



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



PEDRO AUGUSTO VILAÇA VIEIRA

**CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA
AO DESGASTE PARA CHUTES DE TRANSFERÊNCIA**

OURO PRETO - MG
2022

PEDRO AUGUSTO VILAÇA VIEIRA

pedro.vilaca@aluno.ufop.edu.br

pedrovilacavieira@gmail.com

**CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA
AO DESGASTE PARA CHUTES DE TRANSFERÊNCIA**

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

Professor orientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles

Professor coorientador: DSc. José Jimmy Penagos

**OURO PRETO – MG
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V658c Vieira, Pedro Augusto Vilaça.
Classificação de materiais em função da resistência ao desgaste para
chutes de transferência. [manuscrito] / Pedro Augusto Vilaça Vieira.
Pedro Augusto Vilaça Vieira. - 2023.
61 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Carvalho Teles.
Coorientador: Dr. José Jimmy Penagos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Desgaste mecânico. 2. Resistência de materiais. 3. Materiais -
Classificação. I. Vieira, Pedro Augusto Vilaça. II. Teles, Vinicius Carvalho.
III. Penagos, José Jimmy. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 621



REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Augusto Vilaça Vieira

Classificação de materiais em função da resistência ao desgaste para chutes de transferência

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

Aprovada em 09 de março de 2023

Membros da banca

Dr - Vinícius Carvalho Teles - Orientado - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - José Jimmy Penagos - Coorientador - Instituto Tecnológico da Vale
Dr - Igor Cezar Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr - Eleir Mundim Bortoleto - Instituto Tecnológico da Vale

Vinícius Carvalho Teles, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 17/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/03/2023, às 10:50, 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 **0487735** e o código CRC **F6EF587B**.

Agradeço a Deus, a minha família, aos meus professores e colegas por sempre me apoiarem nesta jornada que é viver em prol dos nossos sonhos.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, aos os meus pais, Janete Cristina e Manoel Lino, e aos meus irmãos Gustavo Henrique e Letícia, que são minha base, me dão forças para superar os desafios da vida e me inspiram a evoluir constantemente. A eles dedico este trabalho.

A Universidade Federal de Ouro preto pelo ensino gratuito e de qualidade. Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, sempre solícitos em transmitir conhecimento as novas gerações.

A Vale e ao Instituto Tecnológico Vale pela oportunidade de aprender e contribuir para o desenvolvimento científico-sustentável da engenharia. Em especial ao meu tutor José Jimmy Penagos e aos colegas Renato Chaves, Mario José e Luis Alfredo pelos ensinamentos e companheirismo nos desafios profissionais.

“Talvez o nosso melhor plano possível seja seguir aquilo que a consciência nos dita. De outra forma, no mínimo temos de viver com a sensação de que nos traímos, sabendo que estamos a aturar o que não somos capazes de tolerar”.

Jordan B. Peterson

RESUMO

O desgaste excessivo de componentes industriais é uma das causas-raiz de paradas não programadas, elevados custos de manutenção e maior impacto ambiental nas cadeias produtivas. Quando associado à mineração, mostra-se presente nos sistemas de transporte de materiais granulados, ao serem transferidos ou terem seu fluxo redirecionado, entre correias transportadoras, pelos chutes de transferência. As placas de desgaste que revestem os chutes, os tipos de minério (abrasivos) e as interações entre eles constituem o tribossistema alvo deste estudo, que almeja um método assertivo e replicável capaz de correlacionar o campo e o laboratório. A aplicação de avanços tecnológicos que proporcionem maior competitividade, sustentabilidade e menores custos está atrelada às metodologias que guiaram a produção, reprodução e análise dos dados. Posto isso, o objetivo deste trabalho é apresentar uma classificação laboratorial dos materiais comerciais, que auxilie na seleção de materiais para chutes de transferência da indústria extrativo-mineral. Este trabalho se encarregou de aprimorar as metodologias de ensaio de desgaste por abrasão e impacto, buscando aumentar a confiabilidade dos testes e proporcionar assertividade na alocação de recursos no emprego de materiais de engenharia. Foi empregado tribômetro tambor-impulsor para submeter os materiais candidatos aos ensaios que permitem quantificar o desgaste por abrasão e impacto. O estudo vislumbra classificar materiais comerciais usados nas placas de desgaste dos chutes de transferência, auxiliando na seleção de materiais de construção mecânica para essa aplicação, capaz de aumentar a longevidade dos equipamentos, diminuir as ocorrências de lucro cessante relacionadas aos chutes de transferência e contribuir para sustentabilidade das atividades industriais.

Palavras-chave: Desgaste Abrasão – Impacto, Classificação de Materiais, Chutes de Transferência.

ABSTRACT

Excessive wear of industrial components is one of the root causes of unscheduled downtime, high maintenance costs and greater environmental impact on production chains. Associated with mining, it is relevant in the transport systems of granulated materials, when they are transferred or have their flow redirected, between conveyor belts, by transfer chutes. The wear plates that cover the chutes, the types of ore (abrasives) and the interactions between them constitute the target tribosystem of this study, which aims at an assertive and replicable method capable of correlating the field and the laboratory. The application of technological advances that provide greater competitiveness, sustainability and lower costs are linked to the methodologies that guided the generation, reproduction and analysis of data. That said, the objective of this work is to present a laboratorial material classification capable of helping in the selection of materials for transfer chutes. This work was responsible for improving the abrasion and impact wear testing methodologies, seeking to increase the reliability of the tests and provide assertiveness in the allocation of resources. Drum-impeller tribometer was used to submit candidate materials to tests in different conditions of impact angle and with different abrasives. The study aims to classify commercial materials used in the wear plates of transfer chutes, helping in the selection of engineering materials for this application, capable of increasing the longevity of the equipment, reducing the occurrence of lost profit related to the transfer chutes and contributing to sustainability of industrial activities.

Key words: Abrasion – Impact wear, Material Ranking, Transfer Chutes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo do processo de beneficiamento de minério Fonte: Site da mineradora Vale (Acesso: 21/04/2022)	5
Figura 2: Modelo virtual de uma bancada transportadora Fonte: Site Grabcad Community (Acesso: 25/04/2022)	6
Figura 3: Revestimento interno de chute de transferência Fonte: Site Grabcad Community (Acesso 25/04/2022)	7
Figura 4: Vista isométrica de quatro projetos diferentes de chutes de transferência, indicadas as velocidades das partículas transportadas. O mesmo gradiente de cores foi utilizado para todos os modelos. Fonte: (ILIC, 2019)	8
Figura 5: Ilustração esquemática dos principais tipos de desgaste Fonte: Adaptado de (GAHR, 1987)	10
Figura 6: Classificação dos processos de desgaste por modos de desgaste Fonte: Livro “Wear control handbook” (PETERSON, 1980)	10
Figura 7: Abrasão em sistemas mecânicos e tribológicos Fonte: (GAHR, 1987)	11
Figura 8: Abrasão de dois e três corpos Fonte: Adaptado de GAHR, 1987	11
Figura 9: Micrografia eletrônica de varredura em ranhura de desgaste em aço austenítico e rascunho da ranhura. Fonte: Adaptado de GAHR, 1998	13
Figura 10: Interações físicas entre partículas abrasivas e superfícies de materiais Fonte: Adaptado de GAHR, 1998	14
Figura 11: Diferenças entre abrasão 2-corpos, abrasão 3-corpos e erosão. Fonte: Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017	15
Figura 12: Esquema de um chute de transferência simulado com partículas em movimento Fonte: (SILVA, J.R., 2016)	16
Figura 13: Esquema do tribômetro roda de borracha Fonte: Adaptado de HAWK et al., 1999	18
Figura 14: Representação esquemática do tribômetro tambor-impulsor Fonte: Adaptado de HAWK, 1999	20
Figura 15: Gradiente de desgaste na profundidade dos chutes de transferência Fonte: Adaptado de (BLICKENSDEFER, 1988)	21
Figura 16: Fluxograma de etapas da monografia Fonte: Pesquisa direta, 2022	24

Figura 17: Tribômetro Tambor-Impulsor com rotor central de 90° (a) e 60° (b) instalados. Fonte: Pesquisa direta (2022)	25
Figura 18: Esquema dos corpos de prova utilizados nos ensaios de Tambor-Impulsor Fonte: Pesquisa direta (2022)	26
Figura 19: Microestrutura do HCCI analisada em MEV. Fonte: Pesquisa direta (2022)	29
Figura 20: Microestrutura do Weld analisada em MEV. Fonte: Pesquisa direta (2022)	30
Figura 21: Microestrutura do WC-Co + NCI analisada em MEV, interface entre a matriz de ferro fundido nodular e as partículas de metal duro WC-Co. Fonte: Pesquisa direta (2022)	30
Figura 22: Microestrutura do material cerâmico analisada em MEV. Fonte: Pesquisa direta (2022)	31
Figura 23: Microestrutura do aço ferramenta martensítico H13. Fonte: Pesquisa direta (2022)	31
Figura 24: Gráfico de perda volumétrica acumulada ao longo dos ensaios de 60 minutos. Fonte: Pesquisa direta (2022)	32
Figura 25: Gráfico de perda volumétrica total após ensaios de 60 minutos. Fonte: Pesquisa direta (2022)	32
Figura 26: Amostras cerâmicas fragmentadas durante ensaio tambor-impulsor. Fonte: Pesquisa direta (2022)	33
Figura 27: Amostras revestidas por solda (Weld) com presença de trincas expressivas na região interna do corpo de prova. Fonte: Pesquisa direta (2022)	34
Figura 28: Amostras do material bimetálico WC-Co após ensaio Tambor-Impulsor. Nota-se a presença dos carbonetos de tungstênio dispersos na matriz de ferro fundido nodular. Fonte: Pesquisa direta (2022)	35
Figura 29: Amostras de HCCI (a) e aço H13 (b) após ensaio Tambor-Impulsor. Fonte: Pesquisa direta (2022)	35
Figura 30: Corpos de prova H13 e HCCI após ensaio. Regiões de borda arredondadas e riscadas, regiões internas rugosas sem riscos. Fonte: Pesquisa direta (2022)	36
Figura 31: Taxa de desgaste dos materiais H13 e HCCI submetidos ao ensaio tambor-impulsor com variação do ângulo de incidência de abrasivos. Fonte: Pesquisa direta (2022)	37
Figura 32: Perdas volumétricas acumuladas dos materiais H13 e HCCI submetidos a ensaios de abrasão e impacto à 90° e 60°. Fonte: Pesquisa direta (2022)	38
Figura 33: Perdas volumétricas das regiões externas dos corpos de prova dos materiais H13 e HCCI submetidos a ensaios de abrasão e impacto à 90° e 60°. Fonte: Pesquisa direta (2022)	39

Figura 34: Perdas volumétricas das regiões internas dos corpos de prova dos materiais H13 e HCCI submetidos a ensaios de abrasão e impacto à 90° e 60°. Fonte: Pesquisa direta (2022)40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das diferenças de design entre os chutes de transferência apresentados na Figura 4. Fonte: (ILIC, 2019)	9
Tabela 2 - Tabela de procedimentos normatizados para testes em tribômetro roda de borracha Fonte: Adaptado de ASTM G65-16, 2017	19
Tabela 3 - Comparação dos aspectos da pesquisa qualitativa com os da pesquisa quantitativa Fonte: (FONSECA, 2002)	23
Tabela 4 - Comparação entre o método quantitativo e qualitativo Fonte: Adaptado de (POLIT et al, 2004)	23
Tabela 5 – Materiais testados nos ensaios de tambor-impulsor.	24
Tabela 6 - Parâmetros de ensaio em tribômetro tambor impulsor.....	25
Tabela 7 - Variáveis e indicadores do trabalho.	28
Tabela 8 – Materiais testados nos ensaios de tambor-impulsor. Fonte: Pesquisa direta (2022)	29
Tabela 9: Dados de: perda volumétrica, desvio padrão e coeficiente de variação para o ensaio. Fonte: Pesquisa direta (2022)	33
Tabela 10: Taxa de desgaste, desvio padrão e coeficiente de variação das regiões de borda, interna e total. Fonte: Pesquisa direta (2022)	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Cadeia produtiva do minério	5
2.1.1.	Chutes de transferência	6
2.1.1	Critérios de design dos chutes de transferência.....	7
2.2	Mecanismos de desgaste.....	9
2.2.1	Desgaste por abrasão	11
2.2.2	Micromecanismos de desgaste por abrasão.....	12
2.2.3	Desgaste por erosão	14
2.3	Desgaste em chutes de transferência	15
2.4	Ensaio de desgaste em laboratório	17
2.4.1	Tribômetro Roda de Borracha	18
2.4.2	Tribômetro Tambor Impulsor.....	19
2.5	Correlação campo-laboratório	20
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	Tipo de Pesquisa.....	22
3.2	Materiais e Métodos	24
3.2.1	Ensaio de Abrasão e Impacto	25
3.2.2	Variáveis e indicadores.....	27
3.3	Instrumentos de coleta de dados	28
3.4	Tabulação de dados	28
3.5	Considerações finais	28
4.	RESULTADOS.....	29
4.1	Caracterização dos materiais	29
4.2	Ensaio Tambor-Impulsor	32

	viii
4.3 Ensaio Tambor-Impulsor com variação do ângulo de incidência.....	37
5. CONCLUSÃO.....	41
5.1 Conclusões dos ensaios para classificação dos materiais.....	41
5.2 Recomendações e trabalhos futuros	42
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	43
ANEXO.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Tribologia foi definido como “A ciência e a tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e as práticas relacionadas a elas” (DOWSON, 1979). Documentada em meio aos avanços tecnológicos desde as experimentações de Leonardo da Vinci (Atrito – 1508 d.C.), essa área de estudos é atualmente responsável pela compreensão dos fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação, em paralelo às suas aplicações viáveis e sustentáveis em toda a cadeia produtiva global.

A mineração é um setor onde atrito e desgaste representam considerável parcela do custo de manutenção. As reposições prematuras dos elementos envolvidos na cadeia produtiva de minério geram não apenas custos excessivos operacionais como acréscimo dos danos ambientais oriundos das atividades (RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013). Portanto, desenvolvimentos nesta área mostram-se cada vez mais relevantes e benéficos à competitividade de grandes empresas do setor extrativo-mineral, quando colocado sob óptica da quarta revolução industrial (HOLMBERG, 2017).

Os equipamentos responsáveis pela extração e manuseio das bilhões de toneladas de minério produzidas no mundo sofrem com aceleradas taxas de desgaste que levam seus componentes ao final de suas vidas úteis de maneira precoce. Sendo esses os precursores de problemas no sistema produtivo como: manutenções corretivas (paradas não-programadas), perdas de eficiência nos processos, lucros cessantes, e até mesmo riscos associados à segurança operacional (SINATORA, 2005).

O sistema Transportador de Correias (TC) é amplamente utilizado na indústria mineral devido à sua ótima eficiência operacional. O chute de transferência, equipamento empregado para transferir minério de um transportador para outro, é um dos componentes principais do TC que é submetido a condições críticas de desgaste pelo contato com o material transportado. Para isso, as placas de revestimento, fabricadas com materiais resistentes ao desgaste são utilizadas como sacrifício para proteger as estruturas dos chutes (HOCKE, 1973). Considerando suas necessidades de reparo ou substituição constantes, avalia-se o uso de diferentes materiais que possam superar as condições de operação comumente agressivas envolvendo fenômenos de abrasão e impacto (CHEN; BISWAS; ROBERTS; O'SHEA;

WILLIAMS, 2017). Nesse tribossistema, os desgastes abrasivos e erosivos são predominantes e ocorrem devido ao deslizamento e impacto do material transportado (GATES, 2015).

A correlação entre as condições reais de operação e os testes laboratoriais são consideradas um desafio pela comunidade científica (GATES, 2015). Testes em laboratório são mais desejados pois permitem maior controle das variáveis, podem ser feitos em tempos menores e utilizam pequenas amostras dos materiais estudados; enquanto os testes de campo apresentam maiores desafios por envolver: paradas de produção, custos maiores e maior número de variáveis influenciando a resposta do teste (BLICKENSDEFER, 1988). A fim de otimizar a correlação de campo e laboratório é desejável reproduzir os mecanismos de desgaste presentes, assim, ensaios de campo podem validar metodologias laboratoriais (GAHR, 1987).

Neste trabalho foi utilizado o equipamento de abrasão e impacto desenvolvido no Instituto Tecnológico Vale – ITV (CAMPOS, 2021), para classificar os materiais comerciais de possível aplicação em campo quanto à resistência ao desgaste.

A classificação decorrente do presente trabalho proverá maior eficácia na seleção de diferentes materiais: Ferro Fundido Branco (FFB) alto cromo, ferro fundido nodular com insertos de metal-duro (WC-Co), cerâmico 92% alumina (Al₂O₃), aço revestidos por solda (Cr) e aço ferramenta martensítico (H13). Os dados gerados apontaram qual classe de material apresenta maior resistência ao desgaste, possibilitando maior vida útil operacional dos equipamentos, minimizando manutenções e paradas não programadas.

Neste quesito, o presente trabalho apresenta a seguinte pergunta:

Qual a classificação dos materiais comerciais de revestimentos de chutes submetidos aos ensaios de abrasão e impacto?

1.2 Justificativa

O desgaste dos componentes mecânicos gera impactos consideráveis para a indústria e o meio ambiente. Os danos causados ao sistema produtivo alcançam percentuais significativos das despesas operacionais (SINATORA, 2005), ao passo que as perdas de eficiência decorrentes do atrito agravam também a emissão de poluentes e desperdício energético das atividades econômicas (HOLMBERG, 2019).

Torna-se necessário o melhor conhecimento dos tribossistemas existentes e o desenvolvimento de metodologias que permitam reprodução laboratorial das condições reais de trabalho dos materiais. O desgaste sofrido pelos chutes de transferência é complexo e difícil de ser reproduzido em laboratório, pois mistura mecanismos de abrasão e impacto. Portanto, desenvolver uma classificação de materiais usualmente aplicados no revestimento de chutes torna a seleção de materiais mais assertiva e diminui custos com paradas não programadas e manutenção.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Propor classificação de materiais aplicáveis aos revestimentos de chutes de transferência, em função da resistência ao desgaste.

1.3.2 Específicos

- Revisar literatura de Tribologia acerca dos assuntos que serão abordados;
- Realizar ensaios de desgaste em tribômetro de tambor nos materiais candidatos à aplicação;
- Classificar os materiais testados quanto ao desgaste sofrido;

1.4 Estrutura do Trabalho

O seguinte trabalho é constituído pelos tópicos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados, Discussões, Conclusão e referências utilizadas.

O capítulo a seguir contém uma revisão de toda bibliografia envolvida, abordando os tribossistemas presentes nos chutes de transferências, resultados obtidos em campo, equipamento para testes, parâmetros de ensaio e candidatos classificados pelo estudo.

A apresentação da literatura base, os resultados de campo iniciais, a metodologia dos ensaios de desgaste em tribômetro tambor e as etapas de caracterização metalográfica serão citados no terceiro capítulo.

Os resultados, presentes no capítulo seguinte, dispõem análises dos seguintes tópicos:

1. As propriedades e características metalográficas identificadas;
2. Resistência dos materiais candidatos ao desgaste por abrasão e impacto;
3. Relação das perdas volumétricas com os diferentes ângulos de incidência das partículas abrasivas;

E por fim, o quinto capítulo contém as principais conclusões do trabalho, que validam os resultados obtidos e a classificação subsequente dos materiais candidatos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cadeia produtiva do minério

As principais matérias-primas do aço são extraídas, beneficiadas e transportadas por diversos equipamentos com a presença de atrito e desgaste entre componentes mecânicos e minério. As rotas de manejo são compostas, em grande parte, por transportadores de correia, compostos por correias transportadoras e chutes de transferência, conjunto denominado conhecido também por bancada transportadora. Um exemplo de rota percorrida pelo minério de ferro durante o beneficiamento é ilustrado na Figura 1 (VALE, 2021).



Figura 1: Fluxo do processo de beneficiamento de minério
 Fonte: Site da mineradora Vale (Acesso: 21/04/2022)

Nota-se a gama de diferentes etapas e equipamentos envolvidos no processamento do mineral extraído e a presença crucial das bancadas transportadoras no sistema, responsáveis por grande parte do transporte em minas e usinas e, nos portos por exemplo, responsáveis e presentes na totalidade das realocações do produto, até sua exportação. O manuseio contínuo do minério envolve não apenas rotas unidirecionais, mas também pontos de alimentação e redirecionamento com possível variação de altura, onde são empregados os chutes de transferência.

As operações de manuseio de minério de ferro em grande escala apresentam excesso de desgaste nos componentes transportadores, causador de falhas precoces nos equipamentos e, conseqüentemente, altos custos com manutenção e atrasos provenientes das paradas indesejadas. Sendo assim, a seleção e melhoria de materiais e dos processos de fabricação das placas de revestimento dos chutes tem foco na mitigação das perdas por desgaste, tal como toda atividade minerária e metalúrgica (SINATORA, 2005).

2.1.1. Chutes de transferência

O sistema logístico envolto ao minério de ferro trouxe desafios para a engenharia que se renovam constantemente, frente as necessidades de reduzir custos, demanda e produção crescentes. O advento das correias transportadoras trouxe maior facilidade às operações, vista sua possível adaptação para diferentes terrenos e situações. Posteriormente, as limitações de curvas das correias e a necessidade de variar a velocidade do material transportado foram supridas pela adição de um componente ao sistema: os chutes de transferência (ROBERTS, 2001). Um exemplo de bancada transportadora é visualizado na Figura 2.

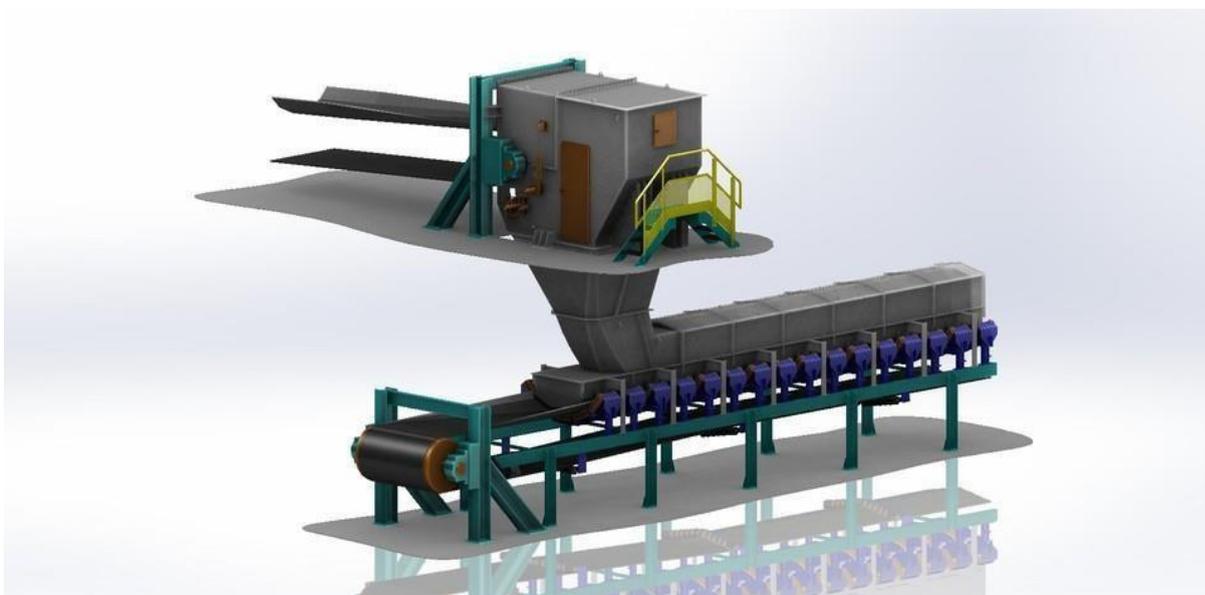


Figura 2: Modelo virtual de uma bancada transportadora
Fonte: Site Grabcad Community (Acesso: 25/04/2022)

Considerado elemento crucial dos conjuntos de bancadas transportadoras (Figura 2), os transportadores de correia são responsáveis pelo escoamento e redirecionamento contínuo do minério de ferro para as próximas etapas do processo industrial. Amplamente utilizados em processos à seco, as condições de trabalho à que são submetidos envolvem diversas

variáveis, entre elas estão a quantidade de material passante, ângulos de incidência, diferença de nível entre as etapas e velocidade de queda do minério (SILVA, J.R., 2016).

Na Figura 2 o modelo do equipamento permite visualizar os diferentes níveis de disposição de correias transportadoras e direções de fluxo entre elas. Os chutes são projetados de maneira a impedir o impacto no transportador inferior ou mesmo a projeção de minério para fora do sistema, reduzindo a velocidade do minério de ferro até a próxima etapa com sua geometria (MESQUITA, 2017).

A solução usual para amenizar o desgaste sofrido pelos chutes de transferência e evitar vazamentos subsequentes é o emprego de placas de revestimento em suas partes internas, constituídas por materiais resistentes da engenharia e capazes de estender a vida útil do equipamento (GATES, 2003).

Os revestimentos internos supracitados podem ser visualizados na Figura 3.

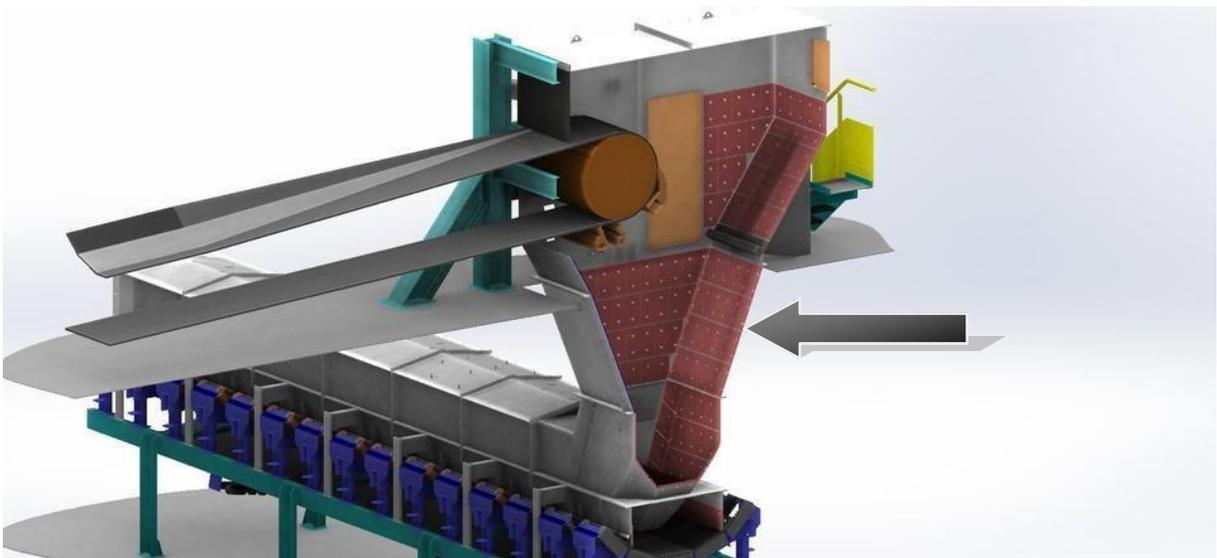


Figura 3: Revestimento interno de chute de transferência
Fonte: Site Grabcad Community (Acesso 25/04/2022)

2.1.1 Critérios de design dos chutes de transferência

Neste tópico é discutida a importância da etapa de projeto dos equipamentos, onde são feitas considerações de geometria, revestimentos e ângulos de impacto. Existem fatores independentes que determinam a eficácia do processo de transporte por chutes de transferência: as propriedades do minério e sua vazão são parâmetros importantes para análise do sistema (ROBERTS, 2001).

Para melhor exercerem sua função na cadeia logística do minério e diminuir os custos com manutenção, reposição e entupimentos de fluxo, critérios de design foram desenvolvidos a fim de otimizar o uso dos chutes de transferência na indústria (ILIC, 2019).

Alguns conceitos de projeto que interferem na eficácia do equipamento são: altura e geometria da estrutura, propriedades mecânicas dos materiais de revestimento relacionadas à baixa fricção e alta resistência ao desgaste, o ângulo de impacto do minério nas placas e a velocidade do fluxo de materiais (GATES, 2003). A não aplicação ou aplicação incorreta destes critérios gera custos financeiros e ambientais para a operação (HOLMBERG, 2017).

Os revestimentos internos dos chutes podem ser dispostos de diferentes maneiras, visando maior eficiência de transporte, com menor desgaste dos componentes e fluxo ininterrupto de material. Em seu trabalho de desenvolvimento de critérios para design de chutes de transferência, Dusan Ilic abordou quatro modelos (Figura 4) em simulações de carregamento, que possibilitou visualizar a influência destas características estruturais no desempenho dos equipamentos (ILIC, 2019).

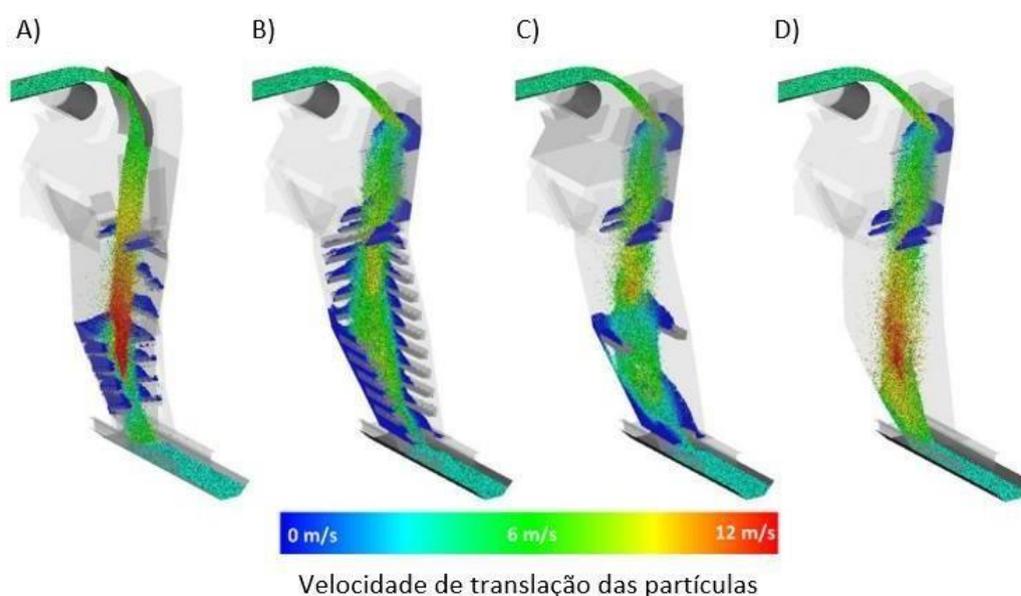


Figura 4: Vista isométrica de quatro projetos diferentes de chutes de transferência, indicadas as velocidades das partículas transportadas. O mesmo gradiente de cores foi utilizado para todos os modelos.

Fonte: (ILIC, 2019)

Tabela 1: Descrição das diferenças de design entre os chutes de transferência apresentados na Figura 4.

Variações de design e respectivas descrições

A)	Defletor Curvo, Chute 70°
B)	Defletor de caixa de rocha, calha de 60°, calha de carga reta de 45°
C)	Igual à B, mas apenas uma borda no meio
D)	Defletor Rock-box, Colher de Carga Curvada, Corte de 45°

Fonte: (ILIC, 2019)

Apesar dos critérios já desenvolvidos para aprimorar as aplicações dos chutes em diversas indústrias, as severas condições de operação e diferentes tipos de carregamento à que são submetidos ainda apresentam desafios para a seleção de materiais (HOCKE, 1973; ROBERTS, 2001; ILIC, 2019).

2.2 Mecanismos de desgaste

De acordo com a norma DIN 50320 (DIN 50320, 1979) os mecanismos de desgaste podem ser classificados em quatro categorias principais. São elas: adesão, abrasão, reação triboquímica e fadiga.

- Adesão: Formação de pontos adesivos interfaciais.
- Abrasão: Remoção de material devido à arrancamento.
- Reação triboquímica: Formação de produtos de reação química como resultado de interações químicas entre elementos do tribosistema iniciado por ação tribológica.
- Fadiga: Fadiga e formação de trincas nas regiões da superfície devido a tensões cíclicas, resultando em separação de material.

A Figura 5 explicita as principais categorias de desgaste.

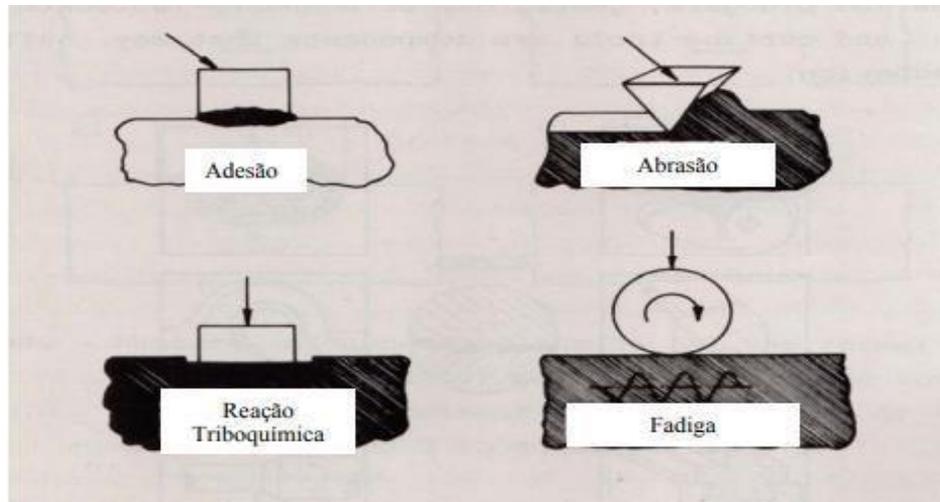


Figura 5: Ilustração esquemática dos principais tipos de desgaste
Fonte: Adaptado de (GAHR, 1987)

Além da classificação normativa, existem também vários termos referentes aos tipos de ações na interface de um corpo sólido. Em função do movimento de interfaces, elas variam entre deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo da cinemática presente no sistema (PETERSON, 1980), explicitados na Figura 6.

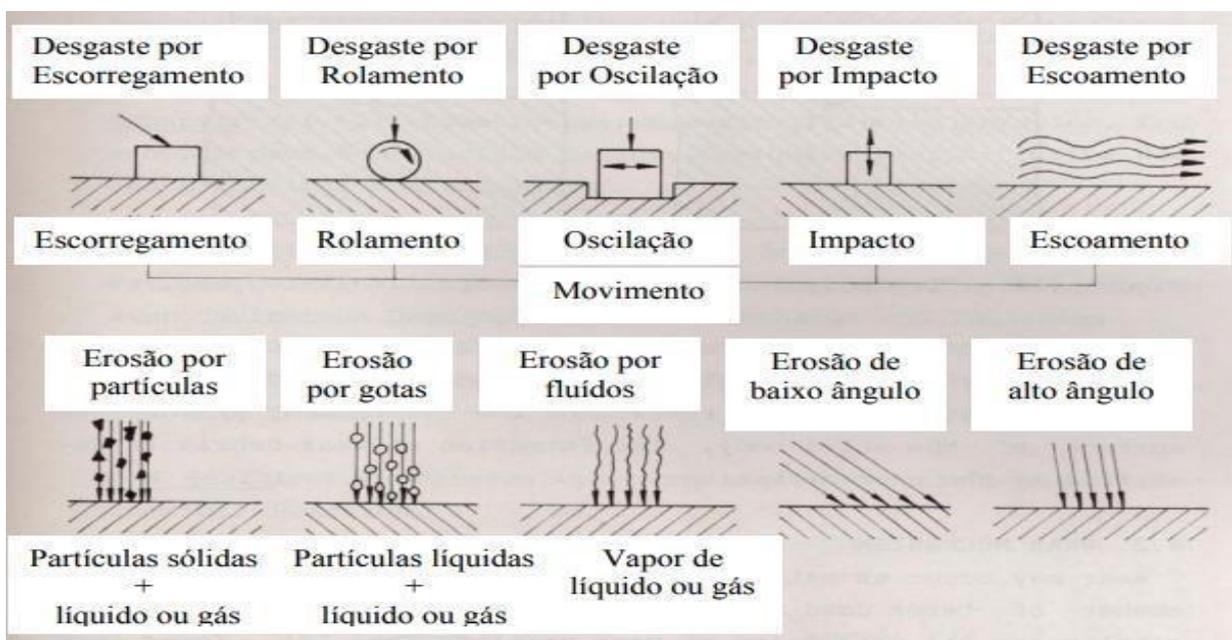


Figura 6: Classificação dos processos de desgaste por modos de desgaste
Fonte: Livro "Wear control handbook" (PETERSON, 1980)

2.2.1 Desgaste por abrasão

O desgaste por abrasão acontece quando partículas duras entram na interface de movimento de corpos relativos, podendo ser provenientes de processos produtivos ou fragmentos de materiais removidos durante trabalho, que assumem a mesma posição de elemento abrasivo do sistema (GAHR, 1998).

Em sua grande maioria, equipamentos mecânicos industriais sofrem com o desgaste abrasivo durante operação. Alguns tribossistemas onde o desgaste por abrasão é predominante são apresentados na Figura 7.

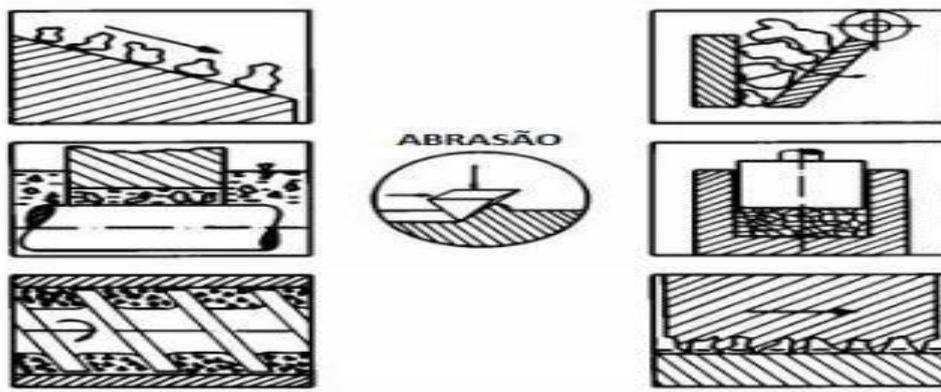


Figura 7: Abrasão em sistemas mecânicos e tribológicos
Fonte: (GAHR, 1987)

Os processos de desgaste por abrasão podem ser classificados também quanto ao número de triboelementos, chamado de desgaste a dois corpos quando composto apenas por dois elementos e desgaste a três corpos quando sob ação de partículas sólidas pressionadas entre superfícies, conforme pode-se observar na Figura 8, ilustrado por Zum Gahr em seu livro “Microstructure and wear of materials” (GAHR, 1987).

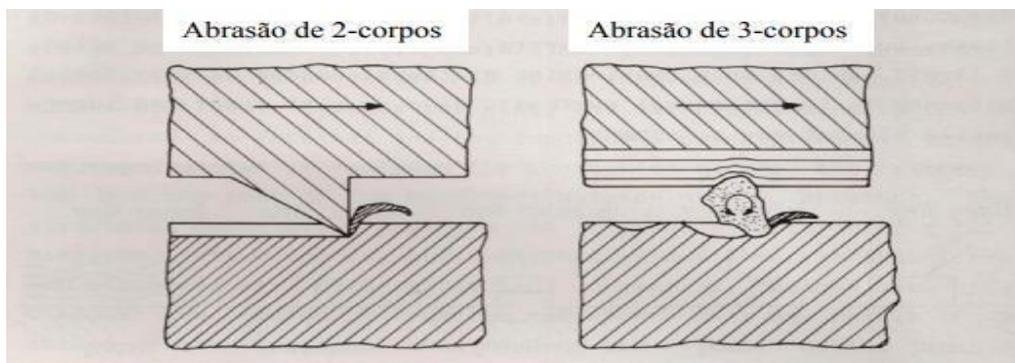


Figura 8: Abrasão de dois e três corpos
Fonte: Adaptado de GAHR, 1987

Zum Gahr diferencia os dois mecanismos quanto ao comportamento das partículas duras, sendo elas protuberâncias ou embutidas na abrasão de dois corpos enquanto na abrasão por três corpos podem se movimentar livremente, rolando ou deslizando, entre as superfícies de contato (GAHR, 1998).

Ao analisar os fenômenos em laboratório, foi observada a maior severidade na remoção de material em tribossistemas de dois corpos, comparado ao de três corpos (HUTCHINGS; SHIPWAY 2017). Essa diferença entre os dois tribossistemas é explicada pela energia perdida pelo abrasivo ao rolar pelas superfícies de contato, que seria responsável pelo arrancamento de material.

A diferença de abrasividade entre os tipos de sistemas de desgaste abrasivo foi conceituada em 1987 por Gahr, ao perceber a diferença de comportamento de materiais sólidos homogêneos e heterogêneos. Os materiais homogêneos conferem menor severidade de abrasão quando a relação de durezas da superfície e do abrasivo são semelhantes e alta severidade quando a dureza do abrasivo for pelo menos 1,2 vezes maior que a da superfície (GAHR, 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Quando analisados os materiais heterogêneos que possuem matriz mole e segunda fase mais dura, a severidade será menor enquanto o abrasivo apresentar menor dureza que a fase dura do material (GAHR, 1987).

Posto isso, os desgastes por abrasão foram classificados em (GAHR, 1987):

- Abrasão suave: Relação dureza partícula abrasiva e superfície menor/igual a 1;
- Abrasão severa: Relação dureza partícula abrasiva e superfície maior que 1, ou seja, dureza do abrasivo excede a da superfície de contato.

2.2.2 Micromecanismos de desgaste por abrasão

Conforme estudos de Gahr, os mecanismos de desgaste por abrasão são identificados e classificados também em escala microscópica, onde os abrasivos interagem com o material ocasionando microcortes, microlascamentos, microsulcamentos e micro-fadigas na superfície de desgaste. A severidade dos danos causados pelos micromecanismos está relacionada à relação de dureza dos materiais da superfície de contato e dos abrasivos, envolvendo também as variações de homogeneidade ou heterogeneidade microestrutural (GAHR, 1987).

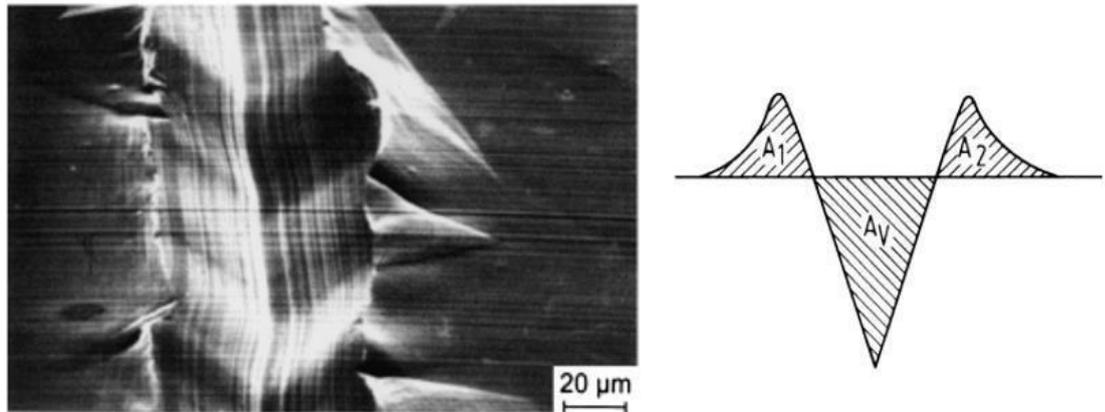


Figura 9: Micrografia eletrônica de varredura em ranhura de desgaste em aço austenítico e rascunho da ranhura.

Fonte: Adaptado de GAHR, 1998

Os quatro micromecanismos de desgaste por abrasão foram descritos pelo autor:

- Microcorte: remoção de material sem deformação plástica, ocasionando riscos superficiais e formação de microcavaco.
- Microlascamento: oriundo da concentração de tensões aplicadas pelo abrasivo na superfície de contato, ao ponto que superam a tensão crítica, formando e propagando trincas no material.
- Microsulcamento: deformação plástica sem perda de material, que se acumula nas laterais conforme deslocamento do material deformado.
- Micro-fadiga: resultado de microsulcamentos e microindentações sucessivos no material que levam à perda de massa ao ultrapassar os limites de deformação plástica do material.

É possível visualizar os micromecanismos do desgaste por abrasão na Figura 10:

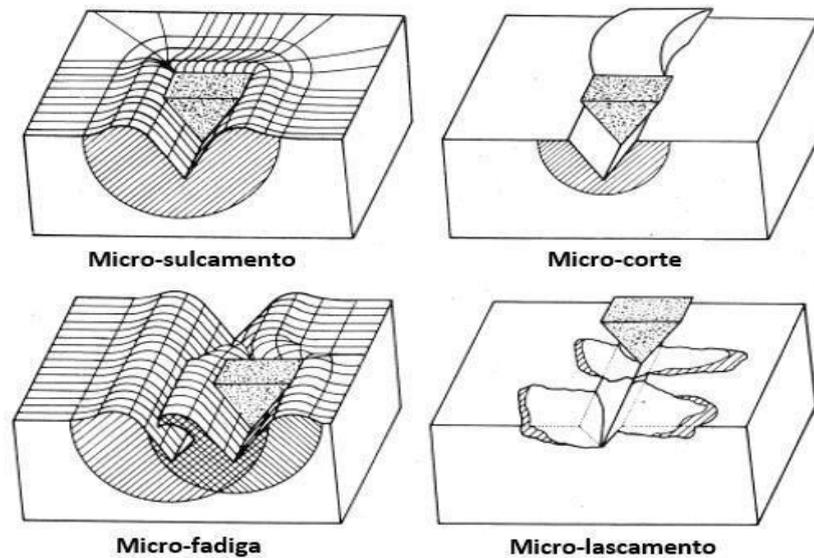


Figura 10: Interações físicas entre partículas abrasivas e superfícies de materiais
 Fonte: Adaptado de GAHR, 1998

2.2.3 Desgaste por erosão

O desgaste erosivo ocorre quando partículas duras, transportadas por fluxo de gás ou líquido, atingem uma superfície sólida causando interações entre o abrasivo e os corpos do tribossistema. A severidade do desgaste está diretamente ligada ao tamanho das partículas que colidem, o ângulo de incidência, a velocidade de impacto e as propriedades do material alvo (GAHR, 1998). Também definido por Peter Blau (1995) como sendo o “desgaste por perda progressiva de material de uma superfície sólida devido a interação mecânica com um fluido multicomponente ou impacto de líquido ou partículas sólidas.

Como apresentado por Ian Hutchings e Philip Shipway, as partículas sólidas podem ser carregadas por gases, fluidos ou induzidas pela cinemática de transportadores mecânicos, sendo intrínsecas ao sistema (ex.: material transportado) ou não (ex.: contaminantes). Existem também situações em que a oxidação ou desgaste dos equipamentos interpõem as partículas responsáveis pela erosão (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

As diferenças entre os tribossistemas de abrasão a dois corpos, três corpos e por erosão podem ser identificadas na Figura 11.

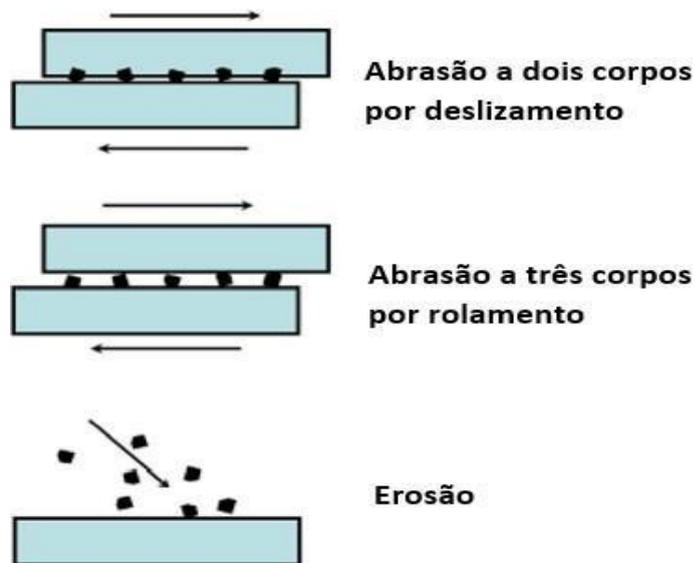


Figura 11: Diferenças entre abrasão 2-corpos, abrasão 3-corpos e erosão.
Fonte: Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017

A presença das partículas duras não é deletéria a todos os processos, sendo comumente empregadas em operações de moagem e polimento, nos quais as características de forma, tamanho e dureza são controladas para obtenção do produto final desejado. As interações dos abrasivos com superfícies sólidas podem acompanhar mecanismos de adesão, abrasão, deformação, aquecimento, fadiga superficial e fratura (GAHR, 1998).

2.3 Desgaste em chutes de transferência

O desgaste em chutes de transferência são uma ação conjunta de mecanismos de impacto e abrasão, e deve ser analisado considerando os fluxos de material transportado. As aplicações para que são projetados os chutes inferem altas taxas de desgaste devido a passagem contínua e em grandes quantidades de partículas (ROBERTS, 2001).

A operação dos chutes cria interfaces entre os mecanismos de desgaste abrasivo em regimes de impacto e deslizamento do material transportado, assegurados pelas forças cinéticas e gravitacionais do sistema e responsáveis pelo intenso desgaste nas superfícies dos revestimentos (ROBERTS, 2001; GATES, 2003).

O tribossistema identificado durante operação de transporte do minério-de-ferro por bancadas transportadoras, especificamente nos chutes de transferência, é formado pela superfície interna dos chutes, logo por suas placas de revestimento com ação abrasiva do minério em movimento (SILVA, J.R., 2016).

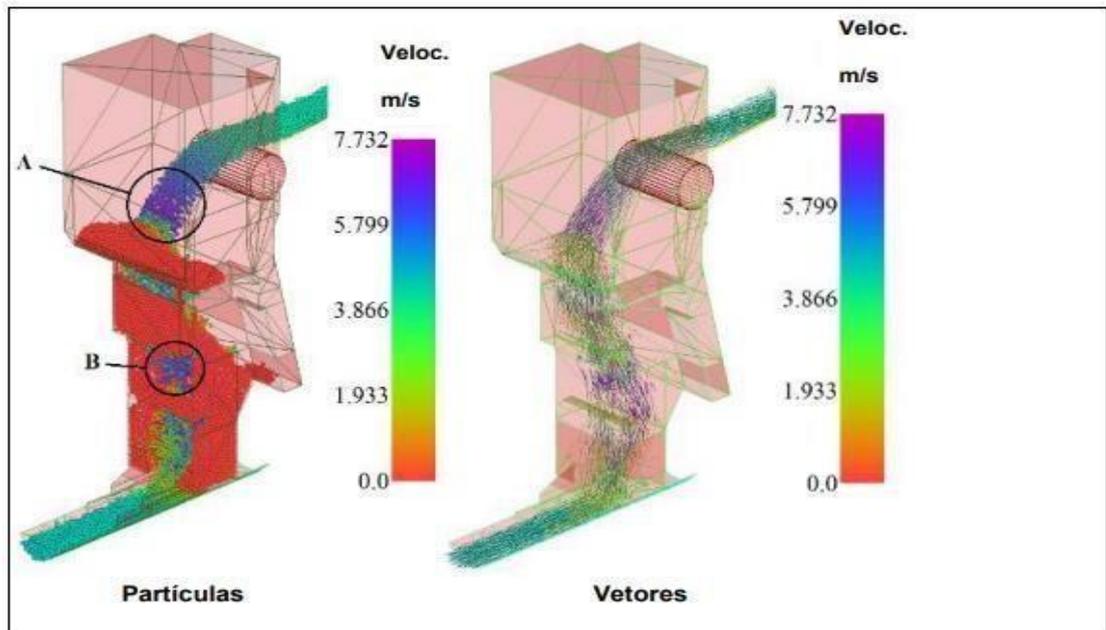


Figura 12: Esquema de um chute de transferência simulado com partículas em movimento
Fonte: (SILVA, J.R., 2016)

O desgaste decorrente do fluxo de minério nas placas de revestimento dos chutes de transferência varia de acordo com a umidade e volume do material passante, a velocidade de impacto do minério e os ângulos de ataque das partículas (GATES, 2003). As propriedades mecânicas dos revestimentos alteram a eficácia do equipamento, influenciando nas trajetórias do minério, na velocidade que as partículas atingem dentro do sistema e, conseqüentemente, na ocorrência de entupimentos (CHEN, 2017).

A severidade dos mecanismos de desgaste identificados nas superfícies dos revestimentos varia também de acordo com a mineralogia e propriedades do minério transportado, fatores de forte influência nas taxas de desgaste das operações industriais e que restringem as soluções encontradas para chutes de transferência (GATES *et al.*, 2015).

Posto isso, caracteriza-se o desgaste nas operações a seco nos chutes em:

- Contato de impacto: desgaste por abrasão-impacto quando por partículas grandes e erosão quando por partículas pequenas
- Contato de deslizamento: desgaste por LSSA (Low Stress Sliding Abrasion)

De acordo com Gates *et al.* (2015), ao contrário do que sugere o nome, as taxas de desgaste abrasivo por deslizamento de baixa tensão – LSSA são maiores e ocorrem com maior frequência nas atividades industriais que os de alta tensão.

Além dos desgastes advindos do minério a seco, os chutes de transferência podem sofrer também desgaste corrosivo, efeito do transporte de material úmido ou imerso em meio aquoso, que acrescenta propriedades corrosivas às interfaces minério/revestimento e influenciam nas taxas de desgaste operacionais (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.4 Ensaios de desgaste em laboratório

Análises laboratoriais identificam, reproduzem e analisam os tribossistemas encontrados nas operações industriais, com o intuito de aprimorar o desempenho do maquinário e proporcionar conhecimento essencial para reduzir custos e prolongar a vida-útil dos componentes mecânicos envolvidos (HAWK et al., 1999). Sistemas mecânicos controlados simulam as condições de campo e permitem analisar interfaces de atrito a que são submetidos os ativos operacionais.

Ensaios de desgaste devem satisfazer critérios de performance para se tornarem ferramentas úteis e gerar dados que permitam comparar o desempenho de materiais em aplicações industriais. Citados por Jeff Gates et al. (2015), alguns dos critérios são: simular os macro e microssistemas com fidelidade, com validação dos resultados frente às aferições de campo e capaz de produzir dados estatísticos de qualidade.

Neste trabalho serão analisadas as perdas volumétricas sofridas pelos materiais candidatos nos ensaios por Tribômetro Roda de Borracha e por Tribômetro Tambor Impulsor, ferramentas científicas consolidadas, que simulam condições abrasivas e de impacto à que são submetidas as placas de desgaste nos chutes de transferência.

2.4.1 Tribômetro Roda de Borracha

O tribômetro roda de borracha, apesar de não ser utilizado neste trabalho possui relevância para o entendimento das simulações de mecanismos de desgaste em laboratório e dos avanços do tribômetro tambor impulsor em testes tribológicos. É um equipamento para ensaios de abrasão de baixa tensão a três corpos, que permite obter informações de materiais, mecanismos e abrasivos por baixos custos e com fácil reprodução. Bastante utilizado para auxiliar a indústria mesmo antes de se tornar um procedimento normatizado ASTM, onde são descritos parâmetros e especificações de aparelhagem por exemplo, tornando-o um dos mais utilizados ensaios tribológicos (HAWK et al., 1999).

O procedimento de teste consiste em pressionar a amostra de material analisado contra uma roda revestida por borracha, podendo variar a carga e distância deslizada entre parâmetros (Tabela 2) e adicionando partícula abrasiva à interface em regime e composição controlados (Figura 13), possibilitando comparações entre os materiais e suas classes quando submetidos ao mesmo mecanismo de desgaste (ASTM G65-16, 2017).

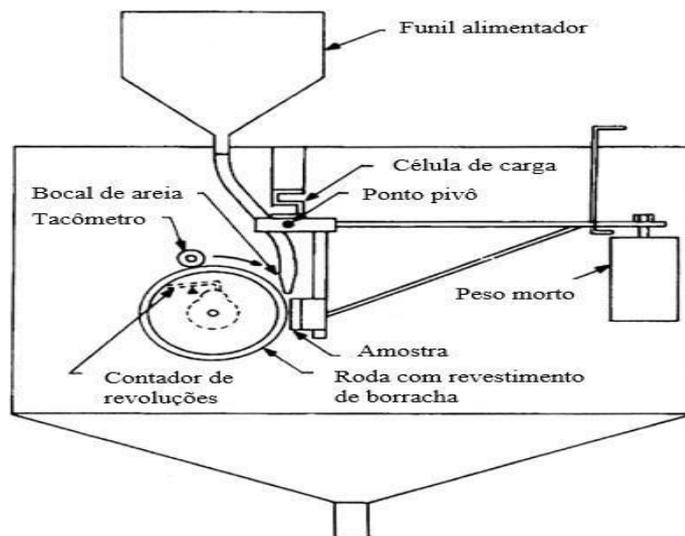


Figura 13: Esquema do tribômetro roda de borracha
Fonte: Adaptado de HAWK et al., 1999

A técnica determina a resistência de materiais – em sua maioria metálicos, ao desgaste por riscamento. A norma vigente ASGT G65-16 descreve procedimentos A – E (Tabela 2) para situações de estudo em materiais com extrema, alta, média ou baixa resistência ao desgaste abrasivo e variações, se por exemplo, houver insertos ou revestimentos na porção estudada.

Tabela 2: Tabela de procedimentos normatizados para testes em tribômetro roda de borracha

Parâmetros de Teste

Procedimento	Força aplicada na amostra, ^B N (lb)	Revoluções da roda	Abrasão Linear ^A	
			m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

^A Vide [ASTM G65-16, p. 4, item 8.4, 2021]

N = Newton (termo métrico para força (S.I.))

1 lbf = 4,44822 N

1 Kgf = 9,806650 N

^B Tolerância de força é $\pm 3\%$

Fonte: Adaptado de ASTM G65-16, 2017

O ensaio por roda de borracha produz dados de perda de massa e resistência ao desgaste das classes de materiais, permitindo classificação de desempenho para aplicações em condições semelhantes de abrasão. Entretanto, possui significativa limitação quanto aos mecanismos simulados, não sendo possível reproduzir os efeitos do impacto erosivo do material particulado na superfície de desgaste.

2.4.2 Tribômetro Tambor Impulsor

O tribômetro tambor impulsor foi desenvolvido para simular, através de um rotor, as condições de trabalho onde mecanismos de desgaste abrasivo e desgaste por impacto/erosão estão presentes simultaneamente (HAWK, 1999). Também conhecido por “teste de impacto contínuo”, o aparato permite avaliar o comportamento das classes de materiais frente partículas abrasivas em tamanhos, composições e condições diversas (RATIA, 2015; RATIA *et al.*, 2016).

O equipamento (Figura 14) é composto por um dispositivo impulsor onde são posicionadas amostras de estudo ou referenciais, que serão impactadas pelas partículas abrasivas dentro do tambor, por uma ou múltiplas horas. Os impactos e deslizamentos repetitivos acabam por fragmentar as partículas, sendo recomendada a substituição do abrasivo ao longo dos ensaios (HAWK, 1999).

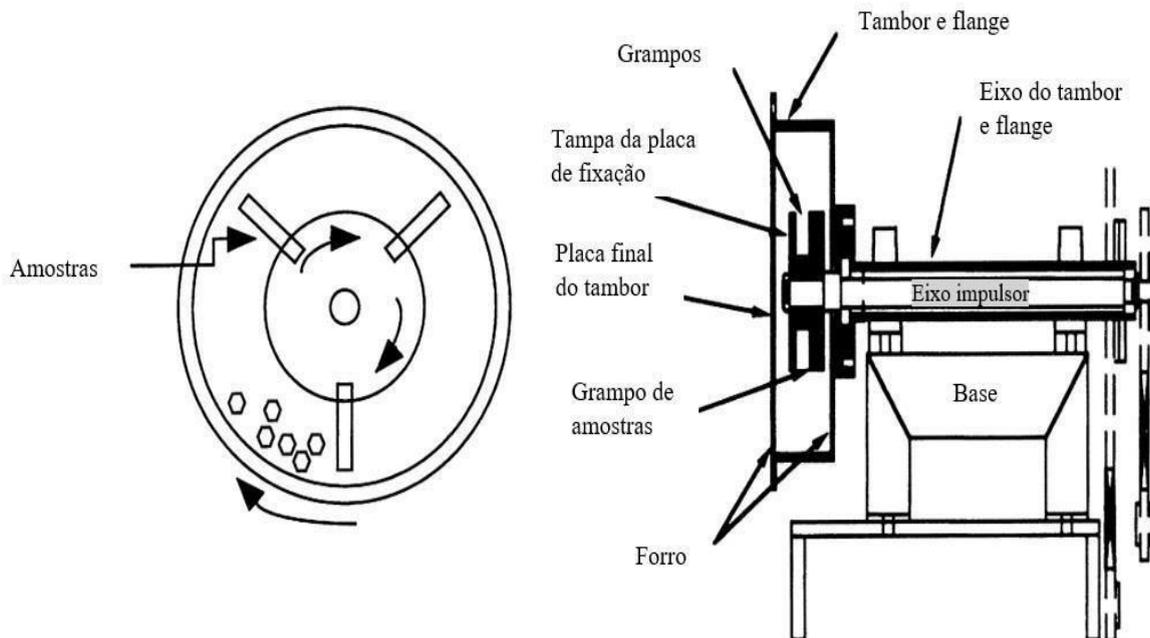


Figura 14: Representação esquemática do tribômetro tambor-impulsor
 Fonte: Adaptado de HAWK, 1999

Apesar de ainda não serem normatizados, os ensaios contam com sólidos parâmetros de reprodução, como os descritos por Hawk *et al.* (1999). Os experimentos preenchem a lacuna entre os ensaios abrasivos de baixa tensão, por exemplo os realizados nos tribômetros roda de borracha, e de alta tensão como os testes de moagem. Desta forma, os dados gerados colaboram para as análises de desgaste dos componentes de transportadores de minério-de-ferro e revestimentos dos chutes de transferência.

2.5 Correlação campo-laboratório

Os testes de desgaste em campo são a melhor opção para o entendimento dos processos de desgaste que ocorrem nos processos industriais e otimização dos ensaios laboratoriais capazes de simulá-los (GAHR, 1987; GATES *et al.*, 2015). A correlação com os resultados reais é um dos requisitos para validar métodos de predição de desempenho dos materiais (GATES *et al.*, 2015).

As dificuldades de caracterização, controle e reprodução das condições de campo são agravadas pela operação simultânea de vários mecanismos de desgaste, para isso critérios para correlacionar testes de desgaste em campo com os ensaios de laboratório foram estabelecidos (BLICKENSDEFER, 1988).

Considerado um dos maiores desafios de testes de desgaste em campo, os gradientes de desgaste são as possíveis variações de severidade das interações, resultantes das cargas, pressões de contato e velocidades não uniformes durante operação. Os gradientes de desgaste, são considerados responsáveis pela alta dispersão de resultados e baixa reprodutibilidade dos testes em laboratório, podendo ser encontrados em regimes constantes ou variáveis que se alteram conforme tempo de operação (BLICKENSDEFER, 1988; GATES *et al.*, 2015).

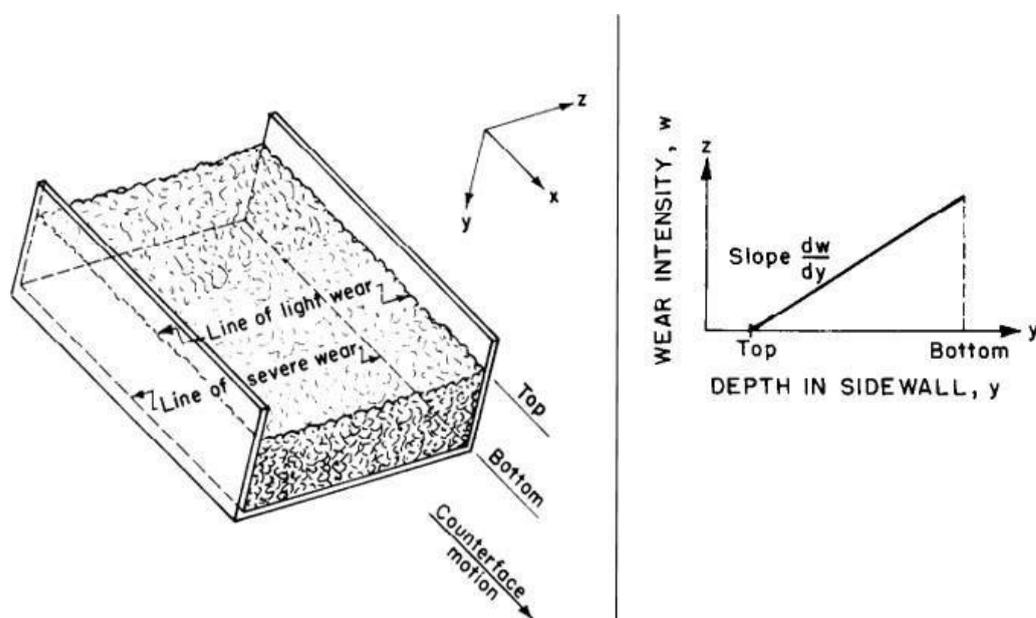


Figura 15: Gradiente de desgaste na profundidade dos chutes de transferência
Fonte: Adaptado de (BLICKENSDEFER, 1988)

Aplicados aos estudos de desgaste em chutes de transferência, a literatura reporta presença dos gradientes de desgaste na direção do fluxo de minério, com diferentes taxas de desgaste entre porção superior e inferior dos equipamentos (XU; VOSE; ST JOHN, 1993).

Para atenuar os efeitos dos gradientes de desgaste nos ensaios de campo, foi proposta por Blickensderfer (BLICKENSDEFER, 1988) utilização de amostras referenciais juntas às de interesse, que podem ser usadas para auxiliar correções nos resultados pela diferença de intensidade de desgaste média e arranjos para posicionamento das amostras que colaboram para a boa qualidade estatística dos dados.

3 METODOLOGIA

A metodologia científica é definida pelo estudo sistemático e lógico dos métodos empregados nas ciências, seus fundamentos, sua validade e sua relação com as teorias científicas, de acordo com Gerhardt e Silveira (2009). Palavra de origem grega (*met'hodos*) que significa “caminho para chegar a um fim”, a metodologia é o corpo de regras e procedimentos estabelecidos para realizar uma pesquisa, considerada científica quando imerso em algum conjunto de conhecimentos precisos e metodicamente ordenados em relação a determinado domínio do saber (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

A pesquisa é a atividade prevalecte da metodologia, caracterizando o conhecimento humano pelas relações de apropriação entre sujeito e objeto, com níveis de abrangência das apropriações variando conforme a complexidade dos alvos de estudo (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Também de acordo com os estudos metodológicos de Gerhardt e Silveira (2009), o conhecimento popular ou empírico difere-se do científico, que por sua vez é mais aprofundado e metódico.

De acordo com a definição de Gil (2007, p. 17), pesquisa é “o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa desenvolve-se por um processo constituído de várias fases, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados”.

A pesquisa científica pode ser classificada sob diversos aspectos, como quanto à abordagem, natureza, objetivos e procedimentos, que serão apresentados na sequência.

3.1 Tipo de Pesquisa

As pesquisas possibilitam aproximação e entendimento da realidade investigada, sendo um processo permanentemente inacabado e podem ser classificadas quanto à sua abordagem, natureza, objetivos ou procedimentos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009)

As classificações quanto à abordagem do trabalho podem considerá-lo qualitativo ou quantitativo. Pesquisas qualitativas não priorizam a representatividade numérica, mas, sim o aprofundamento da compreensão de uma sociedade ou organização, por exemplo. Os pesquisadores que utilizam dos métodos qualitativos buscam respostas sem quantificar valores, muitas vezes trabalham com dados não-métricos e oriundos de diferentes abordagens.

As pesquisas quantitativas, por sua vez, são centradas na objetividade e possuem resultados quantificáveis e considerados representativos, sendo a amostra de pesquisa um retrato real de toda a população alvo, conforme esclarecido por Fonseca (2002, p. 20).

Comparações relevantes entre as categorias foram levantadas e tabeladas na sequência (Tabela 3 e Tabela 4):

Tabela 3: Comparação dos aspectos da pesquisa qualitativa com os da pesquisa quantitativa

Aspecto	Pesquisa Quantitativa	Pesquisa Qualitativa
Enfoque na interpretação do objeto	menor	maior
Importância do contexto do objeto pesquisado	menor	maior
Proximidade do pesquisador em relação aos fenômenos estudados	menor	maior
Alcance do estudo no tempo	instantâneo	intervalo maior
Quantidade de fontes de dados	uma	várias
Ponto de vista do pesquisador	externo à organização	interno à organização
Quadro teórico e hipóteses	definidas rigorosamente	menos estruturadas

Fonte: (FONSECA, 2002)

Tabela 4: Comparação entre o método quantitativo e qualitativo

Pesquisa Quantitativa	Pesquisa Qualitativa
Focaliza uma quantidade pequena de conceitos	Tenta compreender a totalidade do fenômeno, mais do que focalizar conceitos específicos
Inicia com ideias preconcebidas do modo pelo qual os conceitos estão relacionados	Possui poucas ideias preconcebidas e salienta a importância das interpretações dos eventos mais do que a interpretação do pesquisador
Utiliza procedimentos estruturados e instrumentos formais para coleta de dados	Coleta dados sem instrumentos formais e estruturados
Coleta os dados mediante condições de controle	Não tenta controlar o contexto da pesquisa, e, sim, captar o contexto na totalidade
Enfatiza a objetividade, na coleta e análise dos dados	Enfatiza o subjetivo como meio de compreender e interpretar as experiências
Analisa os dados numéricos através de procedimentos estatísticos	Analisa as informações narradas de uma forma organizada, mas intuitiva

Fonte: Adaptado de (POLIT et al, 2004)

Este trabalho aborda ambos os tipos de pesquisa, qualitativa e quantitativa, nas etapas de estudo, avaliando o desempenho isolado dos materiais e comparando os resultados entre as classes estudadas, tornando-a uma pesquisa mista (CRESWELL, 2021). Podemos classificá-la também como pesquisa com procedimentos experimentais, considerados os ensaios tribológicos realizados para desenvolvimento da classificação dos materiais frente mesma aplicação.

3.2 Materiais e Métodos

O estudo contempla análise das taxas de desgaste das amostras dos cinco materiais analisados: aço ferramenta martensítico H13, aço revestido por solda, compósito de matriz de ferro fundido nodular com incertos de metal duro, ferro fundido de alto cromo e um candidato cerâmico, quando submetidos ao ensaio de desgaste por abrasão e impacto em tribômetro tambor-impulsor, equipamento desenvolvido pelo Instituto Tecnológico Vale para estudos tribológicos (CAMPOS, 2020). Os dados produzidos foram analisados e comparados, permitindo classificar os materiais quanto à sua perda volumétrica e, assim, classificar também sua eficiência para aplicações em chutes de transferência de minério de ferro.

A sequência de etapas de desenvolvimento deste trabalho é ilustrada na Figura 16.

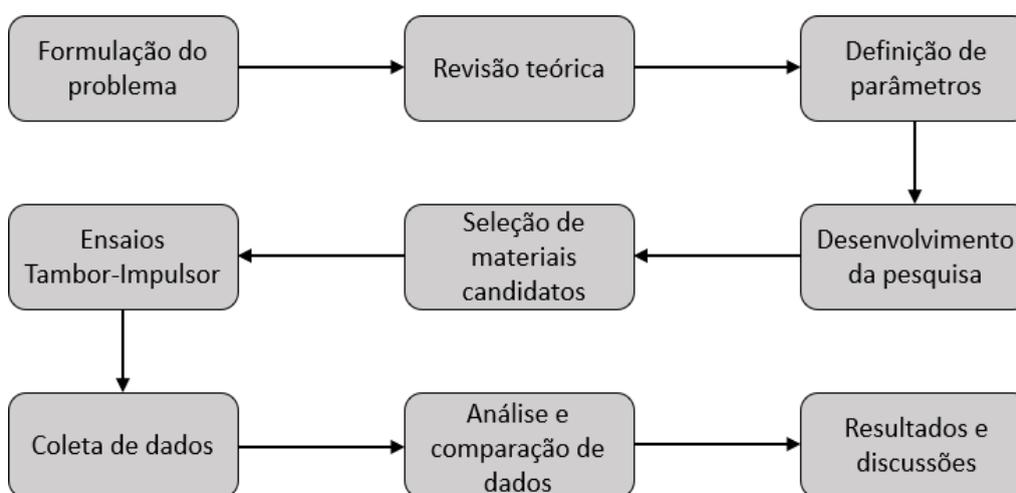


Figura 16: Fluxograma de etapas da monografia
Fonte: Pesquisa direta, 2022

Os materiais testados são descritos na Tabela 5:

Tabela 5: Materiais testados nos ensaios de tambor-impulsor.

Amostra	Tipo de material
HCCI	ASTM A 532 classe III A
Weld	Revestido por solda (Cr)
WC-Co+ NCI	WC-Co em matriz de ferro fundido nodular
Cerâmico	Cerâmica, 92% Alumina (Al ₂ O ₃)
H13	Aço martensítico

Fonte: Pesquisa direta, 2022

3.2.1 Ensaio de Abrasão e Impacto

Os ensaios para simular condições de desgaste por abrasão e por impacto presentes nos chutes de transferência foram conduzidos em tribômetro tambor-impulsor, que possibilita analisarmos a perda volumétrica dos materiais testados quando expostos à tribossistemas de abrasão e impacto, simultaneamente (CAMPOS, 2020).

Foram utilizadas duas variações do rotor impulsor no tribômetro, uma primeira onde o ângulo de incidência do abrasivo nos corpos de prova é de 90° e outra onde o ângulo é de 60° , conforme Figura 17 a seguir.

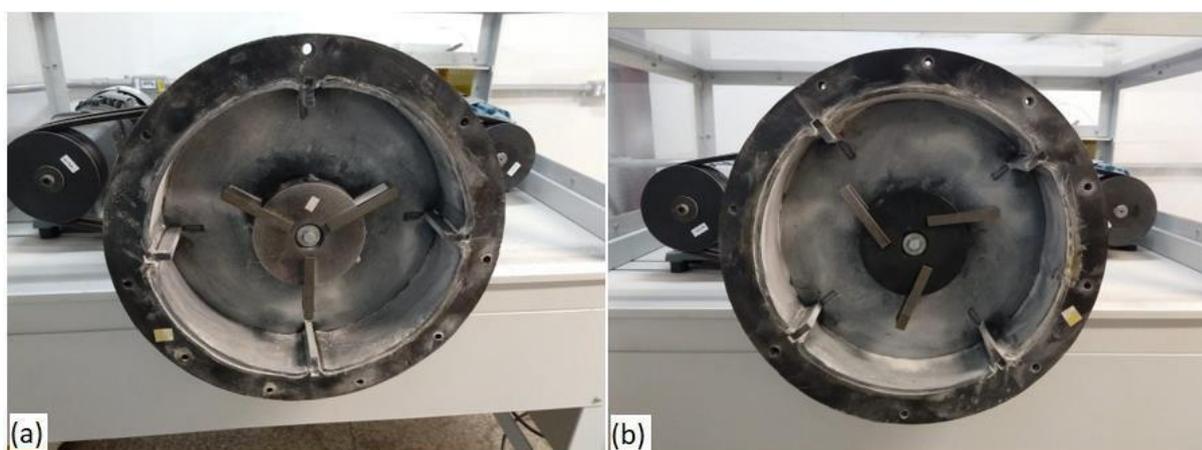


Figura 17: Tribômetro Tambor-Impulsor com rotor central de 90° (a) e 60° (b) instalados.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

Os parâmetros de ensaio no tribômetro de abrasão por impacto foram baseados nos trabalhos de Ratia (2013) e Ratia (2015) e estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros de ensaio em tribômetro tambor impulsor.

Abrasivo:	Brita de gnaisse
Quantidade de abrasivo:	700g
Intervalos de reposição do abrasivo:	15 minutos
Duração total de cada ensaio:	60 minutos
Velocidade do tambor:	30 rpm
Velocidade do rotor impulsor:	700 rpm

Fonte: Pesquisa direta, 2022

A confecção dos corpos de prova levou em consideração o fenômeno de concentração do desgaste nas bordas (RATIA, 2016), separando assim as partes centrais das partes externas das amostras, possibilitando análises separadas de ambas as partes. Os corpos de prova de cada material candidato foram fabricados nas dimensões 75 x 12 x 5 mm e acoplados ao porta amostras do rotor motriz do equipamento. O encaixe das partes é feito por interferência e podem ser pesadas separadamente antes e após cada ensaio. O esquema de confecção é ilustrado na Figura 18 abaixo.

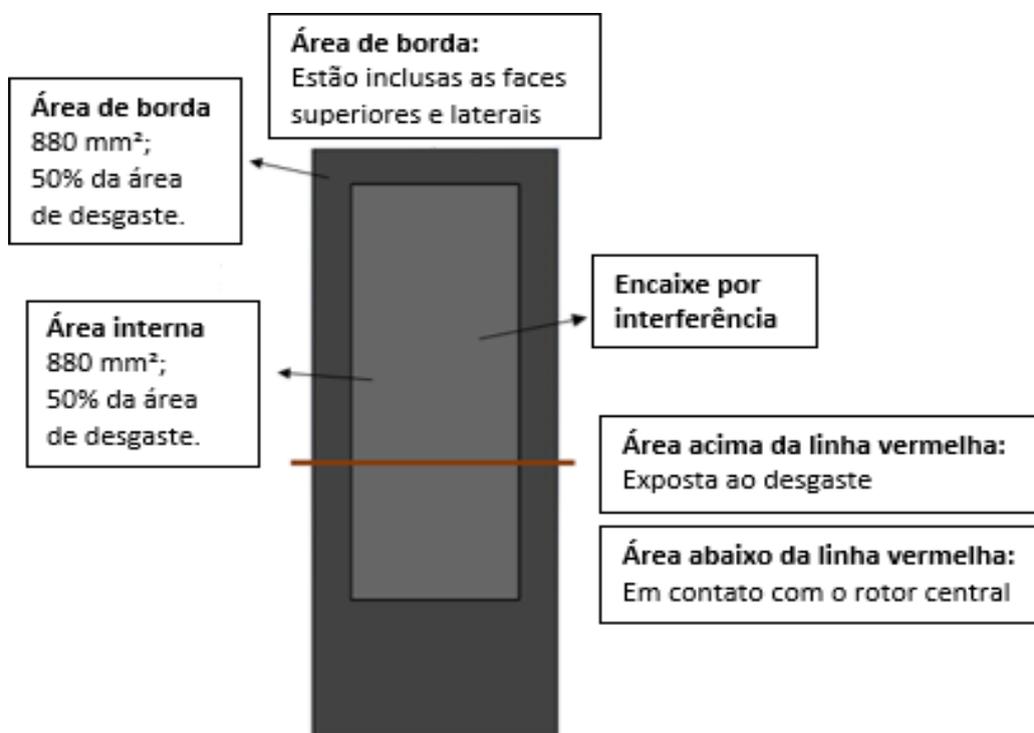


Figura 18: Esquema dos corpos de prova utilizados nos ensaios de Tambor-Impulsor
Fonte: Pesquisa direta (2022)

A perda de massa dos corpos de prova foi mensurada e avaliada em cada intervalo de 15 minutos durante os ensaios de 60 minutos. As amostras foram limpas por ultrassom enquanto submersas em álcool e secas por ar comprimido. As perdas de massa foram mensuradas por balança de precisão com quatro casas decimais, sendo feitas três medições por amostra.

Para se obter uma melhor correlação com os parâmetros operacionais de substituição das placas de revestimento de chutes de transferência, que usam da espessura do componente como referência, as perdas mássicas das amostras foram convertidas em valores volumétricos. A densidade dos materiais candidatos foi obtida por imersão conforme método de Arquimedes.

Equação utilizada para cálculo da densidade dos materiais testados:

$$\rho = \frac{m_{am}}{(m_{am} - m_{ap})} \times \rho_{H_2O}$$

Onde “ ρ ” corresponde às densidades total e da água, “ m_{am} ” a massa da amostra e “ m_{ap} ” a massa aparente após submersão.

Equação utilizada para cálculo do desgaste decorrente dos ensaios:

$$W = \frac{V_i - V_f}{A \times t}$$

Onde “ V_i ” e “ V_f ” correspondem aos volumes iniciais e finais de cada amostra, respectivamente; “ A ” corresponde à área de desgaste em metros quadrados (m^2); “ t ” corresponde ao tempo de ensaio em segundos (s);

O intenso desgaste entre o material particulado e as amostras estudadas fazem necessárias as trocas de abrasivo. Não foram executadas análises granulométricas, este parâmetro foi inserido ao trabalho com base na literatura revisada.

Foi analisado a perda volumétrica das amostras internas de todos os materiais de placas de chutes testados. Para a análise do gradiente de desgaste entre a borda e o interior das amostras em diferentes ângulos, foram utilizadas as amostras de HCCI e o aço H13.

3.2.2 Variáveis e indicadores

As variáveis envolvidas neste trabalho são referentes aos tribômetros e parâmetros de teste utilizados, aos materiais estudados e suas respostas aos ensaios de desgaste por abrasão e impacto. Para que as variáveis sejam medidas e ponderadas, foram estabelecidos os indicadores citados a seguir (Tabela 7).

Tabela 7: Variáveis e indicadores do trabalho.

Variáveis	Indicadores
Materiais testados	Perda de massa
	Mecanismos de desgaste

Fonte: Pesquisa direta 2022

3.3 Instrumentos de coleta de dados

Os dados foram coletados a partir dos ensaios no tribômetro abrasão e impacto do Instituto Tecnológico Vale (ITV). As análises de perda de massa das amostras estudadas foram aferidas em balança de precisão Shimadzu UX620H com erro de 0,01g.

As medidas de dureza dos materiais testados foram realizadas no durômetro Mitutoyo HV-100 em escala Vickers, com 30 kgf de carga de ensaio, resultando nas durezas HV30 demonstradas neste trabalho.

3.4 Tabulação de dados

A tabulação dos dados produzidos pelos experimentos deste estudo foi feita em Excel, ferramenta onde os resultados das classes de materiais candidatos foram compilados e organizados para análise.

A realização da pesquisa contou também com o programa Word para elaboração dos documentos e relatórios.

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os métodos e ferramental utilizados para atingir o objetivo de classificar os materiais quanto ao desgaste por abrasão e impacto, visando otimização dos revestimentos de chutes de transferência de minério de ferro.

No capítulo a seguir os dados adquiridos através destes procedimentos são tratados e analisados para que sejam apresentados e discutidos de forma a contribuir para o aprimoramento da metodologia utilizada e a classificação de materiais para aplicação em condições semelhantes.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização dos materiais

Os materiais testados estão tabelados (Tabela 8) com suas respectivas durezas medidas em escala Vickers [HV 30]:

Tabela 8: Materiais testados nos ensaios de tambor-impulsor.

Amostra	Tipo de material	Dureza [HV 30]
HCCI	ASTM A 532 classe III A	830,7 ± 12
Weld	Revestido por solda (Cr)	913,8 ± 17
WC-Co+ NCI	WC-Co em matriz de ferro fundido nodular	1637,0 ± 14 349,0 ± 23
Cerâmico	Cerâmica, 92% Alumina (Al ₂ O ₃)	1104,0 ± 41
H13	Aço martensítico	575,4 ± 7

Fonte: Pesquisa direta (2022)

As análises de superfície por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foram realizadas para identificação das microestruturas dos materiais envolvidos, descritas:

- HCCI – ASTM A 532 Classe III A.

Ferro fundido alto cromo em matriz martensítica, com presença de carbonetos eutéticos do tipo M₇C₃ e carbonetos secundários. Dureza 830,7 ± 12 [HV30].

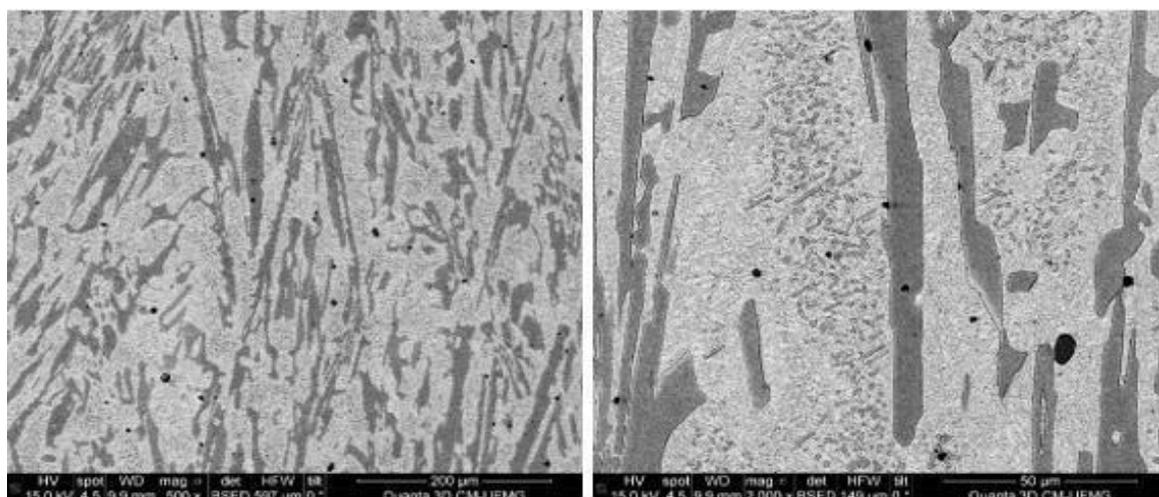


Figura 19: Microestrutura do HCCI analisada em MEV.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

- Weld – Revestimento por solda.

Aço revestido por solda com presença de carbonetos de cromo primários (hexagonais) e carbonetos eutéticos. Dureza $913,8 \pm 17$ [HV30].

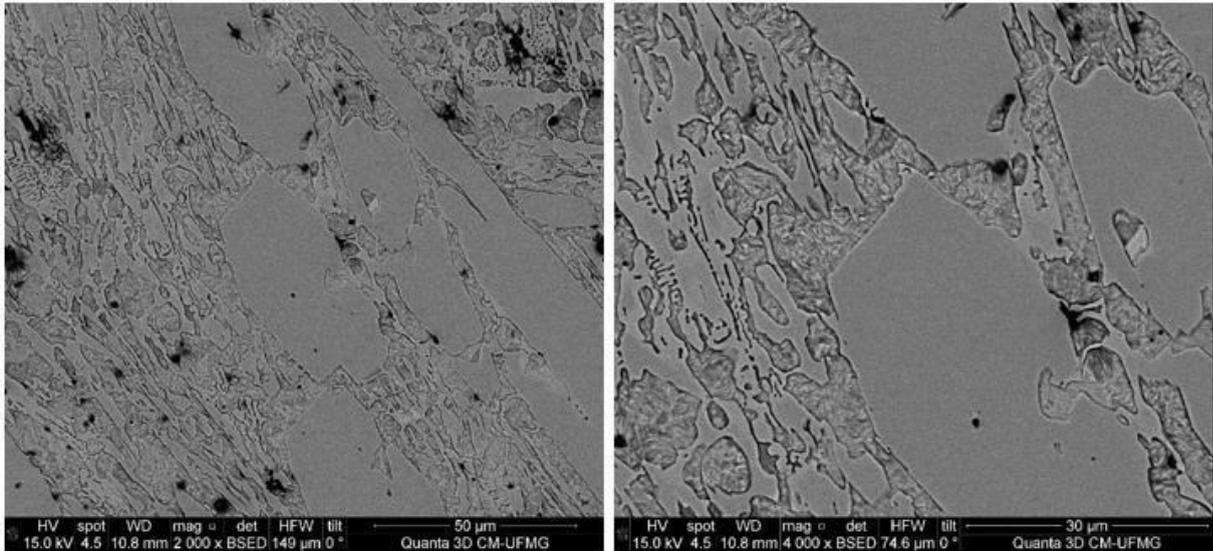


Figura 20: Microestrutura do Weld analisada em MEV.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

- WC-Co + NCI – Ferro fundido nodular com insertos de metal duro

Matriz de ferro fundido nodular com adição de partículas de metal duro WC-Co. Dureza da matriz $349,0 \pm 23$ [HV30] e dureza WC-Co $1637,0 \pm 14$ [HV 30].

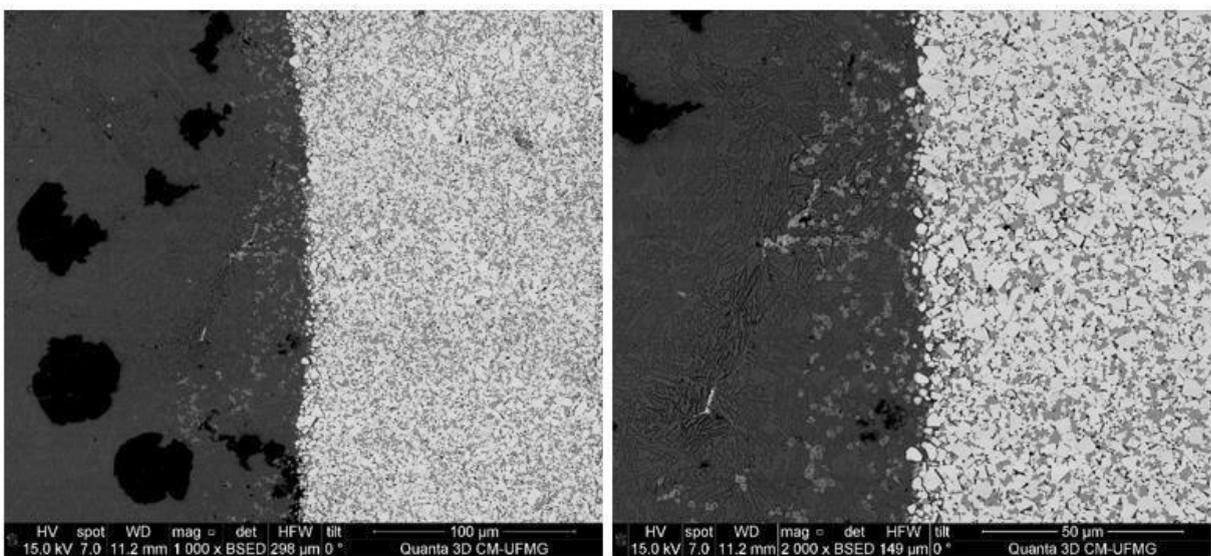


Figura 21: Microestrutura do WC-Co + NCI analisada em MEV, interface entre a matriz de ferro fundido nodular e as partículas de metal duro WC-Co.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

- Cerâmico

Material constituído majoritariamente de alumínio, silício e oxigênio, formando alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). Dureza $1104,0 \pm 41$ [HV30].

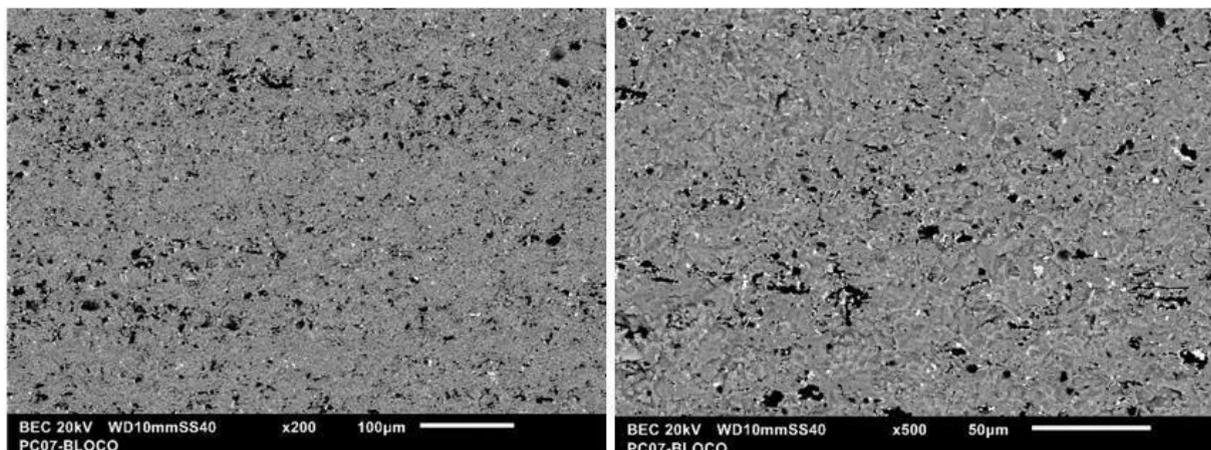


Figura 22: Microestrutura do material cerâmico analisada em MEV.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

- H13 – Aço ferramenta

Aço ferramenta martensítico, apresenta microestrutura homogênea. Dureza $575,4 \pm 7$ [HV30].

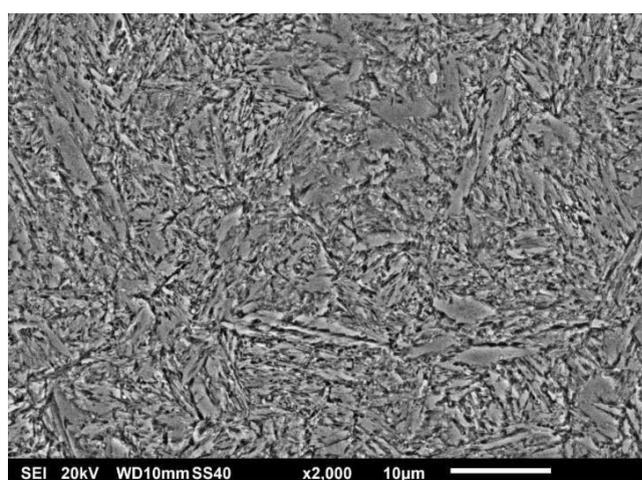


Figura 23: Microestrutura do aço ferramenta martensítico H13.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

4.2 Ensaios Tambor-Impulsor

Os ensaios de abrasão e impacto com impulsor de ângulo 90°, realizados no tempo total de 60 minutos com intervalos para troca de material abrasivo (brita de gnaiss) a cada 15 minutos, produziram os dados de perda volumétrica acumulada, apresentados na Figura 24 e os resultados de perda volumétrica total, exibidos na Figura 25.

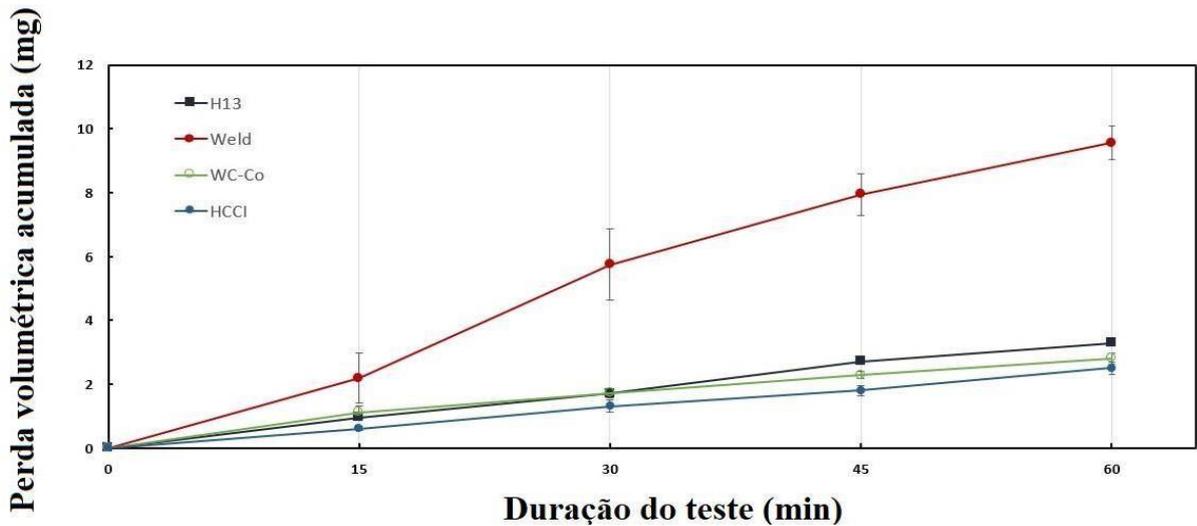


Figura 24: Gráfico de perda volumétrica acumulada ao longo dos ensaios de 60 minutos.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

Os gráficos apresentam as perdas volumétricas ao longo dos ensaios, referentes ao desgaste das regiões internas dos conjuntos porta amostra e amostra, onde há maior tendência a ocorrer mecanismos de impacto. O regime permanente de desgaste ocorreu para todas as amostras no tempo total de ensaio, visto que a curva de perda volumétrica por tempo se comportou como uma reta de inclinação praticamente constante.

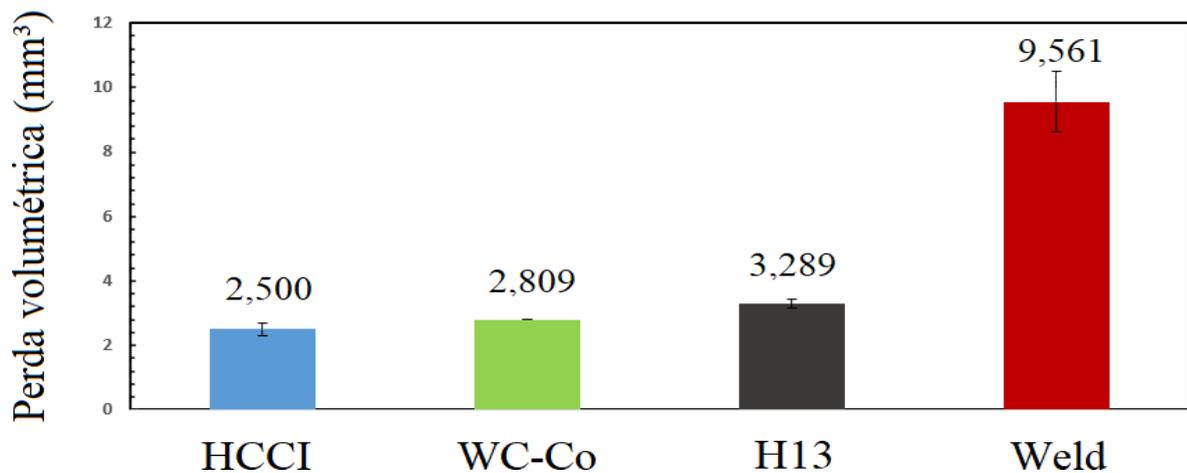


Figura 25: Gráfico de perda volumétrica total após ensaios de 60 minutos.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

O candidato cerâmico apresentou fraturas excessivas durante os ensaios abrasão e impacto (Figura 26), impossibilitando correlação dos resultados com o restante dos materiais testados. Apesar da alta dureza ser favorável à resistência ao desgaste por abrasão, quando submetido ao tribossistema de impacto do material abrasivo, sua fragilidade culminou na invalidez dos resultados.



Figura 26: Amostras cerâmicas fragmentadas durante ensaio tambor-impulsor.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

Os dados coletados de perda volumétrica, o desvio padrão e o coeficiente de variação calculados para cada material candidato que suportou os ensaios no tambor impulsor foram compilados na Tabela 9.

Tabela 9: Dados de: perda volumétrica, desvio padrão e coeficiente de variação para o ensaio.

Material	Perda Volumétrica (mm ³)	Desvio Padrão	CV%
H13	3,29	0,132	4%
HCCI	2,50	0,186	7%
WC-Co	2,81	0,112	4%
Weld	9,56	0,930	37%

Fonte: Pesquisa direta (2022)

O comportamento do material revestido por solda (Weld), que apesar da alta dureza apresentaram trincas superficiais macroscópicas e poros, demonstrou resultados de baixa resistência ao desgaste por impacto. O candidato sofreu perdas por arrancamento de debris significativas nas regiões próximas às trincas (Figura 27), culminando na inclinação acentuada da curva de perda volumétrica, maior desvio padrão e alto coeficiente de variação quando comparado aos outros materiais.

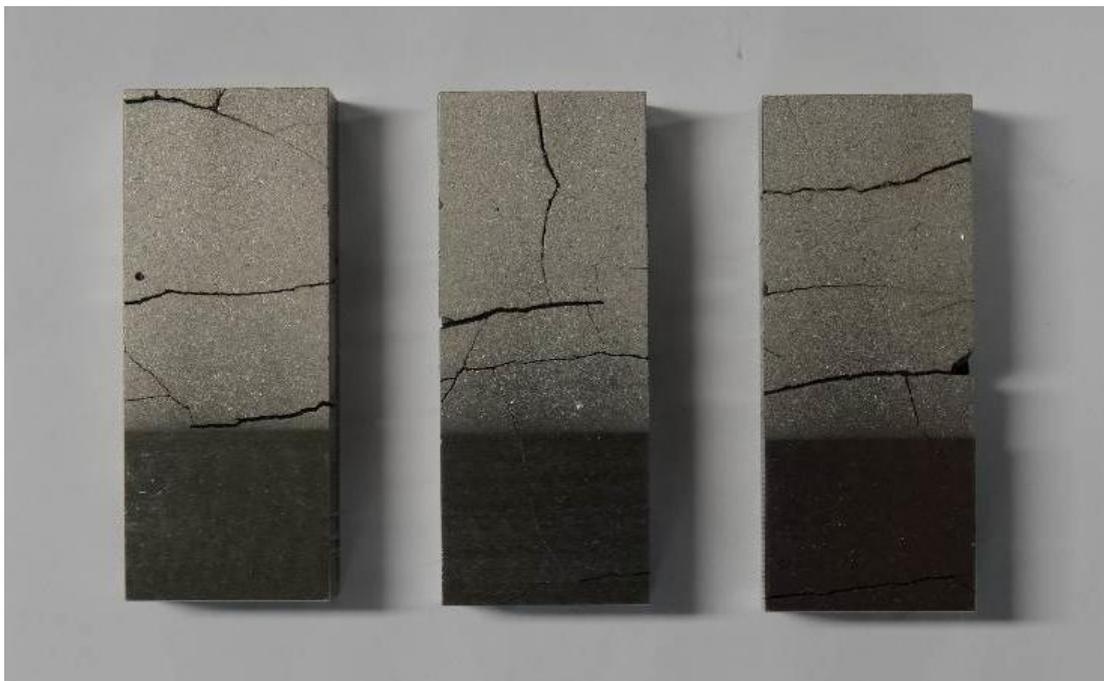


Figura 27: Amostras revestidas por solda (Weld) com presença de trincas expressivas na região interna do corpo de prova.

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Os materiais candidatos HCCI (ferro fundido de alto cromo) e WC-Co (bimetálico) apresentaram as menores médias de perdas volumétricas. Esse resultado se deve à presença de carbonetos de cromo dispersos na matriz martensítica do ferro fundido e, no bimetálico, às grandes partículas de carbonetos de tungstênio presentes na matriz de ferro fundido nodular. A tenacidade das matrizes de ambos os materiais se mostrou suficiente para garantir maior proteção contra o desgaste por impacto, ao passo que as partículas duras (carbonetos de cromo e tungstênio), visíveis na Figura 28, atuaram como barreiras para o desgaste abrasivo.



Figura 28: Amostras do material bimetalico WC-Co após ensaio Tambor-Impulsor. Nota-se a presença dos carbonetos de tungstênio dispersos na matriz de ferro fundido nodular.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

Apesar da predominância de mecanismos de desgaste por impacto nas regiões internas das amostras, os mecanismos de abrasão também estão presentes. A atuação conjunta da tenacidade da matriz e dureza dos carbonetos se mostraram significantes para o desempenho dos candidatos com segunda fase dura (HCCI e WC-Co) submetidos aos desgastes por abrasão e impacto, de forma simultânea. As amostras testadas de HCCI e H13 são expostas lado a lado na Figura 29.

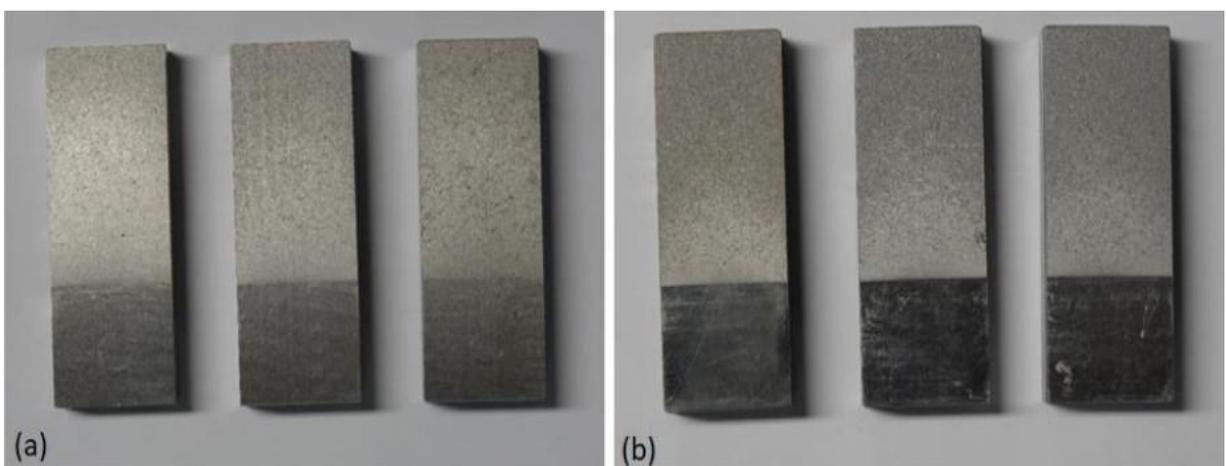


Figura 29: Amostras de HCCI (a) e aço H13 (b) após ensaio Tambor-Impulsor.
Fonte: Pesquisa direta (2022)

O pior desempenho em perda volumétrica total do H13 frente aos candidatos que possuem segunda fase dura é justificado por sua ductilidade e homogeneidade superficial, não sendo capaz de mitigar os mecanismos de desgaste por abrasão, como o HCCI e o WC-Co.

As amostras desgastadas após bateria de ensaios, com diferenciação visível entre as partes expostas ao abrasivo das protegidas pelo encaixe do rotor estão na Figura 30.

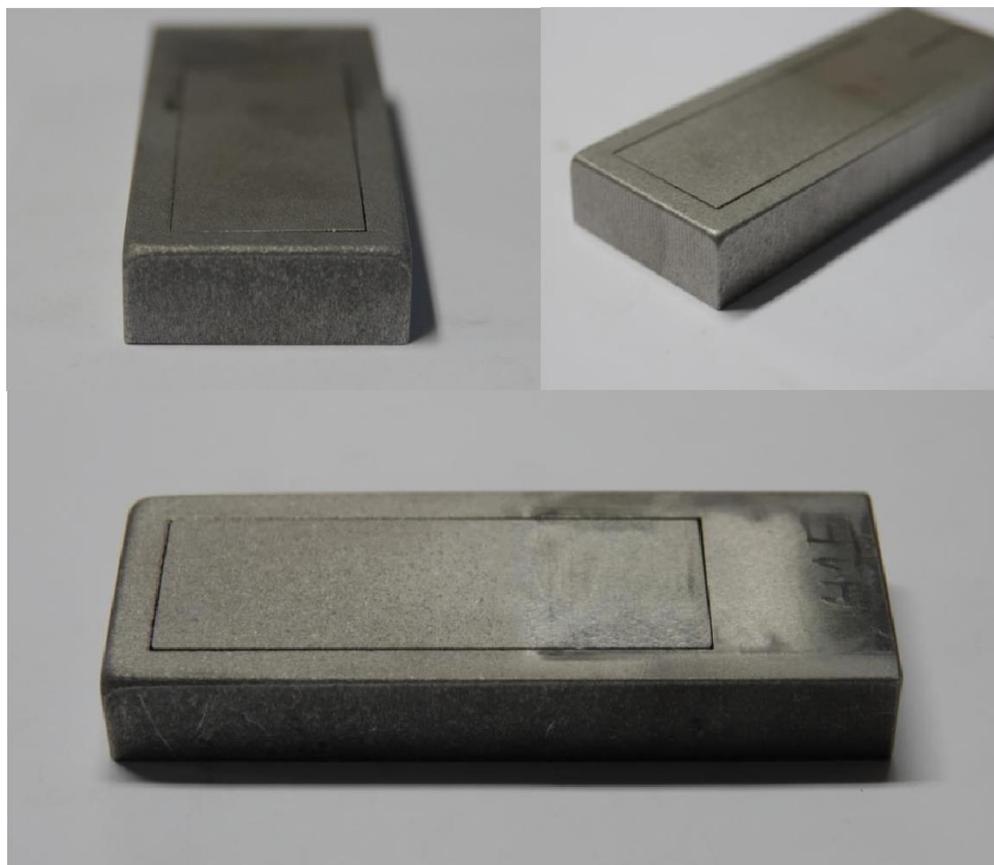


Figura 30: Corpos de prova H13 e HCCI após ensaio. Regiões de borda arredondadas e riscadas, regiões internas rugosas sem riscos.

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Evidências da atuação de mecanismos abrasivos e da maior severidade do desgaste nas regiões de borda podem ser observadas no arredondamento das extremidades e nos riscos gerados no topo do corpo de prova, após o ensaio (Figura 30). A superfície rugosa e sem a presença de riscos são indicativos da presença majoritária de mecanismos de impacto nas regiões internas.

4.3 Ensaios Tambor-Impulsor com variação do ângulo de incidência

Adjacentes aos ensaios discutidos no tópico anterior, foram realizados também ensaios de tambor-impulsor com alteração do ângulo de incidência do abrasivo nas amostras, por meio de um rotor central com suportes retos à um ângulo de 90° e outro inclinado à 60°, para os corpos de prova. Nesta variação do ensaio foram testados o aço martensítico H13 e o ferro fundido alto cromo de referência (HCCI) e as taxas de desgaste resultantes são descritas no gráfico da Figura 31 e nos resultados compilados da Tabela 10.

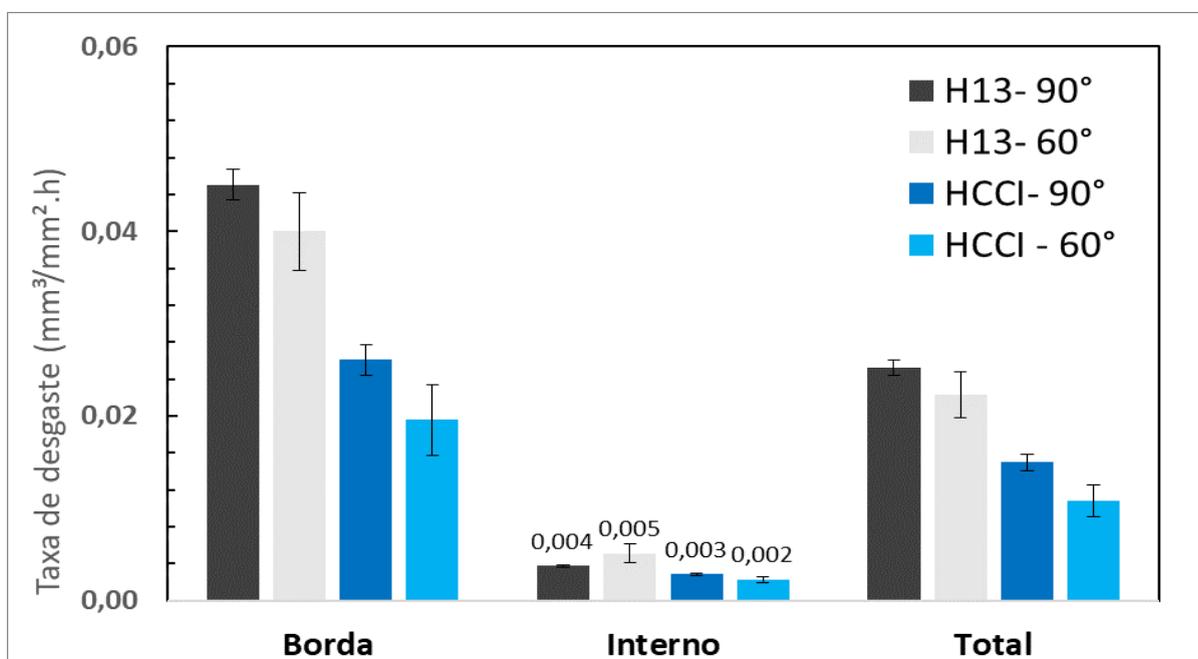


Figura 31: Taxa de desgaste dos materiais H13 e HCCI submetidos ao ensaio tambor-impulsor com variação do ângulo de incidência de abrasivos.

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Tabela 10: Taxa de desgaste, desvio padrão e coeficiente de variação das regiões de borda, interna e total.

	Material	Taxa de Desgaste (mm ³ /mm ² .h)	Desvio Padrão	CV %
Borda	H13 – 90%	0,045	0,00164	4%
	H13 – 60%	0,040	0,00420	11%
	HCCI – 90%	0,026	0,00165	6%
	HCCI – 60%	0,020	0,00382	20%
Interno	H13 – 90%	0,004	0,00015	4%
	H13 – 60%	0,005	0,00099	19%
	HCCI – 90%	0,003	0,00015	5%
	HCCI – 60%	0,002	0,00028	12%
Total	H13 – 90%	0,025	0,00083	3%
	H13 – 60%	0,022	0,00249	3%
	HCCI – 90%	0,015	0,00090	6%
	HCCI – 60%	0,011	0,00177	16%

Fonte: Pesquisa direta (2022)

A normalização da taxa de desgaste total pela área exposta das amostras, calculada a partir da soma dos desgastes nas bordas e regiões internas, indicou a maior resistência ao desgaste por abrasão e impacto do ferro fundido branco comparado ao aço martensítico H13 em ambos os parâmetros angulares de teste (60° e 90°).

Os ensaios com ângulos de impacto de 60° apresentaram comportamentos distintos de desgaste quando comparados aos resultados e análises de 90°, observados principalmente nas perdas volumétricas das regiões internas e externas dos corpos de prova. Verifica-se que houve um ligeiro aumento do desgaste nos primeiros 15 minutos de ensaio para o H13 indicando um possível processo de run-in, após este período, o desgaste ocorreu em regime permanente, enquanto os ensaios do ferro fundido branco ocorreram quase de forma linear, apontando para um possível desgaste em regime permanente para todo o tempo de teste.

Os resultados do aço martensítico H13 – material de menor dureza e constituição superficial homogênea, apresentam maiores perdas volumétricas nas duas variações do ensaio tambor-impulsor, somadas as regiões internas e externas e analisando-as separadamente. O resultado de perda volumétrica total de ambos os candidatos a 60° é demonstrado no gráfico da Figura 32.

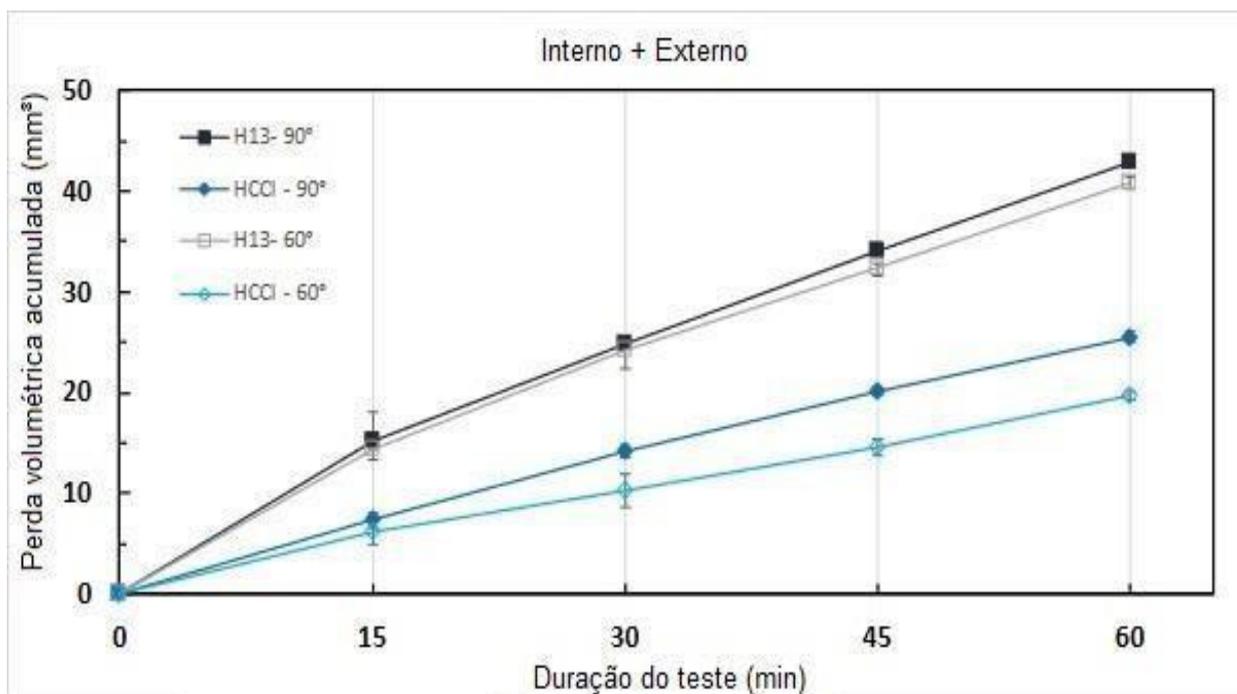


Figura 32: Perdas volumétricas acumuladas dos materiais H13 e HCCI submetidos a ensaios de abrasão e impacto à 90° e 60°.

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Os resultados de perda volumétrica acumulada (Figura 32) mostram que as amostras de ferro fundido de alto cromo tiveram melhor desempenho frente o H13 e individual – quando comparadas as perdas do mesmo material para os dois ângulos. O distanciamento entre os resultados de 90° e 60° do HCCI está relacionado à suas características favoráveis aos mecanismos de desgaste presentes no ensaio. Para a primeira condição (90°), sua matriz martensítica tenaz é capaz de amenizar as perdas por impacto e, para a segunda condição (60°), os carbonetos de cromo dispersos em sua superfície atuam como barreira aos mecanismos abrasivos de corte e lascamento.

Analisando as partes internas e externas dos corpos de prova separadamente, nos gráficos das Figura 33 e Figura 34, é notável o fenômeno de concentração de desgaste nas regiões de borda, como descrito por *Ratia et al. (2016)* e que a maior inclinação da amostra em relação às partículas abrasivas é capaz de influenciar no desgaste sofrido pelo material. De acordo com *Ratia*, devido os repetidos impactos, a microfadiga se apresenta como mecanismo dominante nos ensaios de tambor-impulsor, com as regiões de borda geralmente contendo quantidades consideráveis de micro cortes e menos material abrasivo incorporado ao final dos testes. A região interna, por sua vez, apresenta predominância de microfadiga, com maiores quantidades de abrasivos incorporados e uma tendência ao aumento de micro cortes com a diminuição do ângulo de posicionamento das amostras no impulsor.

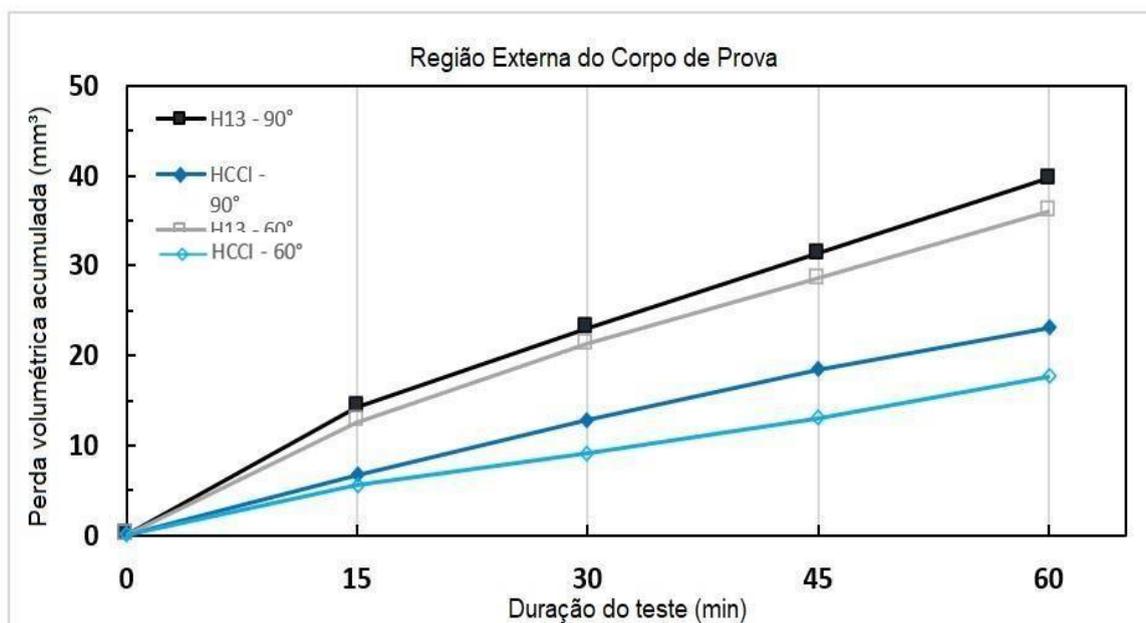


Figura 33: Perdas volumétricas das regiões externas dos corpos de prova dos materiais H13 e HCCI submetidos a ensaios de abrasão e impacto à 90° e 60°. Fonte: Pesquisa direta (2022)

Na Figura 34 é possível visualizar o acentuado desgaste sofrido pela região interna do aço H13, material mais dúctil e sem nenhuma proteção superficial aos mecanismos de corte e lascamento causados pelo abrasivo na superfície.

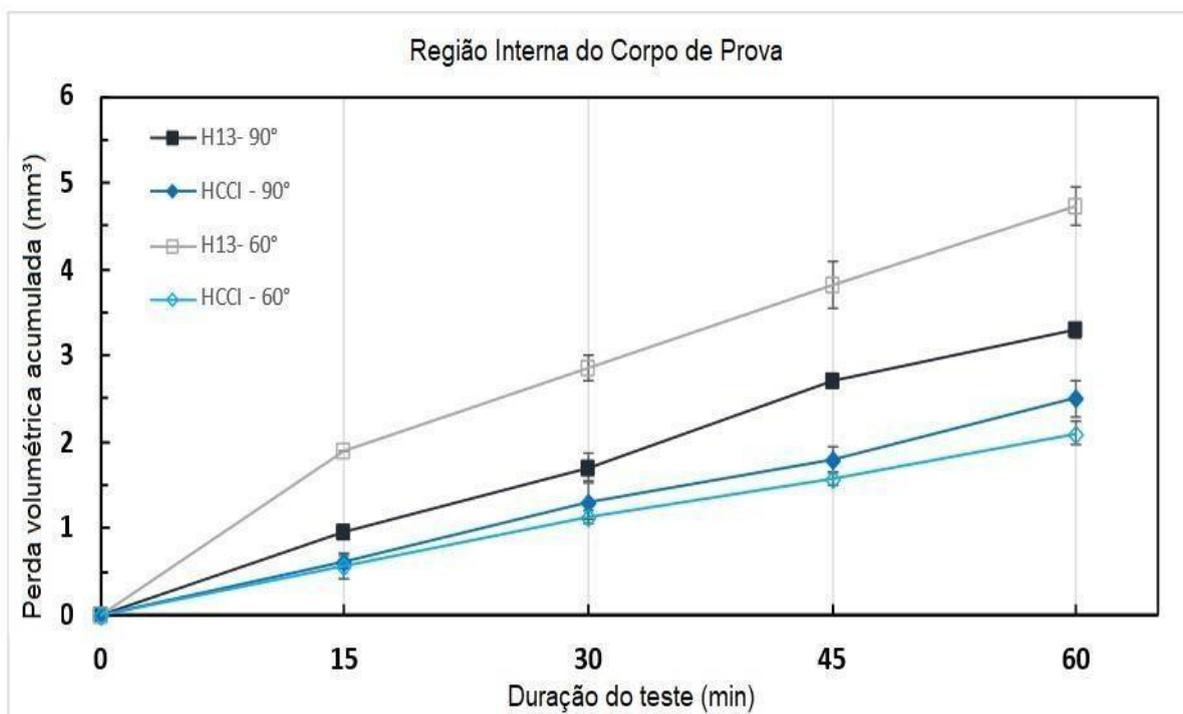


Figura 34: Perdas volumétricas das regiões internas dos corpos de prova dos materiais H13 e HCCI submetidos a ensaios de abrasão e impacto à 90° e 60°.

Fonte: Pesquisa direta (2022)

Além da diferença de mecanismos predominantes entre as duas regiões (externa e interna), a maior velocidade de impacto no topo das amostras quando comparada com a velocidade média no interior das amostras é um fator que pode influenciar nesse comportamento, pois o aumento da velocidade leva a uma maior energia de impacto local. As velocidades das amostras posicionadas no rotor de 90° são 8,06 m/s no topo, com média de 6,23 m/s para a totalidade do corpo de prova e, para as amostras posicionadas a 60° são 7,84 m/s para a região de topo com média total de 6,15 m/s.

5. CONCLUSÃO

5.1 Conclusões dos ensaios para classificação dos materiais

Os resultados coletados permitem avaliar e ranquear os materiais comerciais para placas de revestimentos internos de chutes de transferência selecionados para este trabalho, conforme o desempenho nos ensaios de desgaste por abrasão e impacto, desenvolvidos no tribômetro tambor-impulsor, tendo o aço ferramenta H13 como base comparativa.

Nos ensaios com rotor adaptado para incidência do abrasivo nos corpos de prova à 90°, onde foram avaliadas as regiões internas das amostras, ocorreram as maiores taxas de desgaste entre as duas variações de ângulo. A soma de uma matriz tenaz com a presença de segunda fase dura se mostrara positiva para a resistência ao desgaste, evidenciado pelos resultados do ferro fundido branco com carbonetos de cromo (HCCI), que apresentou menor desgaste médio, e do candidato bimetálico composto por matriz de ferro fundido nodular acrescida de carbetos de tungstênio e cobalto (WC-Co).

Ainda nos ensaios de 90°, o material revestido por solda (Weld) apresentou quantidade expressiva de defeitos superficiais em forma de trincas macroscópicas e poros, resultando na baixa resistência ao desgaste por impacto. A cerâmica de alumina por sua vez fraturou excessivamente durante os testes, o que acarretou perdas não comparativas as dos demais candidatos.

Os testes realizados com rotor de incidência abrasiva à 60° com os candidatos HCCI e H13, onde foram avaliadas as partes internas e externas dos corpos de prova, registraram o aumento da perda volumétrica das regiões internas do aço martensítico H13, indicando agravamento de micro cortes devido a ductilidade do material. O HCCI apresentou desgaste interno inferior com a diminuição do ângulo de incidência, evidenciando a atuação dos carbonetos de cromo dispersos em sua superfície, capazes de mitigar os mecanismos abrasivos predominantes nesta região. Nota-se assim a relevância de uma segunda fase dura para situações de incidência inclinada de abrasivos.

A concentração do desgaste nas regiões de borda foi percebida para os dois candidatos testados em ambas as inclinações de incidência abrasiva. Para o aço martensítico H13, a taxa de desgaste normalizada nas bordas representou aproximadamente 92% do desgaste sofrido nos ensaios de 90° e cerca de 89% para os ensaios de 60°. O ferro fundido branco de alto cromo (HCCI) teve cerca de 90% de sua perda volumétrica total localizada nas regiões externas dos corpos de prova.

5.2 Recomendações e trabalhos futuros

Este trabalho evidenciou as diferenças de comportamento de alguns dos materiais comerciais utilizados para mitigação do desgaste de chutes de transferência em operações de manejo de material granulado por bancadas transportadoras, onde ocorrem mecanismos de desgaste abrasivo e por impacto simultaneamente. Mostra-se necessário o entendimento da região interna do equipamento em foco para melhor aplicação dos materiais de engenharia, voltado para os mecanismos de desgaste predominantes, visto que em regiões de impacto os materiais considerados resistentes, porém muito frágeis, não se comportam da forma esperada (trincas e fraturas) enquanto nas regiões de deslizamento ainda possam apresentar resultados positivos.

O ângulo de incidência do material abrasivo nos revestimentos é também um fator a se considerar para escolha do revestimento destes equipamentos, observado o agravamento do desgaste de materiais dúcteis quando comparados aos que possuem uma segunda fase dura que atua como barreira aos mecanismos tribológicos.

Para trabalhos futuros adjacentes a essa pesquisa podem ser feitos estudos com menores ângulos de incidência do abrasivo, levando-se em consideração a área total exposta dos corpos de prova, que permitam avaliar atenuações ou agravamentos dos mecanismos de desgaste nos materiais. Ensaios de deslizamento, que utilizam do mesmo tribômetro em uma configuração de disposição de amostras diferente, podem também complementar o entendimento do desgaste dos materiais nas regiões de escorregamento de material granulado nos revestimentos de chutes de transferência.

A utilização de material abrasivo nos ensaios semelhante ao material passante nos equipamentos em foco de estudo pode também corroborar com a geração de dados mais precisos sobre o comportamento de cada material candidato a aplicação em revestimentos de chutes de transferência. O desenvolvimento de testes de campo para que sejam correlacionados aos resultados de laboratório possibilitariam a validação dos ensaios de abrasão e impacto utilizando o tribômetro tambor-impulsor, sendo assim uma ótima oportunidade para enriquecimento dessa linha de pesquisa em trabalhos futuros.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BLICKENSDEFER R. Design criteria and correction factors for field wear testing. *Wear*, v. 122, p. 165–182, 1988.
- CAMPOS, N. C. S. Desenvolvimento e construção de equipamento de ensaio de desgaste por abrasão e impacto para classificação de materiais de placas de chutes. [S.l: s.n.], 2021.
- CHEN, W.; BISWAS S.; ROBERTS, A.; O'SHEA, J.; WILLIAMS, K. Abrasion wear resistance of wall lining materials in bins and chutes during iron ore mining. *International Journal of Mineral Processing*, v. 167, p. 42–48, 2017.
- CRESWELL, J. D. *Projetos de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. [S.l: s.n.], 2021
- DOWSON, D. History of Tribology. [S.l: s.n.], 1979.
- FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002.
- GAHR, K. H. Z. *Microstructure and wear of materials*. [S.l.], Elsevier, 1987.
- GAHR, K. H. Z. Wear by hard particles. *Tribology International*, v. 31, n. 10, p. 587–596, 1998.
- GATES, J. D.; BENNET, P. J.; MCINNES, L. J.; TUNSTALL, B. R. The challenge of accurate prediction of industrial wear performance from laboratory tests. [S.l: s.n.], 2015.
- GATES, J. Wear plate and materials selection for sliding abrasion. *Australian Journal of Mining*, July/August, 2003.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Métodos de Pesquisa*. Porto Alegre: [s.n.], 2009
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4^a ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- HAWK, J. A. Laboratory abrasive wear tests: Investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, v. 225–229, n. PART II, p. 1031–1042, 1999
- HAWK, J.; WILSON, R. D. Impeller wear impact-abrasive wear test. *Wear*, v. 225–229, p. 1248–1257, 1999
- HOCKE, H. Wear-resistant materials for steelworks plant handling coke and sinter. *J. Eng. Ind.*, v. 95, p. 60–64, 1973.

HOLMBERG, K. *et al.* Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, v. 115, p.116–139, 2017.

HOLMBERG, K. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. [S.l: s.n.], 2019.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, v. 5, p. 263–284, 2017.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials*. 2º ed. [S.l.]: Matthew Deans, 2017.

ILLIC, D. Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes. *Wear*, p. 434–435, 2019.

MESQUITA, A. L. A.; SANTOS JR, R.M.; PIQUET, C. V. *Laboratório de transportadores de correia para análise de chutes em escala*. 2017.

PETERSON, M. B. *Wear Control Handbook*. [S.l: s.n.], 1980.

RATIA, V. Behavior of martensitic wear resistant steel in abrasion and impact wear testing conditions. *Tampere University of Technology*, v. 1342, 2015.

RATIA, V. *et al.* The role of edge-concentrated wear in impact-abrasion testing. *Tribology Online*, v. 11, p. 410–416, 2016.

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.

ROBERTS, A. W. Chute design considerations for feeding and transfer. [S.l; s.n.], 2001.

SILVA, J. R. *Caracterização de Sistemas Tribológicos e Seleção de Ligas para Revestimentos de Chutes de Transferência de Minério*. 2016.

SINATORA, A. Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte. [S.l: s.n.], 2005.

XU, L.; VOSE, C.; STJOHN, D. Abrasive wear study of selected white cast irons as liner materials for the mining industry. *Wear*, v. 162–164, p. 820-832, 19

ANEXO