



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



KEVIN WILLER DO ROSÁRIO MACHADO

**AVALIAÇÃO DO CUSTO DO DESGASTE EM BRITADOR, MOINHO,
PENEIRA E CHUTE NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO**

**OURO PRETO - MG
2024**

KEVIN WILLER DO ROSÁRIO MACHADO

Kevin.machado@aluno.ufop.edu.br

**AVALIAÇÃO DO CUSTO DO DESGASTE EM BRITADOR, MOINHO,
PENEIRA E CHUTE NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO**

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

Professor orientador: Edson Alves Figueira, Dr.

Professor coorientador: Vinícius Carvalho Teles, Dr.

**OURO PRETO – MG
2024**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M149a Machado, Kevin Willer do Rosario.

Avaliação do custo do desgaste em britador, moinho, peneira e chute na indústria da mineração. [manuscrito] / Kevin Willer do Rosario Machado. - 2024.

72 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves Figueira.

Coorientador: Prof. Dr. Vinicius Carvalho Teles.

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

1. Desgaste mecânico. 2. Minas e recursos minerais - Equipamentos. 3. Custo industrial - Custo de manutenção. I. Figueira, Edson Alves. II. Teles, Vinicius Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Kevin Willer do Rosário Machado

Avaliação do Custo do Desgaste em Britador, Moinho, Peneira e Chute na Indústria da Mineração

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

Aprovada em 24 de Setembro de 2024.

Membros da banca

DSc - Edson Alves Figueira Júnior - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Vinícius Carvalho Teles - Co-Orientador - Universidade Federal de Goiás
DSc - Igor Cezar Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Claudio Marcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Edson Alves Figueira Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/10/2024, às 08:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Marcio Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/10/2024, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Cezar Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2024, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0786658** e o código CRC **6778D4EC**.

Dedico essa conquista primeiramente a Deus e aos meus pais, Maria e Gilberto, por todo o apoio e força incondicional que minha família me ofereceu para realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Maria e Gilberto, meus maiores incentivadores e fonte diária de força. Aos meus irmãos, pelo constante orgulho demonstrado.

Aos meus orientadores, professores Edson e Vinicius, agradeço pelo constante estímulo e pela oportunidade de receber suas valiosas orientações ao longo deste trabalho, pela confiança em minha capacidade e pela paciência ao esclarecer minhas dúvidas, contribuindo de forma significativa para o meu crescimento acadêmico.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, pelas importantes contribuições ao aprimoramento da minha formação e ao meu desenvolvimento como Engenheira Mecânica.

À vida compartilhada em Ouro Preto, e aos meus amigos que fiz ao longo desses anos de graduação.

Em especial, à minha querida Nayane Campos, por suas motivações diárias e por reiterar, inúmeras vezes, o orgulho que sentia pelo meu caminho.

Com carinho e gratidão, aos meus amigos Wanderson, Raphael, Franco, Igor, Joyce, Tukoff, Maicon, Gabriel, Matheus e Welton, por estarem comigo ao longo dessa jornada e tornarem cada momento mais especial.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo”.

Martin Luther King

RESUMO

Este estudo avalia o impacto do desgaste em equipamentos utilizados na mineração, uma questão crítica devido ao elevado custo associado, como a troca de componentes, paradas corretivas e recuperação, o que afeta diretamente a eficiência e competitividade do setor. O objetivo foi analisar o custo de manutenção, entre 2010 e 2015, de quatro equipamentos comumente empregados na mineração: britadores, moinhos, peneiras e chutes de alimentação do transportador. Para isso, foram examinados os registros da empresa quanto aos gastos totais de manutenção e os custos relacionados ao desgaste por abrasão, corrosão, fadiga e impacto. Os resultados indicam que o desgaste pode representar de 68% a 92% do custo total de manutenção, sendo o moinho de bolas o equipamento mais crítico, responsável por 46% desse custo. Em seguida, vêm o britador e a peneira, com 22%, e por último, o chute. Nos quatro equipamentos, o desgaste abrasivo se mostrou o mais severo, com destaque também para o desgaste por impacto no britador, moinho e chute de transferência. O uso de materiais mais resistentes ao desgaste e a implementação de tecnologias de monitoramento contínuo mostraram-se soluções viáveis para mitigar esses impactos, prolongando a vida útil dos componentes e reduzindo os custos de substituição e manutenção. Este trabalho é de grande relevância para o setor de mineração, uma vez que fornece uma análise detalhada sobre os principais fatores de desgaste em equipamentos fundamentais para as operações. A redução dos custos associados ao desgaste não só aumenta a competitividade das empresas mineradoras, como também contribui para a sustentabilidade do setor. A implementação das conclusões deste estudo pode resultar em melhorias significativas na gestão da manutenção, diminuindo paradas não programadas e otimizando a utilização dos equipamentos.

Palavras-chave: Resistência ao desgaste, Equipamentos de mineração, Desgaste abrasivo, Custos de manutenção e Moinhos de bolas.

ABSTRACT

This study evaluates the impact of wear on equipment used in mining, a critical issue due to the high associated costs, such as component replacement, corrective stops, and recovery, which directly affect the efficiency and competitiveness of the industry. The objective was to analyze the maintenance costs, between 2010 and 2015, of four commonly used pieces of mining equipment: crushers, mills, screens, and conveyor feed chutes. To achieve this, the company's maintenance records were examined, focusing on total maintenance expenses and costs related to wear from abrasion, corrosion, fatigue, and impact. The results indicate that wear can account for 68% to 92% of the total maintenance cost, with ball mills being the most critical equipment, responsible for 46% of wear-related costs. Following this, crushers and screens account for 22%, with chutes being the least affected. In all four pieces of equipment, abrasive wear was the most severe, with impact wear also being significant in crushers, mills, and transfer chutes. The use of more wear-resistant materials and the implementation of continuous monitoring technologies have proven to be viable solutions to mitigate these impacts, extending the life of components and reducing replacement and maintenance costs. This work is of great relevance to the mining sector, as it provides a detailed analysis of the main wear factors in equipment that is fundamental to operations. Reducing costs associated with wear and tear not only increases the competitiveness of mining companies, but also contributes to the sustainability of the sector. The implementation of the conclusions of this study can result in significant improvements in maintenance management, reducing unscheduled downtime and optimizing equipment utilization.

Keywords: *Wear resistance, Mining equipment, Abrasive wear, Maintenance costs and Ball mills.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo médio global de energia de uma máquina de moagem elétrica na mineração.....	18
Figura 2: Representação esquemática dos elementos do tribosistema	21
Figura 3: Britador BARMAC 9100SE	26
Figura 4: Peneira vibratória horizontal.....	28
Figura 5: Chute de alimentação	30
Figura 6: Moinho de bolas.....	32
Figura 7: Fluxograma geral da monografia.	41
Figura 8: Média dos custos com cada equipamento	46
Figura 9: Custo de desgaste Britador Barmac	47
Figura 10: Média do custo de desgaste Britador Barmac	47
Figura 11: Desgaste por abrasão na carcaça principal.....	48
Figura 12: Desgaste por impacto em carcaça	49
Figura 13: Custo de desgaste moinho.....	49
Figura 14: Média do custo de desgaste moinho	50
Figura 15: Localização da trinca	51
Figura 16: Dentes da engrenagem do moinho quebrada	51
Figura 17: Troca das placas de revestimento do moinho	52
Figura 18: Custo por desgaste Peneira	53
Figura 19: Média do custo de desgaste moinho	53
Figura 20: Telas da peneira desgastadas.....	54
Figura 21: Viga de sustentação.....	55
Figura 22: Custo por desgaste no chute de alimentação.....	56
Figura 23: Média do custo de desgaste chute de transferência.....	56
Figura 24: Desgaste na chapa de desgaste do chute	57

Figura 25: Desgaste na estrutura do chute.....57

Figura 26: Gráfico de Pareto 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e Indicadores da pesquisa.....	42
Tabela 2: Custos anuais	44
Tabela 3: Custo de desgaste por ano e equipamento do processo produtivo.	46
Tabela 4: Custo do desgaste por equipamento	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Geral	16
1.3.2	Específicos.....	16
1.4	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Tribologia, Conceitos e Definições	18
2.2	Tipos De Desgaste	22
2.2.1	Desgaste por Abrasão	23
2.2.2	Desgaste por Impacto	24
2.2.3	Desgaste por Erosão	24
2.2.4	Desgaste por Corrosão.....	24
2.2.5	Desgaste por Fadiga	25
2.3	Equipamentos da Mineração	25
2.3.1	Britadores	25
2.3.1.1	Função dos Britadores	26
2.3.1.2	Tipos de Britadores.....	27
2.3.1.3	Tipos de Desgaste em Britadores	27
2.3.2	Peneiras vibratórias.....	28
2.3.2.1	Função das Peneiras	29
2.3.2.2	Tipos de Peneiras.....	29
2.3.2.3	Tipos de Desgaste em Peneiras	30
2.3.3	Chute de alimentação do transportador	30
2.3.3.1	Função dos Chutes de Alimentação	31
2.3.3.2	Tipos de Chutes de Alimentação	31
2.3.3.3	Tipos de Desgaste em Chutes de Alimentação.....	32
2.3.4	Moinhos.....	32
2.3.4.1	Função dos Moinhos.....	33
2.3.4.2	Tipos de Moinhos	33
2.3.4.3	Tipos de Desgaste em Moinhos.....	34
2.4	Manutenção preventiva.....	34

2.5	Manutenção corretiva	35
2.6	Manutenção preditiva	36
2.7	Análise de custos na indústria da mineração	36
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	Tipo de pesquisa	39
3.2	Materiais e Métodos	40
3.3	Análise dos custos	41
3.4	Variáveis e indicadores.....	42
3.5	Instrumento de coleta de dados	42
3.6	Tabulação dos dados.....	42
3.7	Considerações finais	43
4	RESULTADOS	44
4.1	Britador.....	47
4.2	Moinho	49
4.3	Peneira	53
4.4	Chute de alimentação do Transportador.....	55
4.5	Discussão final.....	58
5	CONCLUSÃO.....	63
5.1	Conclusão	63
5.2	Recomendação.....	64
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	65

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de equipamentos de empresas mineradoras é uma realidade inevitável devido ao ambiente extremamente severo em que operam (ANDRADE, 2012). Esses fatores têm um impacto direto na vida útil dos equipamentos e, conseqüentemente, nos custos de manutenção e substituição. A avaliação dos custos envolve não apenas a substituição de componentes e reparos emergenciais, mas também monitoramento contínuo do estado dos equipamentos, implementação de estratégias preventivas e corretivas para minimizar perdas e maximizar a eficiência operacional (MARTINEZ, 2020).

A mineração é um setor onde o atrito e o desgaste representam uma parcela considerável dos custos de manutenção. As reposições prematuras dos elementos envolvidos na cadeia produtiva de minério geram não apenas custos operacionais excessivos, mas também aumentam os danos ambientais decorrentes das atividades (RATIA, MIETTUNEN E KUOKKALA, 2013). Portanto, os desenvolvimentos nesta área mostram-se cada vez mais relevantes e benéficos à competitividade das grandes empresas do setor extrativo-mineral, especialmente quando considerados sob a ótica da quarta revolução industrial (HOLMBERG, 2017).

A mensuração precisa do custo do desgaste é fundamental para o planejamento estratégico das operações de mineração. Segundo Denny (2021), isso inclui a análise detalhada dos padrões de desgaste ao longo do tempo, a identificação das principais causas de deterioração dos equipamentos e a estimativa dos custos associados à manutenção preventiva e reparos emergenciais. Além disso, a avaliação considera o impacto do desgaste na disponibilidade dos equipamentos e na produtividade geral das operações, influenciando diretamente a competitividade da empresa no mercado global (SMITH *et al.*, 2019).

No contexto da indústria da mineração, a adoção de tecnologias avançadas de monitoramento de condições e análise de dados desempenha um papel cada vez mais significativo na avaliação do custo do desgaste. Sistemas de monitoramento remoto, sensores de desempenho e análise preditiva permitem uma gestão proativa dos ativos, antecipando problemas potenciais antes que ocorram falhas catastróficas. Essas abordagens não apenas reduzem os custos operacionais relacionados à manutenção, mas também melhoram a segurança no local de trabalho, minimizando o tempo de inatividade não planejado e aumentando a eficiência operacional global da mineração.

Ainda segundo Suzuki (2013), em setores minero-metalúrgico, onde o desgaste causa a parada ou a diminuição da produção ou envolve elevados custos de manutenção, não é suficiente adquirir conhecimentos apenas em materiais e processos metalúrgicos e/ou mecânicos de fabricação. É necessário atentar para o tribosistema, pois fenômenos como atrito e desgaste afetam o desempenho de equipamentos e componentes.

Os mecanismos de desgaste na mineração são variados e dependem das condições específicas de operação e dos materiais envolvidos (ZUM GAHR, 1987). Os principais mecanismos de desgaste que prevalecem na mineração incluem abrasão, impacto, corrosão, fadiga e erosão. Por exemplo, os chutes de transferência possuem duas regiões que desgastam de forma diferente: uma predominantemente desgastada pelo processo de abrasão e outra pelo processo de erosão/impacto (PENAGOS, 2016). A forma de minimizar a perda de massa, sendo por alterar a geometria ou seleção de material, nessas duas regiões é diferente. Outro exemplo é o desgaste dos revestimentos dos moinhos de bolas, que sofrem principalmente abrasão e impacto devido ao movimento das partículas e bolas no interior do moinho (SMITH, 2012). Além disso, os transportadores de correia podem experimentar desgaste por impacto e fadiga devido à carga cíclica e ao impacto repetido de materiais pesados (JOHNSON, 2010).

Entender os mecanismos de desgaste na mineração é crucial para a seleção de materiais adequados e o desenvolvimento de estratégias de manutenção eficientes. Cada mecanismo de desgaste apresenta desafios específicos que devem ser gerenciados para garantir a durabilidade e a eficiência dos equipamentos de mineração (WANG, HUANG & LIU, 2012).

Neste trabalho, pretende-se avaliar o custo do desgaste em alguns equipamentos tipicamente empregados na indústria de mineração. Eles foram selecionados por haver extensa literatura e informações, são eles: britadores, moinhos, peneiras e chute de alimentação do transportador. Os dados coletados visam analisar a relação entre o custo de desgaste, os mecanismos mais comuns e relacionar com o custo total de manutenção no período de 2010 a 2015.

Tendo em vista os custos elevados de manutenção e a importância em se compreender quais são os mecanismos de desgaste mais severos, o trabalho tem como objetivo responder a seguinte pergunta:

Qual o custo do desgaste com manutenção, paradas previstas ou não previstas para uma indústria mineradora?

1.2 Justificativa

Avaliar o custo do desgaste em equipamentos na indústria da mineração é fundamental para entender o impacto econômico do desgaste precoce de componentes e equipamentos. O desgaste excessivo desses elementos não apenas reduz seu desempenho, mas também aumenta significativamente os custos de manutenção para a empresa. A necessidade frequente de substituição de componentes desgastados implica em paradas não planejadas, o que consequentemente leva à perda de produtividade.

Este estudo propõe o desenvolvimento de um método para controlar o desempenho dos componentes de equipamentos em uma empresa de mineração. Esse método visa otimizar o desgaste desses componentes, adaptando-os às condições tribológicas enfrentadas durante sua operação. Ao minimizar o desgaste pretende-se reduzir os custos associados à manutenção não programada e melhorar a eficiência operacional.

Portanto, este estudo não apenas contribui para o conhecimento teórico sobre o impacto do desgaste na indústria da mineração, mas também busca fornecer uma ferramenta prática para gestores e engenheiros melhorarem a gestão de ativos e otimizarem os recursos da empresa. Por fim, incentivar a pesquisa e inovação para diminuir esses custos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Estimar o custo real do desgaste para os equipamentos moinho de bolas, britador, peneira e chute de transferência por meio do estudo das despesas com manutenção e paradas previstas ou não previstas.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre tribologia, tipos de desgaste e equipamentos da mineração;

- Desenvolver um método para avaliação do custo do desgaste;
- Estimar o custo total do desgaste;
- Identificar qual tipo de desgaste prevalece em cada equipamento;
- Avaliar qual tipo de desgaste é mais oneroso.

1.4 Estrutura do Trabalho

Para estruturar o trabalho conforme solicitado, serão delineados os capítulos 2 a 5, abordando revisão bibliográfica, metodologia e resultados:

A revisão bibliográfica aborda no capítulo dois, aspectos fundamentais para compreender os desafios enfrentados na indústria de mineração, com foco na tribologia e nos equipamentos utilizados. Inicialmente, são explorados conceitos e definições de tribologia, essenciais para entender os mecanismos de desgaste presentes nos equipamentos. Em seguida, são discutidos os diferentes tipos de desgaste, como abrasão, impacto, erosão, corrosão e fadiga, detalhando suas características e efeitos nos componentes industriais. Posteriormente, são apresentados os principais equipamentos da mineração, como britadores, peneiras vibratórias, moinhos e chutes de alimentação, destacando suas funções e importância no processo de extração mineral.

A metodologia adotada no capítulo três, é detalhada para proporcionar uma compreensão clara dos procedimentos empregados na pesquisa.

No capítulo quatro, os resultados são apresentados com base na análise sistemática dos estudos revisados na literatura. São destacados os principais achados relacionados aos diferentes tipos de desgaste que afetam os equipamentos na indústria de mineração, fornecendo uma visão abrangente das causas, dos mecanismos e das consequências desses desgastes.

No capítulo cinco têm-se as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tribologia, Conceitos e Definições

Segundo Hutchings (1992), a tribologia, campo de estudo do atrito, desgaste e lubrificação, é crucial para entender o desempenho dos equipamentos mecânicos na mineração. Conforme afirma Rabinowicz (1995), o desgaste é um dos principais fatores que limitam a vida útil dos componentes, influenciando diretamente os custos operacionais e a eficiência dos processos.

Armstrong (2015) complementa que a tribologia desempenha um papel crítico na otimização operacional dos equipamentos. A redução do atrito e do desgaste não só prolonga a vida útil dos componentes como também minimiza os custos de manutenção, maximizando a eficiência operacional. A análise detalhada dos processos de desgaste permite identificar pontos críticos que requerem intervenção preventiva ou corretiva, influenciando diretamente na rentabilidade e na competitividade das operações.

Em uma máquina de moagem elétrica de tamanho médio, apenas 10% da energia é usada para triturar os minerais e quase metade da energia é usada para superar o atrito, como mostrado na figura 1.

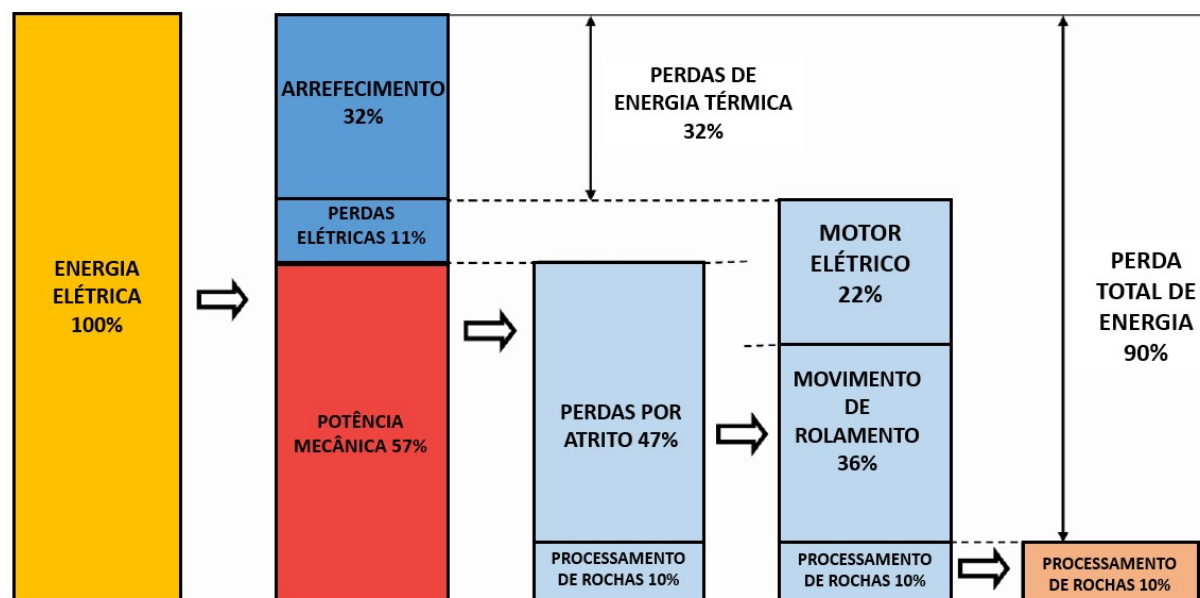


Figura 1: Consumo médio global de energia de uma máquina de moagem elétrica na mineração
 Fonte: Adaptado de HOLMBERG, K.; ERDEMIR (2017)

De acordo com Holmberg e Erdemir (2017), o gráfico mostra a magnitude significativa das perdas por atrito. Globalmente, o setor de mineração ainda está tecnologicamente atrasado. Além disso, do ponto de vista tribológico, as interações entre contatos móveis, especialmente durante a quebra e trituração de minerais, são extremamente severas.

Na indústria de mineração, onde a operação contínua dos equipamentos é essencial, a gestão eficiente dos custos de manutenção torna-se imperativa. De acordo com Hutchings (1992), o desgaste prematuro dos componentes mecânicos é uma das principais causas de paradas não programadas e de custos adicionais. Portanto, estratégias proativas de manutenção, baseadas em dados tribológicos e de monitoramento de condições, são essenciais para mitigar riscos e otimizar a disponibilidade dos equipamentos (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2005).

A compreensão dos fenômenos tribológicos, como o desgaste por abrasão, impacto, erosão, corrosão e fadiga é crucial para desenvolver estratégias eficazes de manutenção preventiva na indústria de mineração. A aplicação de métodos analíticos e tecnologias de monitoramento contínuo permite uma gestão mais precisa dos custos associados à manutenção, garantindo a sustentabilidade operacional e econômica das operações mineradoras (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2005).

Atribuir foco à tribologia na análise de manutenção é fundamental para compreender os custos associados ao desgaste em equipamentos industriais. Conforme Bhushan (2013), a tribologia investiga o comportamento do atrito e desgaste entre superfícies em contato, aspectos críticos na operação de equipamentos na indústria. A avaliação tribológica envolve o uso de equipamentos especializados, como tribômetros e simuladores de desgaste, que permitem não apenas quantificar a perda de material, mas também identificar os fatores que contribuem para o desgaste prematuro.

Conforme destacado por especialistas como Hutchings (1992) e Stachowiak e Batchelor (2005), o desgaste é a principal causa de deterioração e falhas prematuras em componentes mecânicos, afetando diretamente a eficiência operacional e aumentando os custos de manutenção.

A manutenção de componentes de equipamentos de mineração é fundamental para mitigar os efeitos adversos do desgaste, conforme discutido por Czichos (2020) e Sinatora (2005) no contexto da tribologia. Czichos enfatiza que a ciência e tecnologia da tribologia

buscam otimizar sistemas técnicos através do estudo detalhado do atrito e do desgaste. Este estudo abrange não apenas as propriedades dos materiais em contato, mas também uma série de fatores do sistema, como o tipo de movimento relativo entre as superfícies, a carga aplicada, a rugosidade das superfícies, a temperatura e as condições ambientais onde ocorre o desgaste. Esses elementos são essenciais para entender os mecanismos de desgaste e desenvolver estratégias eficazes de manutenção preventiva.

Sinatora (2005) complementa que a tribologia não se restringe apenas ao estudo do desgaste e do atrito, mas também à lubrificação como uma forma tradicional de minimizar esses fenômenos. A aplicação de técnicas de lubrificação adequadas é crucial para reduzir o atrito entre componentes móveis, prolongando sua vida útil e mantendo a eficiência operacional dos equipamentos de mineração. Além disso, a tribologia considera tanto sistemas naturais quanto artificiais, abrangendo uma ampla gama de superfícies interativas e movimentos relativos, desde engrenagens e rolamentos até sistemas complexos de britagem e transporte de minérios (HOLMBERG & ERDEMIR, 2017).

Portanto, a integração dos princípios da tribologia na manutenção de equipamentos de mineração não apenas visa mitigar o desgaste e o atrito, mas também promover a eficiência operacional e reduzir os custos associados à substituição prematura de componentes.

São os principais tópicos de estudo na tribologia:

Atrito: é a força que impede o movimento relativo entre as superfícies em contato. A compreensão do atrito é importante para o projeto de componentes mecânicos, pois pode afetar a eficiência do sistema e aumentar o desgaste (BHUSHAN, 2013);

Desgaste: é a perda de material das superfícies em contato devido às forças de atrito e carga. O desgaste pode ser classificado em vários tipos, como abrasão, corrosão, erosão e fadiga (HOLMBERG & MATTHEWS, 2009);

Lubrificação: é o uso de um lubrificante para reduzir o atrito e o desgaste entre as superfícies em contato. A lubrificação é especialmente importante em sistemas mecânicos de alta velocidade e alta carga (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2013);

Engenharia de superfície: é o estudo da estrutura, propriedades e desempenho das propriedades tribológicas, como a adição de revestimentos ou tratamentos térmicos (ZHOU & ZHENG, 2008).

Ainda de acordo Blau (2011), a tribologia é aplicada em muitos campos, como automóveis, aviões, máquinas, equipamentos industriais, dispositivos médicos e até mesmo em engenharia espacial. A pesquisa em tribologia tem como objetivo desenvolver tecnologias para melhorar a eficiência, reduzir o desgaste e prolongar a vida útil dos componentes mecânicos.

O estudo do sistema tribológico é aplicado em várias áreas em que há contato entre as partes móveis, para explicar esses acontecimentos, Czichos (1978) criou um modelo esquemático, como demonstra a figura 2, que consiste em quatro elementos: corpo sólido, contra corpo, elementos de interface e meio ambiente.

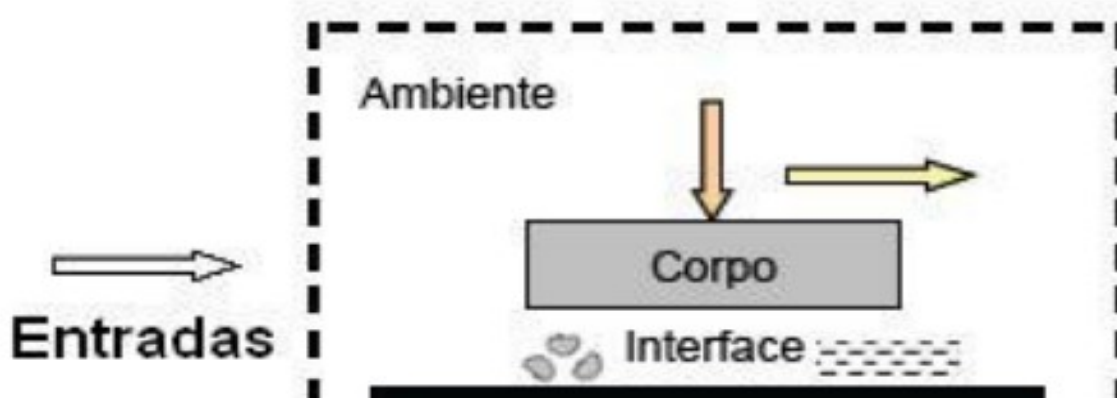


Figura 2: Representação esquemática dos elementos do tribosistema
Fonte: Adaptado de Czichos (1978).

É possível observar na figura 2 que ela apresenta a finalidade do sistema tribológico, que é estudar as transformações ocorridas entre as entradas e saídas, correlacionando os distúrbios decorrentes do atrito e as perdas geradas quando há contato entre as superfícies.

- Entradas: Influências externas e recursos introduzidos no sistema (energia, materiais, lubrificantes);
- Ambiente: Condições externas que afetam o processo de desgaste (temperatura, umidade, contaminantes);
- Corpo: Componente em movimento que entra em contato com outro componente;
- Interface: Região de contato entre o corpo e o contra corpo, onde ocorrem atrito, desgaste e lubrificação;
- Contra Corpo: Componente estacionário ou em movimento relativo oposto ao corpo;

- Saídas Úteis/Perdas: Resultados do sistema tribológico (trabalho útil e perdas como desgaste e aquecimento indesejado).

2.2 Tipos De Desgaste

Stachowiak & Batchelor (2011) enfatizam a diversidade de tipos de desgaste que podem afetar os equipamentos na indústria de mineração. Esses tipos incluem desgaste por abrasão, impacto, erosão, corrosão e fadiga, cada um influenciando de maneira única a eficiência do processo e a durabilidade dos equipamentos. Compreender esses mecanismos de desgaste é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção preventiva e preditiva, visando prolongar a vida útil dos componentes e reduzir os custos associados à manutenção corretiva.

Portanto, a análise detalhada dos diferentes tipos de desgaste, conforme estudado por esses autores, não apenas oferece ideias sobre as causas e mecanismos desse fenômeno, mas também orienta a implementação de práticas de manutenção mais eficientes e econômicas na indústria de mineração. Esse conhecimento permite que as empresas adotem medidas proativas para controlar o desgaste, melhorar a confiabilidade operacional dos equipamentos e otimizar os custos de manutenção ao longo do tempo.

De acordo com Stephenson e Agapiou (2006), a escolha do material é crucial, pois alguns materiais são mais resistentes a certos tipos de desgaste que outros. Para prevenir o desgaste, é essencial adotar técnicas como revestimentos protetores, lubrificação, melhoria da geometria do componente e controle do ambiente.

Os tipos mais comuns de desgaste incluem:

- **Desgaste por abrasão:** o desgaste por abrasão é causado pela ação de partículas duras que entram em contato com a superfície, removendo material por meio de atrito e impacto. De acordo com (Stachowiak e Batchelor, 2011, p.339) "o desgaste por abrasão resulta da remoção de material de uma superfície por partículas contidas na superfície oposta ou no fluido de lubrificação";
- **Desgaste por impacto:** segundo Zum Gahr (1987), o desgaste por impacto ocorre quando um material é desgastado devido a choques ou impactos repetidos que causam a remoção de material da superfície;
- **Desgaste por erosão:** Stachowiak e Batchelor (2011) descrevem o desgaste por erosão como "a remoção de material por partículas contidas em uma corrente

líquida ou gasosa". Eles destacam que essas partículas, quando impactam a superfície, causam desgaste por erosão devido à sua ação abrasiva;

- **Desgaste por corrosão:** ocorre devido à reação química entre as superfícies tribológicas e um meio corrosivo. De acordo com Bhushan (2015), "A corrosão é a degradação da superfície devido à reação química com um meio corrosivo, como água, óxido ou soluções salinas;
- **Desgaste por fadiga:** resulta da repetição de cargas e descargas dos componentes, causando danos na superfície. Esse tipo de desgaste é comum em diversos equipamentos e pode ser prevenido através da otimização da geometria dos componentes e da melhoria das condições de trabalho (JIANG *et al.*, 2017).

Esses tipos de desgaste são estudados e analisados de forma a entender as causas e as formas de preveni-los, para desenvolver técnicas, analisar e criar um método para minimizar ou evitar o desgaste (ZUM GAHR, 1987).

2.2.1 Desgaste por Abrasão

Definem desgaste por abrasão como "a perda progressiva de material que ocorre na superfície de um corpo quando este é submetido à ação de partículas sólidas em contato relativo e movimento" (RIBEIRO & BIANCHI, 2010, p. 72).

Segundo Adachi e Hutchings (1988), o desgaste por abrasão é influenciado pela dureza e geometria das partículas abrasivas, pela dureza e resistência do material que está sendo desgastado, pela pressão e velocidade de contato entre as superfícies, bem como pela presença de lubrificantes e outros contaminantes que possam afetar a interação entre as partículas abrasivas e a superfície do material.

Já segundo Rabinowicz (1995), existem diversos micromecanismos de desgaste por abrasão, incluindo o desgaste por corte, desgaste por risco, desgaste por fadiga, entre outros. Cada tipo de desgaste por abrasão é influenciado por diferentes fatores, como a dureza do material, a geometria das partículas abrasivas, a carga aplicada, a temperatura, entre outros.

Ainda segundo Davim (2019), abrasão pode causar diferentes tipos de danos na superfície do material, como riscos, sulcos, perda de material em forma de pequenas partículas, entre outros. Ele ressalta que a presença de um filme lubrificante pode reduzir a taxa de desgaste por abrasão, mas que esse filme pode ser facilmente removido pelas partículas abrasivas, aumentando a taxa de desgaste. Davim (2019) também enfatiza que a

abrasão pode causar um efeito de polimento na superfície, reduzindo a rugosidade e melhorando o desempenho em termos de atrito e desgaste.

2.2.2 Desgaste por Impacto

Adachi e Hutchings (1988) definem esse fenômeno como a perda de material provocada por impactos repetidos de partículas sólidas, destacando que fatores como a dureza e geometria das partículas, bem como a dureza do material e as condições de impacto, influenciam a taxa de desgaste.

Além disso, Budinski (1992) observa que partículas em alta velocidade podem causar rachaduras e trincas devido às tensões geradas na superfície do material. Davim (2019) ressalta que uma camada protetora, como um revestimento, pode reduzir o desgaste, mas sua remoção pode aumentar a taxa de desgaste. O uso de materiais mais resistentes e a adoção de medidas de proteção são essenciais para minimizar o desgaste por impacto.

2.2.3 Desgaste por Erosão

O desgaste por erosão é causado pela ação de partículas em movimento que removem material da superfície de um corpo. Segundo Bhushan (2009), a taxa de erosão depende da velocidade, ângulo de impacto, e da dureza do material, além das características das partículas. Wood (1997) concorda que esses fatores influenciam a taxa de desgaste, destacando a importância da forma e tamanho das partículas.

Pei e Huang (2012) observam que a erosão pode envolver mecanismos como abrasão, fadiga e corrosão, e pode ser causada por partículas sólidas, líquidas ou gasosas. Sajjadi e Salehi (2014) acrescentam que a erosão pode provocar danos como sulcos e trincas, sendo crucial prevenir esse desgaste em setores como aeroespacial e automotivo. Liu *et al.* (2019) ressaltam que o desgaste por erosão é um fator importante na vida útil de componentes industriais e que sua relevância está aumentando na indústria.

2.2.4 Desgaste por Corrosão

O desgaste por corrosão é um fenômeno complexo que deteriora materiais metálicos, prejudicando suas propriedades mecânicas e funcionalidade. De acordo com Bircher e Schmutz (2006), a corrosão é a reação química entre um material metálico e seu ambiente, levando à deterioração e perda de propriedades. Esse processo pode ser acelerado por fatores

como umidade, temperatura e presença de sais e gases corrosivos (PARVIZPOUR & AZIMI, 2010).

Alkhatib (2017) observa que a corrosão é lenta e progressiva, resultando na perda da integridade do material. Ela pode ser classificada em tipos como corrosão uniforme, localizada, intergranular e galvânica, cada um com características específicas. A corrosão afeta diversos materiais metálicos, incluindo ferro, aço e alumínio, e pode ter um impacto significativo na vida útil de estruturas e equipamentos (BERNAUS & COULSON, 2007).

2.2.5 Desgaste por Fadiga

Segundo Blau (2001, p.225), "o desgaste por fadiga é caracterizado pela formação de trincas na superfície de contato, que se propagam devido à repetida aplicação de tensões cíclicas". Essas trincas podem iniciar tanto na superfície quanto na subsuperfície do material, dependendo da magnitude das cargas aplicadas e das propriedades do material.

Stachowiak e Batchelor (2013, p.342) descrevem que "o desgaste por fadiga é predominantemente influenciado pela natureza das cargas aplicadas e pelas propriedades do material, incluindo a dureza e a resistência à fratura". Eles também destacam a importância de considerar a lubrificação e a rugosidade da superfície, uma vez que esses fatores podem afetar significativamente a vida útil do componente.

2.3 Equipamentos da Mineração

A mineração envolve uma ampla gama de equipamentos, cada um com suas próprias particularidades e desafios relacionados ao desgaste. No entanto, este estudo se concentrará especificamente na avaliação do custo do desgaste em moinhos, britadores, peneiras e chute de alimentação do transportador, considerando os diferentes mecanismos de desgaste e suas implicações econômicas.

2.3.1 Britadores

Segundo Tavares (2017), os britadores são equipamentos de alta capacidade de produção, sendo capazes de trabalhar com minérios de diversos tipos e tamanhos. Eles são equipamentos fundamentais no processamento de minerais, sendo utilizados principalmente para a redução do tamanho de rochas e minérios. Segundo Braga *et al.* (2005), os britadores fazem a fragmentação de materiais de grandes dimensões em partículas menores, facilitando o manuseio e o transporte e preparando-os para as etapas subsequentes de processamento.

A figura 3 mostra um britador Barmac 9100 SE, equipamento amplamente utilizado na indústria da mineração.



Figura 3: Britador BARMAC 9100SE
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Este britador específico apresenta sinais visíveis de desgaste, evidenciados pela corrosão e abrasão nas superfícies metálicas, resultado da exposição contínua a materiais abrasivos e condições adversas. A manutenção regular e a escolha adequada de materiais são fundamentais para prolongar a vida útil do britador e garantir a eficiência do processo de britagem.

2.3.1.1 Função dos Britadores

A principal função dos britadores é a cominuição, que consiste na quebra e redução de pedras e minerais em tamanhos específicos. Este processo é essencial para a liberação dos minerais valiosos contidos nas rochas, permitindo a sua posterior separação e concentração (WILLS & FINCH, 2016). De acordo com Chaves (2012), a eficiência do processo de cominuição influencia diretamente os custos operacionais e a eficiência global da operação de mineração.

2.3.1.2 Tipos de Britadores

De acordo com Smith (2015), existem vários tipos de britadores, cada um adequado a diferentes tipos de materiais e etapas do processo de cominuição. Os principais tipos de britadores são:

Britadores de Mandíbula: utilizados principalmente para britagem primária, os britadores de mandíbula utilizam duas superfícies metálicas para esmagar o material. Conforme descrito por Wills e Finch (2016), este tipo de britador é ideal para materiais de dureza média a alta;

Britadores de Rolos: possuem dois rolos que giram em direções opostas, comprimindo o material entre eles. Este tipo de britador é amplamente utilizado devido à sua capacidade de processamento e à eficiência na produção de partículas uniformes (GUPTA e YAN, 2006);

Britadores de Impacto: utilizados para a britagem secundária, os britadores de impacto utilizam a força do impacto para fragmentar os materiais. São indicados para materiais de baixa a média dureza (COHEN, 1985);

Britadores Cônicos: usados principalmente para britagem secundária e terciária, os britadores cônicos são projetados para triturar materiais duros e abrasivos (WILLS e FINCH, 2016).

2.3.1.3 Tipos de Desgaste em Britadores

Os britadores, devido à natureza do seu trabalho, estão sujeitos a diversos tipos de desgaste. Segundo Gupta & Yan (2006), os principais tipos de desgaste que ocorrem nos britadores são:

- Desgaste Abrasivo;
- Desgaste por Impacto;
- Desgaste por Fadiga;
- Desgaste Corrosivo.

2.3.2 Peneiras vibratórias

De acordo com Wills e Munn (2006), peneiras vibratórias tem uma superfície de peneiramento retangular com descarga de oversize e alimentação em lados opostos. A peneira vibratória é projetada para a classificação de material a granel (minérios e agregados), podendo ser finos, médios ou grossos, e o peneiramento pode ser feito com via úmida ou seca, trabalhando com intervalos de separação de 300 mm até 0,045 mm. (HAVER & BOECKER, 2010).

Para Chaves e Peres (2003), as peneiras vibratórias inclinadas têm um movimento vibratório circular ou elíptico, esse faz com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, causando uma estratificação do leito e submetendo as partículas várias vezes sobre aberturas sucessivas. A direção de rotação no mesmo sentido do fluxo acarreta maior capacidade, mas diminui a eficiência do peneiramento. Por outro lado, a rotação no sentido oposto dificulta o escoamento e aumenta a probabilidade das partículas de atravessar a tela. Na figura 4 adaptado de Chaves e Peres (2003), um esquema de como é uma peneira.



Figura 4: Peneira vibratória horizontal
Fonte: Adaptado Chaves e Peres (2003)

A peneira da figura 4 apresenta as seguintes características:

- Acionamento livre circular ou circular excêntrico ou linear;
- Amplitude variável ou constante do seu movimento;
- Frequência ajustável;
- Tamanho customizável;

- Totalmente blindada, para a captação de pó em projetos para materiais pulverulentos (opcional).

2.3.2.1 Função das Peneiras

Para Kelly & Spottiswood (1982), a principal função das peneiras é a classificação granulométrica, que consiste na separação de materiais em diferentes tamanhos com base em aberturas de malhas ou telas. Este processo é crucial para garantir a uniformidade dos produtos finais e a eficiência das operações de cominuição, flotação e outros processos de beneficiamento mineral. Ainda de acordo com Kelly e Spottiswood (1982), a eficiência da classificação influencia diretamente a performance e os custos operacionais de uma planta de processamento.

2.3.2.2 Tipos de Peneiras

Existem vários tipos de peneiras, cada uma adequada a diferentes tipos de materiais e condições operacionais. Segundo Wills (2006), os principais tipos de peneiras são:

- **Peneiras Vibratórias:** utilizam movimentos vibratórios para separar as partículas. Este tipo de peneira é amplamente utilizado devido à sua eficiência e capacidade de processamento. Elas podem ser classificadas em peneiras vibratórias inclinadas e horizontais, dependendo do ângulo de operação (WILLS & FINCH, 2016);
- **Peneiras Rotativas:** conhecidas também como trommels, utilizam um tambor rotativo com aberturas de diferentes tamanhos para a separação de materiais. São comumente usadas em operações de lavagem e classificação de materiais úmidos ou pegajosos (GUPTA & YAN, 2006);
- **Peneiras de Alta Frequência:** operam a frequências elevadas, proporcionando uma separação mais eficiente de partículas finas. São especialmente úteis em processos que requerem uma classificação precisa de materiais finos (NOBLE, 2017);
- **Peneiras Estáticas:** não possuem partes móveis e utilizam a gravidade para a separação de materiais. São geralmente utilizadas em operações de desaguamento e classificação grosseira (KELLY & SPOTTISWOOD, 1982).

2.3.2.3 Tipos de Desgaste em Peneiras

Segundo Gupta & Yan (2006), devido à sua função contínua de separação de materiais, as peneiras estão sujeitas a vários tipos de desgaste. Os principais tipos de desgaste que ocorrem em peneiras são:

- Desgaste Abrasivo;
- Desgaste por Impacto;
- Desgaste Corrosivo;
- Desgaste por Fadiga.

2.3.3 Chute de alimentação do transportador

Os chutes de alimentação são componentes cruciais em sistemas de transporte de materiais a granel, utilizados para direcionar e controlar o fluxo de materiais de um ponto a outro. Segundo Chaves (2012), os chutes de alimentação têm como função principal a transferência eficiente e segura de materiais de um equipamento para outro, minimizando a perda de material e o impacto nos equipamentos receptores.

A figura 5 apresenta um chute de alimentação, um equipamento muito utilizado para direcionar materiais para os transportadores de correia de forma controlada e eficiente.



Figura 5: Chute de alimentação
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Na figura 5 é visível que o equipamento apresenta sinais de desgaste e corrosão, evidenciados por áreas corroídas e acúmulo de material particulado. Esses problemas podem ser causados por exposição a ambientes agressivos ou manutenção inadequada.

2.3.3.1 Função dos Chutes de Alimentação

A principal função dos chutes de alimentação é garantir a transferência suave e controlada de materiais entre diferentes etapas do processo de transporte. Eles são projetados para direcionar o fluxo de material de forma eficiente, evitando obstruções e minimizando o desgaste dos equipamentos Kawatra & Ghosh (2014). De acordo com Wills e Finch (2016), a eficiência dos chutes de alimentação influencia diretamente a produtividade e a segurança das operações de manuseio de materiais.

2.3.3.2 Tipos de Chutes de Alimentação

Segundo Richards & Fox (2006), existem vários tipos de chutes de alimentação, cada um adequado a diferentes aplicações e tipos de materiais. Os principais tipos de chutes de alimentação são:

- **Chutes de Alimentação em Queda Livre:** utilizam a gravidade para direcionar o fluxo de material. Este tipo de chute é simples e eficiente, sendo adequado para materiais não coesivos e de fluxo livre (GUPTA & YAN, 2006);
- **Chutes de Alimentação em Ângulo:** são projetados com uma inclinação específica para controlar a velocidade e a direção do material. Este tipo é utilizado para materiais que requerem um controle mais preciso do fluxo (CHAVES, 2012);
- **Chutes de Alimentação Vibratórios:** utilizam vibrações para mover o material através do chute. São adequados para materiais que tendem a obstruir ou que precisam ser distribuídos de maneira uniforme (WILLS & FINCH, 2016);
- **Chutes de Alimentação com Revestimento:** são equipados com revestimentos resistentes ao desgaste para prolongar a vida útil do chute. Este tipo é utilizado em aplicações onde o material transportado é altamente abrasivo (NUNES, 2018).

2.3.3.3 Tipos de Desgaste em Chutes de Alimentação

Para Leonard (2011), os chutes de alimentação estão expostos a diferentes tipos de desgaste por conta da natureza abrasiva dos materiais que transportam. Os principais tipos de desgaste nesses chutes são:

- Desgaste Abrasivo;
- Desgaste por Impacto;
- Desgaste Corrosivo;
- Desgaste por Erosão.

2.3.4 Moinhos

Os moinhos são equipamentos cruciais no processamento mineral, utilizados principalmente para a redução do tamanho das partículas através de processos de moagem. Segundo Wills e Finch (2016), os moinhos têm como função principal a cominuição de materiais, preparando-os para etapas subsequentes de processamento e facilitando a extração de minerais valiosos.

O moinho de bolas cilíndrico é um equipamento comumente empregado na moagem de materiais sólidos, especialmente em processos de beneficiamento mineral, como ilustrado na figura 6.



Figura 6: Moinho de bolas
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Este tipo de moinho é composto por um cilindro horizontal rotativo, onde as bolas de aço ou de outros materiais, conhecidas como meios moedores, são utilizadas para triturar o material alimentado. De acordo com Wills e Finch (2016), o impacto das bolas e a fricção entre elas e o material resultam na redução do tamanho das partículas.

2.3.4.1 Função dos Moinhos

A principal função dos moinhos é a moagem, que consiste na redução de partículas a tamanhos menores, promovendo a liberação dos minerais valiosos contidos nas rochas. Este processo é essencial para a eficiência das operações de concentração e beneficiamento mineral. De acordo com Kelly e Spottiswood (1982), a eficiência da moagem influencia diretamente os custos operacionais e a recuperação dos minerais.

2.3.4.2 Tipos de Moinhos

De acordo com Finch & Boyes (2021), existem vários tipos de moinhos, cada um adequado a diferentes tipos de materiais e condições operacionais. Os principais tipos de moinhos são:

- **Moinhos de Bolas:** utilizam bolas de aço ou outros materiais para moer o material. Os moinhos de bolas são amplamente utilizados devido à sua capacidade de produzir partículas finas e à sua versatilidade em processar uma ampla variedade de materiais. São comuns tanto em operações de moagem seca quanto úmida (WILLS & FINCH, 2016);
- **Moinhos de Barras:** utilizam barras de aço para moer o material. Este tipo de moinho é utilizado principalmente para a moagem de materiais mais grossos, produzindo uma granulometria mais uniforme. São frequentemente utilizados como estágio preliminar antes dos moinhos de bolas (GUPTA & YAN, 2006);
- **Moinhos de Martelos:** utilizam martelos rotativos para impactar e moer o material. São utilizados para a moagem de materiais friáveis e para a redução de tamanho em uma ampla gama de indústrias, incluindo a mineração (WILLS & FINCH, 2016);
- **Moinhos de Rolos:** utilizam rolos para comprimir e moer o material. Este tipo de moinho é eficiente para a moagem de materiais duros e abrasivos, sendo utilizado

tanto em operações de moagem fina quanto grossa (KELLY & SPOTTISWOOD, 1982).

2.3.4.3 Tipos de Desgaste em Moinhos

Para Morrison (2016) devido à natureza abrasiva dos materiais que os moinhos processam, eles estão sujeitos a diversos tipos de desgaste. Os principais tipos de desgaste que ocorrem em moinhos são:

- Desgaste Abrasivo;
- Desgaste por Impacto;
- Desgaste por Fadiga;
- Desgaste Corrosivo.

2.4 Manutenção preventiva

Encontra-se na NBR 5462 (1994, p.07), que “a manutenção preventiva é efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

Pereira (2011) afirma que, a manutenção preventiva busca sempre a melhoria contínua, reduzindo a indisponibilidade e melhorando o desempenho das máquinas e equipamentos, aumentando a produtividade. Além desses itens citados, um plano de manutenção preventiva tem o objetivo de manter o equipamento em seu melhor estado operacional, diminuindo o risco de falhas do equipamento, aumentando a ausência de quebras, aumentando a confiabilidade e regularidade de operação do sistema produtivo.

Segundo Mobley (2002), a manutenção preventiva é uma estratégia que pode reduzir significativamente os custos associados à falha dos equipamentos, aumentando a vida útil dos componentes e diminuindo as paradas não programadas. Em vez de esperar que os componentes falhem por completo, a manutenção preventiva atua de forma proativa, substituindo peças antes que o desgaste atinja níveis críticos.

A escolha de realizar manutenção preventiva em vez de corretiva pode resultar em economias substanciais. Sharma, Yadava e Deshmukh (2011) destacam que a manutenção preventiva, quando bem implementada, pode reduzir os custos totais de manutenção entre 25% e 30%, o que é particularmente relevante para equipamentos mineradores que sofrem

com desgaste abrasivo e impacto. Ao prevenir falhas inesperadas causadas pelo desgaste, é possível minimizar as paradas de produção e os custos emergenciais de reparos.

2.5 Manutenção corretiva

A NBR 5462-1994 (1994) explica que a manutenção corretiva é a manutenção realizada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função determinada.

Manutenção corretiva é uma intervenção necessária e imediata para mitigar graves consequências aos equipamentos de produção, à segurança do empregado ou risco ambiental. Desta forma, a manutenção corretiva aguarda a ocorrência de um erro para que seja feita uma intervenção, seguindo uma premissa de que não se deve mexer se está funcionando (VIANA,2002).

Segundo Gregório (2018), a manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma pane, quando o componente é usado até a sua exaustão. Essa manutenção tem o objetivo de recolocar um item em condições de executar a função requerida e pode ser subdividida em manutenção corretiva não programada, quando se corrige uma falha quando ela ocorre, paralisando as atividades produtivas do equipamento, e manutenção corretiva programada, que é quando se corrige o desempenho inferior ao esperado, ou seja, defeito que não tenha implicado falha.

Kardec e Nascif (2009) elucida a manutenção corretiva como a atuação para a correção da falha ou do desempenho exercido pelo equipamento ou sistema. É um tipo de manutenção que consiste em duas condições específicas para que seja praticada: quando apresenta desempenho menor que o esperado, apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais, ou quando há ocorrência de falha.

Quando se trata de manutenção corretiva, ela é caracterizada por intervenções que ocorrem após a falha do equipamento, e é diretamente influenciada pelo desgaste excessivo. Segundo Mobley (2002), a manutenção corretiva está associada à reparação ou substituição de peças defeituosas, resultando em custos mais elevados devido ao tempo de parada inesperada e à necessidade de reparos emergenciais. Na mineração, a falta de planejamento para o desgaste pode gerar falhas graves nos equipamentos, aumentando significativamente os custos de manutenção. Conforme relatado por Vaghefi *et al.* (2012), a manutenção corretiva pode ser de duas a três vezes mais cara que a manutenção preventiva, principalmente em ambientes

severos, como o da mineração, onde o desgaste acelerado de componentes críticos, como moinhos e britadores, resulta em paradas não programadas e prejuízos à produção.

2.6 Manutenção preditiva

Na visão de Almeida (2015), a manutenção preditiva é um método de administração da manutenção desenvolvido com a finalidade de verificar as reais condições das peças e dos componentes de uma determinada máquina, equipamento ou instalação e, com isso, acompanhar os fenômenos decorrentes dos defeitos e planejar uma operação de manutenção corretiva para saná-lo.

Mucida (2017) refere-se à manutenção preditiva como a manutenção baseada na tentativa de prever o estado futuro de um equipamento ou componente, através dos dados coletados por um período, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento. Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela previsibilidade da deterioração do equipamento, prevenindo falhas por meio do monitoramento dos parâmetros principais com o equipamento em funcionamento. Afirma também que, é a execução da manutenção no momento adequado, antes que o equipamento apresente falha, tem a finalidade de evitar a falha funcional ou evitar as consequências desta.

Para Teles (2018), quanto maior o tempo para identificar e corrigir a falha, maiores serão os custos, o que indica que a curva de custo para reparo é inversamente proporcional à curva potencial de falha.

De acordo com Mobley (2002), a manutenção preditiva pode reduzir os custos de manutenção em até 50% em comparação com as abordagens reativas ou preventivas, ao otimizar o tempo de vida dos componentes e minimizar a necessidade de substituições desnecessárias.

Jardine, Lin e Banjevic (2006) destacam que a implementação de manutenção preditiva pode reduzir significativamente as paradas não programadas, ao mesmo tempo em que minimiza o custo de estoque de peças sobressalentes e o tempo de inatividade.

2.7 Análise de custos na indústria da mineração

Na indústria da mineração, a análise do custo de desgaste desempenha um papel fundamental na gestão eficiente dos recursos e na maximização da rentabilidade. De acordo com Chaturvedi (2003), o desgaste de equipamentos é um dos maiores responsáveis pelos

altos custos operacionais nas mineradoras, afetando diretamente a competitividade do setor. Neste contexto, Abbott (2001) argumenta que uma análise detalhada do custo de desgaste é essencial para a tomada de decisões estratégicas que visam estender a vida útil dos ativos e minimizar os custos financeiros associados a falhas inesperadas.

Adicionalmente, Madsen *et al.* (2004) demonstram que uma abordagem preventiva na gestão do desgaste pode resultar em economias significativas a longo prazo, enquanto a negligência nesse aspecto pode levar a custos elevados devido a paradas não programadas e reparos emergenciais. Eles enfatizam que a utilização de tecnologias avançadas, como sensores de monitoramento contínuo e algoritmos de manutenção preditiva, pode prever problemas de desgaste, garantindo uma operação mais estável e econômica (MADSEN *et al.*, 2004).

O uso de materiais resistentes ao desgaste e a aplicação de revestimentos protetores são estratégias eficazes para reduzir a frequência de substituição de componentes e o tempo de inatividade, conforme destacado por ASTM (2008). Esses materiais podem incluir ligas especiais, cerâmicas ou polímeros, dependendo das condições específicas de operação e dos materiais processados. Além disso, a escolha adequada dos métodos de manutenção, seja corretiva, preventiva ou preditiva, é crucial para otimizar a eficiência operacional e reduzir os custos de manutenção.

Segundo Montgomery (2009), a análise econômica dos custos de desgaste deve considerar tanto os custos diretos, como a substituição de peças e mão de obra, quanto os custos indiretos, que incluem a perda de produção e o impacto no tempo de vida útil dos equipamentos. A implementação de estratégias como a manutenção baseada na condição do equipamento, ao invés de intervalos fixos, pode melhorar significativamente a eficiência e a eficácia das operações de manutenção (MONTGOMERY, 2009).

Como destacado por Wills e Finch (2015), uma abordagem integrada na gestão do desgaste, não envolve apenas aspectos técnicos, mas também considerações socioeconômicas e ambientais, como a minimização do uso de recursos naturais e a redução do impacto ambiental das operações de mineração. A adoção de práticas sustentáveis e a inovação tecnológica são essenciais para manter a competitividade e a sustentabilidade no setor de mineração.

Os principais fatores que contribuem para o desgaste em equipamentos de mineração incluem:

- **Abrasividade dos Materiais:** Minérios de alta dureza e abrasividade aceleram o desgaste das superfícies de contato dos equipamentos. Segundo Lopes e Tavares (2011, p.145), “os materiais abrasivos são responsáveis por aumentar a taxa de desgaste, impactando a eficiência e a durabilidade dos componentes”.
- **Ciclos de Carga:** O impacto constante e as variações de carga durante a operação aumentam a fadiga dos materiais. Gonçalves (2014, p.89) destaca que “os ciclos de carga e descarga em equipamentos de mineração podem induzir tensões que resultam em falhas por fadiga”.
- **Ambientes Adversos:** Condições de trabalho severas, como poeira e umidade, aceleram o processo de degradação. Fernandes *et al.* (2016, p.302) afirmam que “a presença de partículas abrasivas em ambientes úmidos pode intensificar o desgaste, exigindo uma análise cuidadosa das condições de operação”.

As consequências do desgaste nos equipamentos incluem:

- **Aumento de Manutenção:** Equipamentos desgastados necessitam de manutenção mais frequente, levando a paradas não programadas. Bastos (2016, p.120) aponta que “cerca de 30% das paradas de um sistema de produção são atribuídas a falhas de desgaste em componentes”.
- **Custo Elevado de Substituição:** A necessidade de substituir peças desgastadas eleva os custos operacionais. A Sociedade Brasileira de Mineração (SBM, 2019, p.45) estima que “os custos com peças de reposição podem representar até 20% do custo total de operação de uma planta de mineração”.
- **Perda de Produtividade:** Equipamentos em manutenção não geram produção. Estudos de Andrade *et al.* (2017, p.55) indicam que “paradas não programadas podem resultar em perdas de até 15% na produção diária”.

3 METODOLOGIA

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

3.1 Tipo de pesquisa

"Pesquisa é um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. Envolve a coleta, análise e interpretação de dados com o objetivo de responder a uma pergunta ou problema de pesquisa" (LEEDY & ORMROD, 2017, p. 2).

Uma pesquisa pode ser classificada em dois tipos:

- Pesquisa quantitativa: "a pesquisa quantitativa tem como objetivo principal a análise numérica dos dados coletados, utilizando técnicas estatísticas para a sua interpretação. Seus resultados são baseados em medidas objetivas e precisas, obtidas por meio de instrumentos padronizados de coleta de dados" (BABBIE, 2016, p. 22);
- Pesquisa qualitativa: "a pesquisa qualitativa tem como objetivo principal a compreensão profunda e detalhada do fenômeno estudado, a partir da perspectiva dos participantes. Utiliza técnicas como entrevistas em profundidade, observação participante e análise de documentos para a coleta de dados" (CRESWELL, 2014, p. 29).

De acordo com os objetivos da pesquisa, em três grupos:

- Pesquisa exploratória: segundo Gil (2008), esse tipo de pesquisa tem como objetivo aprimorar ideias ou descobrir hipóteses. São apropriadas em situações em que há pouco conhecimento prévio sobre um tema ou quando se deseja ter uma visão geral do problema. Elas podem ser realizadas por meio de revisões bibliográficas, entrevistas não estruturadas ou estudos de caso;
- Pesquisa descritiva: de acordo com Marconi & Lakatos (2017), a pesquisa descritiva é a mais utilizada em ciências sociais, pois se concentra na descrição dos fenômenos observados, sem buscar explicá-los. Os resultados obtidos são uma representação exata do fenômeno estudado, permitindo identificar tendências e

padrões. Ela pode ser conduzida por meio de questionários, entrevistas ou observação direta;

- Pesquisa explicativas: segundo Babbie (2016), esse tipo de pesquisa é utilizado quando se deseja identificar a relação de causa e efeito entre as variáveis. Elas são especialmente úteis para prever resultados ou testar teorias. O método científico mais comum para estabelecer relações causais é o experimento, embora outras técnicas possam ser utilizadas, como análise de regressão ou estudos de caso.

Desse modo, o presente trabalho pode ser definido como uma pesquisa exploratória e bibliográfica, que adota a técnica de estudo de caso e integra abordagens quantitativa e qualitativa para avaliar o custo do desgaste em equipamentos de mineração.

3.2 Materiais e Métodos

Para o estudo do custo de desgaste na mineração, serão utilizados dois ativos como base para cada tipo de equipamento, abrangendo o período de 2010 a 2015. Os equipamentos e suas especificações são os seguintes:

- **Britadores:**
 - Motor CA de indução
 - Modelo: B3D 280S/M 4P
 - Potência: 350CV
 - Tipo: BARMAC B9100SE
- **Peneiras:**
 - Motor CA B3D 250S/M 4P
 - Potência: 75CV
 - Tipo: Vibratória METSO Minerals/BS8X21DD
- **Chute de alimentação:**
 - Chute vertical por gravidade
 - Fabricado com chapa ASTM A-36
 - Revestimento interno de chapa de desgaste especial
 - Dimensão: 2495mm X 1260mm
- **Moinhos:**
 - Motor CA de indução
 - Modelo: 870 8P

- Potência: 3000CV
- Tipo: Pré-primário cilíndrico horizontal
- Dimensão: 17000mm X 28000mm

As informações de desgaste que serão contabilizadas para fazer o levantamento de custo incluem:

- Frequência de manutenção;
- Substituição de peças;
- Tempo de inatividade dos equipamentos.

A metodologia geral desse trabalho é apresentada na figura 7.

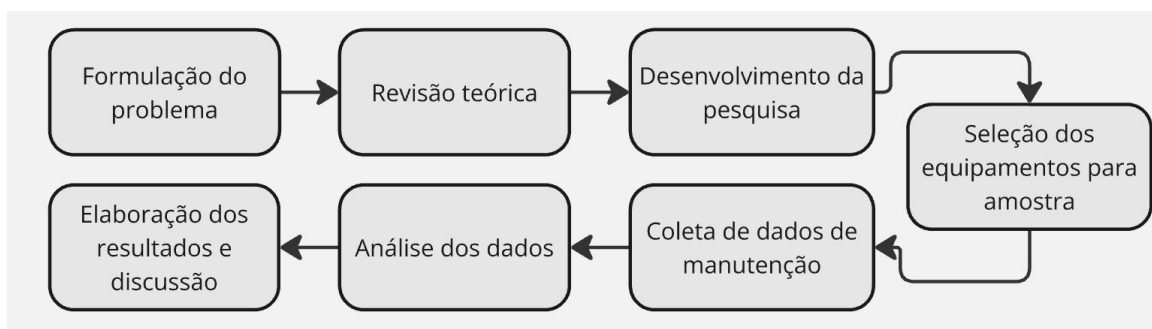


Figura 7: Fluxograma geral da monografia.

Fonte: Pesquisa direta (2024).

3.3 Análise dos custos

Os dados de manutenção dos equipamentos foram extraídos do sistema de gerenciamento de manutenção da empresa em estudo. A equipe de manutenção, ao realizar qualquer intervenção, insere no sistema informações detalhadas sobre as causas e motivos da atividade. Quando a parada ocorre devido à substituição de peças por desgaste, os tipos de desgaste sofridos pelos equipamentos são identificados, podendo ser abrasão, impacto, corrosão, fadiga ou erosão. Neste trabalho, adotou-se a mesma classificação utilizada pela equipe de manutenção.

O custo total de manutenção foi definido como toda verba despendida na manutenção do equipamento, independentemente da atividade realizada (por exemplo, substituição de peças, vistoria programada, falha catastrófica, falha elétrica, entre outras). O custo de desgaste, por sua vez, é a soma de todas as atividades classificadas pela equipe de manutenção

como resultantes de abrasão, impacto, corrosão, fadiga ou erosão (como, por exemplo, a substituição de peças devido à abrasão).

3.4 Variáveis e indicadores

Segundo Marconi & Lakatos (2017), as variáveis são características, atributos, propriedades, conceitos ou condições que podem variar, ou seja, que podem ser medidas, observadas ou manipuladas em um estudo. Elas podem ser classificadas como independentes, dependentes ou de controle, dependendo da relação que têm com o fenômeno estudado.

Para mensurar as variáveis, os indicadores devem ser determinados de acordo com a ferramenta mais adequada, diante disso, a Tabela 1 apresenta as variáveis e indicadores utilizados neste trabalho.

Tabela 1: Variáveis e Indicadores da pesquisa

VARIÁVEIS	INDICADORES
Desgaste	Custo de manutenção

Fonte: Pesquisa direta (2024).

3.5 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados e informações foram obtidas através de material bibliográfico, informações da empresa em questão como as normas técnicas e normas de manutenção, também foram utilizados materiais técnicos como as ordens de manutenção já existente referente ao histórico de manutenção do equipamento da empresa área do estudo, documentos técnicos do setor de manutenção, artigos, teses, livro, monografias, além de dados no sistema SAP e indicadores.

3.6 Tabulação dos dados

A tabulação de dados foi realizada no pacote office, com a utilização do Microsoft Excel para o desenvolvimento do método de controle de desempenho, para a realização da pesquisa, coleta de dados foi utilizado o sistema SAP da empresa área do estudo, para o armazenamento dos dados foi utilizado o Microsoft Word. E para a análise dos dados e apresentação dos resultados foi utilizado o software Power BI.

3.7 Considerações finais

Neste capítulo foi descrito toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho. Constatou-se o tipo de pesquisa e metodologia utilizados, as variáveis e indicadores empregados no desenvolvimento da pesquisa, instrumentos de coleta de dados e análise e, por fim, descreveu-se a coleta de dados e os softwares utilizados.

No capítulo seguinte são abordados os resultados e discussões acerca das análises realizadas nos equipamentos e as constatações visualizadas a partir de análise e investigações.

4 RESULTADOS

O estudo a seguir apresenta resultados de desgaste, fornecidos pela empresa pesquisada, entre os anos de 2010 a 2015 nos quatro equipamentos do estudo. A tabela 2 faz uma relação entre o custo anual total nesses equipamentos e o custo apenas de desgaste. Considerou-se custo do desgaste a substituição de peças que desgastaram naturalmente e não foi considerado falhas abruptas ou manutenção elétrica. Então o custo total de manutenção é a soma total de valores gastos para manter o equipamento em funcionamento quando ocorre uma parada seja qual foi o motivo.

Tabela 2: Custos anuais

Ano	Custo total anual	Custo desgaste	Relação
2010	R\$ 6.228.413,39	R\$ 5.249.306,68	84,28%
2011	R\$ 9.151.309,73	R\$ 8.062.604,96	88,10%
2012	R\$ 9.606.375,55	R\$ 8.877.242,34	92,41%
2013	R\$ 7.132.410,09	R\$ 6.228.579,80	87,33%
2014	R\$ 6.140.448,04	R\$ 5.123.047,09	83,43%
2015	R\$ 5.508.555,94	R\$ 3.764.250,66	68,33%

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Ao examinar os dados fornecidos na tabela 2, observa-se que o percentual do custo de manutenção atribuído ao desgaste de componentes oscilou ao longo dos anos analisados. Em 2010, esse percentual foi de 84,28%, alcançando um pico em 2012 com 92,92%, e apresentando variações menores nos anos subsequentes até 2015, onde registrou-se uma redução significativa para 68,33%. A análise desses números revela que o custo com manutenção devido ao desgaste representa a maior parte dos gastos de manutenção durante os primeiros anos da década analisada, atingindo seu ápice em 2012. Esse aumento pode ser atribuído a diversos fatores, como o aumento na intensidade operacional dos equipamentos, condições adversas de operação, ou mesmo a falta de estratégias eficazes de manutenção preventiva. No entanto, a partir de 2014, observa-se uma tendência de queda no percentual do custo de manutenção atribuído ao desgaste. Isso pode indicar melhorias nas práticas de manutenção, implementação de tecnologias mais duráveis, ou até mesmo mudanças na política de gestão de ativos da empresa. Em 2015, observa-se uma redução nos custos de manutenção, resultado direto da paralisação das atividades da mineradora, o que diminuiu a

necessidade de intervenções corretivas e preventivas nos equipamentos. Esse período de inatividade impactou os custos operacionais, já que, com a suspensão das operações, a demanda por serviços de manutenção foi significativamente reduzida.

Como pode ser visto na tabela 2, em média 84% do custo de manutenção vai para perdas de desgaste. O custo total de manutenção para esses quatro equipamentos foi de R\$ 43.767.512,74, dentro do período estudado, sendo o custo de desgaste R\$ 37.305.031,53. Esse valor mostra a importância de se estudar os fenômenos de desgaste, pesquisa para novos materiais, projeto e desenvolvimento de equipamento otimizados, manutenção preventiva etc.

No contexto da manutenção de equipamentos, os gastos além dos custos relacionados ao desgaste abrangem diversas despesas associadas à preservação e operação eficiente das máquinas. Além disso, há o custo de materiais e peças de reposição, englobando tanto peças que não se desgastam regularmente, como componentes eletrônicos, quanto materiais necessários para reparos que não estão diretamente ligados ao desgaste.

Também se destacam os gastos com manutenção preventiva, que se referem a ações planejadas para prevenir falhas, como inspeções regulares, lubrificação, calibração e ajustes, os quais nem sempre estão diretamente conectados ao desgaste dos componentes.

Em muitos casos, os custos com energia e recursos utilizados durante as atividades de manutenção, como eletricidade, água ou combustíveis, também devem ser considerados. Despesas com paradas e perdas de produção podem ocorrer quando a manutenção exige a interrupção temporária do funcionamento dos equipamentos, o que pode representar um impacto financeiro significativo, especialmente em indústrias onde o tempo de inatividade é caro.

Essas diversas categorias de despesas refletem a complexidade da manutenção de equipamentos, que vai além da simples substituição de peças desgastadas, abrangendo uma ampla gama de atividades e recursos necessários para garantir a operação contínua, eficiente e segura das máquinas.

A tabela 3 apresenta o custo individual de desgaste de cada equipamento avaliado no período estudado.

Tabela 3: Custo de desgaste por ano e equipamento do processo produtivo.

Equipamento	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Britador	928.494,98	1.604.638,16	1.312.518,89	753.380,82	2.509.711,36	910.628,04	8.019.372,25
Moinho	2.810.068,38	4.057.149,96	3.872.550,18	2.974.033,34	1.237.049,82	2.374.109,94	17.324.961,62
Peneira	1.117.644,46	1.492.203,86	3.270.636,23	2.083.422,66	605.855,17	212.610,61	8.782.372,99
Transportador	393.098,86	908.612,98	421.537,04	417.742,98	770.430,74	266.902,07	3.178.324,67
	5.249.306,68	8.062.604,96	8.877.242,34	6.228.579,80	5.123.047,09	3.764.250,66	37.305.031,53

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Os valores fornecidos mostram variações ao longo dos anos, refletindo potenciais desafios na gestão e manutenção desses recursos. Em 2012, por exemplo, houve um aumento substancial no custo de manutenção, alcançando R\$ 8.877.242,34 enquanto em 2015, houve uma significativa redução para R\$ 3.764.250,66.

Essas flutuações podem ser atribuídas a diversos fatores, como o envelhecimento dos equipamentos, a necessidade de atualizações tecnológicas, a frequência e a intensidade das atividades de manutenção preventiva e corretiva, além de questões climáticas e ambientais que afetam a degradação dos ativos físicos.

O equipamento Moinho de bolas é um equipamento chave, pois, sozinho, representa 46,44% do custo de manutenção total. Sendo seguido pelo britador e peneira com uma média 22,5% do custo de desgaste. De forma simplificada, investir para desenvolver materiais ou técnicas para o moinho de bolas pode trazer resultados melhores e mais rápido.

A figura 8 apresenta a média dos gastos de desgaste com cada equipamento dentro do período estudado.

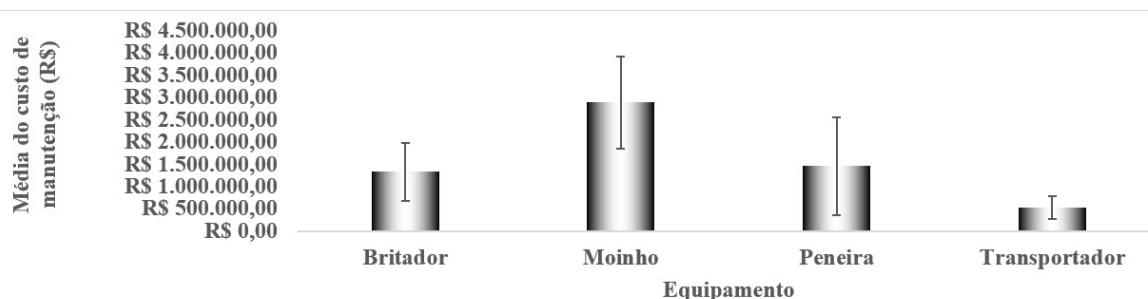


Figura 8: Média dos custos com cada equipamento

Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 8 apresenta a média do custo de manutenção devido ao desgaste dos equipamentos na indústria da mineração ao longo de um período de 5 anos. Observa-se que o moinho é o equipamento com o maior custo médio de manutenção, além de apresentar a

maior variação nos custos. Isso destaca o moinho não apenas como o equipamento mais caro em termos absolutos, mas também como o mais oneroso em termos de desgaste comparado aos outros equipamentos analisados.

4.1 Britador

A figura 9 apresenta uma análise dos custos relacionados ao desgaste do britador Barmac, segmentados por tipo de desgaste.

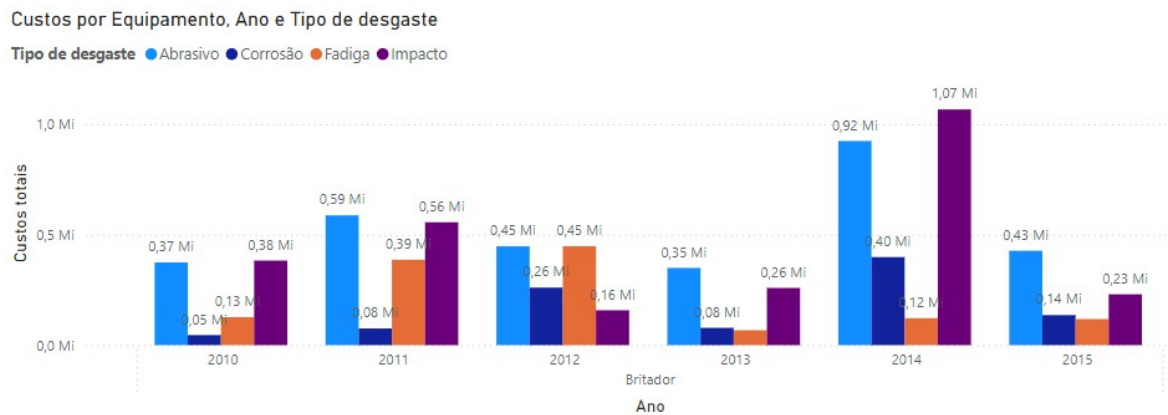


Figura 9: Custo de desgaste Britador Barmac
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 10 mostra a média dos custos de cada tipo de desgaste separados em abrasivo, corrosão, fadiga e impacto.

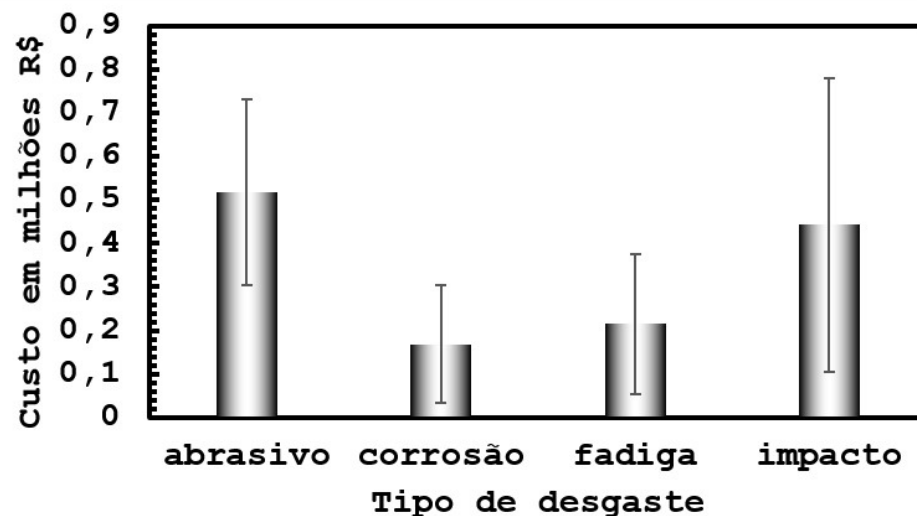


Figura 10: Média do custo de desgaste Britador Barmac
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A análise dos dados apresentados na figura 9 e 10 revela que o tipo de desgaste que mais consome recursos de manutenção ao longo dos anos é o desgaste por abrasão e impacto. Em 2014, eles atingiram o pico, com um custo total de 1,99 milhões, representando a maior parte das despesas de manutenção daquele ano. Esses dados indicam que as operações que envolvem forte atrito ou choques frequentes são as que mais contribuem para os custos de manutenção dos equipamentos de britadores. Esse resultado faz bastante sentido, pois, a função do britador é fragmentar o minério por meio de impactos da mandíbula. Portanto, para esse equipamento é fundamental o estudo de materiais resistentes a abrasão e impacto simultaneamente.

As figuras 11 e 12 apresentam alguns dos danos causados à carcaça de um britador, sendo os principais e mais comuns causadores desses danos os desgastes que ocorrem nesse tipo de equipamento.



Figura 11: Desgaste por abrasão na carcaça principal
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Na figura 11 é evidente que o desgaste na carcaça atingiu um nível crítico, resultando em danos consideráveis ao equipamento. Este cenário reforça a necessidade de realizar inspeções regulares, especialmente durante as trocas de revestimento, sejam fixos ou móveis. A verificação constante da condição da carcaça é crucial para prevenir danos mais sérios e garantir a longevidade e o funcionamento eficiente do equipamento.



Figura 12: Desgaste por impacto em carcaça
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 12 evidencia os danos causados pelo uso prolongado do britador, destacando a importância de realizar inspeções regulares. O estado da carcaça, como apresentado, serve como um exemplo claro de como o desgaste pode comprometer a integridade do equipamento, potencialmente levando a falhas operacionais caso não seja adequadamente monitorado e tratado.

4.2 Moinho

A figura 13 apresenta uma análise dos custos relacionados ao desgaste do moinho de bolas, segmentados por tipo de desgaste.

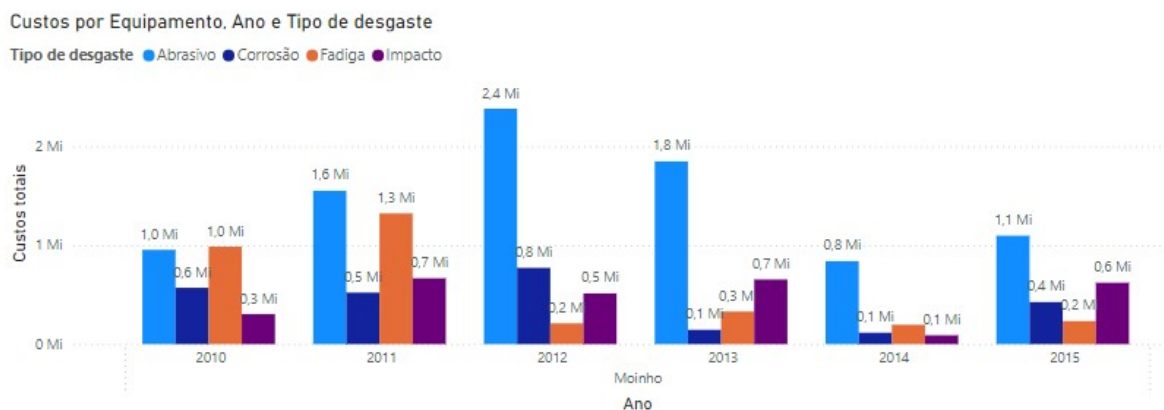


Figura 13: Custo de desgaste moinho
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 14 mostra a média dos custos de cada tipo de desgaste separados em abrasivo, corrosão, fadiga e impacto.

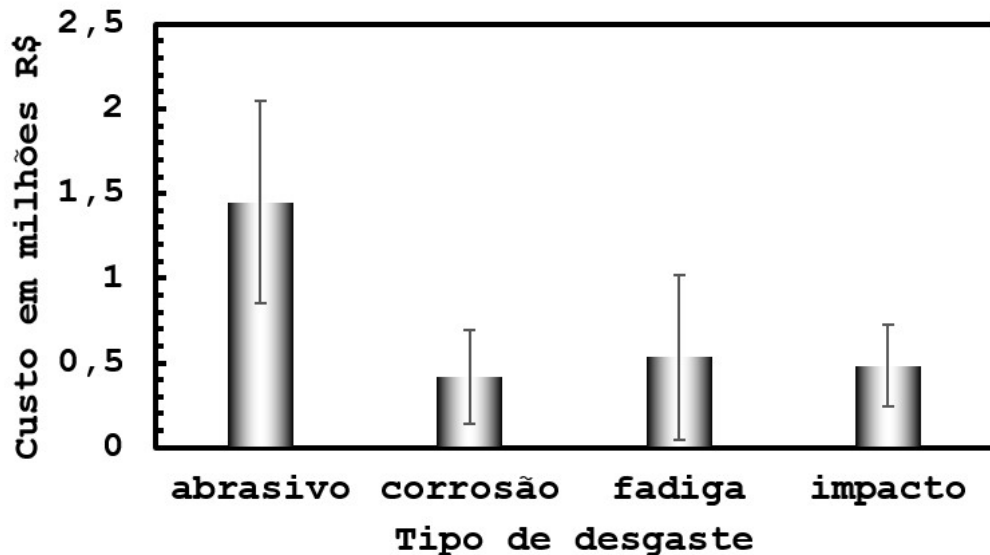


Figura 14: Média do custo de desgaste moinho
Fonte: Pesquisa direta (2024)

As figuras 13 e 14 revelam que o desgaste abrasivo é o que mais impacta financeiramente a manutenção do moinho, sendo o principal responsável pelos custos elevados em vários anos, especialmente em 2012, quando atingiu o pico de 2,4 milhões. Em 2011 e 2013, o desgaste abrasivo também se destacou, com custos de 1,6 milhões e 1,8 milhões, respectivamente. O custo do desgaste abrasivo está diretamente relacionado a substituição das placas de sacrifício que protege as paredes do moinho de bolas.

Além do desgaste abrasivo, outros tipos de desgaste como corrosão, fadiga e impacto também contribuíram para os custos de manutenção, mas em menor escala. A análise desses dados é fundamental para direcionar estratégias de manutenção mais eficazes, focando na mitigação do desgaste abrasivo, que se mostrou o maior vilão em termos de consumo de recursos ao longo dos anos avaliados.

A figura 15 apresenta aspectos do moinho falhado, com ênfase na região onde ocorreu a trinca na pista de rolamento.

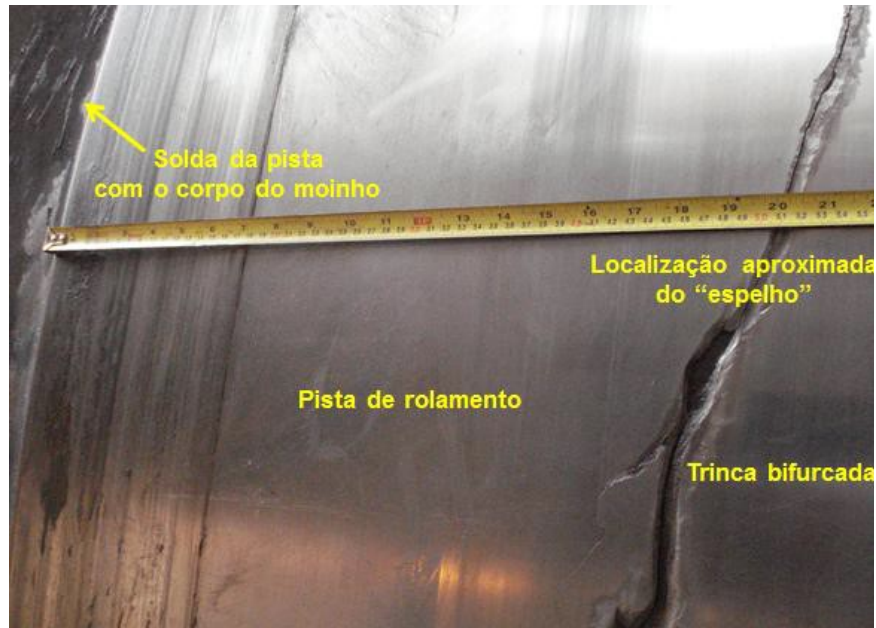


Figura 15: Localização da trinca
Fonte: Pesquisa direta (2024)

O desgaste mostrado na figura 15 é característico de uma fadiga por contato em pistas de rolamento, que pode ser agravada por fatores como carregamento excessivo, defeitos de fabricação ou manutenção inadequada. Na figura 16 é apresentado uma outra situação de desgaste que ocorreu na engrenagem do moinho.



Figura 16: Dentes da engrenagem do moinho quebrada
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 16 mostra uma engrenagem com desgaste severo, evidenciado pela perda de material e deformações nos dentes. Esse desgaste, identificado como abrasão e *pitting*, ocorre devido à presença de partículas duras ou superfícies mais rígidas que removem material, além de fadiga superficial que provoca microtrincas e formação de cavidades. O dano indica condições operacionais adversas, como sobrecarga, desalinhamento ou lubrificação inadequada, sugerindo a necessidade de revisão nas práticas de manutenção e operação.

Como último exemplo de desgaste em moinhos, a figura 17 ilustra o interior de um moinho onde as placas de revestimento estão sendo substituídas devido ao desgaste sofrido.



Figura 17: Troca das placas de revestimento do moinho
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 17 mostra o interior de um moinho de bolas, onde as placas de revestimento estão sendo trocadas. Essas placas, responsáveis por proteger a estrutura do moinho contra o impacto e a abrasão das cargas moídas, sofrem desgaste ao longo do tempo devido à exposição contínua a forças de atrito e impacto. Esse desgaste progressivo é comum em moinhos, que operam sob condições severas e com materiais altamente abrasivos. A substituição periódica das placas é essencial para garantir a eficiência do moinho e prevenir danos estruturais mais graves.

4.3 Peneira

A figura 18 apresenta uma análise dos custos relacionados ao desgaste da peneira, segmentados por tipo de desgaste.

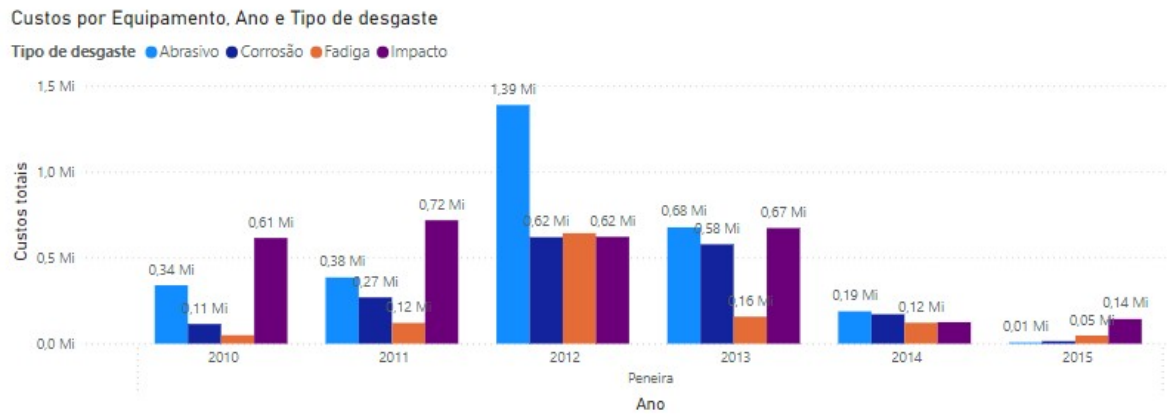


Figura 18: Custo por desgaste Peneira
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 19 mostra a média dos custos de cada tipo de desgaste separados em abrasivo, corrosão, fadiga e impacto.

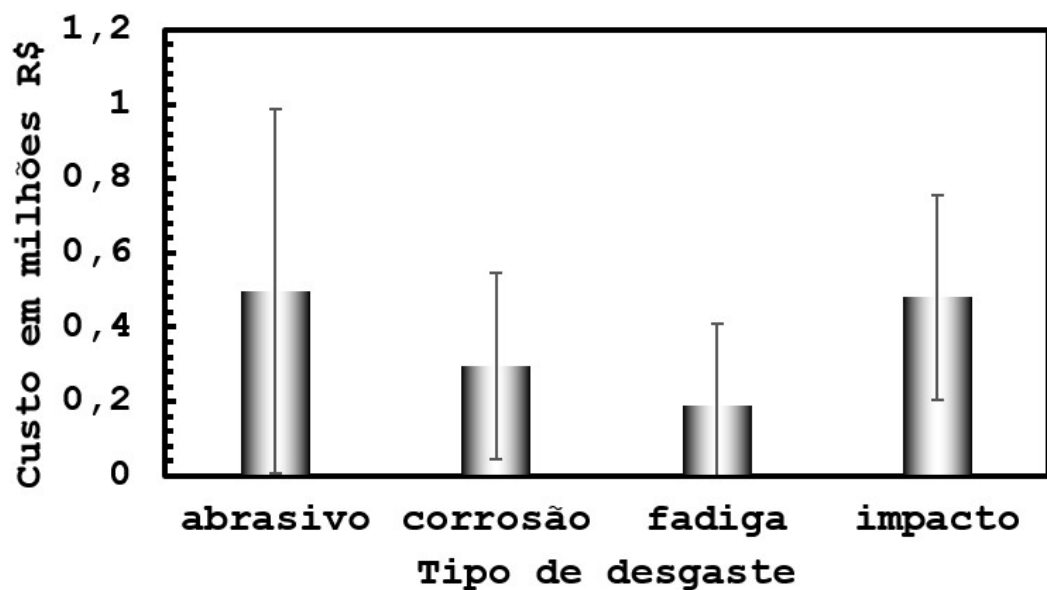


Figura 19: Média do custo de desgaste moinho
Fonte: Pesquisa direta (2024)

As fig. 18 e 19 mostram os custos de manutenção da peneira ao longo dos anos, com destaque para o desgaste por abrasão, que é o tipo de desgaste mais recorrente e contribui significativamente para os custos. Mas, nesse equipamento ocorre uma grande variação nos dados que pode ser um indicativo da complexidade do desgaste dele. Devido a essa grande variação, todos os quatro tipos de desgaste devem ser bem estudados e tentar reduzir os custos.

Os desgastes mais comuns na peneira são os desgastes por abrasão que sem devem devido ao contato direto dos minerais com as telas. Como demonstrado na figura 20, onde mostra as telas desgastadas.



Figura 20: Telas da peneira desgastadas
Fonte: Pesquisa direta (2024)

As telas de peneira, especialmente em ambientes industriais como mineração, estão sujeitas a desgaste constante devido ao contato com materiais abrasivos. Isso pode levar à degradação da tela, como furos ou danos, que comprometem sua eficiência e exigem substituição ou reparo. A figura 21 apresenta um desgaste acentuado na viga de sustentação das telas da peneira.



Figura 21: Viga de sustentação
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 21 mostra uma fissura significativa na estrutura de suporte da peneira, indicando um dano grave que pode comprometer o funcionamento do equipamento. Esse tipo de dano exige manutenção urgente para evitar falhas operacionais e garantir a eficiência do peneiramento.

4.4 Chute de alimentação do Transportador

A figura 22 apresenta uma análise dos custos relacionados ao desgaste do chute de alimentação segmentados por tipo de desgaste.

Custos por Equipamento, Ano e Tipo de desgaste

Tipo de desgaste ● Abrasivo ● Corrosão ● Erosão ● Impacto



Figura 22: Custo por desgaste no chute de alimentação
 Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 23 apresenta a média dos custos associados a cada tipo de desgaste, classificados como abrasivo, corrosão, fadiga e impacto.

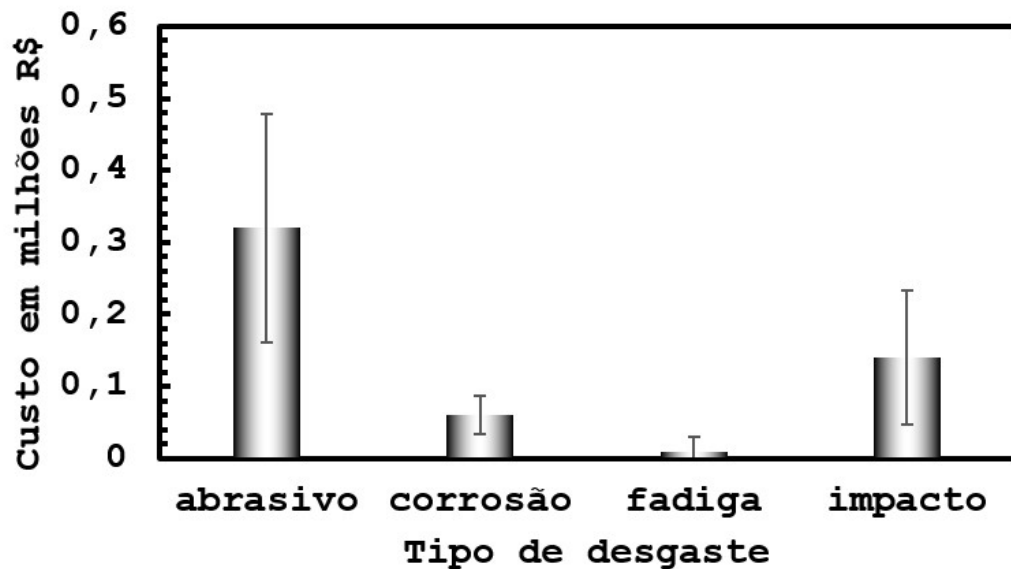


Figura 23: Média do custo de desgaste chute de transferência.
 Fonte: Pesquisa direta (2024)

O desgaste mais comum nos chutes de alimentação é o desgaste abrasivo, devido ao contato direto do material abrasivo com as chapas de desgaste, o que levam a ser o maior causador das trocas e manutenções nesse equipamento, semelhante ao moinho de bolas. A figura 24 apresenta exemplos do desgaste por impacto e por abrasão que ocorrem nas chapas de desgaste.



Figura 24: Desgaste na chapa de desgaste do chute
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A figura 24 mostra o interior de um chute com placas de desgaste danificadas por trincas e abrasão. Esse desgaste é causado pelo impacto e fluxo contínuo de materiais abrasivos. Inspeções regulares e a escolha adequada de materiais são essenciais para gerenciar esse desgaste, como exemplo da falta de inspeção, na figura 25 é apresentado um desgaste acentuado na estrutura externa do chute.



Figura 25: Desgaste na estrutura do chute
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Esse tipo de desgaste ocorre devido ao contato contínuo do material abrasivo que é transportado, causando erosão da superfície interna do chute. Com o tempo, esse desgaste pode levar à falha estrutural, se não for tratado, e pode resultar em paradas de produção não planejadas, aumento de custos de manutenção e substituição de peças, além de possíveis riscos de segurança.

Para mitigar esse tipo de desgaste, medidas como a instalação de revestimentos resistentes à abrasão, otimização do design do chute para melhor direcionamento do material, e inspeções regulares podem ser implementadas.

4.5 Discussão final

A figura 26 apresenta o gráfico de pareto, que evidencia como os custos relacionados à manutenção e ao desgaste dos equipamentos na mineração estão concentrados em algumas áreas principais.

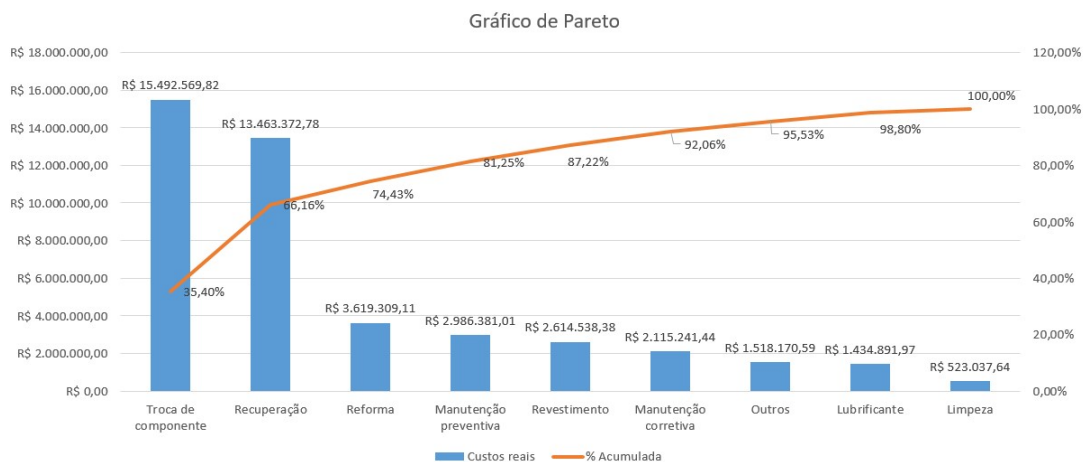


Figura 26: Gráfico de Pareto
Fonte: Pesquisa direta (2024)

A maior parte dos recursos é direcionada à substituição de componentes e à recuperação de equipamentos, o que demonstra que esses são os aspectos mais críticos em termos de impacto financeiro. Essa concentração de custos sugere que focar na otimização desses processos pode ser uma estratégia eficaz para reduzir despesas e aumentar a eficiência das operações.

Além disso, outros custos significativos incluem atividades de reforma, manutenção preventiva e corretiva e revestimentos. Embora não sejam os maiores gastos, essas áreas representam uma parte substancial do orçamento e indicam a importância de um planejamento de manutenção que seja tanto preventivo quanto reativo, visando minimizar paradas inesperadas e prolongar a vida útil dos equipamentos.

Os gastos menores, como lubrificantes, limpeza e outros, embora representem uma fração menor do total, são igualmente fundamentais para o funcionamento contínuo e eficiente dos equipamentos. Esses itens, apesar de menos impactantes individualmente, somam-se ao custo total de manutenção e devem ser geridos de forma eficiente.

Na tabela 4, o custo do desgaste discriminado pelos equipamentos do estudo.

Tabela 4: Custo do desgaste por equipamento

Equipamento	Abrasivo	Corrosão	Erosão	Fadiga	Impacto	Total
Britador	3.107.915,69	993.341,16		1.267.510,82	2.650.604,58	8.019.372,25
Moinho	8.665.058,22	2.544.328,38		3.274.431,99	2.841.143,03	17.324.961,62
Peneira	2.983.958,89	1.765.613,25		1.138.975,33	2.893.825,52	8.782.372,99
Transportador	1.931.005,38	352.594,17	63.598,65		831.126,47	3.178.324,67
Total	16.687.938,18	5.655.876,96	63.598,65	5.680.918,14	9.216.699,60	37.305.031,53

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Como pode ser visto na tabela 4, o custo total com o desgaste abrasivo foi o maior representando 44,78% do valor total gasto com desgaste. O custo com impacto vem em seguida com 24,85%. Portanto, encontrar soluções viáveis e duradouras para esses dois tipos de desgaste podem reduzir consideravelmente o gasto com manutenção na indústria de manutenção.

Portanto, para realizar a "Avaliação do Custo do Desgaste em Equipamentos na Indústria da Mineração", é essencial adotar uma abordagem sistemática que integre conhecimentos teóricos e práticos da tribologia e da operação de equipamentos industriais. O desgaste é um problema significativo na mineração, afetando não apenas a eficiência operacional dos equipamentos, mas também os custos associados à manutenção e substituição de componentes. Nesse contexto, a avaliação do custo do desgaste se torna crucial para a gestão eficaz dos recursos e para a sustentabilidade econômica das operações mineradoras.

Nos próximos tópicos, examinaremos metodologias para a avaliação do desgaste e abordaremos estratégias para reduzir os custos associados ao desgaste dos equipamentos,

oferecendo uma visão abrangente e prática para a gestão eficiente dos recursos na indústria de mineração, como:

Contextualização da Importância do Desgaste na Mineração: A indústria da mineração depende da operação contínua e eficiente de equipamentos como britadores, peneiras vibratórias e chute de alimentação, cujo desgaste pode comprometer severamente a produtividade e a rentabilidade das operações. Entender o impacto econômico do desgaste é fundamental para otimizar a manutenção e prolongar a vida útil dos equipamentos.

Diferentes tipos de desgaste, como abrasão, impacto, erosão, corrosão e fadiga, afetam os equipamentos de forma variada. Cada tipo de desgaste tem suas características específicas que influenciam diretamente nos custos de manutenção e na disponibilidade dos equipamentos. Avaliar como cada tipo de desgaste se manifesta nos equipamentos é crucial para desenvolver estratégias de mitigação adequadas.

A avaliação do desgaste envolve o uso de técnicas tribológicas avançadas, como tribometria e simuladores de desgaste, que permitem quantificar o desgaste dos materiais sob diferentes condições operacionais. Essas metodologias não apenas estimam os custos associados ao desgaste, mas também orientam na seleção de materiais mais resistentes e na implementação de práticas de manutenção preventiva. Os custos diretos incluem aqueles relacionados à substituição de peças desgastadas, reparos emergenciais e paradas não programadas. Já os custos indiretos abrangem perdas de produção, aumento do consumo de energia e impactos ambientais. Avaliar ambos os tipos de custos são essenciais para calcular o custo total do desgaste ao longo do ciclo de vida dos equipamentos.

Algumas melhorias e práticas na manutenção adotadas:

Adoção de Manutenção Preditiva: Implementar técnicas de manutenção preditiva permite monitorar continuamente a condição dos equipamentos. Sensores e dispositivos de medição podem detectar sinais de desgaste, como vibrações anormais ou aquecimento excessivo, permitindo intervenções antes que falhas críticas ocorram.

Materiais e Componentes de Maior Durabilidade: A substituição de componentes desgastados por materiais mais resistentes ao desgaste, como revestimentos cerâmicos ou metálicos de alta resistência, pode aumentar a vida útil das peças e reduzir a frequência das manutenções.

Treinamento de Pessoal: Investir em treinamento contínuo para a equipe de manutenção garante que os operadores estejam atualizados sobre as melhores práticas,

técnicas de diagnóstico e manuseio adequado dos equipamentos, minimizando erros que podem levar a desgastes acelerados.

Planejamento de Manutenção: O estabelecimento de um cronograma de manutenção baseado na análise de dados históricos de desgaste pode otimizar os recursos, evitando manutenções excessivas e programadas nos momentos mais críticos da operação.

Algumas melhorias e técnicas que podem ser adotadas para redução de custos:

Análise de Causa Raiz: Identificar as causas principais de falhas recorrentes permite direcionar esforços para resolvê-las, evitando gastos desnecessários com manutenções corretivas.

Otimização dos Estoques de Peças: Manter um estoque adequado de peças sobressalentes, com base na análise de falhas históricas, pode reduzir o tempo de inatividade e os custos associados à aquisição urgente de componentes.

Integração de Tecnologias de Monitoramento: O uso de tecnologias como Internet das Coisas (IOT) e inteligência artificial (IA) para monitorar a condição dos equipamentos pode ajudar a prever falhas e otimizar o agendamento de manutenções.

Revisão de Contratos de Serviços: Avaliar e renegociar contratos com fornecedores de serviços e peças pode resultar em economias significativas, garantindo que os custos sejam justificados pela qualidade do serviço prestado.

Técnicas de monitoramento adotadas na indústria para auxiliar na redução de manutenções:

Sensores de Vibração: A instalação de sensores de vibração em equipamentos críticos permite monitorar a integridade das máquinas e detectar problemas antes que se tornem falhas catastróficas.

Termografia: A termografia infravermelha pode identificar pontos quentes em equipamentos elétricos e mecânicos, sinalizando potenciais problemas de desgaste ou falhas.

Análise de Óleo: A análise de óleo lubrificante pode fornecer informações sobre o desgaste interno dos componentes, permitindo a realização de manutenções antes que a falha ocorra.

Sistemas de Gestão de Manutenção: A implementação de sistemas de gestão de manutenção (como CMMS - Computerized Maintenance Management System) permite o

monitoramento em tempo real das atividades de manutenção, melhorando o planejamento e o rastreamento dos custos associados.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão

Com base nos dados apresentados, a análise dos custos de desgaste em uma indústria mineradora no período de cinco anos revela um impacto financeiro significativo de R\$ 37.305.031,53. Esse valor representa a soma dos desgastes sofridos por equipamentos essenciais para o processo produtivo, como britadores, moinhos, peneiras e chutes de alimentação do transportador. A análise cuidadosa dos vários tipos de desgaste (abrasivo, corrosão, erosão, fadiga e impacto) demonstra como cada um deles aumenta os custos operacionais e enfatiza a necessidade de métodos estratégicos para reduzi-los.

Com um custo total de R\$ 17.324.961,62, o moinho é o equipamento mais caro, representando aproximadamente 46,4% do custo total de desgaste. O desgaste abrasivo e a fadiga causados pela alta fricção e tensões cíclicas do equipamento são as principais causas disso. Esse conjunto de elementos torna o moinho particularmente suscetível a falhas, o que significa que é necessário fazer manutenção regular e comprar materiais mais resistentes.

O segundo equipamento mais caro é a peneira, que custa R\$ 8.782.372,99, principalmente devido ao desgaste abrasivo. Esse equipamento, que é vital para a separação de materiais, é constantemente afetado por partículas, aumentando significativamente os custos operacionais. O impacto e a vida útil da peneira podem ser reduzidos com melhorias no design e nos materiais usados.

Além disso, o britador, que foi responsável pela fragmentação inicial das rochas, também teve um alto custo de R\$ 8.019.372,25. Os principais responsáveis por esses custos são o desgaste por impacto e a abrasão, mostrando a importância de usar revestimentos mais duráveis e reforçar as partes mais importantes do equipamento.

Embora o chute de alimentação do transportador apresente o menor custo total entre os equipamentos, com R\$ 3.178.324,67, a corrosão e o desgaste abrasivo ainda constituem uma parte significativa dos custos.

A conclusão da análise é que o desgaste do equipamento é um dos principais fatores que aumentam os custos operacionais na indústria mineradora. Devido à sua importância no processo e às condições extremamente agressivas de operação, o moinho emerge como o principal responsável por esses custos. Investir em materiais mais duráveis, usar tecnologias de monitoramento preditivo e fazer manutenção preventiva são necessários para minimizar

esse impacto financeiro. Além disso, melhorias nos revestimentos protetores e na resistência ao impacto e à corrosão podem prolongar a vida útil dos equipamentos, reduzindo significativamente os custos operacionais.

A abrasão é o processo de desgaste mais comum e importante nos equipamentos analisados, especialmente nos moinhos e nas peneiras, devido às condições de operação nelas. O desgaste abrasivo ocorre no moinho durante a moagem, quando partículas duras e abrasivas, como minérios, são constantemente fragmentadas por forte fricção contra as superfícies internas do moinho. Esse processo é amplificado pela pressão e movimento constante dos corpos moedores. Com o tempo, o material começa a ser removido dos revestimentos do equipamento. A abrasão já ocorre na peneira durante a separação dos materiais processados. Isso ocorre porque partículas com alta dureza e bordas afiadas são projetadas contra as telas, aumentando o atrito causado pelo movimento vibratório. O desgaste acelera como resultado desse ciclo de fricção constante, o que significa que os componentes devem ser substituídos frequentemente.

Essa compreensão aprofundada dos custos de desgaste possibilita que a indústria implemente estratégias mais eficazes para a manutenção e operação de seus equipamentos, promovendo assim uma operação mais eficiente e economicamente sustentável a longo prazo.

5.2 Recomendação

A partir do trabalho realizado, recomenda-se os seguintes trabalhos futuros:

- Seleção de Materiais e Revestimentos Eficazes para Redução do Desgaste em Equipamentos de Mineração;
- Desenvolvimento e Implementação de Tecnologias de Monitoramento para Redução de Custos de Desgaste em Equipamentos de Mineração;
- Análise Comparativa de Métodos de Manutenção Preventiva para Aumentar a Durabilidade dos Equipamentos de Mineração.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABBOTT, D. A. **Understanding wear: key to reducing maintenance costs**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2001.

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. **The effect of particle size and shape on the erosive wear of ductile metals**. *Wear*, v. 126, n. 2, p. 109-122, 1988. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1134589>>. Acesso em: 15 jul. 2024.

ALKHATIB, H. **Corrosion engineering and cathodic protection**, 2017.

ANDRADE, J. A. **Manutenção de equipamentos industriais em ambientes severos**. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2012.

ARMSTRONG, R. W. **Tribology in mining**. Amsterdã: Elsevier, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM wear and erosion: test methods and protective coatings**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008. Disponível em: <<https://www.astm.org>>. Acesso em: 31 jul. 2024.

BABBIE, E. **Métodos de pesquisa de survey**. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

BERNAUS, R. R.; COULSON, J. R. **Structural corrosion: causes and control**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2007.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2013.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. Nova Iorque: Springer, 2015.

BHUSHAN, B. **Principles and applications of tribology**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2009.

BIRCHER, G.; SCHMUTZ, R. **Desgaste e sua medição**. São Paulo: Blucher, 2006. 198 p.

BLAU, P. J. **Friction science and technology: from concepts to applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

BLAU, P. J. **Tribology: friction, lubrication and wear**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

BRAGA, P. F.; PERES, A. E. C.; CHAVES, A. P.; LEITE, L. L. **Manual de mineração**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

BUDINSKI, K. G. **Engineering materials: properties and selection**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.

CHATURVEDI, M. C. **Microstructure-property correlations in titanium alloys**. Amsterdã: Elsevier, 2003.

CHAVES, A. P. **Britagem e peneiramento: uma introdução à teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2. ed. São Paulo: Editora Signus, 2012. v. 2.

COHEN, H. E. **Abrasão e atrito em britadores de mandíbula e impacto**. *Journal of Materials Science*, v. 20, n. 5, p. 1263-1275, 1985. Disponível em: <<https://link.springer.com/journal/10853>>. Acesso em: 15 ago. 2024.

CRESWELL, J. W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 4. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2014.

CZICHOS, H. **Overview of tribology: A survey of the fundamentals of tribology and the application of measurement and testing to the determination and presentation of friction and wear data**. *Tribology International*, v. 150, p. 1-28, 2020. Berlim. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/journal/0301679X>>. Acesso em: 15 ago. 2024.

CZICHOS, H. **Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. 1. ed. Amsterdã: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.

DAVIM, J. P. **Handbook of materials failure analysis with case studies from the construction industry**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019.

DENNY, R. **Wear and tear: Strategic management of mining equipment**. *Mining Engineering Journal*, v. 34, n. 2, p. 45-60, 2021. Disponível em: <<https://www.smenet.org/Mining-Engineering-Journal>>. Acesso em: 17 ago. 2024.

FINCH, James; BOYES, Gregory J. A. N. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation**. CRC Press, 2021.

GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2008.

GUPTA, A.; YAN, D. S. **Mineral processing design and operation: an introduction**. Oxford: Elsevier, 2006.

HAWK, J. A. **Wear mechanisms in abrasives**. *Tribology International*, v. 32, n. 5, p. 373-380, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/journal/0301679X>>. Acesso em: 17 ago. 2024.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions**. *Friction*, v. 5, p. 263-284, 2017. Disponível em: <<https://www.springer.com/journal/40544>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

HOLMBERG, Kenneth; MATTHEWS, Allan. **Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering**. 2nd ed. Elsevier, 2009.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward Arnold, 1992.

JIANG, X. **Principles of tribology**. Nova Iorque: Springer, 2017.

JOHNSON, R. **Desgaste mecânico: causas e prevenção**. Londres: Elsevier, 2010.

KAWATRA, S. K.; GHOSH, M. M. M. **Transport and Handling of Bulk Materials**. CRC Press, 2014.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1982.

KRAUSE, H. H. **Fadiga de materiais metálicos**. 2. ed. São Paulo: Ciência e Tecnologia dos Materiais, 2002.

LEEDY, P. D.; ORMROD, J. E. **Practical research: planning and design**. 11. ed. Pearson, 2017.

LEONARD, John W. **Bulk Material Handling**. 3rd ed. CRC Press, 2011.

MADSEN, K.; PROCHASKA, F.; SHAHANI, M. **Preventive maintenance and wear management in mining**. Journal of Mining Technology, v. 89, n. 3, p. 145-159, 2004. Disponível em: <<https://www.springer.com/journal/41812>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 332 p.

MARTINEZ, L. **Cost management in mining operations**. International Journal of Mining and Metallurgy, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/journal/ijmm>>. Acesso em: 27 jul. 2024.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. Metso Minerals, 2014.

METSO MINERALS. **Manutenção HP 400**. Metso Minerals, 2020.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2009.

MORRISON, J. M. D. **The Practical Guide to Grinding and Process Technology**. 2nd ed. Springer, 2016.

NOBLE, A. **Advances in screening technology**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2017.

NUNES, L. C. **Manuseio de materiais a granel**. Nova Iorque: Elsevier, 2018.

PARVIZPOUR, M.; AZIMI, M. **Wear and tribology: theory and practice**. Nova Iorque: Wiley, 2010. 320 p.

PEI, Y. T.; HUANG, T. D. **Introduction to tribology**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2012.

PENAGOS, J. J. **Efeito do refinamento da microestrutura e da adição de nióbio na resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos de alto cromo**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016. Tese (Doutorado em Ciências). Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/10/10134/tde-17102016-161243/>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1995.

RATIA, V.; MIETTUNEN, I.; KUOKKALA, V. T. **Surface deformation of steels in impact-abrasion: The effect of sample angle and test duration**. *Wear*, v. 301, n. 1–2, p. 94–101, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164812003456>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

RICHARDS, R. L.; FOX, M. A. **Handling and Processing of Bulk Materials**. 2nd ed. McGraw-Hill Education, 2006.

RIBEIRO, A. M.; BIANCHI, E. S. **Desgaste por abrasão: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2010. 216 p.

SAJJADI, S. A.; SALEHI, S. R. **A review on erosion wear in pipes and elbows**. *Procedia Materials Science*, v. 3, p. 27-32, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. São Paulo: Prova de Erudição, 2005.

SMITH, Daniel E. H. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy: An Introduction**. New York: Springer, 2015.

SMITH, J.; BROWN, A.; WILSON, M. **Cost analysis in mining operations**. *Journal of Mining Economics*, v. 34, n. 1, p. 45-60, 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-019-0043-2>>. Acesso em: 10 ago. 2024.

SMITH, J.; BROWN, A.; WILSON, M. **Cost analysis in mining operations**. *Journal of Mining Economics*, v. 25, n. 1, p. 78-92, 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-019-0045-0>>. Acesso em: 03 ago. 2024.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2011.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2005.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2013.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Advances in the understanding of the wear process**, 2006.

SUZUKI, R. S. **Projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre**. São Bernardo do Campo, SP: Centro Universitário da FEI, 2013. Projeto de pesquisa.

TAVARES, L. M. **Introdução à Engenharia de Minas**, 2017.

TYLCZAK, J. H.; HAWK, J. A.; WILSON, R. D. **Abrasive wear testing of steels**. *Wear*, v. 225-229, p. 1221-1230, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164898001597>>. Acesso em: 04 ago. 2024.

WANG, Z.; HUANG, W.; LIU, Y. **Wear mechanisms and modelling in mining equipment**. *Tribology International*, v. 52, p. 17-25, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X1100201X>>. Acesso em: 15 ago. 2024.

WOOD, R. J. K. **Understanding tribology: the science of friction, lubrication, and wear**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1997.

WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 7. ed. Amsterdã: Elsevier, 2015.

WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

ZHOU, Ying; ZHENG, Yufeng. **Surface Modification of Biomaterials: Methods Analysis and Applications**. Woodhead Publishing, 2008.

MOBLEY, R. K. (2002). **An Introduction to Predictive Maintenance** (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

JARDINE, A. K. S., LIN, D., & BANJEVIC, D. (2006). **A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510.

SHARMA, A., YADAVA, G. S., & DESHMUKH, S. G. (2011). **A literature review and future perspectives on maintenance optimization**. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 5-25.

VAGHEFI, M., ANCEV, T., & DORAN, T. (2012). **"Cost Analysis of Equipment Failure: A Study of Mining Equipment"**. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(2), 187-199.

ANDRADE, J. R.; SILVA, T. R.; ALMEIDA, M. F. **Gestão de Paradas não Programadas na Indústria de Mineração**. 2017. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

BASTOS, L. M. **Análise de Desgaste em Equipamentos de Mineração: Uma Abordagem Prática**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2016. 256 p.

CUNHA, P. S. **Materiais de Engenharia: Seleção e Aplicação em Equipamentos de Mineração**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017. 318 p.

FERNANDES, R. A.; SOUZA, C. P.; RIBEIRO, A. T. **Condições Adversas em Equipamentos de Mineração**. Revista Brasileira de Mineração, v. 12, n. 3, p. 300-310, 2016.

GONÇALVES, A. J. **Fadiga e Desgaste em Equipamentos de Mineração: Um Estudo de Caso**. 2014. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

LOPES, R. D.; TAVARES, L. A. **Desgaste e Eficiência em Britadores e Moinhos: Um Estudo de Caso**. 2011. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MEDIROS, J. R. **Gestão de Recursos na Indústria de Mineração**. Rio de Janeiro: Editora SBM, 2015. 230 p.

RIBEIRO, F. A.; FERREIRA, M. A. **Capacitação de Operadores na Indústria de Mineração: Efeitos sobre a Produtividade**. 2020. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

SANTOS, R. C.; ALMEIDA, V. P. **Análise do Custo Total de Propriedade em Equipamentos de Mineração**. 2018. 140 p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, L. P.; MARTINS, F. R. **Manutenção Preditiva: Conceitos e Aplicações em Mineração**. Revista de Engenharia de Minas, v. 15, n. 2, p. 105-115, 2019.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE MINERAÇÃO (SBM). **Relatório Anual 2019**. Brasília: SBM, 2019. 78 p.