicata, o que significa que cada uma foi testada de forma independente cinco vezes, utilizando-se a média dos resultados para uma representação mais fiel dos achados. Neste teste, adotou-se como referência a escala de dureza Shore C.

Para esse ensaio, foi utilizado o Durômetro Portátil Digital Shore C da marca Metrotokyo, com número de certificado 1042-0086, nas dimensões 116 x 57 x 30 mm e peso de 145 g, conforme Figura 5. Este equipamento possui uma capacidade de medição de 0 a 100 Shore C. Utiliza, como método de medição, a penetração de uma agulha esférica de aço, com força de medição de 0,55 a 8,06 N. Requer que a amostra tenha uma espessura mínima de 6 mm para sua utilização. Ademais, o equipamento atende às normas DIN 53505, ASTM D2240, ISO/R868 e JIS R7215.

Figura 5 – Durômetro Portátil Digital Shore C

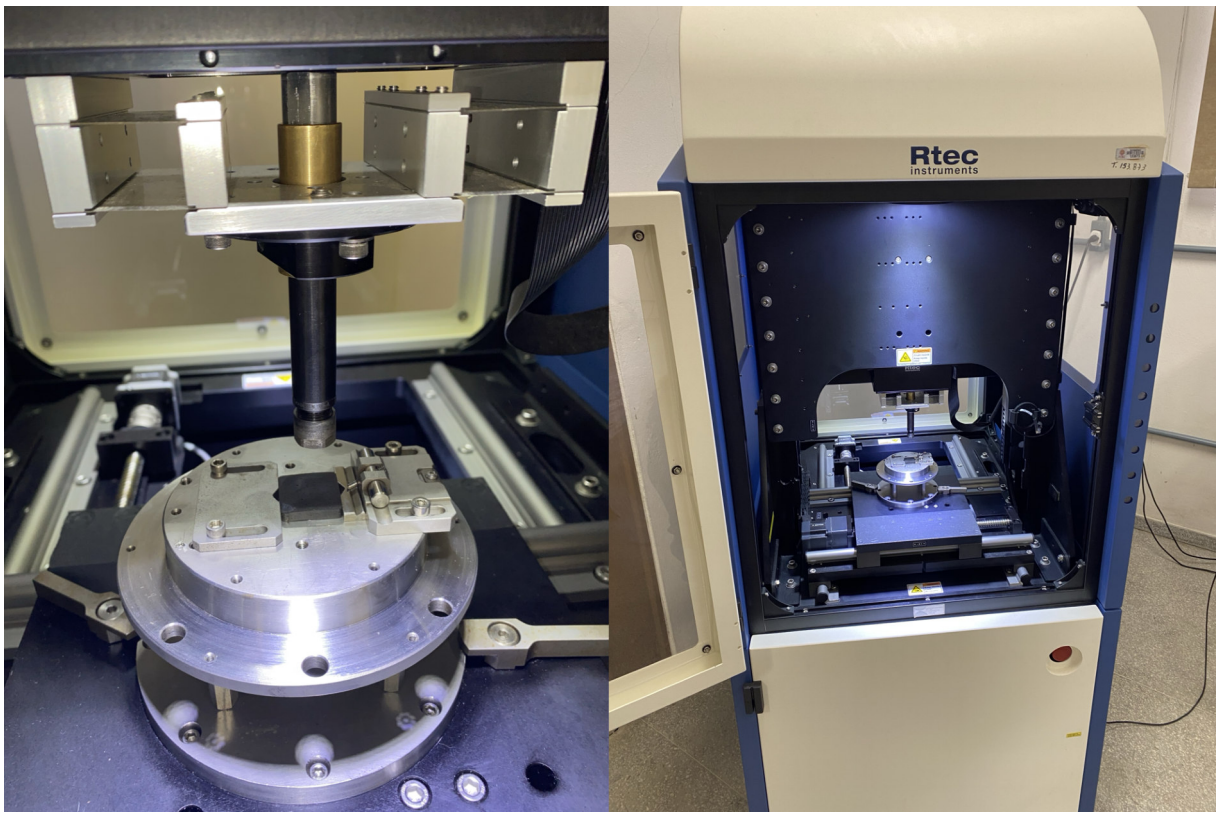
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.5 Ensaios de Desgaste e Atrito

Os ensaios tribológicos foram realizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), que está localizado na Escola de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Rio Grande – Campus FURG, respeitando as normas da ASTM e utilizando um tribômetro para reproduzir fenômenos de atrito e desgaste por meio do teste de abrasão por esfera.

Neste ensaio, foi empregado o Tribômetro Multifuncional MFT-5000, série RETC2789, da Rtec Instruments. O equipamento opera com cargas que variam de nanonewtons (nN) a dezenas de quilonewtons (kN), permitindo a realização de testes em diferentes condições de temperatura, entre -120 °C e 1200 °C, com sensores de força adequados para medições precisas de atrito e desgaste (TENNESSINE, 2023). A Figura 6 demonstra o acoplamento da amostra de PRM ao MFT-5000.

Figura 6 – Acoplamento da amostra PRM ao MFT-5000



Nota: Poliuretano com Rejeito Magnético (PRM); Tribômetro Multifuncional Modelo MFT-5000
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme descrito na metodologia empregada para os ensaios de dureza, as amostras PP e PRM também foram avaliadas em quintuplicata para os ensaios com o tribômetro, utilizando a média dos resultados obtidos em cada teste para a avaliação dos resultados.

Inicialmente, cada amostra foi pesada utilizando uma Balança Analítica de precisão da marca Marte-Shimadzu, modelo ATX224R, com capacidade de medição de 0,0001 g a 220 g, incerteza de 0,2 mg, acondicionada no Laboratório de metalografia da Universidade Federal do Rio Grande – Campus FURG.

Após definido o peso inicial de cada amostra, em média, elas foram submetidas ao ensaio com o Tribômetro, utilizando-se os seguintes parâmetros:

- Carga normal: 10 N;
- Velocidade de deslizamento: 15 mm/s
- Distância de deslizamento: 36.000 mm
- Número de ciclos: 5.538 ciclos;
- Distância de deslizamento: 6,5 mm por ciclo;
- Condições: seco, temperatura ambiente (20 ± 2 °C);

Cada amostra foi submetida ao ensaio sob estas condições por 40 minutos, sendo posteriormente retiradas do equipamento, higienizadas com banho ultrassônico, secadas com jato de ar e pesadas novamente, sendo definida a média dos pesos para cada uma delas. Este processo foi repetido três vezes, com os resultados compilados em uma tabela.

A partir destes testes, foi calculada a densidade teórica do compósito PRM conforme a fórmula (7):

$$d = (\rho PU \times fPU + \rho RM \times fRM) / 100 \quad (7)$$

Onde:

- dd = densidade teórica do compósito PRM (g/cm³);
- ρPU = densidade do poliuretano puro (g/cm³);
- ρRM = densidade do rejeito magnético (g/cm³);
- fPU = fração mássica de poliuretano (%);
- fRM = fração mássica de rejeito magnético (%).

Os parâmetros adotados estão de acordo com os estabelecidos na literatura e nas condições experimentais deste estudo. A densidade do poliuretano puro (PU) foi considerada como 1,10 g/cm³, referência para poliuretanos de média densidade utilizados em aplicações

industriais e acadêmicas. Para o rejeito magnético (RM), foi adotada a densidade média de 5,00 g/cm³, representativa dos principais minerais presentes no compósito (hematita e magnetita), cujas densidades típicas variam entre 4,9 g/cm³ e 5,2 g/cm³. A fração mássica de rejeito magnético considerada no cálculo foi de 5%, valor médio dentro da faixa de 1% a 10% de adição de rejeito utilizada no processamento experimental das amostras.

Ademais, foi calculada a Taxa de desgaste conforme a equação 5, e definido o Coeficiente de Atrito conforme a equação 6. Os dados de Força tangencial e normal foram fornecidos pelo próprio equipamento.

4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva

Por fim, o Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV-EDS) foi utilizado para análises microestruturais por meio do equipamento da marca JEOL, modelo JSM-6610LV. Estas análises foram realizadas no equipamento pertencente ao Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-Sul).

Para tal, as amostras foram revestidas com ouro utilizando o aparelho de pulverização catódica Denton Vacuum, modelo Desk V, acondicionado no mesmo local. Cada amostra foi analisada individualmente na área que não sofreu o desgaste, comparando-a com a área desgastada.

Os parâmetros selecionados para a aquisição dos dados para o EDS foram idênticos entre as amostras: resolução da imagem de 512 x 384 pixels; tamanho do pixel de 1,57 µm; voltagem de aceleração de 15,0 kV; ampliação de 150x. As análises foram denominadas:

- PP¹: Poliuretano Puro em áreas fora do desgaste;
- PP²: Poliuretano Puro em áreas de desgaste;
- PRM¹: Poliuretano com Rejeito Magnético em áreas fora do desgaste;
- PRM²: Poliuretano com Rejeito Magnético em áreas de desgaste.

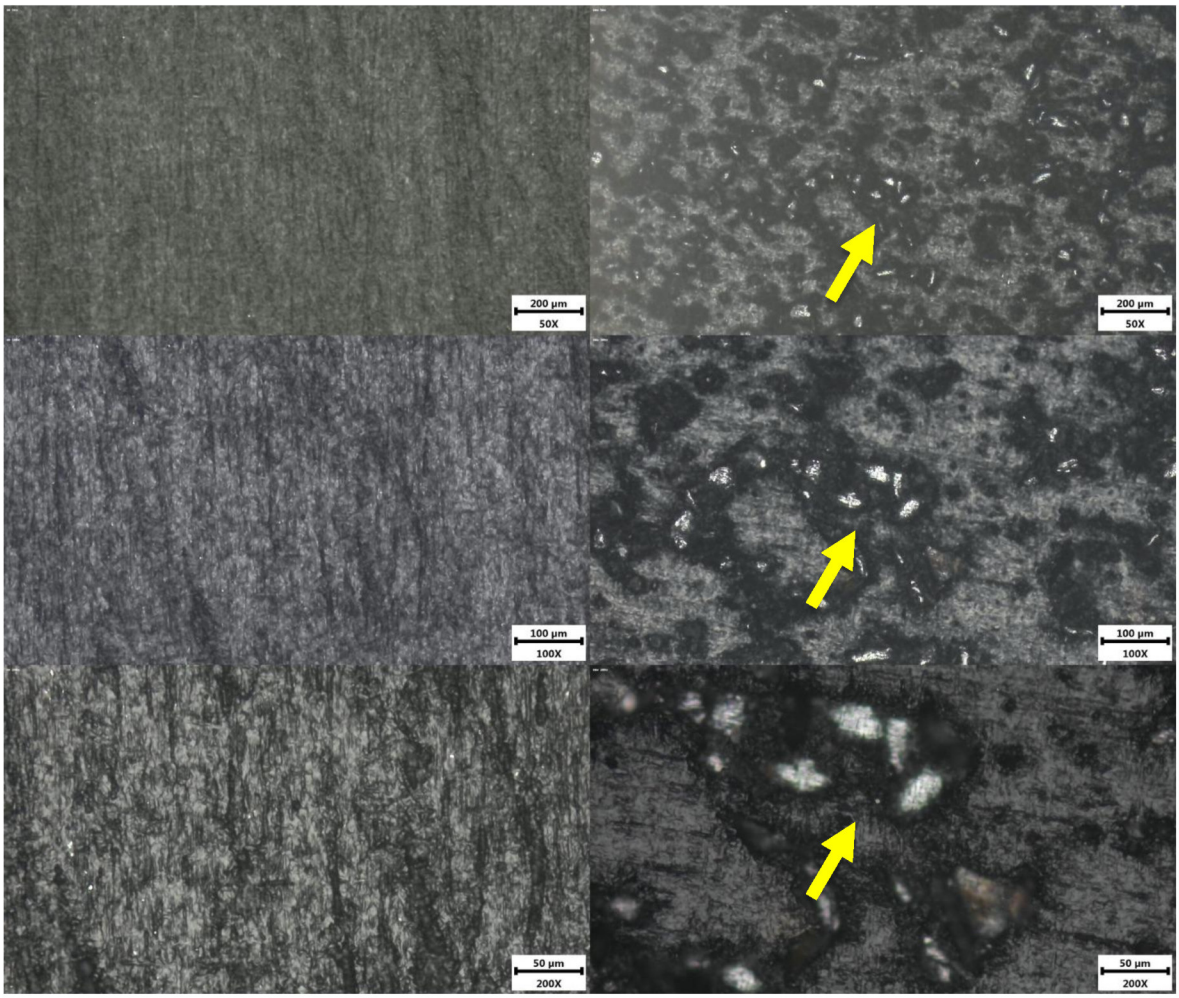
Cada uma das análises foi realizada em triplicata (selecionado 3 pontos) para que fosse possível expor os dados de forma fidedigna. Após, os dados gerados foram compilados em uma tabela para melhor representação.

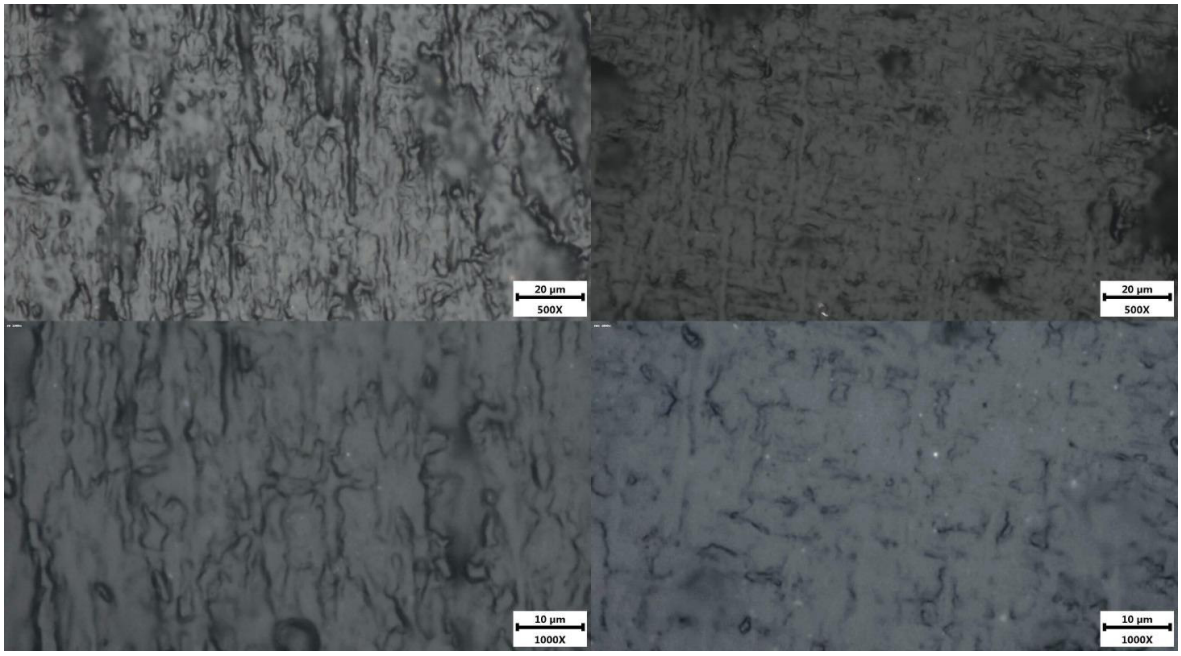
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização Morfológica por Microscopia Óptica

A Figura 7 compara as amostras de Poliuretano Puro (PP) e Poliuretano com Rejeito Magnético (PRM) em diferentes ampliações por meio da Microscopia Óptica, antes de aplicados os testes de desgaste. Observa-se que a amostra PP apresenta uma superfície relativamente homogênea em todas as ampliações, típica de polímeros. Já a amostra PRM apresenta maior heterogeneidade, sendo possível visualizar as partículas de rejeito magnético, que se destacam em tons mais claros, gerando contraste com a matriz polimérica, acinzentada.

Figura 7 - Comparação das amostras PP e PRM utilizando Microscopia Óptica





Nota: PP = Poliuretano Puro à esquerda / PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos à direita / µg = microgramas / X = número de ampliações / Seta amarela = aglomerados de rejeito magnético;
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que as partículas de rejeito magnético formam pequenos aglomerados dispersos na matriz polimérica, favorecendo o arrancamento de partículas. Esses aglomerados são mais nitidamente visualizados nas micrografias obtidas com ampliações de 50× a 200×. Em ampliações superiores, a visualização torna-se mais localizada: dependendo da área focalizada no microscópio, é possível observar predominantemente apenas a matriz polimérica ou apenas regiões concentradas de rejeito.

Ademais, a interface entre as partículas de rejeito magnético e a matriz polimérica aparenta apresentar fraca interação, evidenciada pelo distanciamento entre as fases. Essa descontinuidade na aderência favorece o arrancamento das partículas durante a aplicação de esforços mecânicos. Tal característica é mais visível na micrografia obtida com ampliação de 50×, apresentada à direita na Figura 7. Observa-se que as partículas de rejeito magnético estão envoltas por uma região mais escura, o que sugere a presença de zonas de menor densidade, indicativas de uma fraca interação físico-química entre o polímero e o rejeito. Essa condição dificulta a ancoragem eficiente das partículas na matriz, comprometendo a integridade interfacial e favorecendo o desprendimento sob solicitações mecânicas.

A adesão eficaz entre superfícies é fundamental para a integridade estrutural dos compósitos (SOUSA, 2023). No contexto específico do poliuretano, a interação com minerais depende da compatibilidade entre os materiais: uma adesão fraca pode comprometer o

desempenho global do compósito, prejudicando propriedades como resistência ao desgaste e à tração (MAGNO, 2013). Os achados observados neste estudo, como a presença de regiões de baixa densidade entre a matriz e os rejeitos, reforçam essa interpretação, evidenciando que a má adesão interfacial é um fator determinante para a performance mecânica e tribológica do material.

5.2 Efeito da Inclusão de Rejeitos Magnéticos na Dureza Shore do Poliuretano

A Tabela 1 apresenta os resultados médios de dureza Shore e os respectivos desvios padrão das amostras de poliuretano puro (PP) e poliuretano com rejeito magnético (PRM). Observa-se que ambos os materiais exibiram baixo desvio padrão (0,3 para PRM e 0,2 para PP), evidenciando boa reprodutibilidade e consistência experimental.

Tabela 1 - Resultados de Dureza Shore

Teste	Dureza Shore PRM	Dureza Shore PP
Média	94.8	92.9
Desvio Padrão	0.3	0.2

Nota: PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos. PP = Poliuretano Puro
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados revelam que a incorporação de rejeitos magnéticos ao poliuretano puro promoveu um aumento médio de 2,04% na dureza Shore, elevando o valor de 92,9 Shore (PP) para 94,8 Shore (PRM). Isto indica que a adição dos rejeitos atuou como reforço mecânico na matriz polimérica, influenciando a resistência à indentação localizada.

Este comportamento está em consonância com os achados de outros trabalhos na literatura. No estudo de Coura (2018), por exemplo, foi relatado um aumento de cerca de 4% na dureza de compósitos de poliuretano com adição de partículas metálicas, resultado atribuído à maior rigidez conferida pelas cargas inorgânicas na estrutura do compósito. De forma semelhante, Gonçalves (2010), observou que a adição de caulim em matriz de resina poliéster promoveu aumento significativo de dureza até determinada concentração, reforçando a hipótese de que partículas adicionadas a matriz polimérica podem melhorar as propriedades superficiais dos compósitos.

Medeiros et al. (2008) afirmam que o poliuretano puro apresenta valores médios de 85 ± 2 Shore quando submetido a ensaios tribológicos, o que demonstra que o material utilizado neste estudo possui formulação mais rígida, voltada para aplicações de maior exigência mecânica, o que justifica os valores absolutos mais elevados observados.

Adicionalmente, os resultados desta dissertação corroboram os achados de Gungor (2007), que avaliou compósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) com adição de pó de ferro. O autor observou aumento progressivo na dureza à medida que a concentração de ferro aumentava, porém, esse ganho foi acompanhado de redução significativa na resistência ao impacto e na deformabilidade do compósito.

É importante destacar que a dureza é uma propriedade estática e localizada, refletindo apenas a resistência do material à penetração em uma região específica da superfície analisada. Assim, a maior dureza observada no PRM indica uma elevação pontual na resistência à deformação superficial, mas não garante necessariamente uma melhoria generalizada nas demais propriedades mecânicas do compósito.

A presença de partículas duras, apesar de aumentar a dureza, também pode introduzir zonas de descontinuidade e fragilização interfacial entre a matriz polimérica e o rejeito, conforme evidenciado pelas análises microestruturais. Essas interfaces pouco aderentes podem atuar como pontos de início de falha sob condições de estresse mecânico dinâmico, como impacto ou desgaste abrasivo.

5.3 Avaliação do Desgaste e do Comportamento Tribológico do Compósito

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados médios de peso, em gramas, e os respectivos desvios padrão, obtidos após cada uma das quintuplicatas realizadas nas amostras de PRM e PP, assim como a variação do peso inicial em comparação com o peso após três ensaios subsequentes de desgaste.

Tabela 2 – Pesagem da amostra de PRM antes e após ensaios de desgaste

Amostra PRM*	Peso Inicial (g)	1º Ensaio (g)	2º Ensaio (g)	3º Ensaio (g)
Média	3,2696	3,2391	3,2237	3,2034
Desvio Padrão	0,0005	0,000075	0,00005	0,00005

*** Nota:** PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos / g = gramas.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 3 – Pesagem da amostra de PP antes e após ensaios de desgaste

Amostra PP*	Peso Inicial (g)	1º Ensaio (g)	2º Ensaio (g)	3º Ensaio (g)
Média	2,7615	2,7605	2,7595	2,7586
Desvio Padrão	0,00007	0,00009	0,00009	0,00005

*** Nota:** PP = Poliuretano Puro / g = gramas.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a amostra PRM, o peso inicial médio foi de 3,2696 g, com reduções sucessivas para 3,2391 g, 3,2237 g e 3,2034 g ao longo dos três ensaios de desgaste. De modo análogo, a amostra de PP apresentou um peso inicial médio de 2,7615 g, com valores subsequentes de 2,7605 g, 2,7595 g e 2,7586 g.

Observa-se que a perda de massa foi mais pronunciada na amostra PRM em comparação à amostra PP. A redução de peso do PRM ao longo dos ensaios foi da ordem de 66,2 mg (aproximadamente 2,02%), enquanto para o PP a perda foi de apenas 2,9 mg (cerca de 0,10%). Essa diferença substancial evidencia que, embora o PRM tenha apresentado maior dureza estática (Tabela 1), sua resistência ao desgaste foi inferior à do poliuretano puro.

Esse comportamento corrobora os achados de Teldjoun et al. (2024), que afirmam que fragmentos de material removidos durante o atrito podem se acumular sob a superfície de contato, agravando o desgaste e alterando o coeficiente de atrito.

Tal comportamento pode ser explicado pela microestrutura observada nas análises microscópicas, que indicaram fraca interação interfacial entre o rejeito e a matriz polimérica. Essas regiões de fragilidade também são discutidas por Onitiri e Akinlabi (2017), que associaram baixa adesão partícula-matriz ao aumento da abrasividade e à queda de desempenho mecânico, o que é compatível com os resultados desta dissertação. Infere-se que a presença de partículas rígidas pouco aderidas favorece o arrancamento durante o processo de desgaste, resultando em maior perda de massa.

Observou-se que o peso inicial da amostra PRM foi cerca de 18% maior do que o da amostra PP, apesar de ambas apresentarem as mesmas dimensões. Esse resultado justifica-se pela inclusão de rejeitos magnéticos, que conferem maior densidade à amostra. Esse achado também está em consonância com Santos et al. (2013), que demonstraram alterações nas propriedades físicas com a inserção de materiais mais densos em matrizes poliméricas.

Considerando a natureza aditiva da densidade em compósitos, foi calculada a densidade teórica da amostra PRM, resultando em 1,295 g/cm³. Adicionalmente, com base na massa média inicial da amostra PRM (3,2696 g) e considerando o volume equivalente à amostra de PU puro (2,5105 cm³), obteve-se uma densidade de 1,302 g/cm³. A comparação entre os valores teórico e experimental é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre a densidade teórica e a experimental da amostra PRM.

Tipo de Densidade	Valor (g/cm³)	Desvio Padrão (g/cm³)
Densidade teórica (5% RM*)	1,295	-

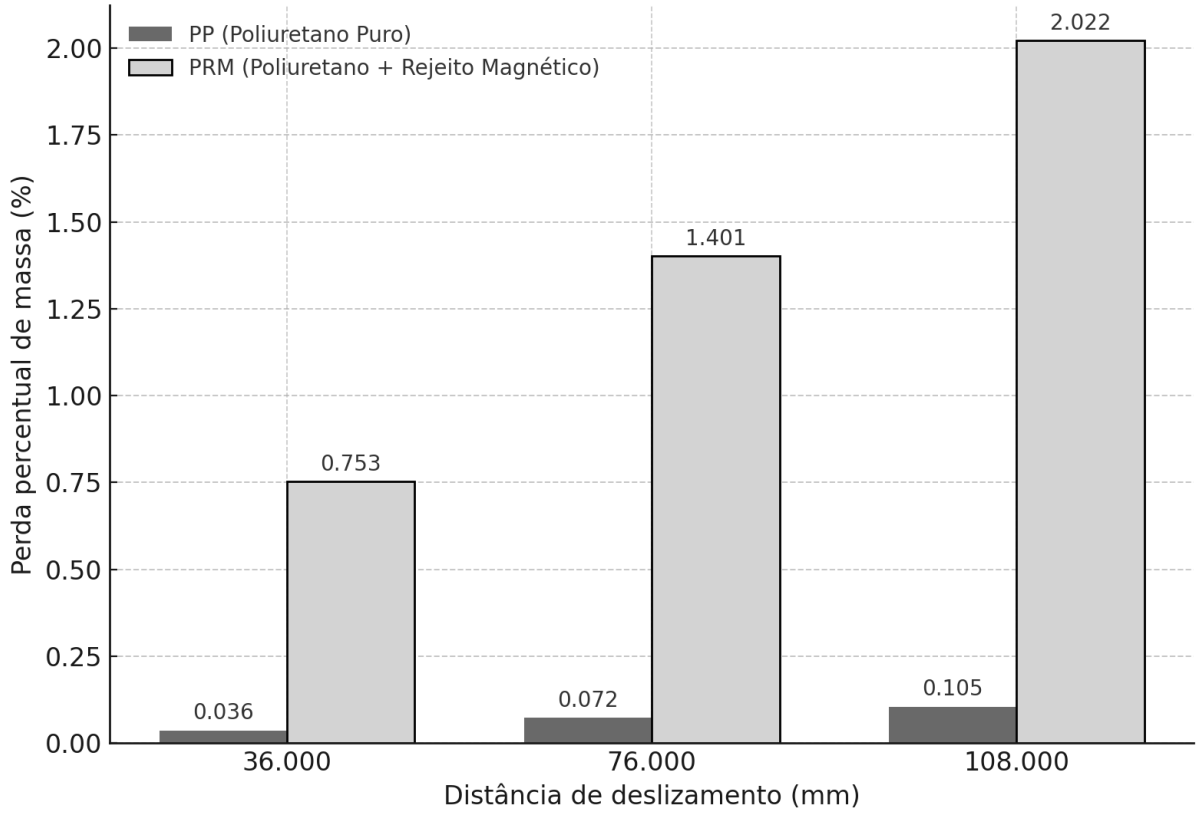
Densidade experimental	1,302	0,003

*** Nota:** RM – Rejeito Magnético.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A diferença relativa entre os valores foi de aproximadamente 0,54%**,** indicando uma boa concordância entre a composição projetada e a obtida experimentalmente. Essa pequena variação pode ser atribuída a fatores como pequenas inclusões de ar no material. O resultado reforça que a incorporação dos rejeitos magnéticos foi realizada de maneira controlada e homogênea, validando a metodologia de preparação das amostras.

A Figura 8 demonstra a perda de massa percentual das amostras PP e PRM conforme a distância de deslizamento setada no tribômetro. Observa-se que a amostra PRM (Poliuretano com Rejeito Magnético) apresentou uma perda de massa percentual maior quando comparada à amostra PP (Poliuretano Puro) sob as mesmas condições de desgaste. Apesar de a amostra PRM ter exibido maior dureza superficial, também sofreu desgaste mais acentuado. Esse fenômeno está de acordo com Gungor (2007), que observou que o aumento de dureza em compósitos com partículas metálicas pode comprometer propriedades como resistência ao impacto e a deformabilidade, levando a maior desgaste.

Figura 8 – Perda de massa percentual das amostras PP e PRM em função da distância de deslizamento após submetidas a ensaios de desgaste com tribômetro



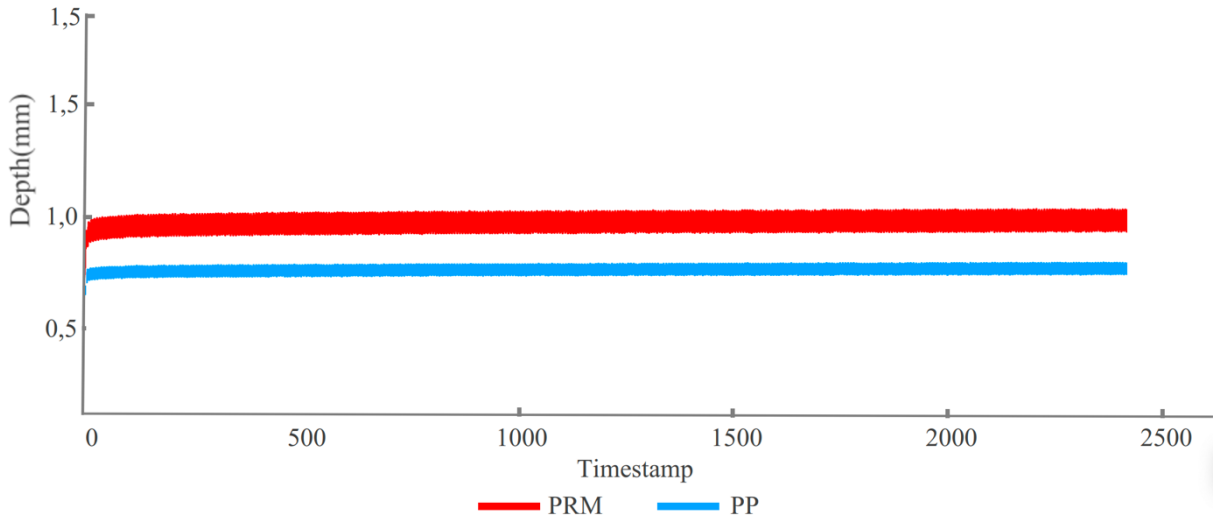
Nota: PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos / PP = Poliuretano Puro / mm = milímetros
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esse resultado pode parecer contraditório à primeira vista, mas é compreensível quando se considera a natureza distinta entre as propriedades de dureza e desgaste. A dureza refere-se à resistência localizada à indentação estática, enquanto o desgaste é um fenômeno dinâmico, influenciado por múltiplas variáveis — entre elas, a qualidade da interação entre a matriz polimérica (PU) e a fase dispersa (RM) (MAGNO, 2013; SOUSA, 2023).

Nos compósitos, uma boa adesão entre matriz e partículas é fundamental para que as propriedades mecânicas sejam efetivamente aprimoradas. No presente estudo, os indícios sugerem que o acoplamento entre PU e RM foi limitado. Essa baixa interação interfacial pode ter facilitado o desprendimento das partículas de rejeito durante o ensaio, fazendo com que atuassem como terceiro corpo abrasivo, agravando o desgaste da matriz. Portanto, embora o reforço com rejeito magnético tenha elevado a dureza da amostra, a ausência de sinergia estrutural entre os constituintes resultou em um desempenho tribológico inferior ao do poliuretano puro. Tal comportamento também foi descrito por Coura (2018), que apontou regiões de heterogeneidade em compósitos com rejeito, gerando zonas propensas à falha mecânica.

Observando a Figura 9, gerada pelo tribômetro, nota-se que a amostra de PRM (linha vermelha) apresentou uma profundidade média de desgaste de 0,99 mm, enquanto a amostra de PP (linha azul) apresentou uma profundidade menor, de 0,71 mm, em média. Esse achado sugere que a amostra PP apresentou maior resistência aos testes de desgaste quando comparada à amostra PRM. Por outro lado, Borisov, Sviridov e Korzhik (1998) relataram um aumento da resistência ao desgaste em compósitos de metais e polímeros, o que contrasta com nossos achados. Tal discrepância pode ser atribuída às diferenças nas composições e nas interações entre os componentes dos materiais estudados.

Figura 9 - Profundidade de penetração em função do tempo



Nota: PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos / PP = Poliuretano Puro / mm = milímetros
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 5 apresenta os parâmetros estatísticos observados pelo equipamento para as duas amostras. Nota-se que o coeficiente médio de atrito da amostra PRM foi menor do que o da amostra PP, indicando que a PRM impôs menor resistência ao movimento, entendido como atrito, apesar de ter apresentado maior desgaste. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito dos rejeitos magnéticos incorporados à matriz polimérica. Por serem partículas rígidas e duras, os rejeitos podem atuar como elementos de rolamento microscópico, reduzindo a interação direta entre a superfície do compósito e o tribômetro, o que resulta em um coeficiente de atrito mais baixo. No entanto, quando não há uma boa aderência entre a matriz (PU) e a fase dispersa (RM), essas partículas podem se desprender facilmente durante o ensaio. Uma vez soltas, elas passam a atuar como terceiro corpo abrasivo, circulando entre as superfícies em contato e aumentando a taxa de remoção de material. Esse mecanismo explica por que, mesmo com menor atrito, a amostra PRM apresentou maior desgaste.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos gerados pelo Tribômetro

Parâmetro	**PRM**	**PP**
Força Normal	9,9951 N	9,9981 N
Força Tangencial	0,1257 N	-0,0526 N
Coeficiente de Atrito	0,3831	0,4279

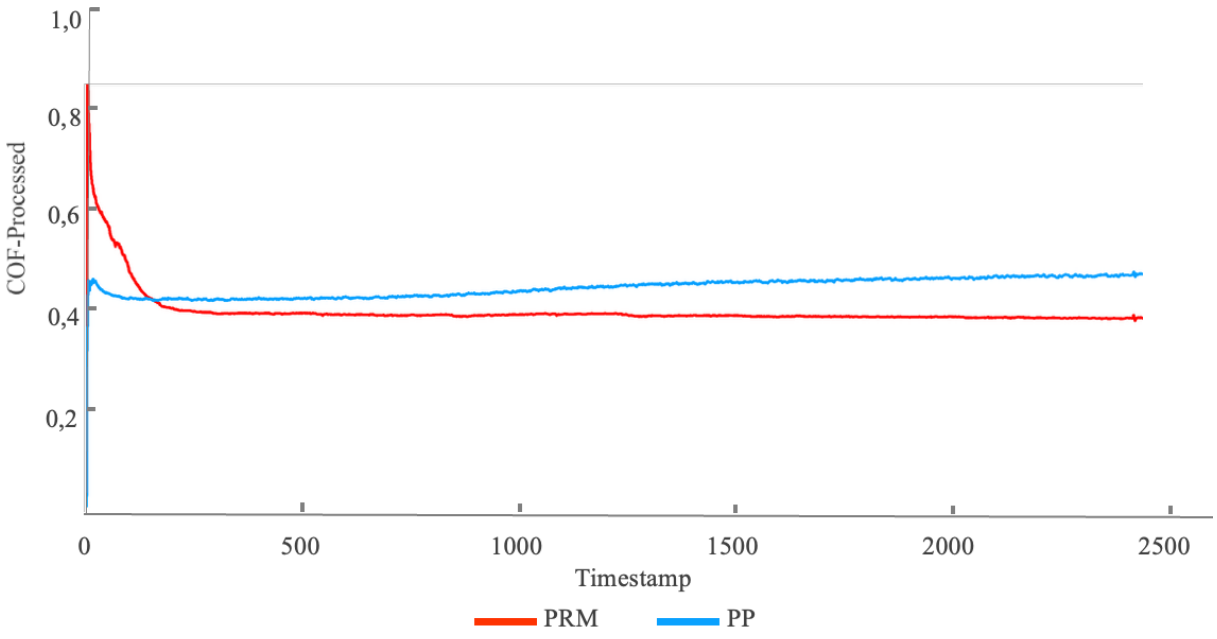
Profundidade	0,9908 mm	0,7108 mm

Nota: PRM = Amostra de Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos / PP = Amostra de Poliuretano Puro / mm = milímetros / N = Newton
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O estudo de Yamashita (2018) é pertinente para contextualizar nossos resultados. Yamashita comparou o desgaste entre corpos de prova normalizados e genéricos utilizando o tribômetro Reichert Test. O estudo demonstrou que, embora os corpos de prova genéricos apresentassem desgastes moderados em relação aos normalizados, os resultados foram estáveis e satisfatórios, sugerindo a viabilidade do uso de materiais alternativos em estudos tribológicos. De forma semelhante, nossos resultados indicam que, apesar da adição de rejeitos magnéticos ter aumentado o desgaste do PRM, o comportamento tribológico se manteve consistente, demonstrando que materiais modificados podem ser utilizados em aplicações específicas, desde que suas limitações sejam compreendidas e controladas.

A Figura 10 mostra que, apesar de o Coeficiente de atrito médio do PRM ter sido menor que o de PP, o PRM inicia com um coeficiente de atrito duas vezes maior do que o do PP; contudo, rapidamente diminui até se estabilizar em torno de 0,35. Esse comportamento inicial pode estar relacionado à aspereza da superfície da amostra, que aumenta a resistência inicial ao deslizamento, mas evolui com a rápida acomodação do material, culminando na redução desse atrito.

Figura 10 - Coeficiente de Atrito (COF) em Função do Tempo



Nota: PRM = Amostra de Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos / PP = Amostra de Poliuretano Puro / mm = milímetros /
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

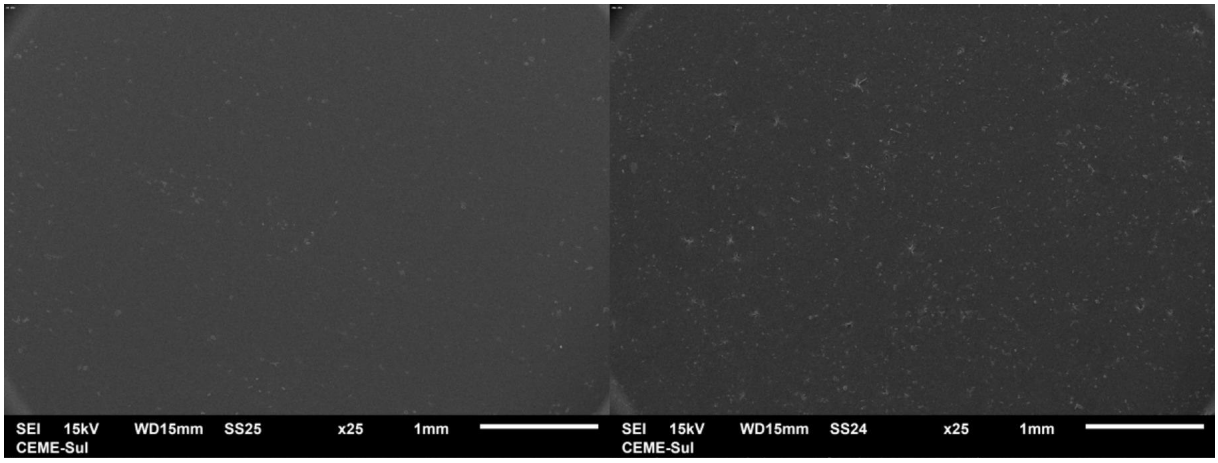
Já o PP apresenta um coeficiente de atrito inicial menor, indicando maior homogeneidade na superfície da amostra. Entretanto, observam-se acréscimos graduais e contínuos ao longo do tempo, alcançando cerca de 0,42 ao final do ensaio. Esse comportamento pode ser explicado pelo acúmulo de material desgastado na amostra, formando detritos que afetam negativamente o atrito, ou por processos de fadiga e alterações nas propriedades do material ao longo do teste.

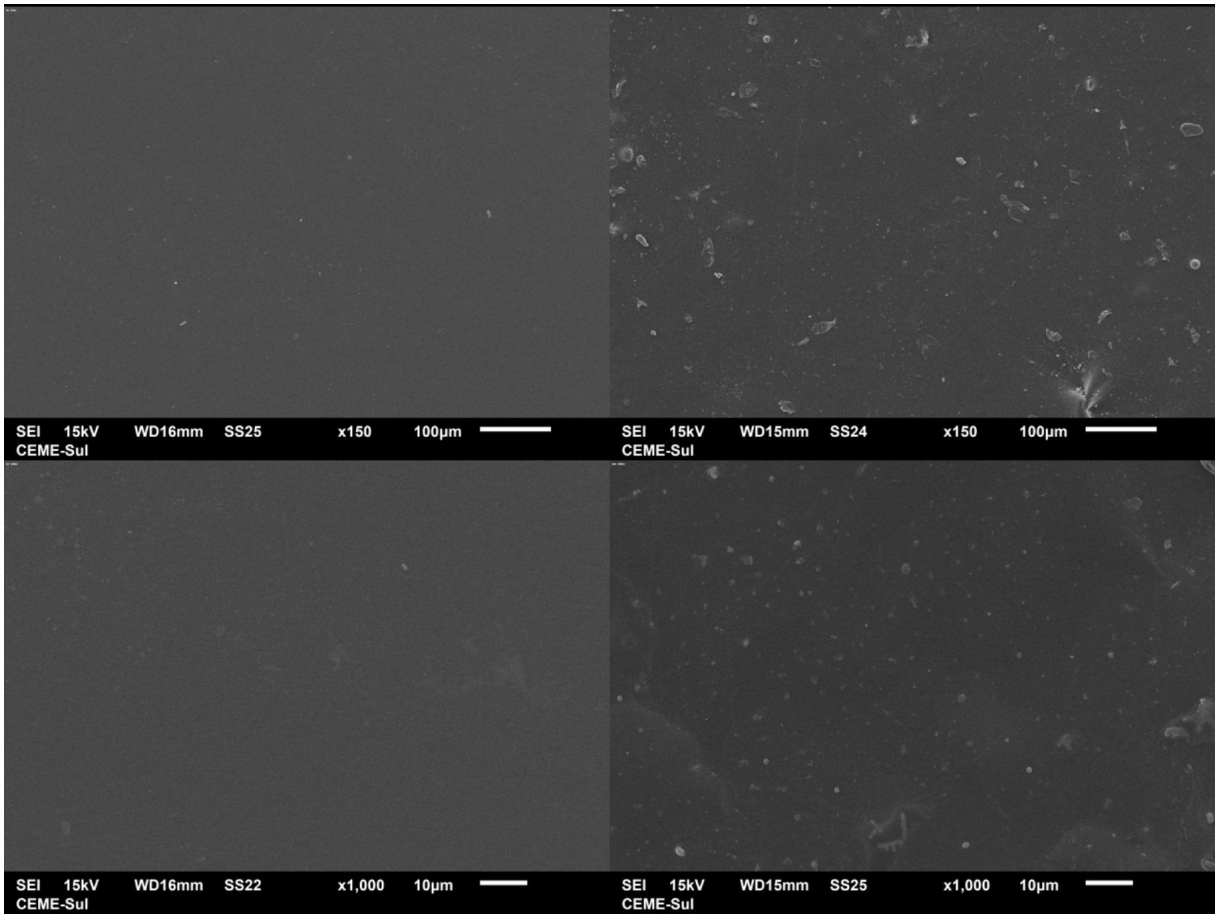
Assim, infere-se que o PRM apresenta melhor desempenho frente ao atrito ao longo do tempo, apesar de exibir um período inicial de acomodação, durante o qual o atrito é maior. Esse padrão de desempenho tribológico está de acordo com os achados de Yamashita (2018), que relatou comportamento estável em materiais alternativos, mesmo com maior desgaste inicial

5.4 Análise microestrutural e elementar do compósito poliuretano com rejeito: resultados de MEV e EDS

A Figura 11 compara as amostras PP e PRM em três ampliações distintas: 25X, 150X e 1000X, obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Da mesma forma que observado por Microscopia Óptica, o PP apresenta uma estrutura mais homogênea em todas as ampliações, sem observarmos inclusões ou falhas maiores, diferente das imagens do PRM, em que a adição de rejeitos magnéticos gerou heterogeneidade na amostra. Embora as partículas serem visíveis em todas as ampliações, elas parecem bem distribuídas na amostra, sem formarem grandes pontos de acúmulo de rejeito.

Figura 11 - Comparação das amostras PP e PRM utilizando MEV em áreas que não foram expostas aos ensaios de desgaste

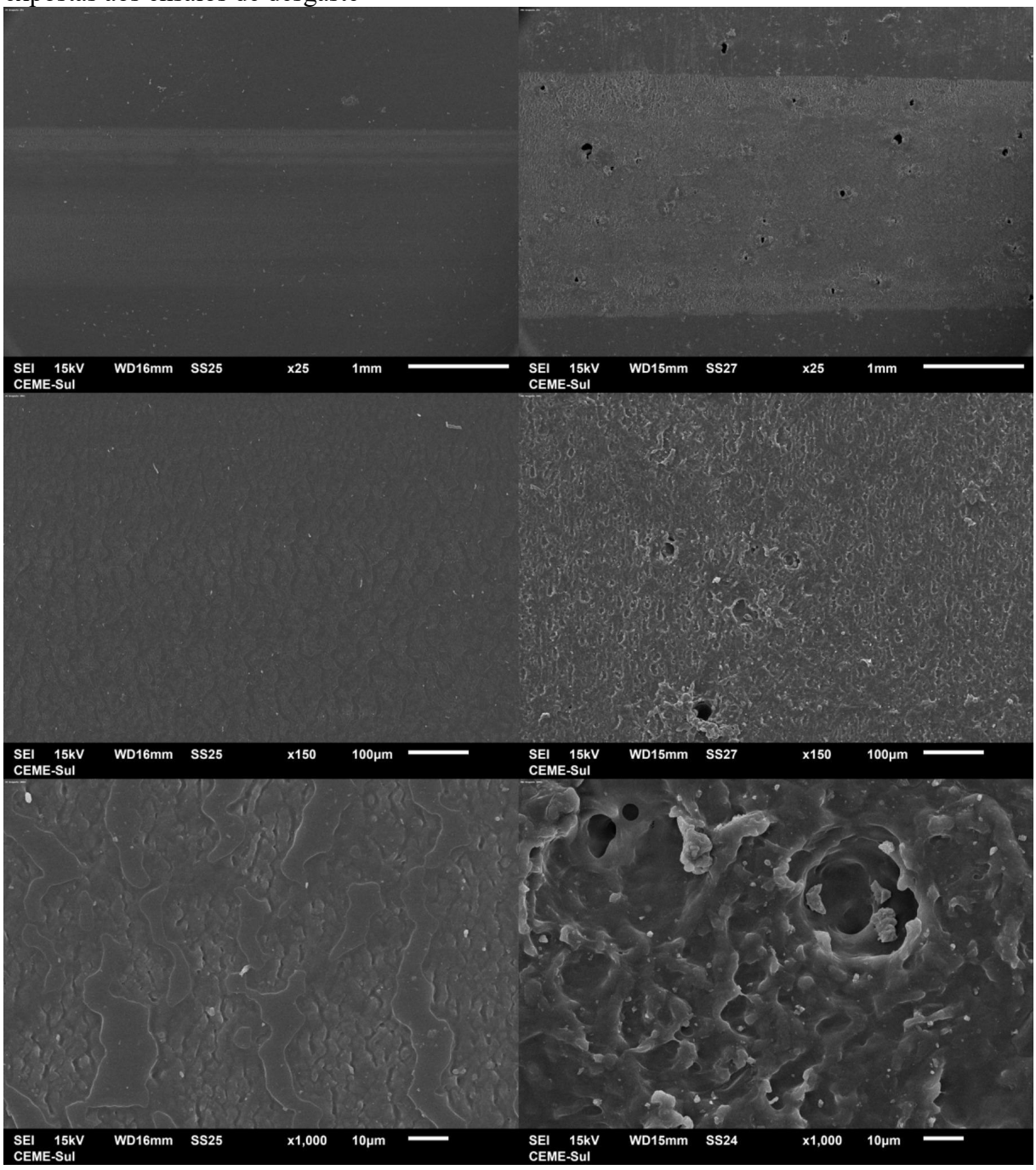




Nota: PP = Poliuretano Puro à esquerda / PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos à direita / MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura / µg = microgramas / X = número de ampliações
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Infere-se que a presença de rejeitos magnéticos influenciou as propriedades mecânicas da amostra, promovendo um aumento na rigidez e dureza, mas também ocasionando descontinuidades estruturais na interface entre os rejeitos e a matriz polimérica, devido à baixa adesão interfacial. Além disso, a incorporação dessas partículas resultou em uma superfície mais rugosa na amostra PRM, o que contribuiu para alterar seu comportamento tribológico, intensificando os mecanismos de desgaste durante os ensaios, como apresentado pela Figura 12, que compara as amostras PP e PRM após realizado testes de desgaste com o tribômetro.

Figura 12 - Comparação das amostras PP e PRM utilizando MEV em áreas que foram expostas aos ensaios de desgaste



Nota: PP = Poliuretano Puro à esquerda / PRM = Poliuretano adicionado a Rejeitos Magnéticos à direita / MEV = Microscopia Eletrônica de Varredura / µg = microgramas / X = número de ampliações
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se, na ampliação de 25x, que a trilha de desgaste gerada pelo tribômetro ao remover o material superficial das amostras foi mais estreita e uniforme no PP que quando comparada à trilha do PRM. Este resultado está de acordo com os encontrados anteriormente,

que demonstram que a amostra PRM apresentou maior perda de massa acumulada e profundidade média de desgaste quando comparada ao poliuretano puro.

Ademais, a amostra PRM apresenta maior rugosidade que o PP em todas as ampliações. Apresenta também pontos pretos que correspondem a bolhas de ar oriundas do processo de fabricação. A heterogeneidade da amostra PRM se torna mais evidente quanto maior a ampliação utilizada, observando-se que, a 1000x, o PRM sofreu maiores danos com o desgaste em comparação ao PP, tendo em vista a delimitação de grandes áreas, o que pode estar relacionado à má adesão do rejeito ao polímero. Gungor (2007) também observou partículas de ferro mal aderidas e depressões em compósitos poliméricos com pó metálico, reforçando a interpretação de que falhas na interface polímero-rejeito contribuem para a degradação da estrutura.

A presença de bolhas de ar no PRM também foi evidenciada por Gonçalves (2010), ao estudar compósitos com alto teor de caulim. Souza (2013) relatou morfologia típica de componentes imiscíveis em compósitos com rejeitos minerais, o que também é observado neste trabalho, especialmente na clara distinção entre matriz e partículas na amostra PRM. Coura (2018), por sua vez, apontou que o método de processamento influencia diretamente na dispersão do rejeito: misturadores em batelada promovem melhor homogeneização do que a extrusão. Tais achados sustentam que o processo de moldagem utilizado pode ter impactado na distribuição das partículas e, consequentemente, nas regiões de delaminação identificadas neste estudo.

A análise com o EDS mostrou diferenças importantes na composição elementar das amostras em áreas que não foram expostas ao desgaste quando comparadas a áreas desgastadas para ambos os corpos de prova: PP e PRM. Os dados gerados pelo EDS foram compilados na Tabela 6, expressos em porcentagem em peso (Weight %), sendo possível melhor visualização dos achados.

Tabela 6 – Análise elementar em porcentagem em peso (Weight %)

Elemento	PP[1]	PP[2]	PRM[1]	PRM[2]
C	29.88-33.04	33.73-34.19	29.80-32.37	27.13-27.68
N	5.12	-	4.79-5.13	4.44-4.53
O	17.40-18.85	18.93-19.26	18.62-19.59	17.87-18.35
Na	-	0.18-0.19	0.32-0.39	0.27-0.40
Al	-	-	-	0.06-0.17
Si	-	-	-	1.11-1.18

Cl	3.37-3.68	3.49-3.53	3.46-3.89	3.04-3.40
K	-	0.18	0.32-0.59	0.19-0.36
Ca	-	-	-	0.19-0.62
Fe	-	-	-	0.73
Au	42.78-46.05	42.98-43.52	40.83-44.37	43.71-44.54

Nota: PP¹ refere-se ao Poliuretano Puro em áreas fora do desgaste; PP² refere-se ao Poliuretano Puro em áreas de desgaste; PRM¹ refere-se ao Poliuretano com Rejeito Magnético em áreas fora do desgaste; PRM² refere-se ao Poliuretano com Rejeito Magnético em áreas de desgaste.
Fonte: Dados gerados pelo Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (MEV-EDS). Compilados em tabela pelo autor (2025).

A composição elementar verificada por percentual de peso em área não desgastada na amostra PP foi: Carbono (C), que variou entre 29,88% e 33,04% de peso, o que reafirma a predominância do polímero; 5,12% de Nitrogênio (N); entre 17% e 18% de Oxigênio (O); 3,5% de Cloro (Cl), podendo corresponder a contaminantes na amostra, tendo em vista que não é compatível com a estrutura química do poliuretano; e Ouro (Au), com 42,78% a 46,05%, correspondendo unicamente ao revestimento aplicado na amostra. Conforme Carneiro (2020), a predominância de C e O está relacionada à maior fração polimérica — resultado também identificado neste estudo.

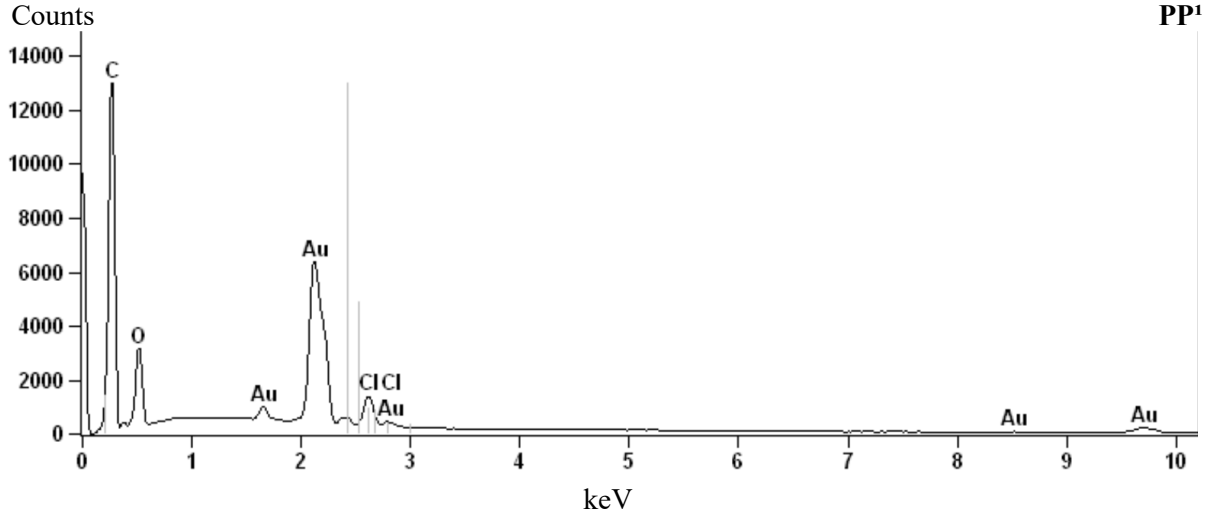
Em contrapartida, ao avaliarmos a amostra PP em área exposta ao desgaste observamos um ligeiro aumento na quantidade de Carbono (33,73% a 34,19%), podendo ser justificado pela remoção do material mais volátil na amostra. O mesmo acontece com o Oxigênio (18,93% a 19,26%), sugerindo oxidação da superfície devido ao atrito contínuo. O Nitrogênio, antes presente, não foi detectado na área desgastada. O Cloro e Ouro se mantiveram similares: 3,49% a 3,53% e 42,98% a 43,52%, respectivamente. Observou-se uma quantidade ínfima de Sódio (Na) e Potássio (K) na área desgastada, 0,18% para ambos, sugerindo contaminação do material durante o ensaio ou a incorporação de partículas após o ensaio de desgaste.

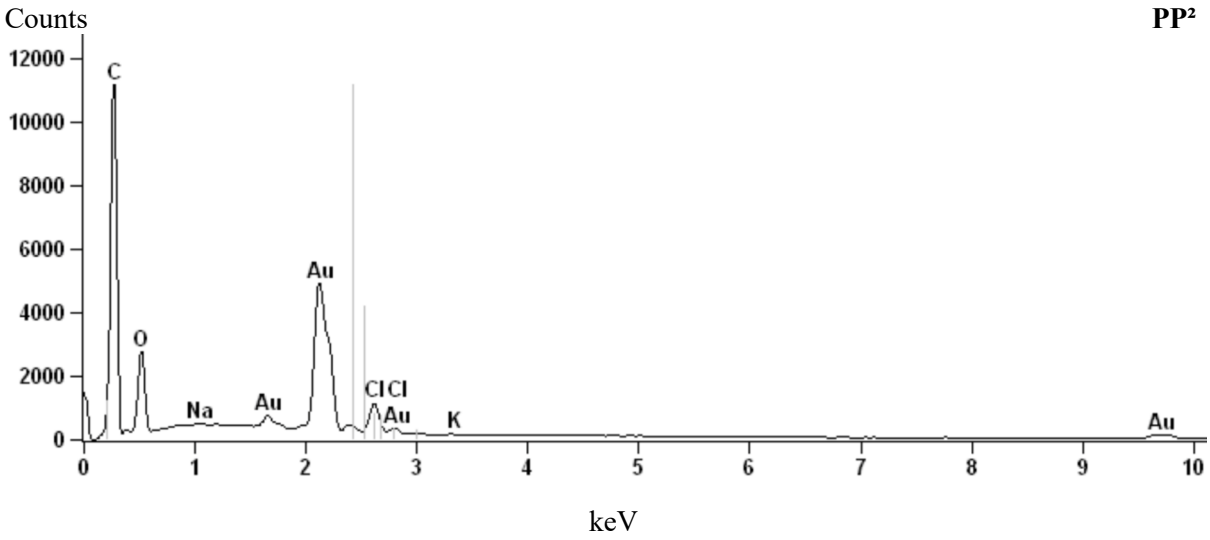
A composição elementar verificada por percentual de peso em área não desgastada na amostra PRM foi semelhante à PP, com Carbono (29,80% a 32,37%), Nitrogênio (4,79% a 5,13%), Oxigênio (18,62% e 19,59%), Cloro (3,5%) e Ouro (40,83% a 44,37%) como elementos principais, contudo, apresentando também o Sódio (0,32% a 0,39%) e Potássio (0,32% e 0,61%), característicos de minerais magnéticos, reforçando que o rejeito magnético foi efetivamente incorporado na matriz de poliuretano. Vale destacar que o Oxigênio se apresentou superior ao observado no PP, estando entre 18,62% e 19,59%, o que pode ser justificado pela presença de bolhas de ar na amostra, como visualizado no MEV.

Da mesma forma, ao avaliarmos a amostra PRM em área exposta ao desgaste observamos uma ligeira redução de Carbono (27,13% a 27,68%), Nitrogênio (4,44% a 4,53%) e Oxigênio (17,87% a 18,35%), indicando remoção da camada superficial polimérica. O Sódio (0,27% a 0,40%), Cloro (3,04% a 3,40%), Potássio (0,19% a 0,36%) e Ouro (43,71% a 44,54%) mantiveram valores próximos dos observados na área não desgastada. Houve o surgimento de novos elementos ao observarmos a área desgastada do PRM: Alumínio (0,06% a 0,17%), Silício (1,11% a 1,18%), Cálcio (0,19% a 0,62%) e Ferro (0,73%), elementos associados aos rejeitos magnéticos, expostos após realizado a abrasão superficial da amostra. Esses elementos também foram reportados por Coura (2018) e Carneiro (2020) como características típicas de compósitos com rejeitos minerais. A presença destas partículas reforça a teoria de que elas contribuíram para a abrasão superficial da amostra.

As Figuras 13 e 14 foram geradas pelo EDS durante a análise das amostras PP e PRM, respectivamente. Observa-se a energia dos raios X emitidos no Eixo X, em quiloelétron-volt (keV), pela quantidade de fótons detectados pelo equipamento no Eixo Y (Counts). A Figura 9 representa a quantidade de cada elemento presente na amostra PP, sendo possível observar a inclusão de Sódio e Potássio na área de desgaste. A Figura 14 mostra o surgimento de Alumínio, Silício, Cálcio e Ferro na área desgastada para a amostra PRM.

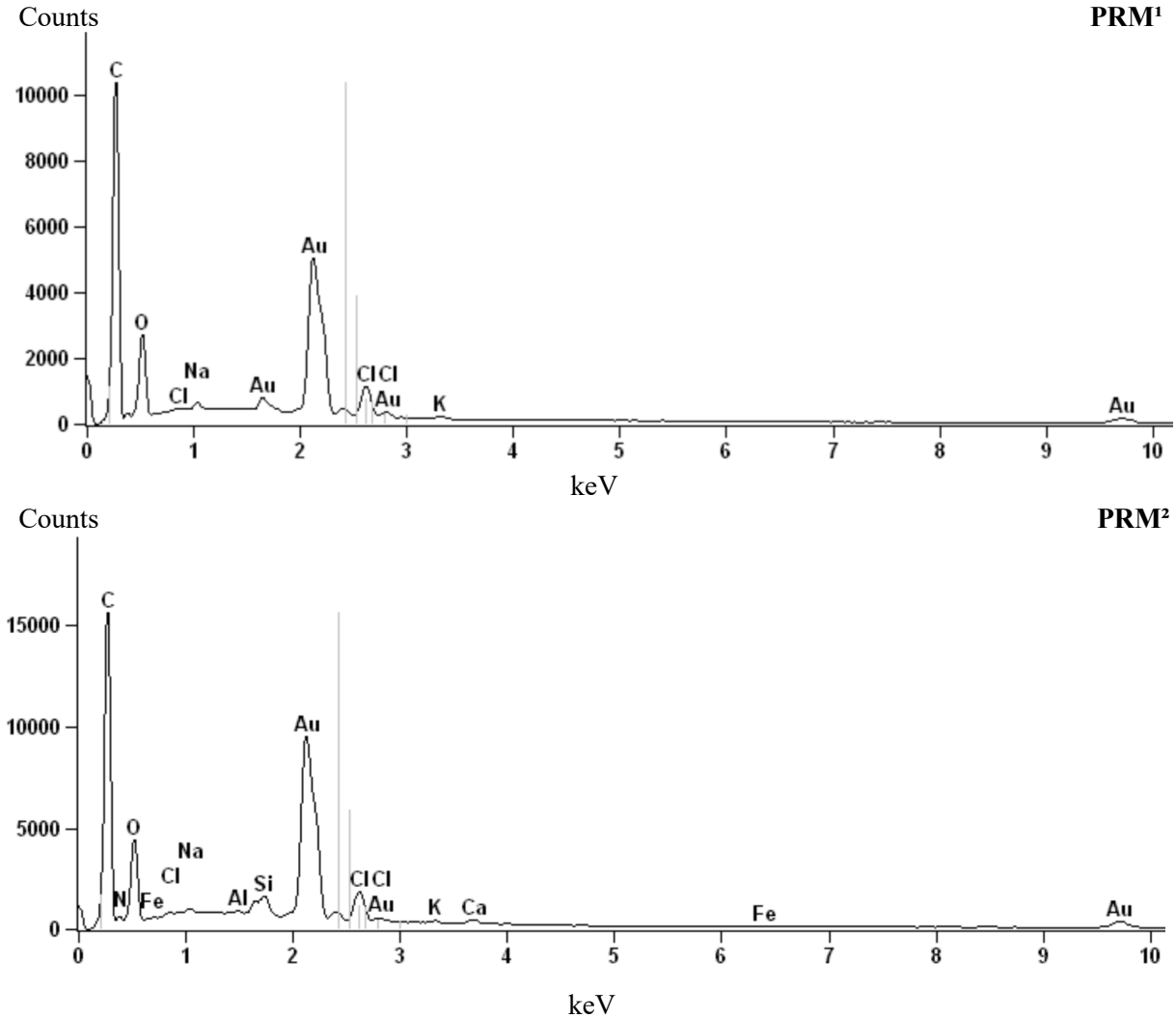
Figura 13 - Representação gráfica da análise elementar realizada por EDS nas amostras de Poliuretano Puro





Nota: PP¹ refere-se ao Poliuretano Puro em áreas fora do desgaste; PP² refere-se ao Poliuretano Puro em áreas de desgaste; EDS = Espectroscopia de Dispersão de Energia / keV = quiloelétron-volt
Fonte: Gerado pelo equipamento. Elaborado pelo autor (2025).

Figura 14 - Representação gráfica da análise elementar realizada por EDS nas amostras de Poliuretano com Rejeito Magnético



Nota: PRM¹ refere-se ao Poliuretano com Rejeito Magnético em áreas fora do desgaste; PRM² refere-se ao Poliuretano com Rejeito Magnético em áreas de desgaste; EDS = Espectroscopia de Dispersão de Energia / keV = quiloelétron-volt
Fonte: Gerado pelo equipamento. Elaborado pelo autor (2025).

No PRM, a detecção de Al, Si, Ca e Fe após o desgaste sugere que as partículas foram expostas ou deslocadas, intensificando o desgaste por abrasão. Tal comportamento foi discutido por Teldjoun et al. (2024), que observaram delaminações e formação de chips em compósitos poliméricos com minerais, resultado igualmente visível nas regiões desgastadas da amostra PRM neste estudo.

6. CONCLUSÃO

A adição de rejeitos magnéticos ao poliuretano promoveu um aumento discreto, mas consistente, na dureza Shore A, que passou de 92,9 (PP) para 94,8 (PRM), representando um ganho médio de 2,04%. Esse reforço, entretanto, não se traduziu em melhor desempenho tribológico. Os ensaios de desgaste evidenciaram que o PRM sofreu perda de massa acumulada de 66,2 mg (2,02%), muito superior à do PP, que foi de apenas 2,9 mg (0,10%). Da mesma forma, a profundidade média de desgaste atingiu 0,99 mm no PRM, contra 0,71 mm no PP, confirmando a menor resistência ao desgaste do compósito com rejeito.

O coeficiente médio de atrito do PRM (0,38) foi inferior ao do PP (0,42), comportamento atribuído ao efeito de micro-rolamento das partículas de rejeito. Contudo, a análise microestrutural por MO e MEV revelou fraca adesão interfacial entre matriz e partículas, com regiões de baixa densidade e presença de bolhas de ar, o que favoreceu o desprendimento dos rejeitos durante o ensaio. O EDS confirmou a exposição de elementos como Al, Si, Ca e Fe após o desgaste do PRM, reforçando a tese de que as partículas podem ter atuado como terceiro corpo abrasivo, intensificando a remoção de material.

Portanto, conclui-se que a incorporação de rejeitos magnéticos ao poliuretano, embora aumente a dureza e reduza o atrito, compromete a resistência ao desgaste em razão da baixa adesão partícula-matriz e da heterogeneidade estrutural. A busca pelo equilíbrio entre dureza, resistência ao desgaste, viabilidade econômica e sustentabilidade fomentou a realização do presente estudo, que cumpriu com seus objetivos. Apesar dos desafios observados, esta pesquisa contribui para o avanço na utilização sustentável de resíduos de mineração, promovendo o desenvolvimento de novos materiais compósitos com potencial para aplicações industriais.

7. TRABALHOS FUTUROS

Algumas direções de pesquisa são sugeridas para dar continuidade à investigação do potencial de aproveitamento de rejeitos minerais em materiais compósitos. Uma primeira linha de desenvolvimento refere-se ao aprimoramento do processo de incorporação dos rejeitos. Estudos futuros podem avaliar técnicas de modificação superficial das partículas, como tratamentos químicos, com o objetivo de melhorar a adesão entre matriz e reforço, reduzindo a formação de regiões heterogêneas que atuam como pontos de fragilidade.

Outro aspecto relevante diz respeito à granulometria e morfologia das partículas de rejeito. Investigações adicionais podem explorar a influência de diferentes faixas granulométricas no desempenho mecânico e tribológico dos compósitos. Essa abordagem permitirá compreender em maior profundidade a relação entre tamanho de partícula, dispersão e propriedades finais do material.

Também se mostra promissora a avaliação de diferentes matrizes poliméricas, como outros elastômeros, resinas termorrígidas ou misturas poliméricas, que possam interagir de forma mais eficiente com os rejeitos. A combinação de poliuretano com outros aditivos, fibras ou cargas minerais pode abrir novas possibilidades de aplicação industrial, conciliando desempenho técnico e sustentabilidade.

Do ponto de vista da caracterização, recomenda-se a realização de ensaios complementares, como testes de erosão, fadiga superficial, abrasão por partículas soltas e análises em ambientes corrosivos. Além disso, o uso de técnicas avançadas, como análise por microtomografia computadorizada, espectroscopia Raman e nanoindentação, poderá fornecer informações adicionais sobre a microestrutura e a interação partícula-matriz.

Por fim, estudos futuros podem incluir a avaliações de viabilidade econômica, de forma a quantificar os benefícios ambientais da utilização de rejeitos em compósitos e comparar os custos de produção com materiais convencionais. Essa análise permitirá estabelecer a real competitividade dos compósitos desenvolvidos, auxiliando na transição para uma mineração mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular.

Em síntese, os trabalhos futuros deverão buscar a integração entre avanços técnicos e critérios de sustentabilidade, de modo a ampliar as possibilidades de utilização dos rejeitos magnéticos em aplicações industriais, ao mesmo tempo em que se reduz o impacto ambiental associado ao seu descarte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da ciência dos polímeros.** 1. ed. Barueri: Manole, 2007.

AKHTAR, K.; KHAN, S. A.; KHAN, S. B.; ASIRI, A. M. **Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization.** In: SHARMA, S. 1 Ed. Handbook of Materials Characterization. Cham: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-92955-2_4.

ANFIKO. **Microscopia óptica.** 2020. Disponível em: https://afinkopolimeros.com.br/ensaio-de-microscopia-optica/. Acesso em: 10 nov. 2023.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: www2.ifrn.edu.br. Acesso em: 8 mar. 2024.

ASTM. G40-15 - **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

ASTM. **Standard test method for Brinell hardness of materials.** ASTM E10. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

ASTM. **Standard test methods for Rockwell hardness of metals.** ASTM E18. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

ASTM E384-16. **Standard test method for microindentation hardness of materials.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

ASTM E384-17. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM G65. **Standard Test Method for Measuring Abrasiveness of Material by the Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

BARRETO, T. M.; REPSOLD, L. L.; CASAGRANDE, M. D. T. Melhoramento de solos arenosos com polímeros. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA**, 19., 2018, Salvador. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362787882_ESTABILIZACAO_DE_UM_SOLO_ARENOSO_UTILIZANDO_UM_COPOLIMERO. Acesso em: 14 ago. 2024.

BASSAN, E. **Metrologia.** 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2022. ISBN: 978-85-212-1234-5.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology.** 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2013. ISBN 0-471-59407-5.

BORISOV, Y.; SVIRIDOV, A. I.; KORZHIK, V. **Thermal spraying of metal-polymeric composite coatings with any increased corrosion and wear resistance.** In: UNITED

THERMAL SPRAY CONFERENCE, 1998, Dusseldorf. Dusseldorf: [s.n.], 1998. Disponível em: https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc1999p0588. Acesso em: 05 fev. 2024.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CARMIGNANI, A. et al. **Environmental impact of the Fundão tailings dam failure** (Bento Rodrigues, Mariana, MG, Brazil). Rem: Revista Escola de Minas, v. 69, n. 2, p. 195-201, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/0370-44672015690040.

CARNEIRO, Andressa de Araujo. **Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno.** 2020. Disponível em: http://icts.unb.br/jspui/handle/10482/39772. Acesso em: 04 jun. 2024.

CLARK, H. M. **A comparison of the erosion rate of casing steels by sand-oil suspensions.** Wear, v. 151, p. 217-230, 1991. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0043-1648(91)90318-O. Acesso em: 7 abr. 2024.

COUTINHO, F.; DELPECH, M. C. **Poliuretanos como materiais de revestimento de superfície.** São Carlos, SP: Associação Brasileira de Polímeros, 1999. Disponível em: https://www.scielo.br/j/po/a/fd4VGJtbg3w98RS5VzQV7Zr/?lang=pt. Acesso em: 8 ago. 2024.

COURA, Ítalo Rocha. **Avaliação do processamento de compósitos baseados em polietileno de alta densidade e rejeito de mineração de ferro.** 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Desenvolvimento de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

DE VRIES, Paul F. D. E. F. J. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

DEDAVID, B. A.; ALVES, J. L.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparações de Amostras.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

FESTUGATO, L.; CONSOLI, N. C.; FOURIE, Andy. **Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings.** Geosynthetics International, v. 22, n. 2, p. 196-206, 2015. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Cyclic-shear-behaviour-of-fibre-reinforced-mine-Festugato-Consoli/41a2c1e602a3ff11d17990babc893ca438b32a03. Acesso em: 7 out. 2024.

FINNIE, Iain. **Some reflections on the past and future of erosion.** Wear, v. 186, p. 1-10, 1995. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043164895071881. Acesso em: 24 nov. 2024.

GEE, MGea et al. **Progress towards standardisation of ball cratering.** Wear, v. 255, n. 1-6, p. 1-13, 2003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164803000917. Acesso em: 12 jan. 2024.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; ECHLIN, P. et al. **Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis.** 3. ed. New York: Springer, 2003.

GONÇALVES, Elaine. **Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Reforçados com Caulim.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2010. Disponível em: https://femat.unifesspa.edu.br/images/TCCs/2010/ELAINE-GONALVES.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

GONÇALVES, José Roberto. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010. ISBN 85-88098-10-5.

GOMES, A. S.; CAMARGO, P. R. **Revestimento interno de tubulação por um processo de polimerização in situ.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: repositorio.unesp.br. Acesso em: 8 fev. 2024.

GUNGOR, Ali. **Mechanical properties of iron powder filled high density polyethylene composites.** Materials & Design, v. 28, n. 3, p. 1027-1030, 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306905003031. Acesso em: 23 dez. 2024.

GUIMARÃES, Nilton Caixeta; VALADÃO, George E. S.; PERES, Antônio E. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 65, p. 543-548, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rem/a/HkKz8QZPYsNskdwNCSBqFPQ/?format=html&lang=pt. Acesso em: 9 out. 2024.

HARRIS, C. K. et al. **Determination of wear in a tribo-system.** In: ASEE GULF-SOUTHWESTERN ANNUAL CONFERENCE, 2002. Industrial Technology Department, College of Engineering. Lafayette: The University of Louisiana at Lafayette, 2002. Disponível em: https://peer.asee.org/determination-of-wear-in-a-tribo-system.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

HILL, D. J. T. et al. **Laboratory wear testing of polyurethane elastomers.** Wear, v. 208, n. 1-2, p. 155-160, 1997. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004316489607514X. Acesso em: 10 set. 2024.

HOLMBERG, K.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; HÄRKISAARI, P.; JUNKALIN, J. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. Tribology International, v. 115, p. 116–139, 2017

HUANG, Runzhou et al. **High density polyethylene composites reinforced with hybrid inorganic fillers: morphology, mechanical and thermal expansion performance.** Materials, v. 6, n. 9, p. 4122-4138, 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/260972518_High_Density_Polyethylene_Composites_Reinforced_with_Hybrid_Inorganic_Fillers_Morphology_Mechanical_and_Thermal_Expansion_Performance. Acesso em: 09 dez. 2024.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (Brasil); MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **A extensão da cadeia produtiva da economia mineral no PIB brasileiro.** Brasília: IPEA; MME, 2023. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/14835-ipea-e-mme-lancam-estudo-sobre-a-extensao-da-cadeia-produtiva-da-mineracao-no-pib-brasileiro. Acesso em: 26 ago. 2025.

JOST, H. P. **Lubrication (tribology) education and research: a report on the present position and industry's needs.** London: Department of Education and Science, H.M. Stationery Office, Universidade Cornell, 1960.

LAL, S. W.; VERMA, P.; KALRA, M. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 9. ed. New York: Wiley, 2014.

LIKHACHEV, Alexander A. **Magnetomechanical effects in the elastic polymer composites containing different volume fraction of ferromagnetic powder particles.** Kiev: Institute for Metal Physics, National Academy of Sciences, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329635532_Magnetomechanical_Effects_in_the_Elastic_Polymer_Composites_Containing_Ferromagnetic_Powder_Particles. Acesso em: 9 fev. 2024.

MAGALHÃES, Luciano da Rocha et al. **Contribuição ao estudo da Erosão-corrosão de um aço de baixo carbono na presença de água contendo 3,5% de sal, areia e inibidor de corrosão.** 2018. Disponível em: http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21213. Acesso em: 10 out. 2023.

MAGNO, V. M. **Análise da interação matriz/carga em compósitos poliméricos reforçados com partículas minerais**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013. Disponível em: https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Dissertação-Magno-Versão-Final.pdf. Acesso em: 16 fev. 2025.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros.** 2ª ed. São Paulo: Blucher, 1999.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos: fundamentos e tecnologia.** São Paulo: Artliber Editora, 2011.

MEDEIROS, João & Silva, Laís & Ricardo de Souza, Juliana & Ferreira, Mayara & Silva, Ruthilene. (2008). AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE POLIURETANO SUBMETIDO A ENSAIOS DE DESLIZAMENTO. V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. 2008 - Salvador – Bahia – Brazil.

MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. A. **A história das barragens no Brasil.** Rio de Janeiro: COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011.

MILANEZ, B.; LOSEKANN, C.; SANTOS, R. S. P. **Desastre no Vale do Rio Doce.** Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015. Disponível em: https://www.ufes.br/sites/default/files/anexo/desastre-no-vale-do-rio-doce.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

NASCIMENTO, S. M. O.; PEREIRA, Y. S.; SANTOS, A. M. M.; LAMEIRAS, F. S. **Desenvolvimento de compósitos geopoliméricos com aproveitamento de rejeito de mineração de ferro.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 58., 2018, Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Química, 2018. Disponível em: https://www.abq.org.br/cbq/2018/trabalhos/5/1742-26818.html. Acesso em: 9 mar. 2024.

OERTEL, G. **Polyurethane Handbook: Chemistry, Raw Materials, Processing, Application, Properties.** 2. ed. Munich: Hanser Publishers, 1993. ISBN 3446171983.

OLIVEIRA, Maria. Desafios e desvantagens do uso de poliuretano na indústria mineradora. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO**, 10., 2022, Belo Horizonte. SBM, 2022. p. 123-130.

ONITIRI, M. A.; AKINLABI, E. T. **Effects of particle size and particle loading on the tensile properties of iron-ore-tailing-filled epoxy and polypropylene composites.** Mechanics of Composite Materials, v. 52, p. 817-827, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363157267_EFFECTS_OF_PARTICLE_SIZE_AND_PARTICLE_LOADING_ON_THE_TENSILE_PROPERTIES_OF_IRON-ORE-TAILING-FILLED_EPOXY_AND_POLYPROPYLENE_COMPOSITES. Acesso em: 9 nov. 2024.

PINTAUDE, G. **Revisão sobre terminologia em falhas por desgaste.** In: BARRA, S. R.; PINTAUDE, G. (Org.). Materiais metálicos: Composição, fabricação, propriedades e desempenho. Rede PDIMat/UFRN, 2022. p. 130-141.

PYLES, Sérgio Rodrigues. **Revestimento interno de tubulação por um processo de centrifugação utilizando resina éster-vinílica com adição de cargas.** 2012. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/items/e58f2a86-5abc-432a-918c-1fc69d04f6d4. Acesso em: 10 ago. 2024.

QUEIROZ, F. M.; COSTA, I. **Electrochemical, chemical and morphological characterization of galvannealed steel coating.** Surface and Coatings Technology, v. 201, n. 16-17, p. 7024-7035, 2007. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025789720700014X. Acesso em: 13 dez. 2024.

QUEIROZ, H. M. et al. **Iron ore mining waste contamination of soil and water in the Mariana region, Brazil: impact of the Fundão dam collapse.** Environmental Pollution, v. 236, p. 163-170, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.042

REVEST-BOR. **Revestimento de poliuretano em tubos.** Disponível em: https://www.revestbor.com.br/revestimento-poliuretano-tubos. Acesso em: 10 nov. 2023.

ROBERGE, P. R. **Corrosion engineering: principles and practice.** 1. ed. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2008.

ROSA, E. da. **Fadiga.** 1ª ed. Porto Alegre: Editora Sagra, 2000.

RTEC INSTRUMENTS. Universal Tribometer – MFT-5000. Disponível em: https://rtec-instruments.com/tribometer/universal-tribometer/. 2025.

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. Disponível em: https://asmedigitalcollection.asme.org/testingevaluation/article-abstract/25/2/250/1188780/Theory-and-Application-of-a-Micro-Scale-Abrasive?redirectedFrom=fulltext. Acesso em: 2 jan. 2025.

SANTOS, P. A.; VIEIRA, L. M.; SILVA, L. G. **Efeito da incorporação de materiais reciclados nas propriedades do polipropileno.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 23, n. 3, p. 328-335, 2013. Disponível em: https://www.revistapolimeros.org.br/doi/10.4322/polimeros.2013.083. Acesso em: 01 fev. 2025.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Artliber Editora, 2007. Disponível em: https://www.artliber.com.br/amostra/aspectos_tribologicos.pdf. Acesso em: 8 out. 2024.

SANTOS, R. C. V. **Contribuição do setor mineral no Produto Interno Brasileiro.** Radar: tecnologia, produção e comércio exterior, Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, n. 65, p. 15-23, abr. 2021. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstreams/836f67e3-3ca4-4103-8dca-46eab984386b/download. Acesso em: 26 ago. 2025.

SARE, I. R.; MARDEL, J. I.; HILL, A. J. **Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries**—an overview. Wear, v. 250, n. 1-12, p. 1-10, 2001. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164801006226. Acesso em: 9 mar. 2024.

SERBINO, Edison Marcelo. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar.** 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-12052005-093850/en.php. Acesso em: 09 out. 2024.

SILVA, Eduardo da. **Caracterização mecânica de compósitos poliméricos com adição de partículas metálicas.** 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: https://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Eduardo%20da%20Silva%20Leitao_M.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

SILVA, Lays Capingote Serafim et al. **Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração.** Anais do IX SIMPROD, 2017. Disponível em: https://ri.ufs.br/handle/riufs/7697. Acesso em: 30 ago. 2024.

SILVA, Vinícius Augusto da; COSTA, Adilson Rodrigues da. **Desgaste de poliuretano por erosão úmida: desenvolvimento de um ensaio tecnológico.** 2018. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – DEMET, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. Disponível em: https://tecnologiammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.1265/pdf/tmm-15-2-144.pdf. Acesso em: 09 out. 2024.

SILVA, Fernando Brandão Rodrigues da; ARAÚJO, Fernando Gabriel Silva; VON KRÜGER, Fernando Leopoldo; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; BATISTA, Ronaldo Junio Campos; MANHABOSCO, Taíse Matte. **Characterization of magnetic tailings from phosphate-ore processing in Alto Paranaíba.** Materials Research, São Carlos, v. 25, p. 1-6, 2022. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/17260. Acesso em: 12 maio 2025.

SOUSA, A. C. União de peças metálicas por colagem – Parte 1: Fundamentos. **Revista Corte & Conformação de Metais**, São Paulo, v. 13, n. 159, 2023. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/ccm/artigo_tecnico/159-Uniao-de-pecas-metalicas-por-colagem-–-Parte-1%3A-Fundamentos.html. Acesso em: 16 fev. 2025.

SOUUZA, Ricardo Dias de. ***Structural assessment of pipelines with real corrosion defects.*** 2003. Dissertação (D.Sc.) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.

SOUZA, R. E. D. **Utilização de resíduo de mineração para obtenção de madeira plástica.** 2013. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT). Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFOP_0911b29827d5569322de3d98b777febd. Acesso em: 8 nov. 2024.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering tribology.** 3. ed. Oxford: Elsevier, 2013.

STEVENS, M. P. **Polymer Chemistry: an introduction. 3**° Ed. New York: Oxford University Press, 1999.

TELDJOUN, Mohamed; MENDAS, Mohammed; MZALI, Slah; BOUIADJRA, Belabbes Bachir. **Reciprocating sliding wear behavior of talc-filled polypropylene: Effect of talc proportion.** Tribology International, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110074. Acesso em: 4 abr. 2024.

TENNESSINE. Tribômetro Rtec MFT-5000. 2023. Disponível em: https://tennessine.com.br/tribometro-rtec-mft-5000?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 2 fev. 2024.

THERMOFISHER SCIENTIFIC. **Energy-dispersive X-ray spectroscopy.** Disponível em: https://www.thermofisher.com/br/en/home/materials-science/eds-technology.html. Acesso em: 10 nov. 2023.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 **Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda. Acesso em: 26 ago. 2025.

YAMASHITA, Roberta Cristine. **Comparative study of test specimen on a reichert test tribometer.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5189. Acesso em: 04 fev. 2025.

ZUM-GAHR, K-H. **Microstructure and Wear of Materials.** Volume 10. Tribology series. Elsevier, 1987.