

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PRODUTOS E
PROCESSOS

Nirvana Cecília Ribeiro

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOCORROSIVO DE DOIS AÇOS
FERRAMENTA CANDIDATOS À FABRICAÇÃO DE CAPAS DE
BRIQUETAGEM

Belo Horizonte (MG)
2025

Nirvana Cecília Ribeiro

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOCORROSIVO DE DOIS AÇOS
FERRAMENTA CANDIDATOS À FABRICAÇÃO DE CAPAS DE
BRIQUETAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos do CEFET-MG, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Raquel Vieira Mambrini

Coorientador: Dr. José Jimmy Penagos

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
– Brasil (CAPES)

Belo Horizonte
2025

Ribeiro, Nirvana Cecília.
R484a Avaliação do comportamento tribocorrosivo de dois aços
ferramenta candidatos à fabricação de capas de briquetagem /
Nirvana Cecília Ribeiro. – 2025.
92 f. : il.
Orientadora: Raquel Vieira Mambrini.
Coorientador: José Jimmy Penagos.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia de Produtos e Processos, Belo Horizonte, 2025.
Bibliografia.

1. Briquetes. 2. Tribocorrosão. 3. Aço - Corrosão. 4. Desgaste
abrasivo. I. Mambrini, Raquel Vieira. II. Penagos, José Jimmy. III.
Título.

CDD: 620.11223

NIRVANA CECÍLIA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOCORROSIVO DE DOIS AÇOS
FERRAMENTA CANDIDATOS À FABRICAÇÃO DE CAPAS DE BRIQUETAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Belo Horizonte, 04 de abril de 2025.

Aprovada pela Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO TRESSIA DE ANDRADE**
Data: 09/04/2025 16:30:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Gustavo Tressia De Andrade

Documento assinado digitalmente
 **ERNANE RODRIGUES DA SILVA**
Data: 27/04/2025 10:16:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Documento assinado digitalmente
 **LUZIA SERGINA DE FRANÇA NETA**
Data: 28/04/2025 13:36:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Luzia Sergina de França Neta

Documento assinado digitalmente
 **JOSE JIMMY PENAGOS**
Data: 22/04/2025 17:47:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jose Jimmy Penagos (coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **RAQUEL VIEIRA MAMBRINI**
Data: 07/04/2025 14:27:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Raquel Vieira Mambrini (orientadora)

RESUMO

O desgaste por tribocorrosão na briquetagem é reconhecido como um problema crítico, pois reduz a vida útil das superfícies das capas de rolos das prensas empregadas na compactação do minério de ferro (MFe). Com o objetivo de avaliar a resistência à tribocorrosão de aços ferramenta candidatos à fabricação de capas de briquetagem, o AISI H13 e D2, foram realizados testes no equipamento Miller com metodologia adaptada da norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM) G75. Os testes permitiram investigar o comportamento tribocorrosivo de materiais metálicos através do processo de abrasão-corrosão em polpas abrasivas, utilizando areia #100 e dois tipos de minérios de ferro (A1 e A2). Os abrasivos foram caracterizados quanto à composição química e mineralógica, resultando em 96,1% de quartzo para areia com tamanho de grão médio de 0,17mm, 99% de hematita para o abrasivo A1 e 98 % de hematita e 1% de quartzo para o A2. Os abrasivos apresentaram tamanho médio de partícula igual a 0,05 mm. Ambos os aços do estudo possuem matriz martensítica, mas diferem quanto a composição química e dureza. O aço D2 (58 HRC) apresentou microestrutura com carbeto de cromo, o que confere maior resistência ao desgaste quando comparado ao H13 (45 HRC). O comportamento tribocorrosivo foi influenciado pela composição da polpa. No tribossistema com polpa de areia #100, a taxa de desgaste foi 3 vezes maior para o aço H13, com predominância do componente de abrasão. Aços com maior dureza apresentam maior sinergismo dos fenômenos de abrasão-corrosão e no tribossistema D2-Areia #100 este fenômeno foi confirmado pela presença de corrosão nas áreas afetadas pelo desgaste abrasivo através da microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Em polpas de MFe, as taxas de desgaste foram menores, e apresentaram diferenças de 1,6 vezes entre os aços no tribossistema com polpa do abrasivo A1, e 1,8 vezes com polpa do abrasivo A2. As micrografias das superfícies de desgaste revelaram maior intensidade de corrosão no aço H13 em todos os tribossistemas estudados. Já no aço D2, a presença de corrosão foi de menor intensidade, porém, reforçou a probabilidade de ocorrência de corrosão na interface matriz-carbeto. Contudo, os resultados obtidos neste estudo indicaram que o aço D2 é um material alternativo para o aumento da vida útil das capas de briquetagem, oferecendo uma solução mais durável para aplicações que envolvem testes industriais.

Palavras-chave: briquetagem, tribocorrosão, capas de briquetagem, máquina Miller.

ABSTRACT

Tribocorrosion wear in briquetting is recognized as a critical problem, as it reduces the useful life of the surfaces of the roller covers of the presses used to compact iron ore (MFe). To assess the resistance to tribocorrosion of AISI H13 and D2 tool steels that are candidates for the manufacture of briquetting covers, tests were carried out on Miller equipment using a methodology adapted from the American Society for Testing and Materials (ASTM) G75 standard. The tests made it possible to investigate the tribocorrosive behavior of metallic materials through the abrasion-corrosion process on abrasive slurries, using #100 sand and two types of iron ore (A1 and A2). The abrasives were characterized in terms of their chemical and mineralogical composition, resulting in 96.1% quartz for sand with an average grain size of 0.17mm, 99% hematite for abrasive A1 and 98% hematite and 1% quartz for A2. The abrasives had an average particle size of 0.05 mm. Both steels in the study have a martensitic matrix but differ in terms of chemical composition and hardness. D2 steel (58 HRC) has a microstructure with chromium carbides, which gives it greater resistance to wear when compared to H13 (45 HRC). The tribocorrosive behavior was influenced by the composition of the pulp. In the tribosystem with #100 sand slurry, the wear rate was 3 times higher for H13 steel, with the abrasion component predominating. Steels with greater hardness show greater synergism of abrasion-corrosion phenomena and in the D2-Sand #100 tribosystem this phenomenon was confirmed by the presence of corrosion in the areas affected by abrasive wear through optical microscopy and scanning electron microscopy. In MFe slurries, the wear rates were lower and showed differences of 1.6 times between the steels in the tribosystem with A1 abrasive slurry, and 1.8 times with A2 abrasive slurry. The micrographs of the wear surfaces showed greater corrosion intensity on H13 steel in all the tribosystems studied. In the case of D2 steel, the presence of corrosion was less intense, but it reinforced the likelihood of corrosion occurring at the matrix-carbide interface. However, the results obtained in this study indicate that D2 steel is an alternative material for increasing the useful life of briquetting covers, offering a more durable solution for applications involving industrial testing.

Keywords: briquetting, tribocorrosion, roller tires, Miller machine.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Conceitos de Tribologia.....	4
3.1.1 Desgaste Abrasivo	6
3.1.2 Mecanismos de desgaste abrasivo	9
3.2 Conceitos de Corrosão.....	10
3.2.1 Mecanismos de corrosão.....	13
3.3 Tribocorrosão.....	15
3.4 O equipamento de briquetagem.....	19
3.4.1 Tribossistema real de operação.....	25
3.4.2 Materiais candidatos à fabricação de capas de briquetagem	26
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 Materiais.....	30
4.2 Estudo do comportamento tribocorrosivo de dois aços ferramenta.....	31
4.2.1 Corpos de prova.....	31
4.2.2 Ensaios de tribocorrosão segundo a norma ASTM G75.....	31
4.3 Caracterização dos materiais.....	32
4.3.1 Composição química dos aços.....	32
4.3.2 Composição mineralógica dos abrasivos.....	33
4.3.3 Dureza.....	33
4.3.4 Microestrutura.....	33
4.3.5 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)	34
4.3.6 Difração de raio X.....	34
4.3.7 Distribuição granulométrica por difração a laser.....	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 Caracterização dos aços.....	35
5.1.1 Composição química	35
5.1.2 Microestrutura.....	36

5.1.3	Dureza.....	37
5.2	<i>Caracterização dos abrasivos</i>	37
5.2.1	Composição química e mineralógica.....	37
5.2.2	Difração de raios X.....	38
5.2.3	Análise da distribuição granulométrica	41
5.3	<i>Análise do desgaste tribocorrosivo em máquina Miller</i>	43
5.3.1	Teste Miller com polpa de areia #100	43
5.3.2	Teste Miller com polpas de MFe	50
6	CONCLUSÕES	57
7	TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	APÊNDICES	67
	<i>Apêndice A – Dureza dos aços ferramenta estudados</i>	67
	<i>Apêndice B – Dados de desgaste obtidos do ensaio Miller</i>	70
	<i>Apêndice C – Ajuste linear para estimativa da taxa de desgaste</i>	73
	<i>Apêndice D – Teste estatístico de hipótese</i>	74
	ANEXOS	75
	<i>Anexo 1 – Distribuição granulométrica dos abrasivos</i>	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (% massa) do aço empregado nas capas de briquetagem do estudo.	27
Tabela 2 - Composição química (% massa) do AISI H13.	28
Tabela 3 - Composição química (% massa) do AISI D2.	28
Tabela 4 - Composição química (% massa) dos aços H13 e D2.	35
Tabela 5 - Dureza (HRC e HV ₃₀) dos aços H13 e D2.	37
Tabela A.6 - Dureza das amostras de H13 no tribossistema H13-Areia #100.	67
Tabela A.7 - Dureza das amostras de H13 no tribossistema H13-A1.	67
Tabela A.8 - Dureza das amostras de H13 no tribossistema H13-A2.	68
Tabela A.9 - Dureza das amostras de D2 no tribossistema D2-Areia #100.	68
Tabela A.10 - Dureza das amostras de D2 no tribossistema D2-A1.	69
Tabela A.11 - Dureza das amostras de D2 no tribossistema D2-A2.	69
Tabela B.12 - Perda de massa das amostras de H13 no tribossistema H13-Areia #100.	70
Tabela B.13 - Perda de massa das amostras de H13 no tribossistema H13-A1.	70
Tabela B.14 - Perda de massa das amostras de H13 no tribossistema H13-A2.	71
Tabela B.15 - Perda de massa das amostras de D2 no tribossistema D2-Areia #100.	71
Tabela B.16 - Perda de massa das amostras de D2 no tribossistema D2-A1.	71
Tabela B.17 - Perda de massa das amostras de D2 no tribossistema D2-A2.	72
Tabela C.18 - Ajustes lineares e R ² para as amostras dos aços D2 e H13 em polpa de areia e polpa dos abrasivos A1 e A2.	73
Tabela D.19 - Teste estatístico de hipótese.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Método de resolução de um problema tribológico.....	5
Figura 2 - Estrutura geral de um tribossistema.	6
Figura 3 - Tipo de desgaste conforme o movimento entre os corpos.	6
Figura 4 - Classificação do desgaste abrasivo devido ao número de corpos: a) dois corpos e b) três corpos.	7
Figura 5 - Relação entre a dureza do abrasivo e dureza do material desgastado.....	8
Figura 6 - Desgaste abrasivo como função da razão de dureza do abrasivo e dureza do material desgastado.....	9
Figura 7 - Mecanismos de desgaste abrasivo.....	10
Figura 8 - Árvore de falha básica de uma falha por corrosão.....	11
Figura 9 - Esquema de corrosão atmosférica do ferro.	13
Figura 10 - Formas de corrosão.	15
Figura 11 - Superfície de desgaste de um aço após ensaios em: a) Condições secas, b) Condições neutras e c) Condições corrosivas.....	17
Figura 12 - Máquina Miller.	18
Figura 13 - Estrutura de uma briquetadeira piloto.....	20
Figura 14 - Princípio de trabalho de briquetagem.	21
Figura 15 - Desenho esquemático das cavidades de uma capa de briquetagem.....	21
Figura 16 - Distribuição de pressão nos <i>pockets</i>	22
Figura 17 - Esquema ilustrativo do efeito bacia: a) capa antes do desgaste; b) capa após o desgaste; c) efeito bacia nas capas-espelho.	23
Figura 18 - Superfície de trabalho da capa após 1100 h de briquetagem de minério de cobre.	24
Figura 19 - Interação abrasão-corrosão: a) trilha de desgaste abrasivo, b) produto de corrosão nas trilhas de desgaste, c) interação abrasão-corrosão após remoção da camada grosseira do produto de corrosão.....	25
Figura 20 - Esquema do tribossistema real em estudo.....	26
Figura 21 - Esquema ilustrativo para ligas metálicas.	27
Figura 22 - Abrasivos: Areia #100, Minério A1 e Minério A2.	30
Figura 23 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio Miller.....	31
Figura 24 - Esquema de montagem da máquina Miller.....	32

Figura 25 - Microestrutura dos aços ferramenta: a) AISI H13 e b) AISI D2.	36
Figura 26 - Composição mineralógica dos abrasivos A1 e A2.....	38
Figura 27 - Difração de raio X: a) areia #100 de estudo; b) padrão de quartzo.	39
Figura 28 - Padrão de difração de raio X: a) Abrasivo A1; b) Abrasivo A2; c) Padrão de hematita.....	40
Figura 29 - Distribuição granulométrica areia #100.....	41
Figura 30 – Microscopia óptica e distribuição granulométrica dos abrasivos: a) abrasivo A1; b) abrasivo A2.....	42
Figura 31 - Perda de massa acumulada para todas as amostras dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.	44
Figura 32 - Média de perda de massa acumulada dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.	45
Figura 33 - Taxa de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.....	46
Figura 34 - Micrografias da superfície de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.	47
Figura 35 - Imagens de MEV da superfície desgastada em polpa de areia.	48
Figura 36 - Imagens de MEV da superfície de desgaste do aço D2 no tribossistema com polpa de areia #100.....	49
Figura 37 - Perda de massa acumulada para todas as amostras dos aços H13 e D2 em polpas de minério abrasivo A1 e A2.....	50
Figura 38 - Média das perdas de massa dos aços H13 e D2 em polpas de minério abrasivo: a) A1 e b) A2.	52
Figura 39 - Taxa de desgaste dos aços H13 e D2 em polpas de minério.....	53
Figura 40 - Imagens de microscopia óptica e MEV da superfície de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de minério A1.....	54
Figura 41- Imagens de microscopia óptica e MEV da superfície de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de minério A2.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

#: granulometria Mesh

a: ambiente

A1: abrasivo de minério de ferro 1

A2: abrasivo de minério de ferro 2

AISI: *American Iron and Steel Institute*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CEFET-MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CTF: Centro Tecnológico de Ferrosos

D: diâmetro

D2: aço-ferramenta para trabalho a frio

DEMAT: Departamento de Engenharia de Materiais

DRX: difração de raio X

GEE: gases do efeito estufa

H13: aço-ferramenta para trabalho a quente

H: hematita

H_m: dureza genérica do material

H_a: dureza genérica do abrasivo

HRC: Dureza Rockwell escala C

HV: Dureza Vickers

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LFS: Laboratório de Fenômenos de Superfície

m: material

MFe: Minério de Ferro

p: pessoas

P_{máx.}: pressão máxima no contato entre duas superfícies

pH: potencial hidrogeniônico

PIB: Produto Interno Bruto

Ra: parâmetro de rugosidade

ONU: Organização das Nações Unidas

Q: quartzo

RRUFF: *Raman Research for the Future*

SGB: Serviço Geológico do Brasil

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

USP: Universidade de São Paulo

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do desgaste na mineração é uma demanda constante que visa a estabilidade operacional de equipamentos nas instalações industriais. E isso influi diretamente sobre custos com substituições, manutenções e consumo de energia devido ao atrito. Além disso, a avaliação do desgaste está diretamente vinculada à segurança do operador. Logo, o desgaste abrasivo é um fator determinante para a seleção de materiais adequados à fabricação de máquinas e componentes aplicáveis na extração e beneficiamento mineral, siderurgia, indústria petrolífera e mais (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK, 2006).

A resistência ao desgaste não pode ser definida como uma propriedade intrínseca dos materiais, pois depende dos parâmetros que estão envolvidos no sistema tribológico (PENAGOS, 2016; ZUM GAHR, 1987). Logo, deve-se considerar as condições de operações do equipamento, o ambiente de instalação do maquinário, o material que compõe o maquinário e o elevado grau de abrasividade e dureza das partículas que constituem o abrasivo.

Danos nas superfícies de materiais, devido a remoção ou deslocamento de material, mostram-se associados à ação simultânea de diferentes mecanismos e processos de desgaste. A interação entre abrasão e corrosão determina o desgaste por tribocorrosão (ASTM, 2022; STACHOWIAK, 2006). Gates et al. (1995) observaram que a interação entre os fenômenos de abrasão e corrosão pode contribuir com o aumento significativo do desgaste em operações de processamento mineral, potencializando, portanto, a severidade desta deterioração.

Em processos de aglomeração a frio do minério de ferro (MFe), como a briquetagem, o fenômeno tribocorrosivo é reconhecido como um problema, pois a prática industrial mostra a redução a vida útil das superfícies das capas de rolos empregadas na compactação do MFe. A avaliação do desgaste de materiais é comumente regida por normas descritas pela Sociedade Americana de Testes e Materiais, do inglês *American Society for Testing and Materials* (ASTM), como a regulamentação da norma ASTM G65 para avaliação da resistência a abrasão a seco (ASTM, 2017). Para avaliar a resistência à tribocorrosão utiliza-se a norma ASTM G75, como uma metodologia laboratorial que permite a obtenção de dados referentes à perda de massa de um bloco metálico, submetido ao desgaste pelo contato com uma polpa por um período previamente determinado.

Nesse contexto, este estudo visa investigar o comportamento tribocorrosivo de potenciais candidatos à fabricação de capas de briquetagem, através ensaio do abrasão-corrosão na máquina Miller, com uma metodologia adaptada da norma ASTM G75, em polpa de areia comercial e polpas de dois diferentes produtos de MFe.

2. OBJETIVOS

2.1 *Objetivo Geral*

Avaliar o comportamento tribocorrosivo dos aços ferramenta AISI H13 e D2 candidatos à fabricação de capas de rolos de briquetagem.

2.2 *Objetivos Específicos*

- Caracterizar os aços AISI H13 e D2 por espectroscopia de emissão óptica por centelhamento e combustão, dureza, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura;
- Caracterizar os abrasivos (areia normal brasileira, minério A1 e minério A2) por microscopia óptica, difração de raio X e distribuição granulométrica;
- Avaliar a resistência ao desgaste tribocorrosivo baseado na metodologia da norma ASTM G75;
- Determinar e comparar os mecanismos de abrasão-corrosão produzidos nos ensaios de laboratório;
- Correlacionar as características dos tribossistemas com o desempenho tribocorrosivo dos aços AISI H13 e D2.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais temas desta dissertação. A abordagem inicia-se com os conceitos de tribologia, incluindo desgaste abrasivo, suas classificações e mecanismos. Em seguida, descreve-se o fenômeno de tribocorrosão e a avaliação do comportamento tribocorrosivo de materiais por meio do ensaio de desgaste abrasão-corrosão em equipamento Miller. Por fim, inclui-se um breve descritivo sobre briquetagem de MFe o efeito do desgaste na vida útil de um equipamento de briquetagem, usando a abordagem de um tribossistema real.

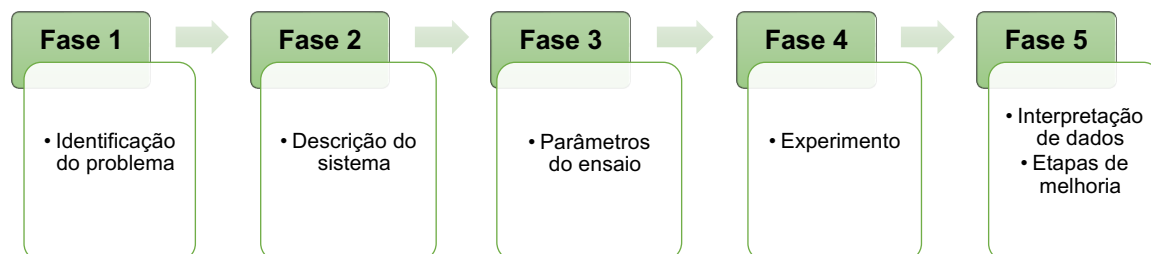
3.1 *Conceitos de Tribologia*

Tribologia é a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo, centrada no atrito, desgaste e na lubrificação. Embora os estudos tribológicos sejam relatados ao longo da história, como os primeiros desenvolvimentos científicos sobre atrito e desgaste conduzidos por Leonardo da Vinci (1452-1519), o reconhecimento da terminologia “tribologia” foi definido na década de 1960 por um comitê de Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, no Reino Unido (STACHOWIAK, 2006). O trabalho governamental desenvolvido por este comitê correlacionou a perda de aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto (PIB) do país mediante a omissão da tribologia, inferindo, portanto, no consumo de energia da indústria britânica (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O desgaste é a principal causa de perda de material e da redução de desempenho mecânico de uma superfície sólida. Sempre que as superfícies se movimentam umas sobre as outras, há perda progressiva de material mediante ação de atrito e desgaste, provocando aumento das folgas entre os componentes móveis, movimentos indesejados e perdas de precisão. Quando intenso, o desgaste pode causar a falha completa de máquinas grandes e complexas, levando à grandes desastres de engenharia (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK, 2006).

A solução para um problema de desgaste depende da investigação de múltiplos fatores do sistema tribológico (tribossistema) (ZUM GAHR, 1987). Munoz, Espallargas e Mischler (2020) sugerem que para compreender um tribossistema, é necessário atentar-se a alguns passos, conforme esquematizado na Figura 1.

Figura 1 - Método de resolução de um problema tribológico.

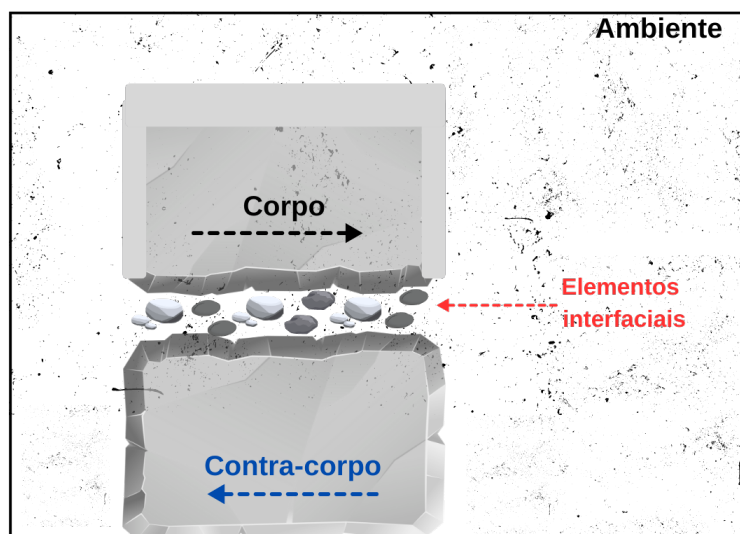


Fonte: Adaptado de Munoz, Espallargas e Mischler, 2020.

Na fase 1, uma inspeção preliminar deve contemplar o problema de forma macroscópica, tornando possível identificar riscos, transferência ou adesão de material, corrosão ou oxidação localizada. Nesta etapa, a observação pode ser a olho nu ou por técnicas que possibilitam ampliar a escala. Assim, identificado o problema, deve-se investigar os demais parâmetros do sistema (fase 2), incluindo: o meio (pH, temperatura, e a atmosfera), o material (composição química, dureza, rugosidade e microestrutura) e as condições dinâmicas (carga, tipo de contato, geometria da peça e presença/ausência de lubrificantes). Na fase 3, busca-se solucionar o problema através da pesquisa em escala laboratorial. Em seguida (fase 4), aplicam-se os parâmetros do ensaio definidos anteriormente, e, por fim, faz-se a interpretação dos resultados e implementação de medidas mitigadoras e de melhoria (fase 5) (MUNOZ; ESPALLARGAS; MISCHLER, 2020).

Adicionalmente, Zum Gahr (1987) propõe que a estrutura geral de um tribossistema deve apresentar sua descrição estrutural e funcional, considerando as propriedades e as interações entre os seus elementos. Na Figura 2, o autor esquematiza esta descrição, identificando os constituintes do tribossistema, como: corpo, contra-corpo, elementos interfaciais e o ambiente.

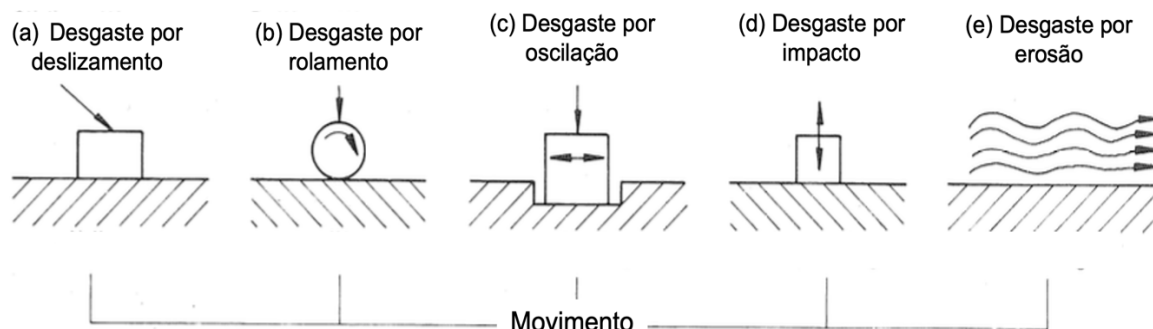
Figura 2 - Estrutura geral de um tribossistema.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

O tipo de movimento relativo entre os corpos pode classificar diferentes processos de desgaste. A Figura 3 descreve o tipo de desgaste conforme o movimento entre os corpos, sendo eles: (a) desgaste por deslizamento, (b) desgaste por rolamento, (c) desgaste por oscilação, (d) desgaste por impacto e (e) desgaste por erosão (ZUM GAHR, 1987).

Figura 3 - Tipo de desgaste conforme o movimento entre os corpos.



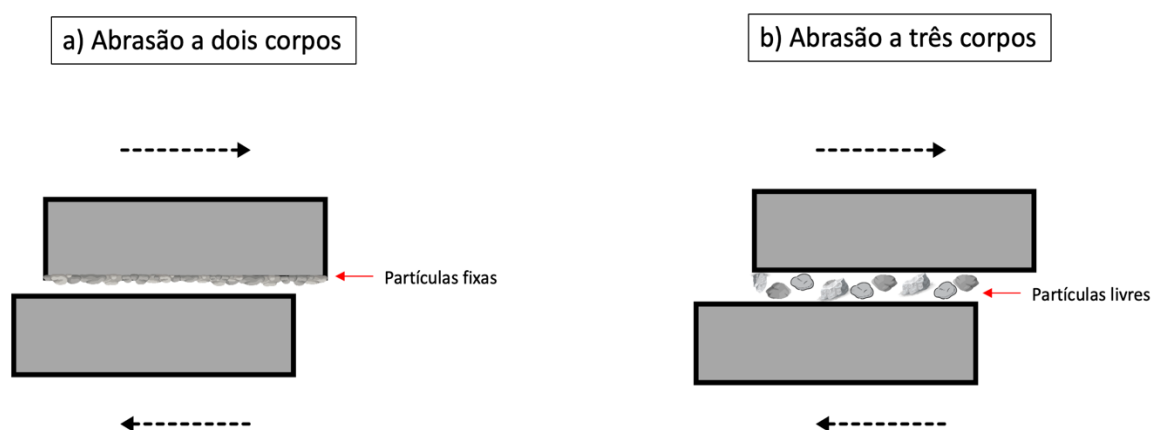
Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

3.1.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo, segundo a norma ASTM G40, dá-se pela remoção ou deslocamento de material de uma superfície por partículas ou protuberâncias duras, forçadas contra a superfície sólida e movimento relativo ao longo de sua extensão. O

número de corpos envolvidos classifica o desgaste abrasivo em desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos (Figura 4) (BURWELL, 1958; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; ZUM GAHR, 1987). A abrasão a dois corpos é resultado da remoção de material do corpo, no qual as partículas ou protuberâncias duras estão fixas no contra-corpo. Já no desgaste abrasivo a três corpos, as partículas abrasivas estão livres entre as superfícies, podendo rolar ou deslizar entre as superfícies (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Figura 4 - Classificação do desgaste abrasivo devido ao número de corpos: a) dois corpos e b) três corpos.



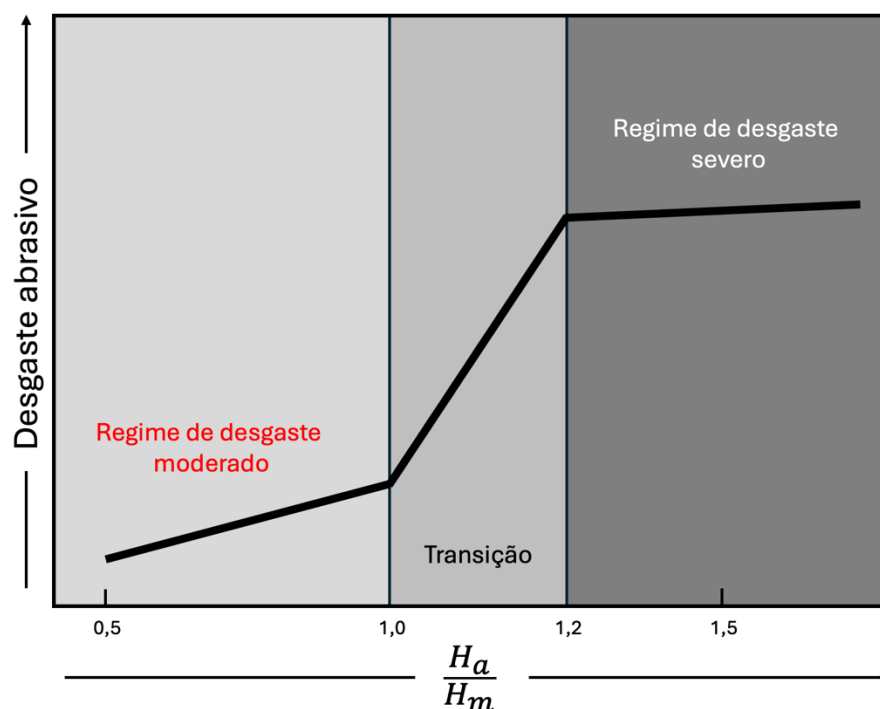
Fonte: Adaptado de Hutchings; Shipway, 2017.

Avery (1977) utiliza outros termos para classificar o desgaste abrasivo, dessa vez, de acordo com os níveis de tensão ou esforços. Seu trabalho classifica o desgaste abrasivo em função dos esforços encontrados na indústria de mineração, em três categorias: o desgaste abrasivo de altos e baixos esforços e abrasão por goivagem, do inglês *gouging abrasion*. Na abrasão de altos esforços as partículas duras são quebradas durante o processo de desgaste, enquanto na abrasão de baixos esforços as partículas abrasivas não se quebram uma vez que as tensões são pequenas. Na goivagem a escala de tamanho dos abrasivos é superior aos demais casos e este processo de desgaste se dá pelo impacto (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Adicionalmente, a intensidade do desgaste é um fator relevante do sistema. Zum Gahr (1987) demonstra, através da Figura 5, que a razão entre a dureza do abrasivo (H_a)

e a dureza do material (H_m) a ser desgastado determina a intensidade do desgaste abrasivo. Khruschov (1974) complementa esta análise ao descrever que a razão entre a dureza do abrasivo e a dureza do material desgastado, $\frac{H_a}{H_m}$, deve obedecer à condição $H_a > 1,2H_m$ para que ocorra a abrasão de um material. Esta relação define o regime do desgaste abrasivo como: regime moderado e regime severo.

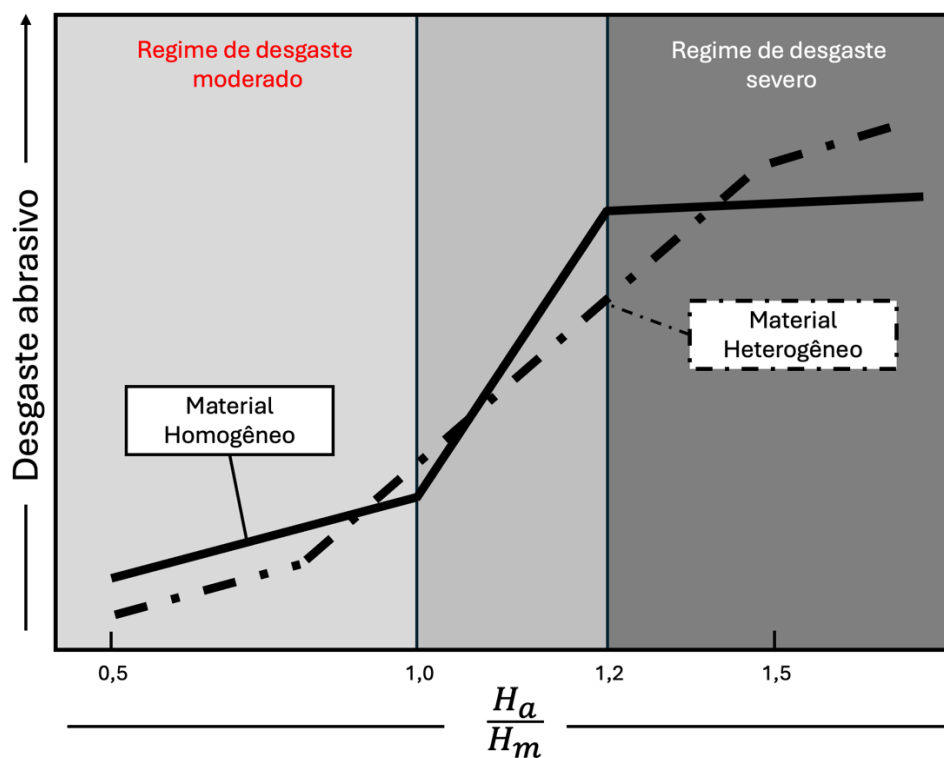
Figura 5 - Relação entre a dureza do abrasivo e dureza do material desgastado.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

A mudança na severidade do nível de desgaste é mais pronunciada em materiais homogêneos, onde a transição de regime ocorre quando a dureza do abrasivo se iguala à dureza do material, ou seja, quando sua razão é 1. O esquema da Figura 6 compara o comportamento de materiais homogêneos e heterogêneos sob condições do desgaste abrasivo. No caso dos materiais heterogêneos, aqueles que incluem carbeto duros em sua matriz, a transição pode ser vista quando a dureza do material for maior que a dureza do abrasivo. Esta transição ocorre de maneira mais suave, pois a presença de fase dura (como os carbeto) confere maior resistência ao desgaste.

Figura 6 - Desgaste abrasivo como função da razão de dureza do abrasivo e dureza do material desgastado.

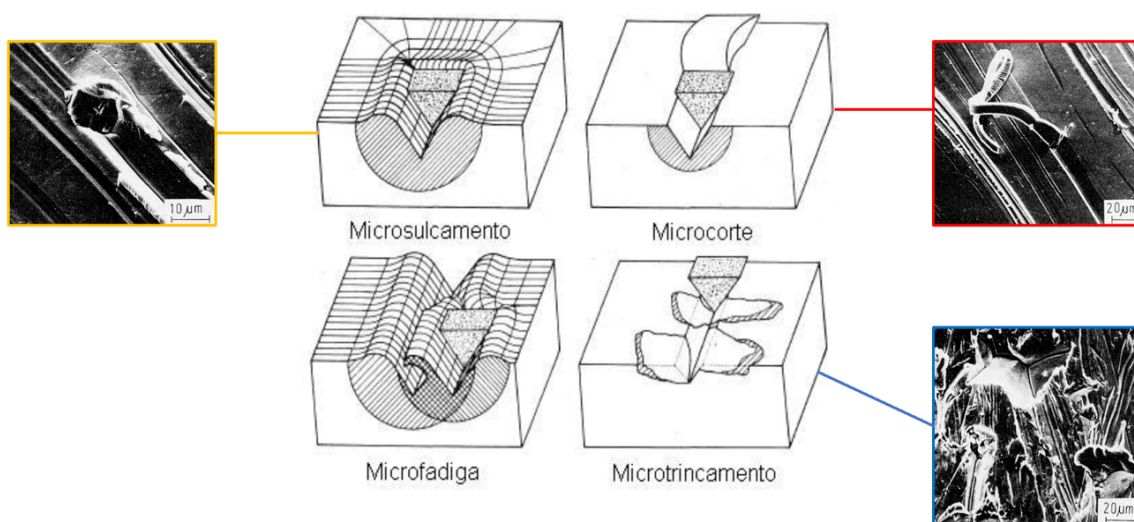


Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

3.1.2 Mecanismos de desgaste abrasivo

Conforme descrição anterior, o desgaste abrasivo pode ser influenciado por muitos fatores, incluindo propriedades do abrasivo, do material a ser desgastado e o sistema, como um todo. Zum Gahr (1987) descreve que as partículas ou protuberâncias duras podem remover material da superfície por microsulcamento, microcorte, microtrincamento e microfadiga (Figura 7). O mecanismo de microsulcamento origina-se da deformação plástica, enquanto a microfratura é um mecanismo de fratura frágil (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Figura 7 - Mecanismos de desgaste abrasivo.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

O microsulcamento se dá pela criação de um sulco na superfície do material devido o deslocamento do material para a lateral e a formação de uma proa a frente da partícula dura (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A ação simultânea de múltiplas partículas e a tensão repetida podem causar microfadiga (STACHOWIAK, 2006; ZUM GAHR, 1987). Dentre os mecanismos listados o microcorte e o microtrincamento apresentam maior severidade.

Zum Gahr (1987) afirma que o ângulo de ataque da partícula abrasiva sob a superfície sólida pode determinar o tipo de mecanismo no desgaste abrasivo, seja ele microsulcamento ou microcorte. Porém, no microcorte o material é destacado, e, este desprendimento ocorre devido a criticidade do ângulo de ataque do abrasivo.

3.2 Conceitos de Corrosão

A corrosão é conhecida como um processo, geralmente espontâneo, de deterioração de materiais. As interações físico-químicas são provenientes de ações químicas ou eletroquímicas que podem ser potencializadas quando combinadas com esforços mecânicos (GENTIL, 2017; ROBERGE, 1999).

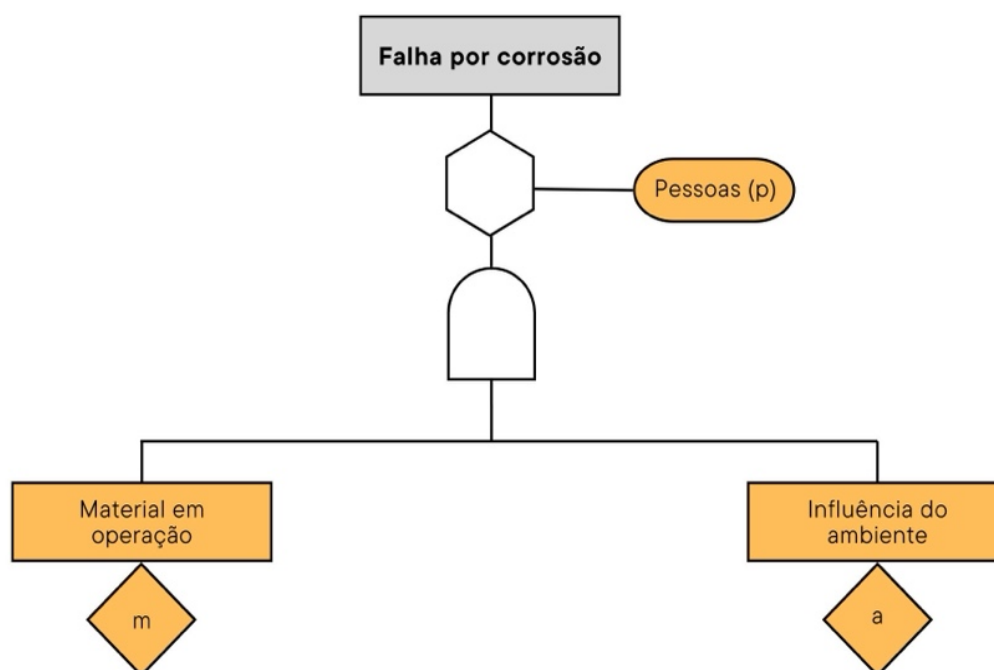
Em 1949, o professor Uhlig relatou os primeiros dados significativos sobre o custo da corrosão na Conferência Científica sobre a Conservação e a Utilização de Reservas

Minerais, evento da Organização das Nações Unidas (ONU). Sua análise foi pioneira ao quantificar o impacto dos custos diretos e indiretos da corrosão em projetos industriais (GENTIL, 2017; UHLIG, 1949).

Segundo Roberge (1999), quando um sistema de engenharia funciona conforme sua expectativa, há interação entre três fatores: pessoas (p), material (m) e o ambiente (a). Esta associação foi discutida em seu trabalho, que resultou em uma ferramenta para correlacionar a probabilidade de acontecimento de uma falha por corrosão.

A Figura 8 descreve uma árvore de falha básica para um acontecimento por efeito da corrosão. Nesta descrição, o fator p foi considerado como um fator inibidor (ou evento condicional), tendo em vista que a intervenção humana pode se tornar uma influência para a ocorrência de falha por corrosão (ROBERGE, 1999).

Figura 8 - Árvore de falha básica de uma falha por corrosão.



Fonte: Adaptado de Roberge, 1999.

Ao transformar essa relação em uma equação algébrica (Equação 1), Roberge (1999) afirma que a monitorização constante dos fatores ambientais e humanos minimizam os efeitos da corrosão. Logo, a probabilidade de falha em um sistema, devido a corrosão, pode ser calculada conforme descrição abaixo:

$$P_{fs} = P_m P_a \text{Fator}_p \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

P_{fs} : Probabilidade de falha no sistema;

P_m : Probabilidade de falha causada pelo material;

P_a : Probabilidade de falha causada pelo ambiente;

Fator_p : Fator de inibição (<1) ou Fator de agravamento (>1).

Gentil (2017) atribui a ocorrência dos processos corrosivos sob meios os quais os materiais estão inseridos e seus respectivos eletrólitos. Dentre os meios corrosivos, os mais difundidos na literatura são: a atmosfera, os solos, águas naturais (rios e lagos), água do mar e produtos químicos.

A ocorrência de corrosão atmosférica está diretamente associada à heterogeneidade deste meio, pois, o teor de umidade, a temperatura, a incidência de insolação e os contaminantes podem intensificar a taxa de deterioração de um material (GENTIL, 2017; ROBERGE, 1999; REVIE; UHLIG, 2008). De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (SGB), a atmosfera é composta por gases, sendo em sua maioria: nitrogênio (78,09%), oxigênio (20,95%), argônio (0,93%), vapor de água e outros gases (BRANCO, 2014). As principais fontes de outros gases são as emissões industriais, que modificam a composição química do ar mediante a presença de substâncias poluentes. A presença de gases do efeito estufa (GEE) no ar, intensificam a temperatura terrestre, provocam mudança de pH das chuvas e do solo (TAN, 2017).

Revie e Uhlig (2008) descrevem a teoria eletroquímica da corrosão atmosférica em ferro e aço, considerando que as zonas anódicas apresentam a reação (Equação 2):



A Figura 9 descreve a corrosão do ferro através da ação atmosférica. Considera-se que quando o ferro sofre corrosão, a velocidade reacional é controlada pela reação catódica. Esta reação acontece lentamente em ambiente sem aeração (Equação 3) e mais rapidamente quando há aeração diferencial, que resulta no $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (Equação 4). O ferro ainda pode passar por outra oxidação e se apresentar como hidróxido de ferro III ($\text{Fe}(\text{OH})_3$).

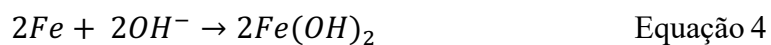
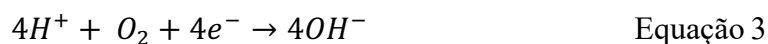
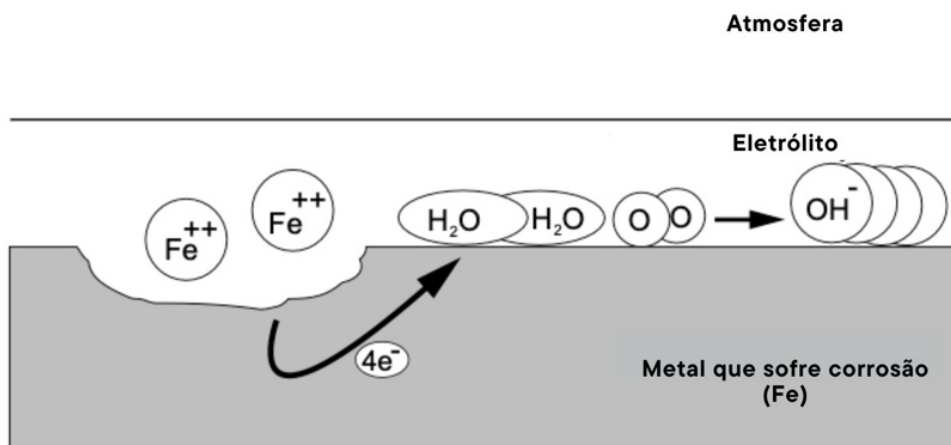


Figura 9 - Esquema de corrosão atmosférica do ferro.



Fonte: Roberge, 1999.

Adicionalmente, os fatores que potencializam a corrosão mostram-se associados aos fatores metalúrgicos. O sistema de corrosão eletroquímica entre o metal e o meio pode ser influenciado pelo contorno dos grãos, uma vez que os átomos na estrutura cristalina podem apresentar certo desarranjo (GENTIL, 2017).

A composição química dos materiais metálicos como ferro e aços comerciais pode ser ajustada para torná-los mais resistentes à corrosão, incluindo teores mais elevados de cromo (REVIE; UHLIG, 2008). Esses elementos são acrescentados em concentrações específicas que apresentam conformidade mediante especificações técnicas e normas regulamentadoras. O teor de cromo, quando superior de 12%, corrobora com a formação de uma película estável de óxido de cromo, que surge como produto de corrosão (ASMHANDBOOK, 2003).

3.2.1 Mecanismos de corrosão

A classificação dos mecanismos de corrosão se baseia na forma de como o fenômeno se manifesta na superfície corroída. Fontana (1987) descreve oito formas, mas destaca que em muitos casos os fenômenos acontecem simultaneamente, sendo difícil

obter uma segregação total do tipo de corrosão. O autor descreve os mecanismos de corrosão como: corrosão uniforme, corrosão galvânica, corrosão em fendas, corrosão por pites, corrosão intergranular; lixiviação seletiva, corrosão por erosão e corrosão sob tensão.

Outros autores apresentam nomenclaturas distintas de Fontana (1987). A Figura 10 mostra as formas de corrosão descritas por Gentil (2017): uniforme, intergranular (a olho nu e micrografia), corrosão em placas, alveolar, puntiforme, filiforme e intragranular.

A corrosão uniforme é o tipo mais comum, caracterizada pela presença em toda a extensão da superfície. Já em áreas específicas, a corrosão se dá por placas com escavações na superfície deteriorada (GENTIL, 2017).

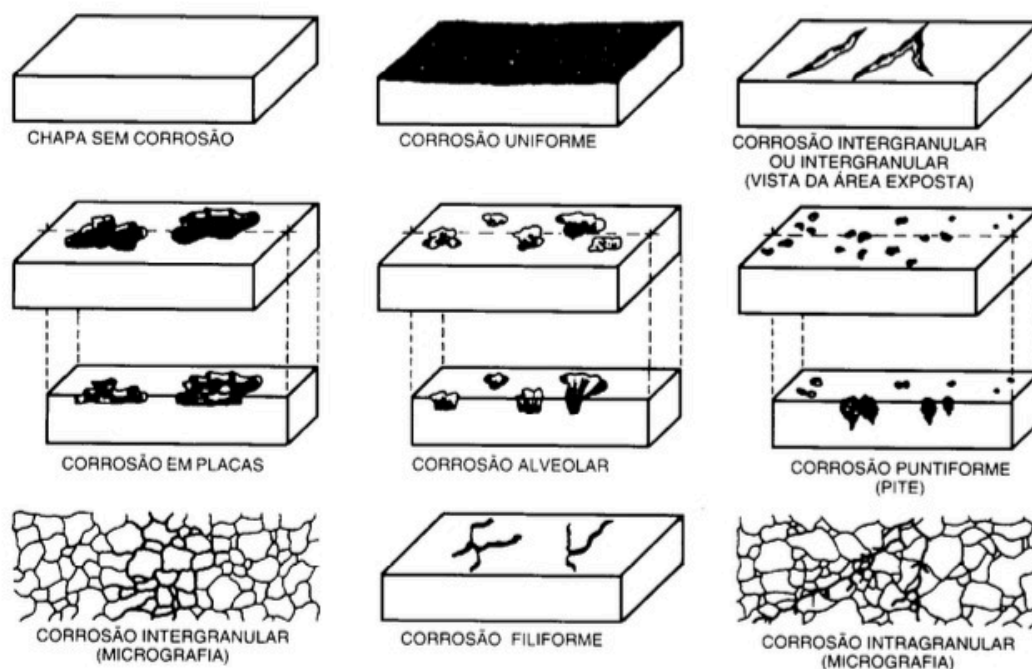
Quando há dois metais distintos, em contato com uma solução eletrolítica, a corrosão ocorre como uma pilha, logo, é chamada de corrosão galvânica. Este tipo depende de diversos fatores como as diferenças de potenciais, efeitos ambientais, condutividade da solução e área exposta (FONTANA, 1987).

A corrosão por fendas ou juntas é uma consequência do depósito de solução em superfícies sobrepostas, como cabeças de parafuso e rebites, por exemplo. De maneira menos frequente, este tipo de corrosão pode acontecer sob uma película e recebe o nome de corrosão filiforme (FONTANA, 1987; GENTIL, 2017; ROBERGE, 1999).

Quando a corrosão resulta na modificação acentuada das asperezas da superfície, causando um aumento significativo da rugosidade, é nomeada corrosão por pite (REVIE; UHLIG, 2008). Esta forma é intensa e localizada, com crescimento orientado por ação da gravidade. O desenvolvimento de pite em uma superfície metálica pode ser autocatalítico ou depender da composição da solução eletrolítica (GENTIL, 2017). Esta forma de corrosão está diretamente vinculada à microestrutura do material e a velocidade de crescimento dos ataques (ROBERGE, 1999).

Fontana (1987) descreve a corrosão intergranular como a forma de corrosão que ocorre nos contornos de grão. Geralmente, a corrosão se dá por um ataque uniforme, porém, quando acontece na interface dos grãos, as reações podem ser intragranulares.

Figura 10 - Formas de corrosão.



Fonte: Adaptado de Gentil, 2017.

3.3 Tribocorrosão

A tribocorrosão é um fenômeno que combina os efeitos da abrasão e da corrosão, resultando na degradação acelerada da superfície de materiais (ASTM, G75). Este processo ocorre devido a remoção de material de uma superfície metálica que, consequentemente, expõe uma nova camada ativa e quimicamente reativa, susceptível às ações do meio ambiente. A interação entre os processos, químicos e mecânicos, em superfícies sujeitas ao movimento relativo em uma atmosfera corrosiva, intensifica a ação do desgaste, determinando-o como desgaste tribocorrosivo (KAJDAS; HIRATSUKA, 2018).

De acordo com Mathew et al. (2009), a compreensão dos fundamentos de tribocorrosão é necessária para selecionar materiais para algumas aplicações específicas, uma vez que a ação sinérgica dos efeitos mecânicos e ambientais pode ser significativamente maior que o esperado pela soma dos danos de cada processo individualmente.

Hutchings e Shipway (2017) afirmam que o processo de degradação por tribocorrosão pode ser mensurado pela taxa total de perda de massa de um material em condições de tribocorrosão. Esta taxa T se dá pela soma da taxa de desgaste e a taxa de corrosão, acrescida do fator de sinergia. O cálculo de avaliação do sinergismo abrasão-corrosão se dá conforme a Equação 5.

$$T = W_0 + C_0 + S \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

T : perda de massa total;

W_0 : Probabilidade de falha no sistema;

C_0 : Taxa de corrosão eletroquímica sem desgaste mecânico;

S : Efeito sinérgico.

Em 2022, a norma ASTM G119 apresentou uma metodologia padronizada para avaliar a coesão entre os fenômenos de abrasão-corrosão em sistemas que envolvem soluções ou lamas. Geralmente utilizada para analisar a durabilidade e desempenho dos materiais, este guia estabeleceu critérios para interpretação de dados obtidos em teste de desgaste abrasivo e corrosivo através da mesma equação citada anteriormente (Equação 5). Em destaque, a norma possibilita a quantificação do sinergismo, sendo essencial para mitigar a perda de material (ASTM, 2022).

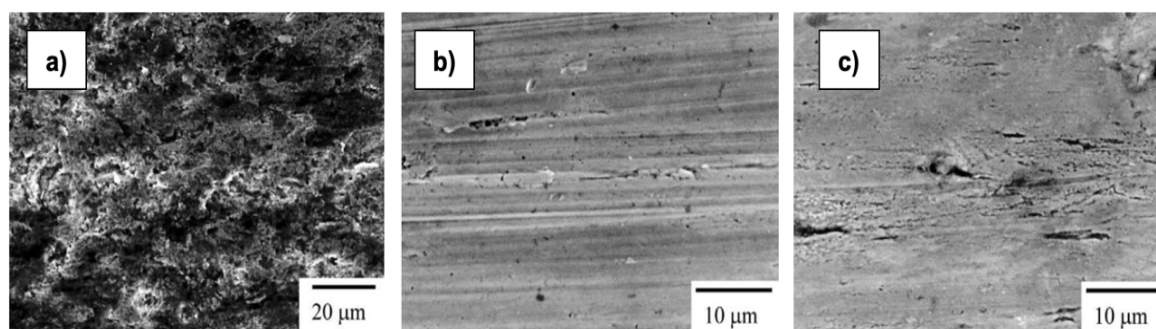
A fim de investigar a resistência ao desgaste dos materiais submetidos a diferentes condições, Shipway e Wirojanupatump (2002) investigaram o desgaste abrasivo em ambientes aquosos-corrosivos e não corrosivos, mediante adaptação de equipamento roda de borracha. O equipamento foi utilizado para avaliar o comportamento de três tipos de materiais, com abrasivo de sílica, nas seguintes condições:

- i. Condições secas;
- ii. Condições de polpa neutra (água destilada);
- iii. Condições de polpa corrosiva (5% de ácido sulfúrico $v v^{-1}$).

Os autores destacam que o aço macio sofreu desgaste severo nas condições de teste a seco devido ação mecânica, como mostra a Figura 11a. O desgaste nessas condições ocorreu preferencialmente por indentações. Em contrapartida, os ensaios em condições de polpa apresentaram similaridade, evidenciando a mudança dos mecanismos

de desgaste para microcorte e riscamento. Essa alteração sugere uma transição no comportamento tribológico devido à presença do meio líquido. Entretanto, nas condições de polpa corrosiva, destaca-se a ação corrosiva mediante a formação de poros alongados na superfície da amostra (SHIPWAY; WIROJANUPATUMB, (2002). A Figura 11c destaca a presença dos fenômenos de abrasão-corrosão na superfície do aço. Além disso, o estudo de Shipway e Wirojanupatump (2002) revela que a taxa de desgaste em condições secas é aproximadamente 12% maior do que em condições úmidas, o que pode estar atribuído à severidade da ação mecânica. No entanto, em todos os casos analisados, houve um aumento na taxa de desgaste sob condições ácidas quando comparado à polpa neutra.

Figura 11 - Superfície de desgaste de um aço após ensaios em: a) Condições secas, b) Condições neutras e c) Condições corrosivas.



Fonte: Shipway; Wirojanupatump, 2020.

Trabalhos recentes, como o de Santos et al. (2025), avaliaram o desempenho tribocorrosivo de bolas de moagem em polpa de minério de cobre. A Figura 12 mostra o equipamento de teste Miller utilizado neste estudo, que além de simular condições de baixa tensão, permitiu avaliar o comportamento tribocorrosivo de materiais comerciais. O objetivo principal foi fornecer uma metodologia mais completa para avaliar a vida útil de bolas de moinho fabricadas em ferro fundido branco, baseando-se em metodologias previamente estabelecidas como a ASTM G75.

Figura 12 - Máquina Miller.



Fonte: Adaptado de Ribeiro et al., 2024.

A norma ASTM G75 consiste em uma metodologia laboratorial que permite a obtenção de dados referentes à perda de massa de um bloco metálico, submetido ao desgaste pelo contato com uma polpa por um período previamente determinado. O ensaio fornece o índice da abrasividade relativa de polpas (número Miller), originário de uma amostra referência, para ranqueamento da abrasividade em função do desgaste (desgaste abrasivo a três corpos) do material metálico padrão. Para testar vários materiais, aplica-se uma polpa específica de interesse, a fim de classificar a taxa de desgaste mediante resposta abrasiva, com o número SAR, do inglês, *Slurry Abrasion Response* (ASTM, 2021).

No estudo de Santos e demais colaboradores (2025), os autores conseguiram replicar, em escala laboratorial, o comportamento tribocorrosivo da mina Salobo localizada em Marabá, Brasil. Para isso, foi utilizado o equipamento Miller com uma metodologia adaptada da norma ASTM G75. Os resultados obtidos mostraram-se promissores para a seleção de materiais comerciais mais resistentes à tribocorrosão, visando a aplicação na indústria de mineração.

Jiang, Yao e Xie (2021) destaca a relevância de abordar o tema no âmbito industrial. Este estudo enfatiza a importância de compreender o efeito dos parâmetros de um tribossistema sobre a sinergia entre abrasão-corrosão, utilizando o equipamento Miller para realização dos testes. Os autores observaram que a corrosão é comumente acelerada pelo desgaste devido à ativação mecânica da superfície metálica e ao aumento da atividade da área desgastada pela deformação plástica. Ambas as ocasiões tornam o metal mais susceptível à corrosão. Além disso, a pesquisa destaca o efeito da distância de deslizamento, comumente, atribuída à metodologia descrita pela ASTM G75.

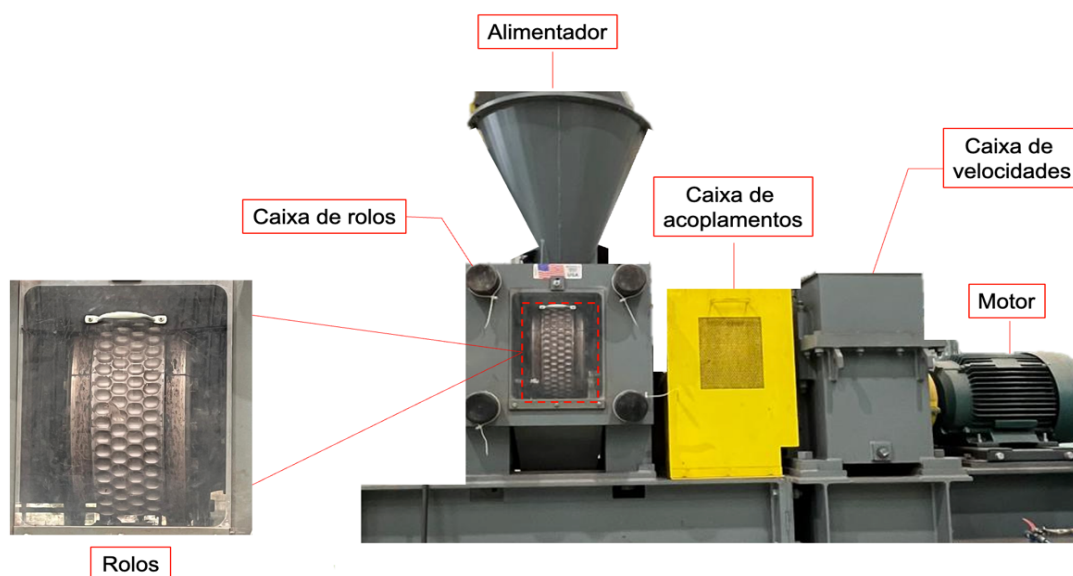
3.4 *O equipamento de briquetagem*

A compactação de MFe é um processo pioneiro para a indústria de mineração, pois sua viabilidade permite o aproveitamento de uma quantidade maior de finos que poderiam ser perdidos ou acumulados ao longo das etapas de processamento (VALE S.A., 2021; VALE S.A., 2023a, b). Além disso, este processo promove a industrialização sustentável e fomenta a inovação como estabelecido no nono objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU (ARTAXO, 2014; ONU, 2023), pois a operação possibilita atender as projeções ambientais quanto a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros GEE (VALE S.A., 2021; VALE S.A., 2023a, b).

Com o compromisso de reduzir e mitigar impactos ambientais do processo de beneficiamento do MFe, o briquete recebe o nome de “briquete verde”. Este produto apresenta vantagens quando comparado aos processos executados na atualidade, como a pelotização e a sinterização, pois além de reduzir as emissões de CO₂, é considerado um processo mais simples, sem o uso de água para resfriamento e oferece um produto final com resistência mecânica adequada (VALE S.A., 2021; VALE S.A., 2023a, b; ZHANG; SOL; XU, 2018).

A briquetadeira é uma estrutura complexa de compactação pressurizada que consiste em elementos para a alimentação da mistura (MFe + aglomerado) e moldagem contínua do aglomerado em superfícies projetadas para este fim. Normalmente, a configuração do equipamento é constituída de sistemas de acionamento, caixa dos rolos, suporte para os rolos e a unidade de compactação, que é integrada pelos rolos e a unidade de alimentação simultaneamente (BEMBENEK, 2020). A Figura 13 elucida, de forma esquemática, uma briquetadeira de escala piloto e seus componentes.

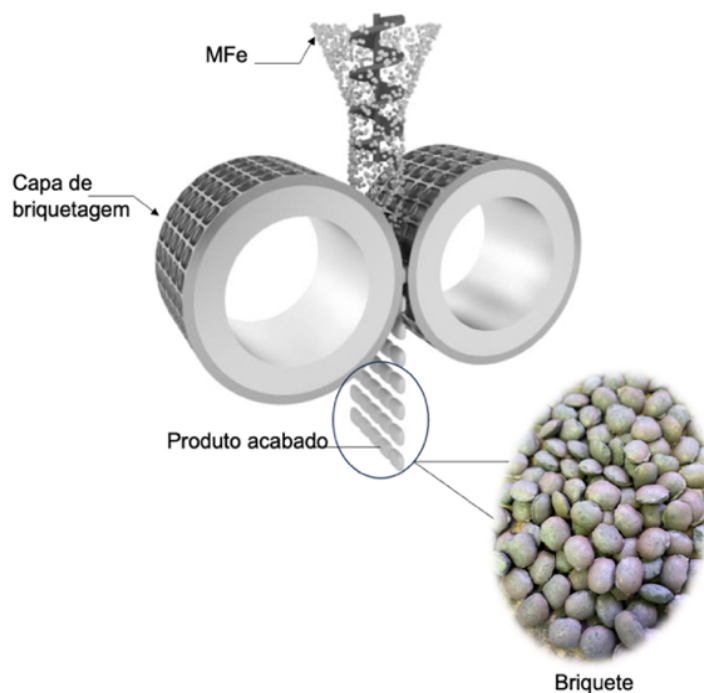
Figura 13 - Estrutura de uma briquetadeira piloto.



Fonte: Autoria própria.

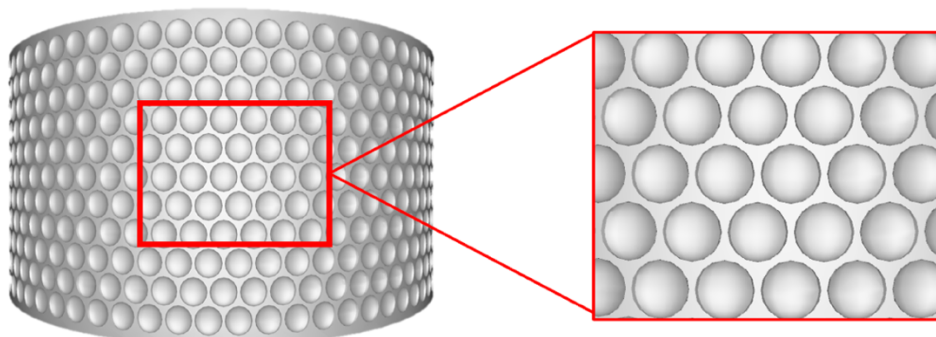
Inicialmente, no alimentador o material (MFe + ligantes) sofre uma leve compressão e, em seguida, é destinado ao meio de duas capas de briquetagem, ou seja, dois rolos de pressão como mostra a Figura 14. Os rolos giram na mesma velocidade, porém, em sentidos opostos. O movimento de rotação dos rolos permite a variabilidade de na região do contato das superfícies, sendo o máximo de pressão atingida na área central. Após a compressão, o briquete passa para a etapa de desmoldagem, onde acontece o desacoplamento das cavidades.

Figura 14 - Princípio de trabalho de briquetagem.



Fonte: Adaptado de Koppert, 2024.

Comumente fabricadas em aço, as superfícies de trabalho contêm cavidades (*pockets*) ao longo de sua extensão, que quando entram em contato, formam zonas de aglomeração sob pressão (BEMBENEK, 2017; BEMBENEK; KRAWCZYK; PANCIKIEWICZ, 2020). A Figura 15 apresenta o desenho esquemático das cavidades de uma capa de briquetagem.

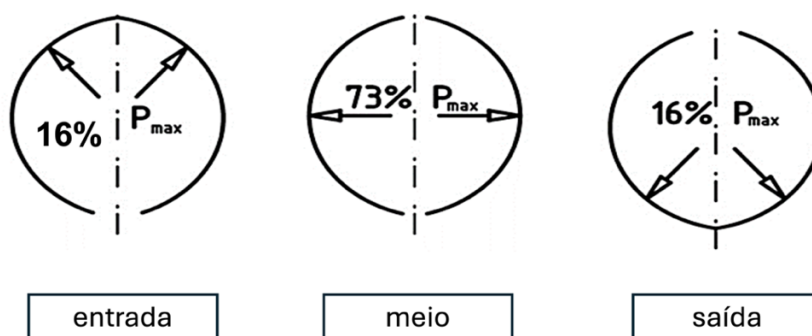


Fonte: Autoria própria.

A pressão de contato e o movimento relativo entre as superfícies resulta no desgaste da superfície de trabalho dos rolos, o que consequentemente modifica a geometria do produto (JANEWICZ; KOSTURKIEWICZ; HRYNIEWICZ, 2013; LOGINOV; BOURKINE; BABAILOV, 2001). O trabalho de Bembenek et al. (2020) discute a variação de pressão conforme a localização dos *pockets* na peça durante a formação do briquete, o que influi na distribuição não homogênea do aglomerado dentro das cavidades.

Conforme demonstra a Figura 16, durante a operação de briquetagem, estima-se que a pressão máxima ($P_{\max}$) seja alcançada na área central das cavidades. De acordo com Bembenek e colaboradores (2020) a distribuição de pressão nesta região (meio) corresponde a 73% da pressão total aplicada. Já nas etapas de alimentação (entrada de matéria-prima) e desmolde (saída do produto) a pressão corresponde a 16%.

Figura 16 - Distribuição de pressão nos *pockets*.



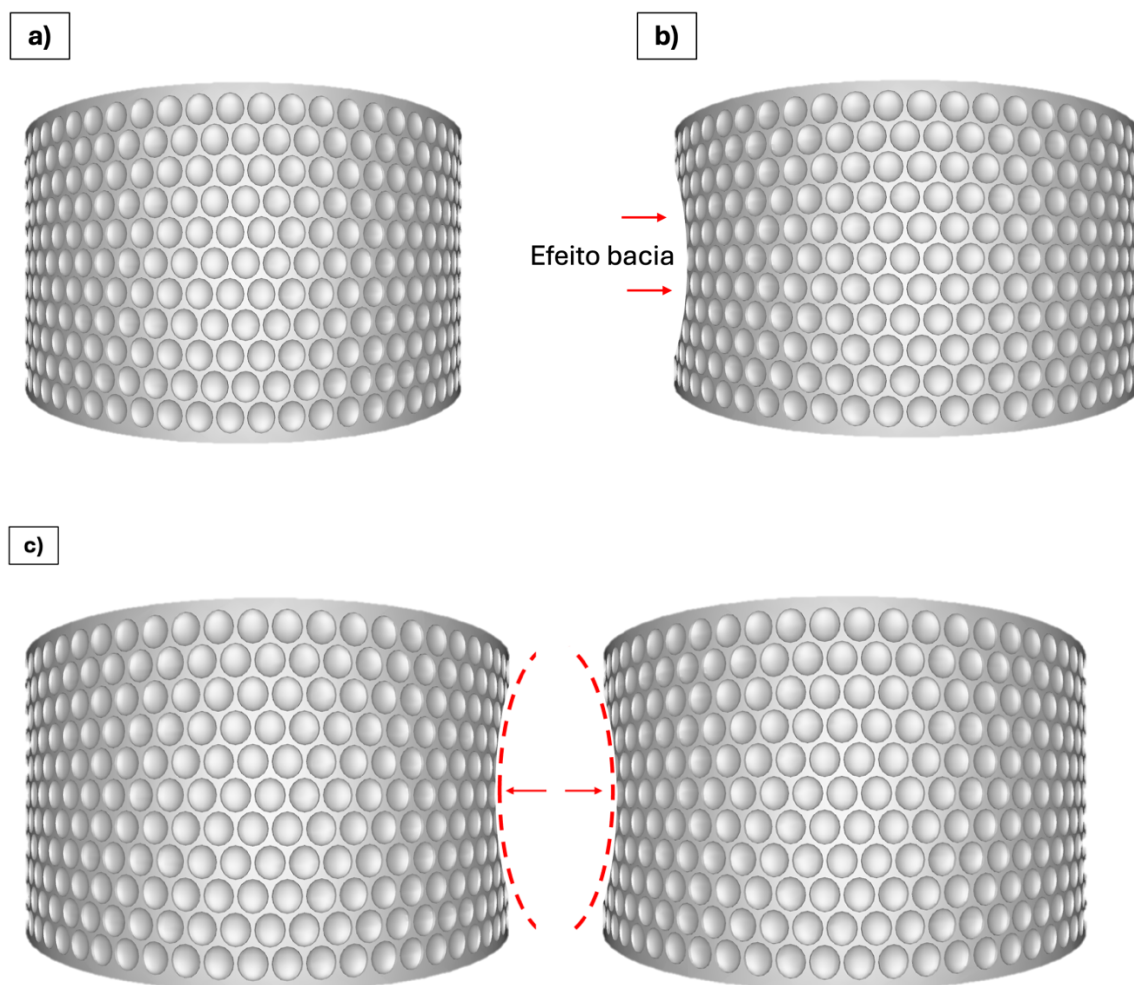
Fonte: Adaptado de Bembenek et al., 2020.

Especificamente, a variabilidade da pressão durante a briquetagem de finos de MFe pode gerar pressão insuficiente para compactar o briquete, reduzindo suas propriedades mecânicas (BEMBENEK, 2017; BEMBENEK; KRAWCZYK; PANCIKIEWICZ, 2020). Para garantir a eficiência do processo de briquetagem, o fabricante do equipamento discrimina parâmetros técnicos para a funcionalidade total da máquina, destacando os requisitos relacionados à matéria-prima. A matéria-prima deve apresentar homogeneidade e granulometria entre 40 μm e 80 μm . Além disso, a mistura (minério + aglomerante) não pode apresentar em sua composição objetos duros, que

possam danificar o equipamento e seus componentes. Em casos específicos de recirculação de material, o produto deverá ser triturado em partículas finas de até 3 mm.

As consequências da variação de pressão entre as capas, alimentação imprecisa e diferença granulométrica do material abrasivo resultam em um fenômeno tribológico conhecido como efeito bacia. Este fenômeno ocorre devido ao desgaste localizado na superfície de trabalho, onde se forma uma depressão com o formato similar ao de uma bacia como demonstrado na Figura 17. Embora não existam relatos na literatura sobre o efeito bacia em capas de briquetagem, trata-se de um fenômeno já observado em operações com este tipo de componente quando o material compactado é mais abrasivo.

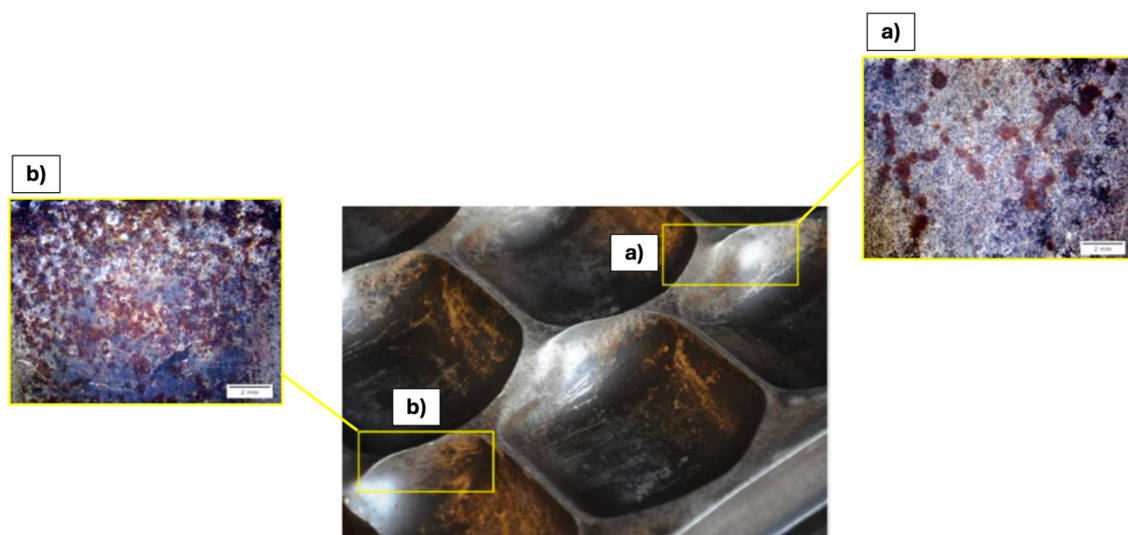
Figura 17 - Esquema ilustrativo do efeito bacia: a) capa antes do desgaste; b) capa após o desgaste; c) efeito bacia nas capas-espelho.



Fonte: Autoria própria.

Outros fenômenos de desgaste são observados em capas de briquetagem, como a associação entre os fenômenos de abrasão e corrosão. Bembenek et al. (2020) descrevem a tribocorrosão em operações de briquetagem de minério de cobre utilizando capas de aço cementado, após 1100 horas de trabalho em ambiente industrial. Conforme ilustrado na Figura 18, observa-se a combinação de desgaste abrasivo-corrosivo na superfície de trabalho após operação industrial de briquetagem, em ambos os locais demarcados (a e b).

Figura 18 - Superfície de trabalho da capa após 1100 h de briquetagem de minério de cobre.

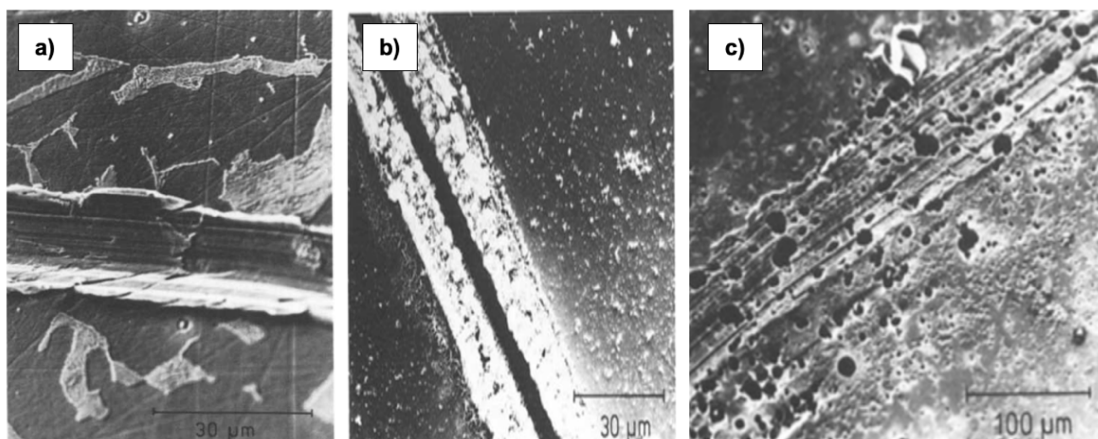


Fonte: Adaptado de Bembenek et al., 2020.

O fenômeno de tribocorrosão é significativo para a indústria, pois o desgaste abrasivo se mostra associado a ataques corrosivos devido à umidade no ambiente e às características da polpa mineral. Além disso, há uma propensão de ocorrência de erosão quando houver impacto na alimentação (LOGINOV; BOURKINE; BABAILOV, 2001; NEVILLE; HODGKIESS; XU, 1999).

Em muitas situações, a ação da corrosão pode ser negligenciada, pois antes de tornar-se perceptível a olho nu, a ação abrasiva contínua remove os indícios de corrosão da superfície de trabalho. Entretanto, Noel e Ball (1983) revelam que, embora o produto de corrosão seja removido, a natureza do ataque corrosivo não pode ser anulada, pois ocorreu nas cristas e sulcos gerados pela trilha do desgaste abrasivo (Figura 19) (NOEL; BALL, 1983).

Figura 19 - Interação abrasão-corrosão: a) trilha de desgaste abrasivo, b) produto de corrosão nas trilhas de desgaste, c) interação abrasão-corrosão após remoção da camada grosseira do produto de corrosão.

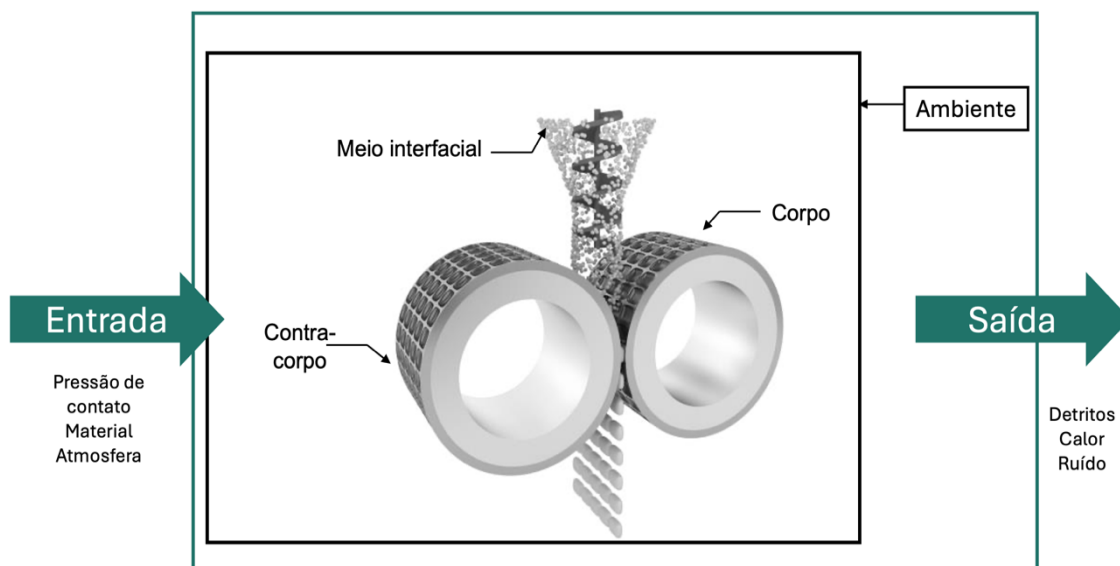


Fonte: Noel; Ball, 1983.

3.4.1 Tribossistema real de operação

A Figura 20 apresenta o tribossistema abordado neste estudo. Considera-se a superfície de trabalho das capas de briquetagem como o corpo e contra-corpo, o MFe como elemento interfacial e atmosfera industrial e marítima como o ambiente. Os parâmetros de entrada do sistema devem incluir o tipo de movimento entre os rolos e a potência, resultante da pressão de contato e dos meios, para além dos materiais abrasivos, umidade e sujidades. Já na saída, é possível encontrar detritos, geração de calor e ruído, além das informações de funcionalidade do sistema.

Figura 20 - Esquema do tribossistema real em estudo.



Fonte: Adaptado de Koppert, 2024; Adaptado de Zum Gahr, 1987.

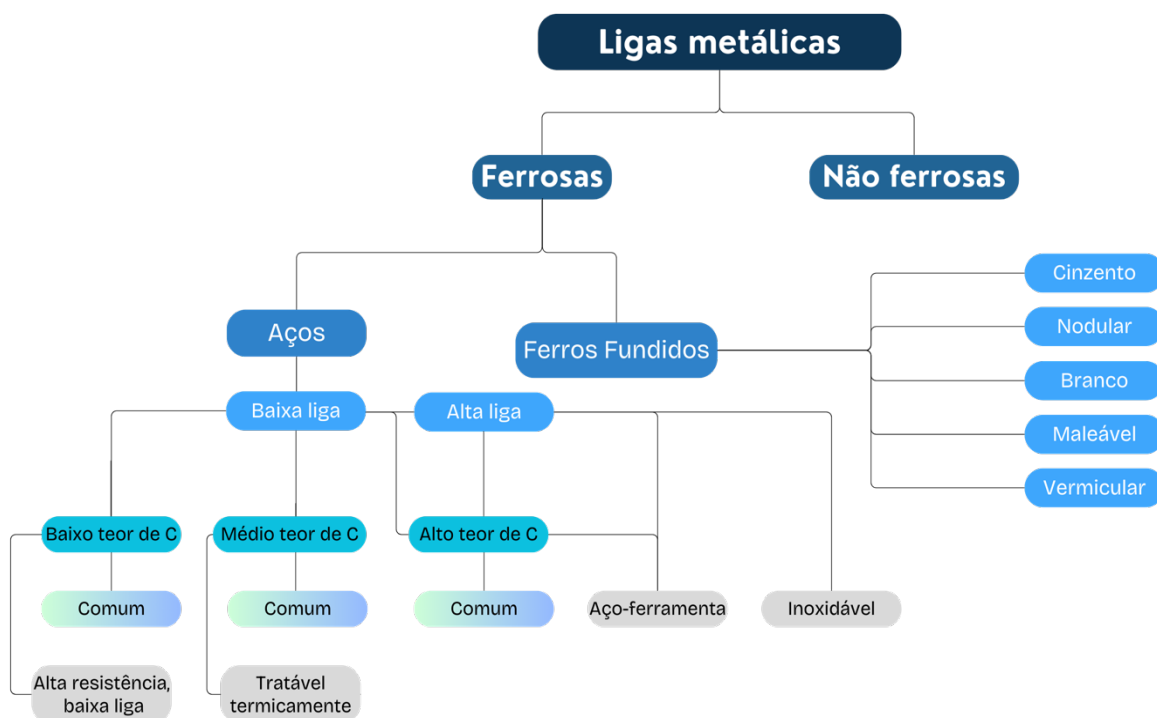
No cenário objeto de estudo, a vida útil das capas não chegou a atingir a durabilidade especificada pelo fabricante, considerando as condições atuais de operação. Portanto, para reduzir a taxa de desgaste, a seleção de materiais resistentes ao desgaste para fabricação de capas de briquetagem, é de suma importância para aumento de vida útil e viabilidade operacional.

Este tribossistema se enquadra na classificação do desgaste abrasivo a três corpos e de baixos esforços, uma vez que o minério de ferro atua como partícula abrasiva solta entre os rolos (corpo e contra-corpo) e não se fragmenta durante a compactação. Essa configuração permite o uso do equipamento Miller para correlacionar os resultados obtidos em laboratório e as condições do processo operação industrial em estudo.

3.4.2 Materiais candidatos à fabricação de capas de briquetagem

Callister (2018) classifica os aços como ligas ferro-carbono que podem conter outros elementos, conforme demonstrado no esquema ilustrativo da Figura 21. As capas fornecidas pelo fabricante do equipamento (objeto deste estudo) são de aço alto carbono (teor de carbono $>0,60\%$) e baixa liga, caracterizados pela pequena quantidade de elementos de liga em sua composição, como manganês, níquel, cromo e molibdênio.

Figura 21 - Esquema ilustrativo para ligas metálicas.



Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch, 2012.

A composição química do aço (temperado e revenido) utilizado no objeto deste estudo está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química (% massa) do aço empregado nas capas de briquetagem do estudo.

Material	% massa				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
Aço (atual)	0,94	0,49	1,07	1,40	0,03

Fonte: Acervo Instituto Tecnológico Vale, 2024.

O tratamento térmico de têmpera envolve o aquecimento do aço, seguido de um resfriamento rápido para formar a martensita. Em seguida, o revenimento é aplicado para aliviar tensões internas e melhorar a tenacidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Dessa forma, é comumente recomendado para obtenção de microestrutura martensítica de alta dureza em capas de aço pois resulta em boa resistência mecânica.

Uma forma de aumentar a resistência ao desgaste é utilizando aços ferramenta, seja para trabalho a quente, que recebem a insígnia H (do inglês *hot*), ou para trabalho a frio (D). O aço ferramenta AISI H13 apresenta composição química conforme padronização da norma ASTM A681 (2022).

Tabela 2 - Composição química (% massa) do AISI H13.

Material	% massa				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
AISI H13	0,32-0,45	0,80-1,25	0,20-0,60	4,74-550	1,10-1,75

Fonte: ASTM A681, 2022.

O aço H13 foi utilizado como referência para os estudos deste trabalho, pois sua estabilidade microestrutural é conhecida e além disso, é um aço de fácil obtenção no mercado. Segundo a ASTM A681 (2022), este aço martensítico deve apresentar dureza dentro da faixa de 49 a 53 HRC após tratamento térmico. Em detalhes, o tratamento térmico envolve a austenitização, têmpera em óleo ou a ar, e revenimento.

O aço D2 apresenta microestrutura martensítica e segunda fase dura, composta por carbeto que atuam como reforços na matriz metálica (CALLISTER, 2018). A dureza determinada pela ASTM A681 é de 64 HRC, porém, outras fontes apontam a faixa de aceitação de 61 a 64 HRC, após tratamento térmico (austenitização, têmpera em óleo ou ar e revenimento). A composição química do AISI D2 pode ser observada conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (% massa) do AISI D2.

Material	% massa				
	C	Si	Cr	Mo	V
AISI D2	<u>1,40-1,60</u>	0,10-0,60	0,10-0,60	<u>11,00-13,00</u>	0,70-1,20

Fonte: ASTM A681, 2022.

Tendo em vista a revisão bibliográfica abordada até o momento, a escolha de um aço com a presença de segunda fase dura se mostra promissora para o aumento da vida útil das capas de briquetagem, uma vez que atuam como barreira contra o desgaste

abrasivo e apresentam maior percentual em massa de cromo contribuindo contra a ação da corrosão. Nesse contexto, este estudo visa investigar o comportamento tribocorrosivo de dois aços ferramenta candidatos à fabricação de capas de briquetagem. Em equipamento Miller, a aplicando uma metodologia adaptada da ASTM G75 para avaliação da resistência ao desgaste ocasionado pela abrasividade de polpa de areia comercial e polpas de dois diferentes produtos de MFe.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

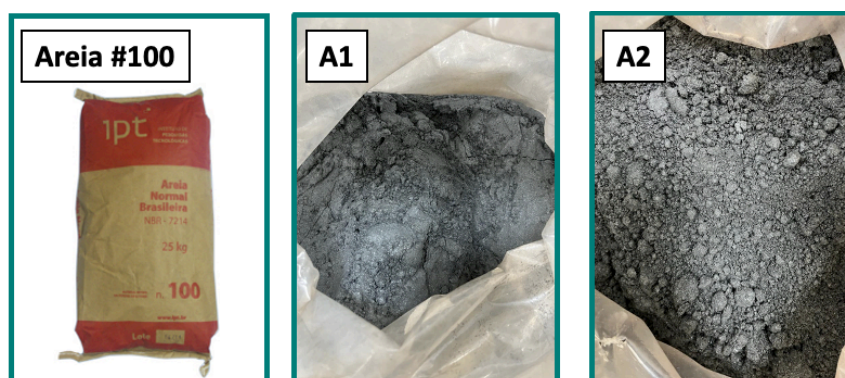
Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados neste trabalho. Primeiramente foram definidos os materiais a serem empregados no estudo, seguido da definição de metodologia do ensaio de desgaste tribocorrosivo. Por fim, foram determinadas as técnicas de caracterização dos aços ferramenta e materiais abrasivos, assim como, os parâmetros para avaliação das superfícies de desgastes.

4.1 Materiais

Dois aços ferramenta temperados e revenidos, AISI H13 e D2 comerciais, foram avaliados em um ensaio de tribocorrosão na máquina Miller. A metodologia empregada foi adaptada da norma ASTM G75, considerando cada calha do equipamento como uma unidade experimental independente, totalizando, portanto, em quatro replicatas por tribossistema.

Para investigar o efeito da abrasividade de polpas, três abrasivos (Figura 22) foram testados, sendo eles: areia normal brasileira #100 fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e dois tipos de minérios de ferro oriundos de produção industrial na Vale S.A. (abrasivos A1 e A2).

Figura 22 - Abrasivos: Areia #100, Minério A1 e Minério A2.



Fonte: Autoria própria.

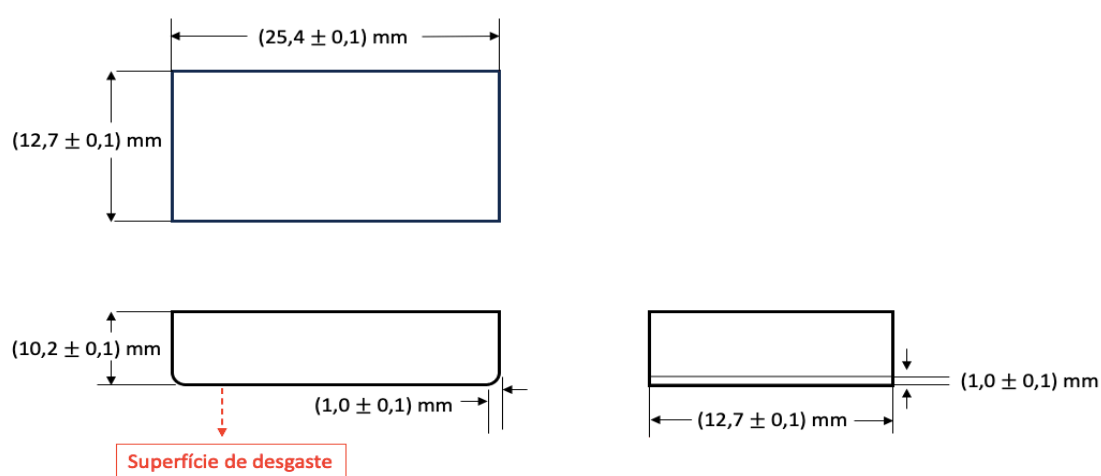
Para estudo das microestruturas dos aços H13 e D2 foi utilizado o agente reativo Nital 5%, cuja composição química contém 5 mL ácido nítrico (HNO_3) e 95 mL de álcool etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$).

4.2 Estudo do comportamento tribocorrosivo de dois aços ferramenta

4.2.1 Corpos de prova

As amostras dos aços foram cortadas e retificadas pelo fornecedor terceirizado, apresentando rugosidade de 0,8 Ra, medida que representa quantitativamente a média aritmética da rugosidade. A Figura 23 mostra as dimensões milimétricas dos corpos de prova, com medidas regidas conforme norma ASTM G75.

Figura 23 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio Miller.



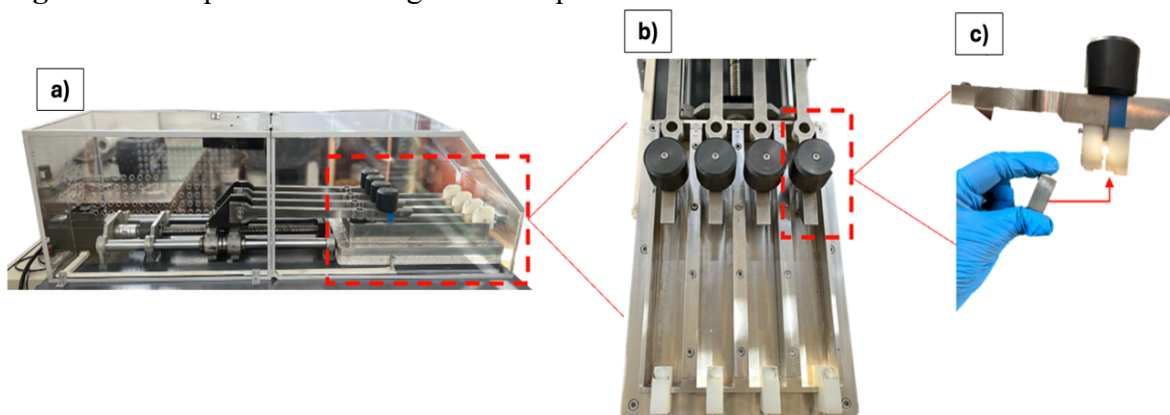
Fonte: Adaptado de ASTM G75, 2017.

4.2.2 Ensaios de tribocorrosão segundo a norma ASTM G75

Antes da pesagem, os corpos de prova foram limpos em ultrassom com banho de álcool etílico por 10 minutos, e, posteriormente, secos com auxílio de ar comprimido. A massa das amostras foi mensurada em balança analítica (Mettler Toledo modelo XSE105 Dual Range).

A metodologia adaptada da norma ASTM G75 conforme Santos et al. (2025) foi reproduzida neste estudo. O equipamento Miller possui quatro calhas paralelas idênticas como demonstra a Figura 24.

Figura 24 - Esquema de montagem da máquina Miller.



Fonte: Adaptado de Ribeiro et al., 2024.

Verteu-se em cada uma das calhas (Figura 24b) uma mistura de 150 g de água destilada e 150 g sólido abrasivo. Posteriormente, as amostras foram posicionadas no porta amostra (Figura 24c) fixado no braço mecânico, que percorrer 203,20 mm sob movimento harmônico horizontal alternado com velocidade média de deslizamento igual a $0,2 \text{ m s}^{-1}$. A força aplicada foi de 22,24 N por 6 horas totais de ensaio. Considerou-se cada calha uma amostra, totalizando uma quadruplicata para cada tribossistema ensaiado.

O ensaio foi pausado a cada 2 horas, permitindo a homogeneização manual da polpa com auxílio de uma espátula de silicone. Para mediar a perda de massa, os corpos de prova foram novamente limpos em ultrassom com banho de álcool etílico por 10 minutos e secos com auxílio de ar comprimido. Em seguida, a massa das amostras foi mensurada em balança analítica. Ao reposicionar as amostras no porta amostras, conforme local indicado pela Figura 24c, os corpos de prova foram rotacionadas em ângulo de 180° para assegurar o desgaste uniforme. Para cálculo da taxa de desgaste foram elaborados os gráficos de perda de massa acumulada em função do tempo de ensaio, e através da linearização dos dados, as taxas de desgaste foram estimadas (SANTOS et al., 2025).

4.3 Caracterização dos materiais

4.3.1 Composição química dos aços

A análise de composição química dos aços foi realizada por Espectroscopia de Emissão Óptica por Centelhamento no equipamento Anacom Científica (modelo

B2ADV). O teor de carbono e enxofre foram mensurados por combustão no equipamento *Arms Find*.

4.3.2 Composição mineralógica dos abrasivos

A composição mineralógica dos abrasivos A1 e A2 foi realizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais de um parceiro da Vale S.A., utilizando análise de imagens por microscopia óptica.

4.3.3 Dureza

O durômetro (Mitutoyo modelo: HV₃₀) foi utilizado com carga de 30 kg por 15 segundos, para um total de 5 indentações ao longo de cada corpo de prova, conforme regulamentação da norma ASTM E92. A conversão da dureza Vickers (HV) para a Rockwell C (HRC) foi realizada pelo próprio equipamento, a fim de se obter uma estimativa do valor em HRC para comparação com a norma ASTM A681.

4.3.4 Microestrutura

Os aços foram cortados por eletroerosão a fio em equipamento de eletrocorte (Electrout Novick modelo: AR-35) a 0,90 mm min⁻¹. Em seguida, as amostras foram lavadas com detergente sob água corrente, secas em ar comprimido e submetidas ao ultrassom em banho de álcool etílico por 10 minutos. Após o ultrassom, as amostras foram secas e desmagnetizadas.

Os aços, cortados e limpos, foram embutidos a quente em embutidora metalográfica Arotec (modelo PRE-30 A/2). A preparação metalográfica ocorreu em três etapas: lixamento, polimento e ataque químico. Sendo, as amostras lixadas com lixas abrasivas de #80, #120, #220, #400, #600 e #1200, polidas em pasta diamantada de 6µm, 3µm e 1µm. E, posteriormente, emergidas em agente reativo Nital 5%, por 15 segundos, para análise da microestrutura.

As micrografias foram obtidas utilizando microscópio óptico Olympus (modelo BX53), as quais as capturas das imagens se deram por uma câmera *Olympus Digital Cameras*, controlada pelo software próprio.

4.3.5 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

As superfícies de desgaste obtidas a partir dos ensaios de tribocorrosão foram analisadas em um microscópio FEG com sistema de nanofabricação FIB-Quanta FEG 3D FEI, com tensão de aceleração 5 kV. As análises foram realizadas no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

4.3.6 Difração de raio X

Os padrões de difração de raios X (DRX) dos abrasivos foram obtidos em um aparelho *X-Ray diffractometer* XRD-7000 da Shimadzu, automático com tubo de Raios X de Cu, utilizando o método de pó. As análises foram obtidas em corrente de 30 mA e tensão de 45 kV. Foram feitas varreduras nos ângulos $10^\circ < 2\theta < 80^\circ$ e com velocidade de 1° min^{-1} , em ar.

4.3.7 Distribuição granulométrica por difração a laser

A análise granulométrica dos abrasivos foi realizada no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG. A técnica de análise utiliza a luz para determinar o tamanho de partículas mediante teoria Fraunhofer em equipamento Cilas 1090 Líquido, com faixa de 0,04-500,00 μm . Esta teoria foi utilizada pois permite a medição de partículas com tamanho inferior a $1\mu\text{m}$, mesmo que o ângulo de difração seja desconhecido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa. Inicialmente, os aços ferramenta foram caracterizados, com a determinação da composição química, dureza e microestrutura. Os abrasivos foram analisados quanto à composição química e mineralógica, além de sua distribuição granulométrica. Posteriormente, os resultados do desgaste tribocorrosivo serão apresentados, incluindo uma análise da superfície de desgaste.

5.1 Caracterização dos aços

5.1.1 Composição química

A Tabela 4 apresenta as composições químicas dos aços estudados. Segundo a norma ASMT A681 (2022), os valores obtidos para os aços ferramenta analisados apresentam conformidade com a especificação normalizada. O teor de carbono para o aço H13 deve se enquadrar na faixa de 0,32-0,45%, enquanto o aço caracterizado neste trabalho apresentou 0,44%. Para o aço D2, o teor de carbono padrão é de 1,40% a 1,60%, sendo o analisado igual a 1,59%, também dentro da faixa estabelecida.

Já o teor de cromo para o aço H13 deve se apresentar na faixa de 4,75% a 5,50%, conforme a norma ASMT A681 (2022), sendo encontrado 4,87% para o aço H13 em teste. Para o aço D2, a ASMT A681 (2022) estabelece limites para o cromo entre 11,00 % e 13,00%, sendo o teor encontrado de 12,19% também atende aos critérios padrões.

Tabela 4 - Composição química (% massa) dos aços H13 e D2.

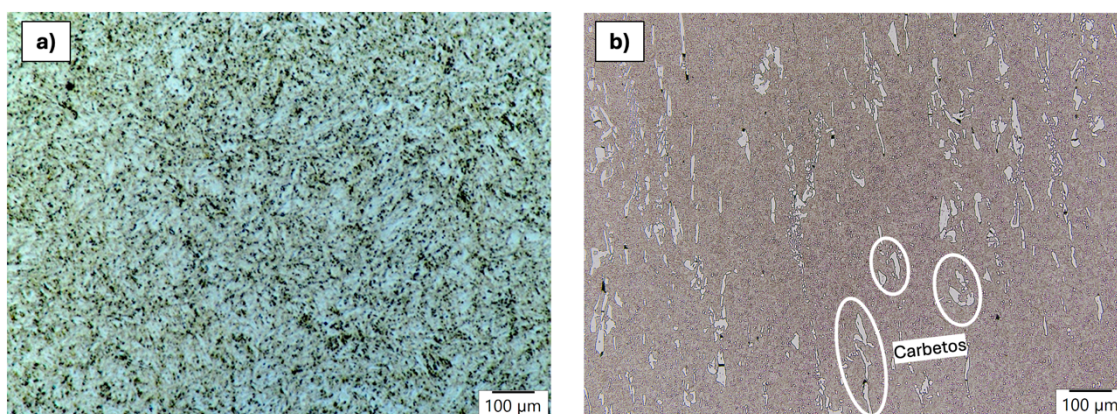
Material	% massa					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
H13	0,44	0,71	0,35	4,87	1,18	0,94
H13 (ASTMA681)	0,32-0,45	0,80-1,25	0,20-0,60	4,75-5,50	1,10-1,75	0,80-1,20
D2	1,59	0,37	0,38	12,19	1,02	0,68
D2 (ASTMA681)	1,40-1,60	0,10-0,60	0,10-0,60	11,00-13,00	0,70-1,20	0,50-1,10

Fonte: Adaptado de ASTM A681, 2022.

5.1.2 Microestrutura

A Figura 25 mostra a microestrutura dos aços ferramenta estudados, após etapas de preparação metalográfica. A microestrutura martensítica revenida do aço H13 obtida por microscopia óptica é evidenciada na Figura 25a. Na Figura 25b a microestrutura de matriz martensítica com a presença de segunda fase dura do aço D2 é apresentada.

Figura 25 - Microestrutura dos aços ferramenta: a) AISI H13 e b) AISI D2.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se um formato acicular característico da microestrutura da martensita do aço H13, o que é esperado para uma martensítica temperada e revenida. Constata-se o esperado para uma estrutura temperada e revenida, com o formato acicular (áreas em alto relevo) característico da martensita (COLPAERT, 2008).

Colpaert (2008) descreve que a natureza metaestável da martensita requer tratamentos térmicos adequados para obtenção das propriedades desejadas. Diante disso, durante o reaquecimento controlado, a martensita pode sofrer transformações e precipitar carbeto secundários compostos por componentes de liga presentes em sua composição (CHIAVERINI, 2005). No caso do aço D2 de estudo (contendo 12,19% Cr), as imagens de microscopia óptica revelam a predominância de carbeto de cromo (componentes cinzas destacadas na Figura 25b). Esta observação corrobora estudos termodinâmicos que indicam a formação preferencial de carbeto do tipo M₇C₃ e M₂₃C₆ em aços alto-cromo (VENKATRAMAN; NEUMANN, 1990).

5.1.3 Dureza

Os valores de dureza foram convertidos para HRC para comparação com a norma ASTM A681 (2022). Na Tabela 5 estão descritos os valores médios de dureza dos aços em estudo. O resultado médio para o aço H13 foi de $(45,31 \pm 0,37)$ HRC, abaixo do valor estipulado pela norma, a qual a dureza mínima corresponde a 52 HRC. Já o aço D2 apresentou dureza média igual a $(58,21 \pm 0,67)$ HRC, mais próximo do valor mínimo estabelecido pela ASTM A681, de 59 HRC. Os valores das cinco medições de dureza por amostra estão disponibilizados no Apêndice A.

Tabela 5 - Dureza (HRC e HV₃₀) dos aços H13 e D2.

	H13		D2	
	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
Média	449,59	45,31	657,63	58,21
Desv. Pad.	4,48	0,37	13,99	0,67
CV%	1,00%	0,81%	2,13%	1,15%

Fonte: Autoria própria.

Foi especificado para o fornecedor que o aço H13 comercial deveria apresentar dureza na faixa de 48 a 52 HRC, porém, o material recebido apresentou dureza igual a 45 HRC. Neste caso, o tratamento térmico aplicado ao material adquirido não foi satisfatório, e a dureza ficou abaixo do valor esperado.

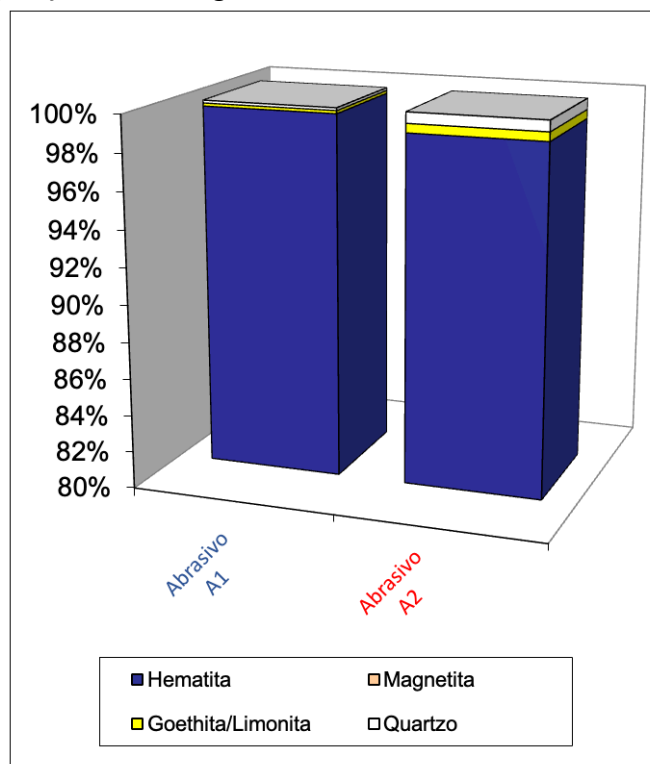
5.2 Caracterização dos abrasivos

5.2.1 Composição química e mineralógica

A areia normal brasileira fornecida pelo IPT apresenta condições normatizadas segundo a ABNT NBR7214:2015, sendo composta principalmente de areia quartzosa natural com teor de sílica igual a 96,10%, sem umidade (IPT, 2023).

A Figura 26 apresenta as composições mineralógicas dos minérios utilizados como abrasivos (A1 e A2).

Figura 26 - Composição mineralógica dos abrasivos A1 e A2.



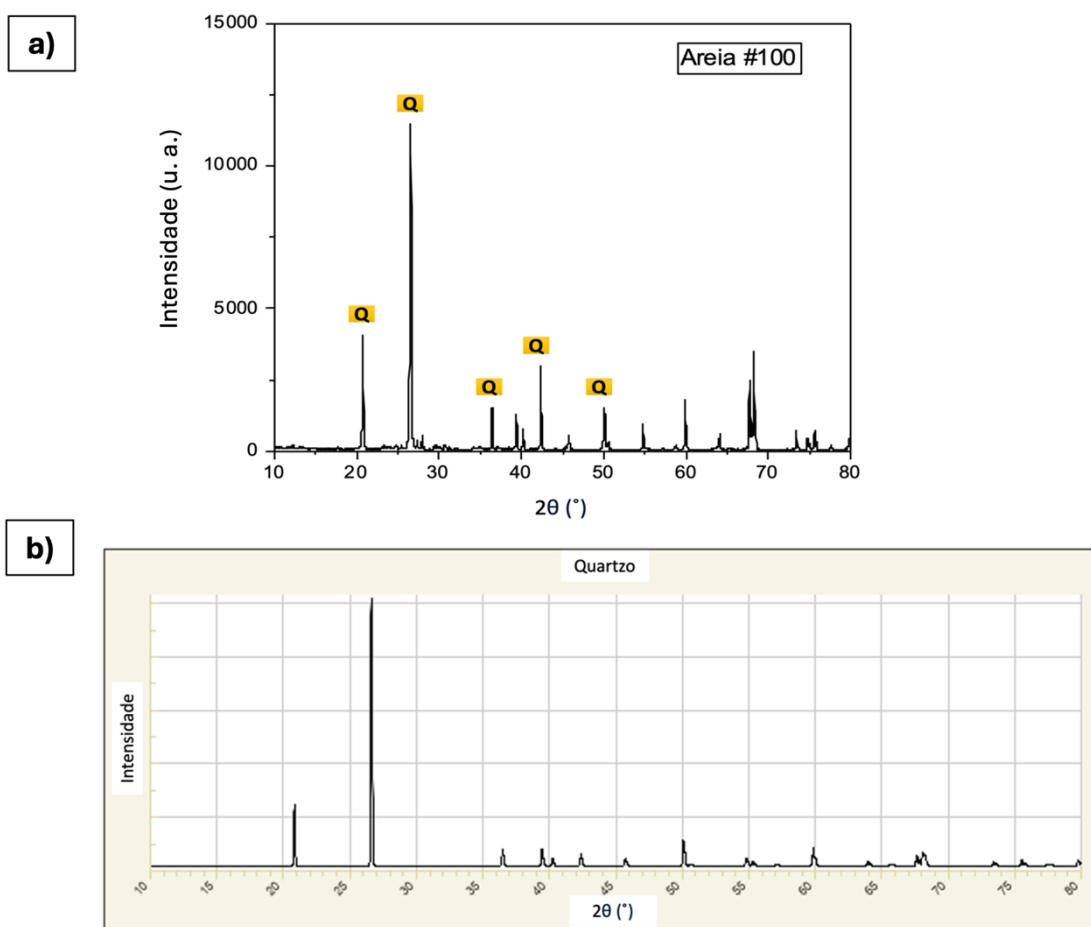
Fonte: Autoria própria.

Ambos os minérios apresentam hematita (Fe_2O_3) como mineral metálico principal, sendo composto por hematita em quase sua totalidade. A composição mineralógica do A2 difere-se quanto a presença de 1% de quartzo e níveis >1% de goethita/limonita.

5.2.2 Difração de raios X

Os padrões de raios X da areia quartzosa está apresentado na Figura 27, juntamente ao padrão de quartzo do banco de dados RRUFF (*Raman Research for the Future*).

Figura 27 - Difração de raio X: a) areia #100 de estudo; b) padrão de quartzo.

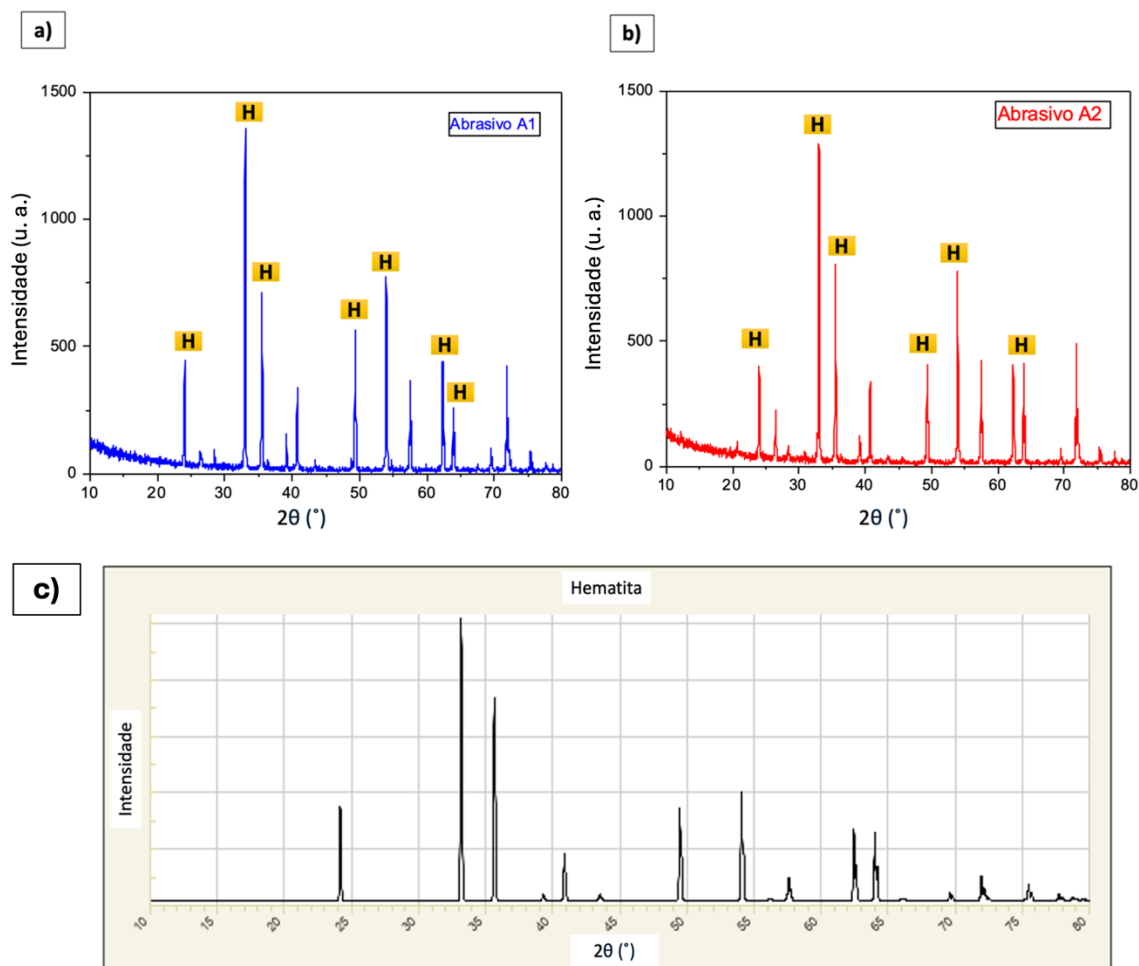


Fonte: Autoria própria.

O difratograma da areia #100 do IPT (Figura 27a) apresentou semelhança com o padrão de DRX padrão do quartzo (Q), com picos característicos em 2θ igual a 20,8°, 26,6°, 36,5° e 50,1° (SILVA et al., 2019). O padrão para o quartzo utilizado do banco de dados RRUFF é identificado como R100134 (Figura 27b). A intensidade e a posição dos picos podem variar dependendo da pureza da areia (96,1%) e a presença de outros componentes minerais.

Os resultados de DRX dos abrasivos A1 e A2 podem ser observados na Figura 28, assim como, a referência para hematita obtida do banco de dados RRUFF.

Figura 28 - Padrão de difração de raio X: a) Abrasivo A1; b) Abrasivo A2; c) Padrão de hematita.



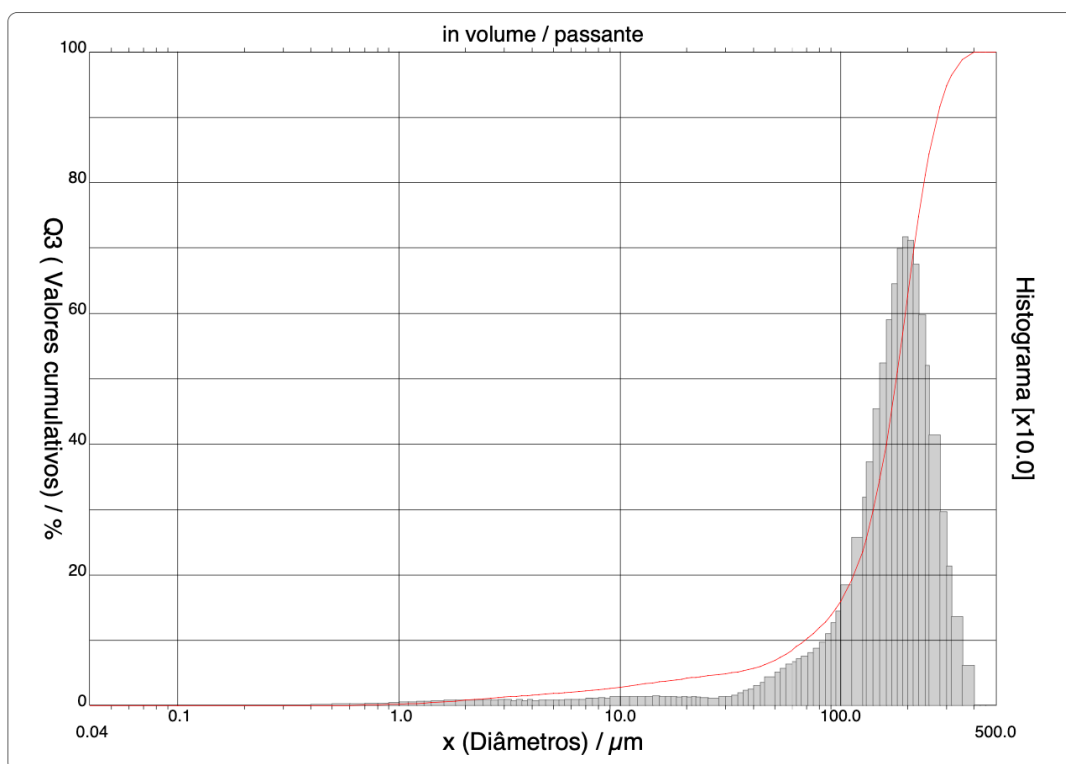
Fonte: Autoria própria.

Os picos que identificam a presença de hematita (H) como mineral, são os: 24,1°, 33,1° e 35,6°, principalmente, conforme o padrão fornecido pelo banco de dados RRUFF ID: R110013 na Figura 28c. Os picos que correspondem a hematita podem ser notados em ambos os abrasivos estudados, confirmando a composição mineralógica descrita na Tabela 6. Os picos em 49,4°, 54,0°, 62,4° e 64,0° são encontrados em ambos os abrasivos e no padrão, porém, apresentam-se com diferentes intensidades.

5.2.3 Análise da distribuição granulométrica

A Figura 29 apresenta a distribuição granulométrica da areia #100. Os dados detalhados da distribuição granulométrica dos três abrasivos utilizados neste estudo estão disponíveis no Anexo 1.

Figura 29 - Distribuição granulométrica areia #100.



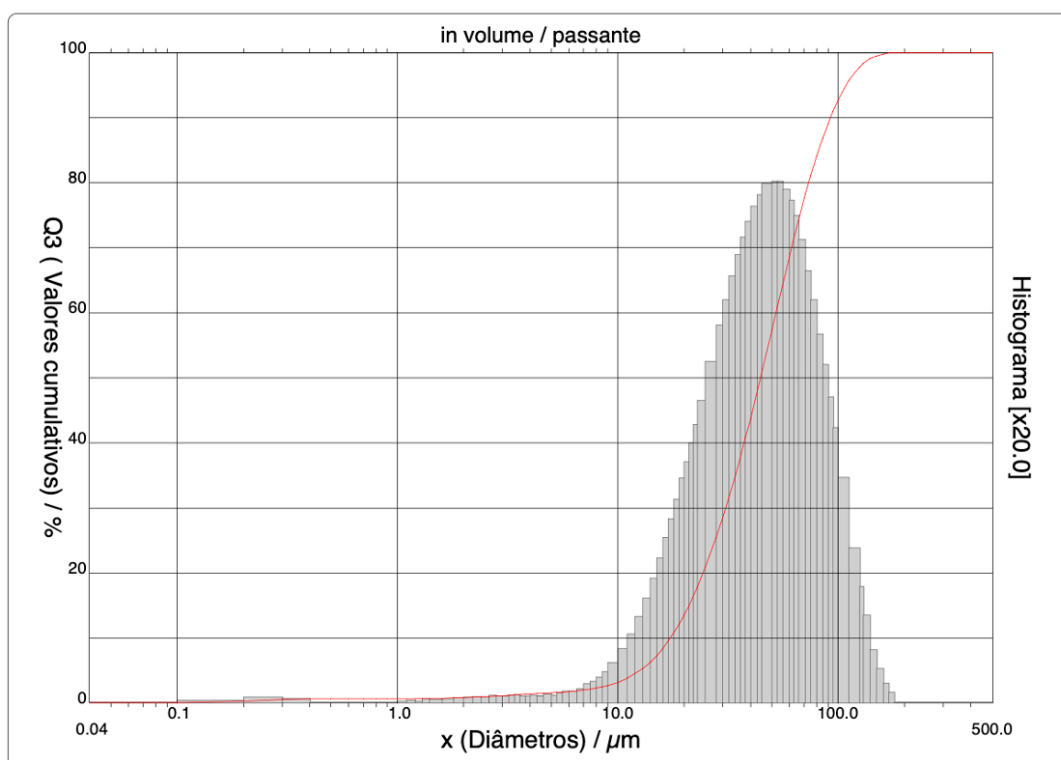
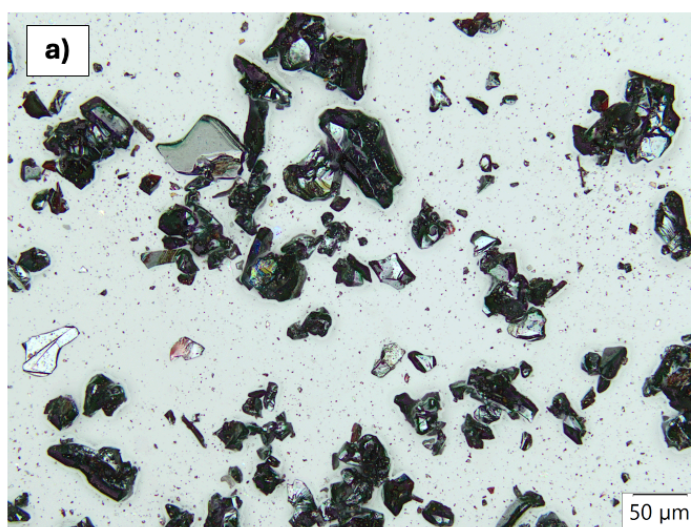
Fonte: Autoria própria.

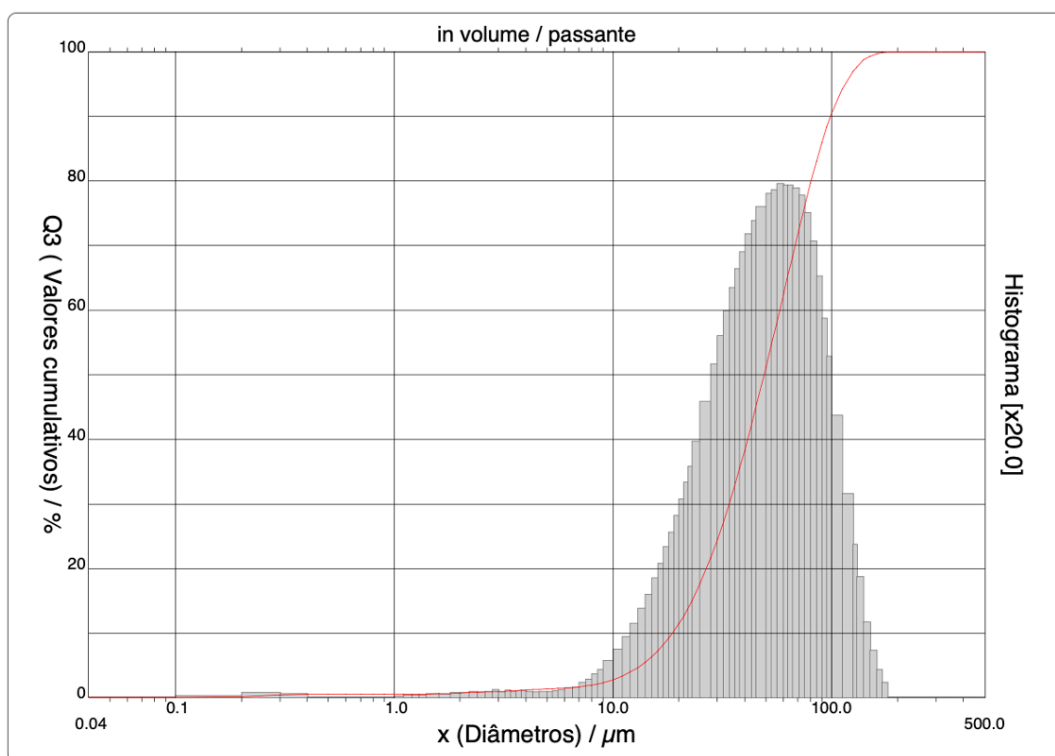
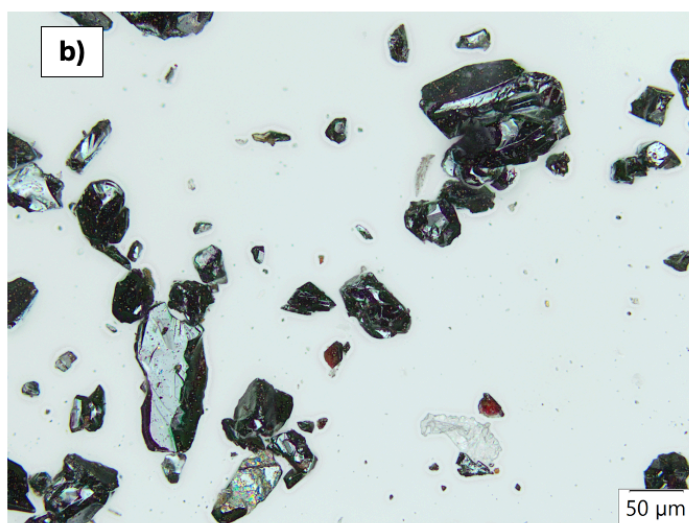
De acordo com as especificações do fornecedor, a areia #100 apresenta faixa granulométrica de 0,30 mm a 0,15 mm. A análise da distribuição granulométrica realizada no equipamento Cilas relevou que o diâmetro médio observado corresponde a 0,17 mm (175,54 μm), conforme apresentado no Anexo 1. O diâmetro 90% (D90), parâmetro que representa o diâmetro do qual 90% das partículas se encontram abaixo, é de 0,27mm (272,90 μm), em conformidade com a Figura 29.

A Figura 30 apresenta imagens de microscopia óptica dos abrasivos A1 e A2, correlacionando suas características dimensionais com as respectivas distribuições granulométricas. O minério A1 (Figura 30a) apresenta o tamanho médio igual a 0,05 mm (50,25 μm), e o minério A2 (Figura 30b) apresenta tamanho médio igual a 0,06 mm

(54,69 μm). O D90 de ambos os abrasivos de minério de ferro também se mostraram próximos, sendo D90=0,09mm (92,30 μm) para o A1 e D90=0,10mm (98,98 μm) para o A2.

Figura 30 – Microscopia óptica e distribuição granulométrica dos abrasivos: a) abrasivo A1; b) abrasivo A2.





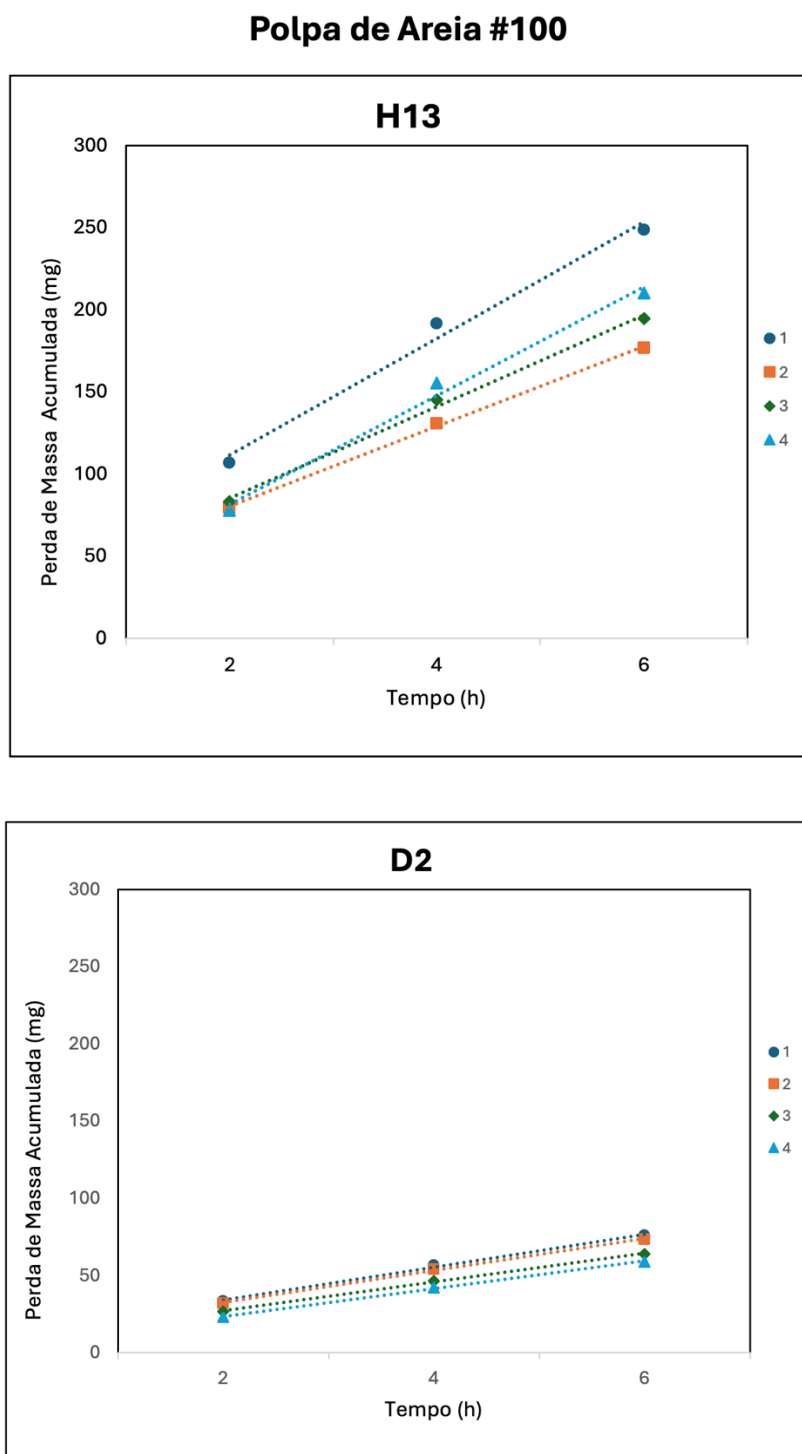
Fonte: Autoria própria.

5.3 Análise do desgaste tribocorrosivo em máquina Miller

5.3.1 Teste Miller com polpa de areia #100

A Figura 31 apresenta as perdas de massa acumulada em função do tempo para cada amostra dos aços H13 e D2, submetidas ao ensaio com polpa de areia comercial de granulometria #100.

Figura 31 - Perda de massa acumulada para todas as amostras dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.



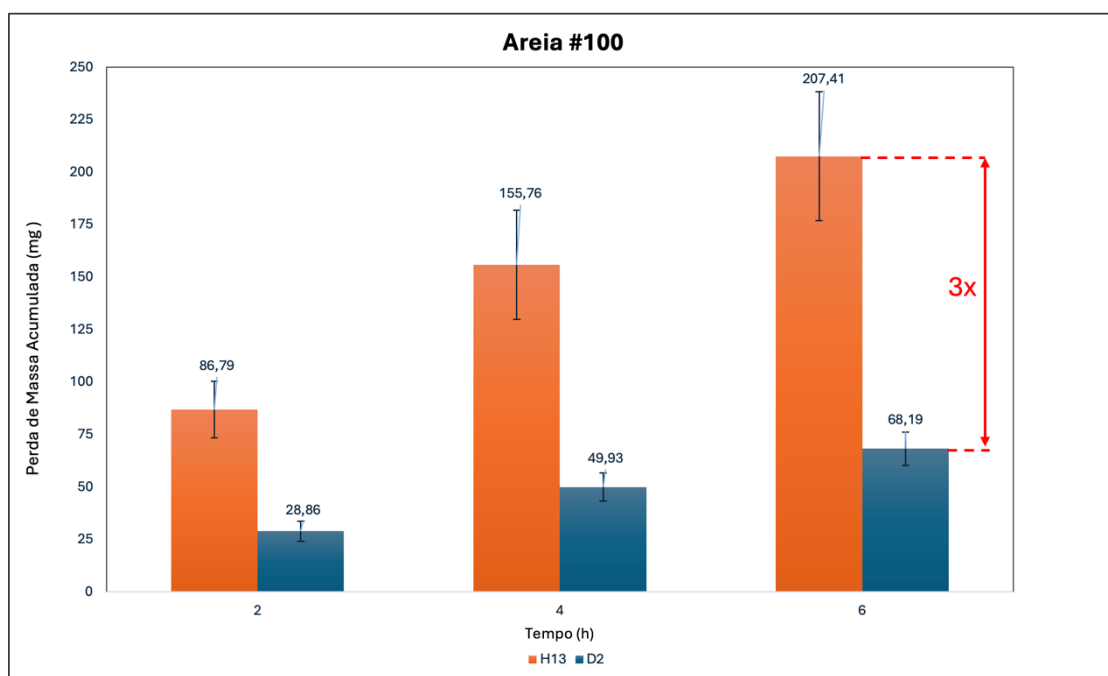
Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram interrompidos a cada duas horas, totalizando três medições de perda de massa para cada uma das quatro amostras do tribossistema em estudo.

Considerou-se a numeração das amostras conforme a localização das calhas no equipamento Miller, sendo a amostra 1 correspondente à calha 1, e assim sucessivamente para as demais amostras. Os dados detalhados estão disponíveis no Apêndice B.

As médias das perdas de massa acumulada são apresentadas na Figura 32. Para o aço H13, no total das 6h, a perda de massa acumulada foi de 207,41 mg, e para o aço D2 a perda de massa acumulada foi igual a 68,19 mg. O aço D2 foi 3 vezes mais resistente ao desgaste tribocorrosivo que o aço H13, no tribossistema com polpa de areia.

Figura 32 - Média de perda de massa acumulada dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.



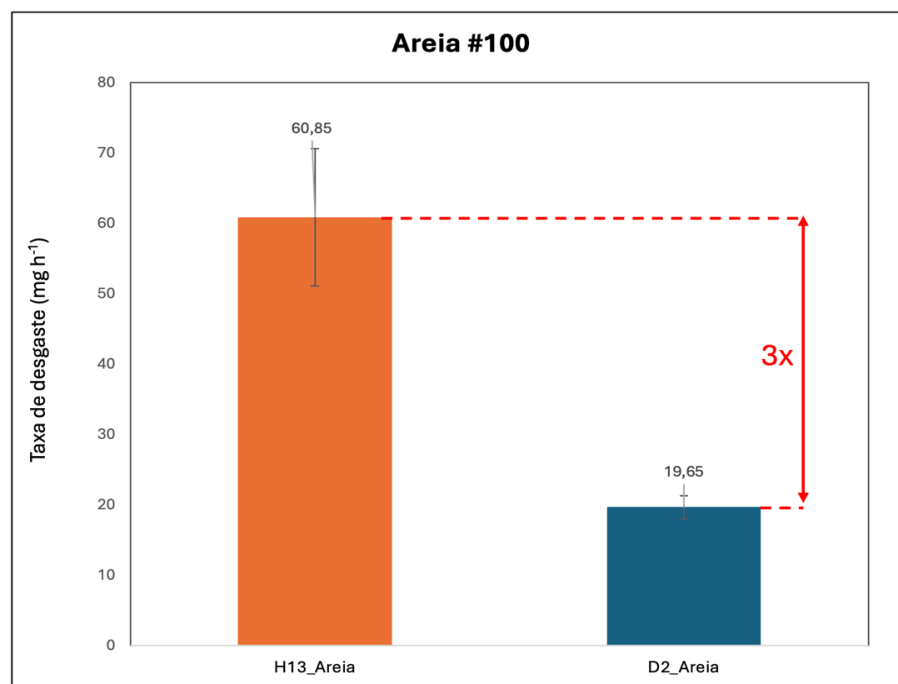
Fonte: Autoria própria.

Para avaliar a resistência do desgaste tribocorrosivo dos dois aços ferramenta, foram traçados os ajustes lineares para estimar a taxa de desgaste correspondente para cada tribossistema. As taxas de desgaste para os aços ferramenta analisadas em ensaios com polpa de areia estão representadas na Figura 33, e os dados detalhados estão no Apêndice C.

Observa-se que o aço H13 apresentou uma taxa de desgaste de $60,85 \text{ mg h}^{-1}$, valor significativamente mais elevado em comparação ao aço D2 que apresentou $19,65 \text{ mg h}^{-1}$. Tal resultado destaca o desempenho tribocorrosivo superior do aço D2, em 3 vezes, que

pode ser atribuído à presença dos carbeto de cromo primários e secundários neste material. Os carbeto atuam como uma barreira, impedindo que a partícula abrasiva risque de maneira mais acentuada o material.

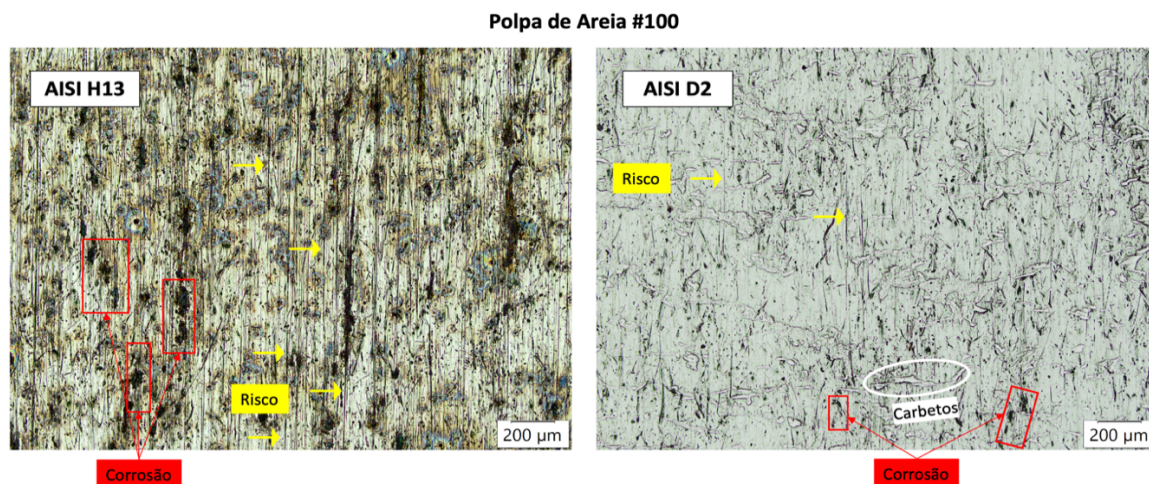
Figura 33 - Taxa de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 mostra as superfícies de desgaste após ensaio de abrasão-corrosão em equipamento Miller.

Figura 34 - Micrografias da superfície de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de areia #100.

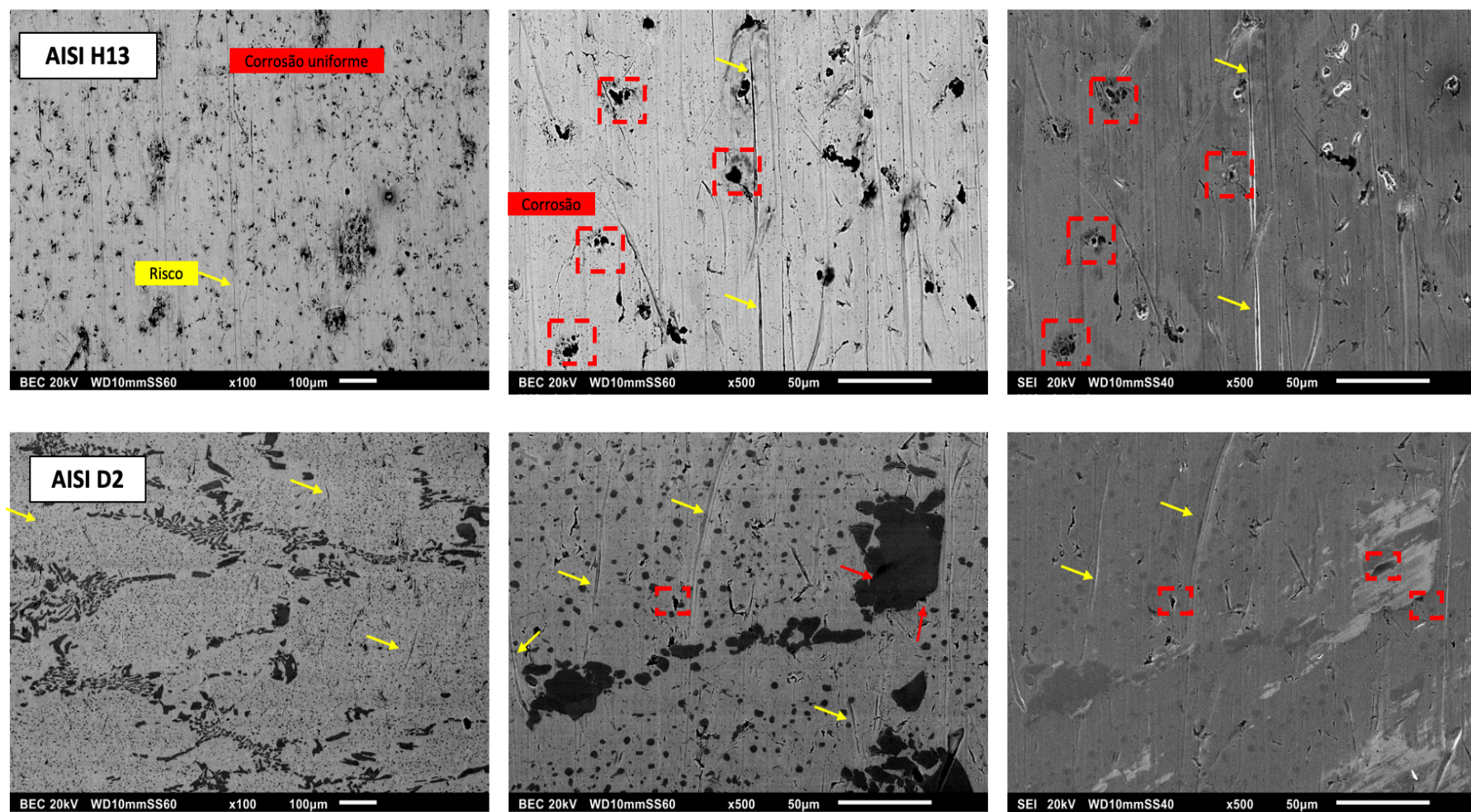


Fonte: Autoria própria.

Noel e Ball (1983) afirmam que as remoções substanciais de material da superfície devido ao desgaste abrasivo não eliminam os efeitos do ataque corrosivo. Dessa forma, a superfície de desgaste permanece susceptível a ação combinada dos fenômenos de abrasão e corrosão. Dessa forma, as micrografias revelaram que no aço H13 o fenômeno de corrosão ocorre em regiões afetadas pelo desgaste. Já no aço D2 observa-se a corrosão com menor intensidade, uma vez que o teor de cromo quando acima de 12% corrobora com o fenômeno de passivação (ASM HANDBOOK, 2003; FONTANA, 1986).

A Figura 35 mostra as imagens de MEV das superfícies de desgaste após o ensaio de abrasão-corrosão em equipamento Miller. As imagens referente aos aços H13 e D2 estão em magnificação de 100 e 500, sendo que na magnificação de 500 as imagens foram obtidas com elétrons retroespalhados e elétrons secundários.

Figura 35 - Imagens de MEV da superfície desgastada em polpa de areia.



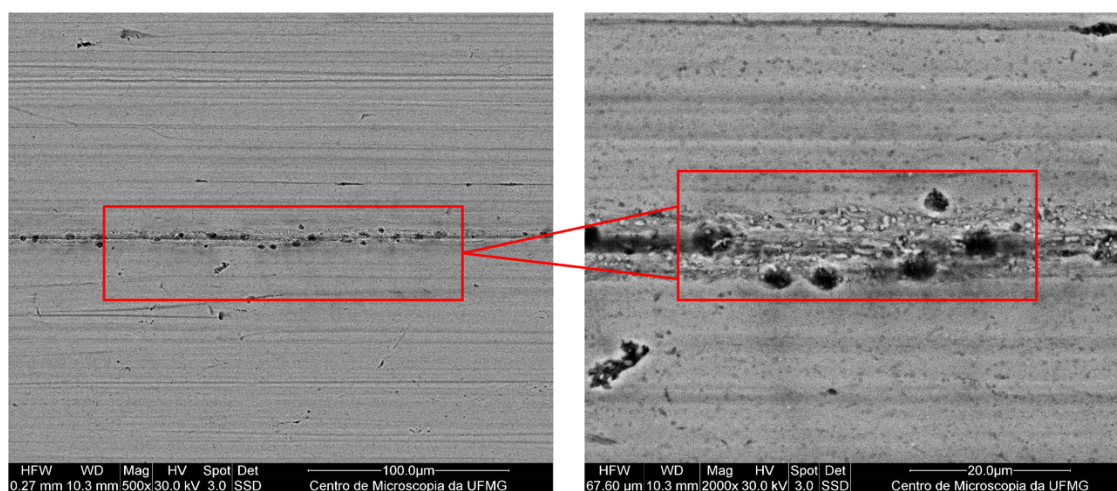
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 35, os focos de corrosão são distribuídos uniformemente pela superfície do aço H13, porém, o mecanismo de microsulcamento se destaca. Jiang e Tufa (2013) afirmam que no sistema de interação abrasão-corrosão, a corrosão uniforme é mais comum de ocorrer, pois, em aços de menor dureza, as cavidades formadas por corrosão não se transformam em pites, uma vez que a taxa de desgaste é elevada e não há tempo para as cavidades ganharem escala.

Na magnificação de 500 vezes o resultado do desgaste na superfície de trabalho torna-se mais nítidas. Para identificar as marcas de abrasão-corrosão foram utilizadas as imagens obtidas por elétrons retroespalhados nesta mesma magnificação (500x). No aço H13 foram identificados predominantemente os mecanismos de abrasão, evidenciados pela presença de microsulcamento. Para o aço D2, na magnificação de 100 vezes não foi possível distinguir com precisão as marcas de corrosão. No entanto, foram observadas as marcas de deformação plástica. Na ampliação de 500 vezes, a presença de corrosão na interface matriz-carbeto foi sutilmente notada.

As regiões de associação dos fenômenos de abrasão-corrosão foram observadas na Figura 35 para o aço D2 e destacadas na Figura 36. De acordo com Jiang, Yao e Xie (2021), aços de maior dureza tendem a mostrar maior sinergia abrasão-corrosão, pois apresentam maior resistência no desgaste abrasivo, deixando a superfície exposta à corrosão por mais tempo.

Figura 36 - Imagens de MEV da superfície de desgaste do aço D2 no tribossistema com polpa de areia #100.

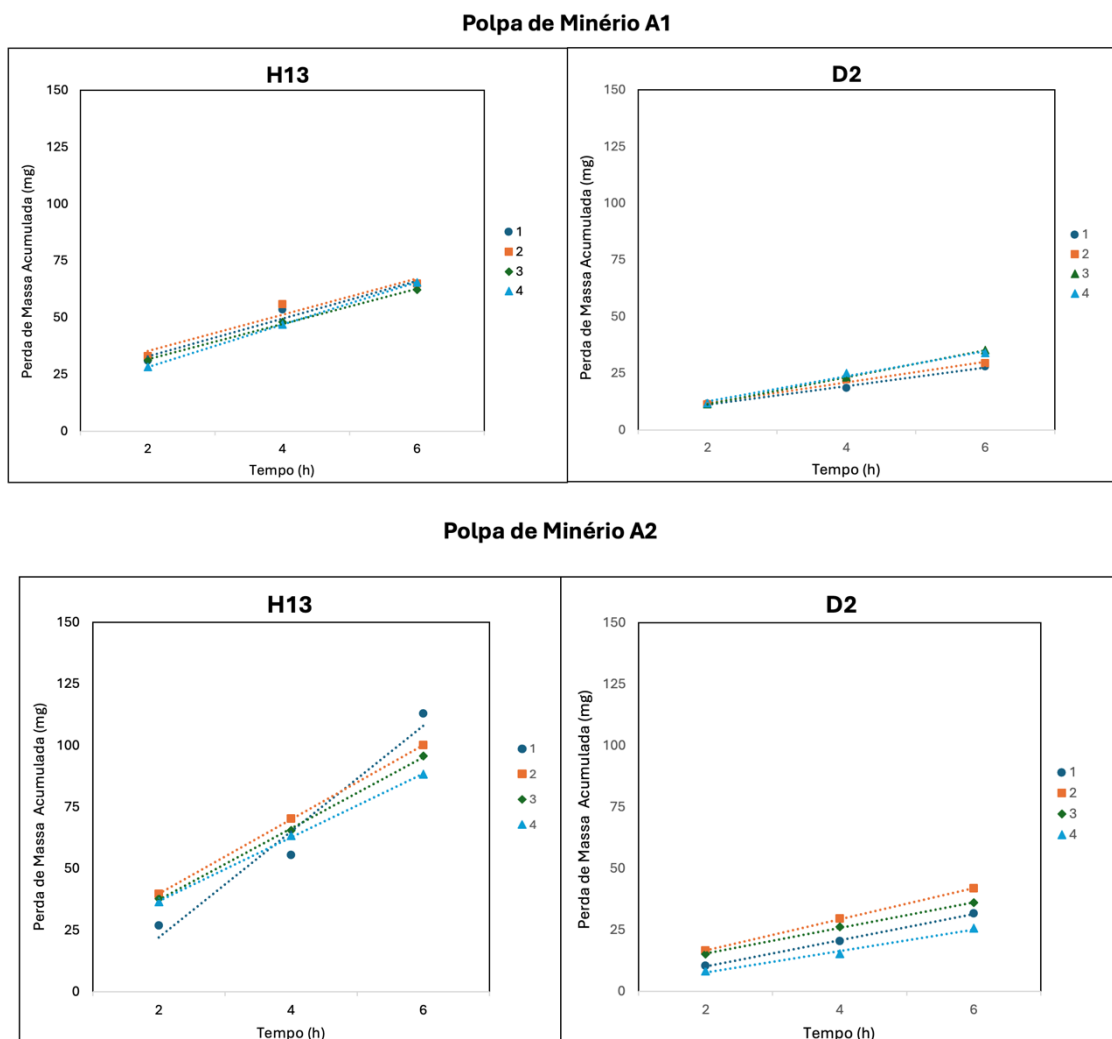


Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Teste Miller com polpas de MFe

A Figura 37 apresenta as perdas de massa acumuladas para aços H13 e D2, submetidas ao ensaio com polpas de abrasivas de minério de ferro. Os ensaios foram interrompidos a cada duas horas, totalizando três medições de perda de massa para cada uma das quatro amostras do tribossistema em estudo. A configuração do teste com polpa de areia foi mantida, na qual as amostras estão conforme a numeração das calhas do equipamento Miller, sendo a amostra 1 correspondente à calha 1, e assim sucessivamente para as restantes.

Figura 37 - Perda de massa acumulada para todas as amostras dos aços H13 e D2 em polpas de minério abrasivo A1 e A2.



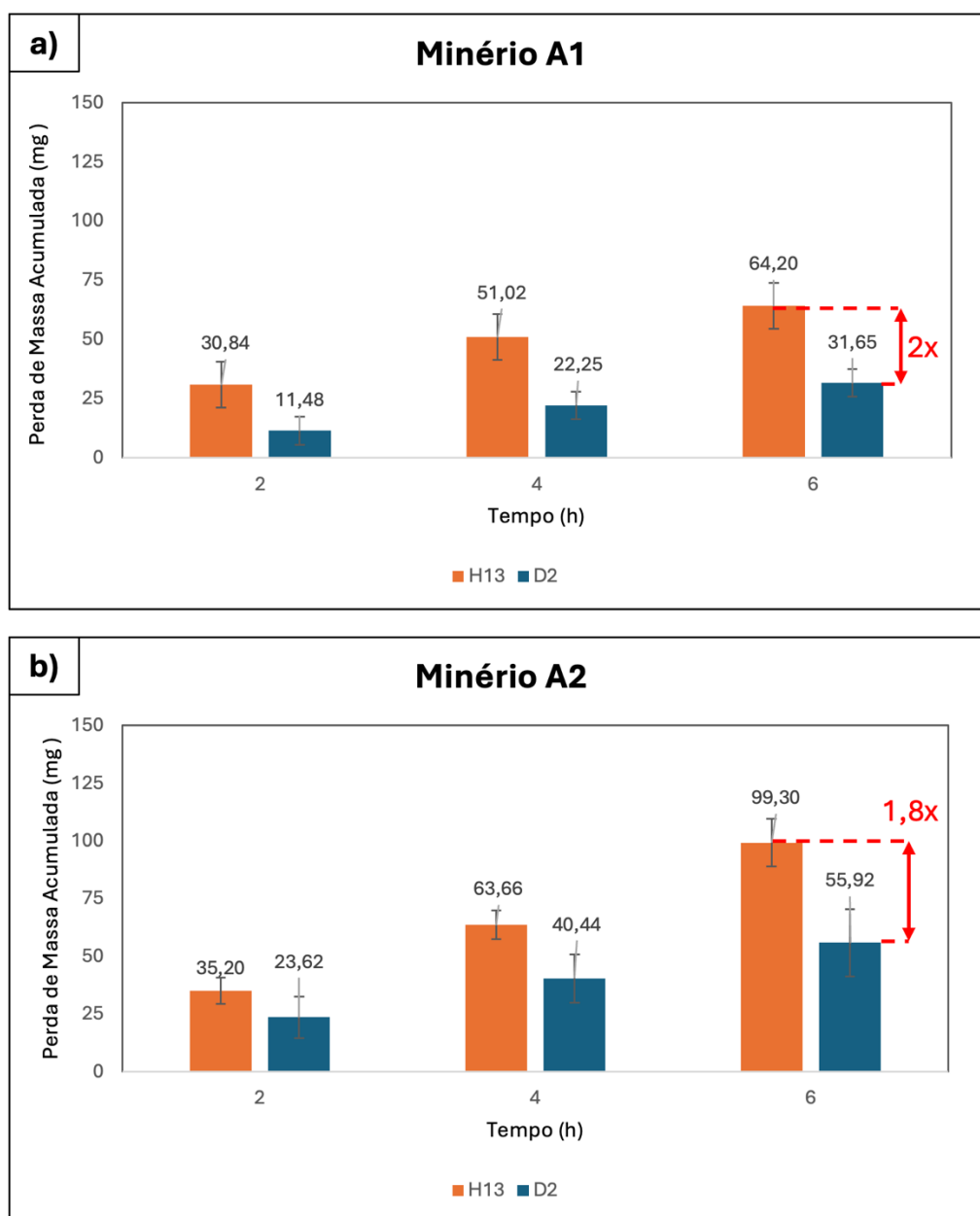
Fonte: Autoria própria.

Nos tribossistemas estudados, o aço H13 apresentou maior perda de massa quando comparado ao aço D2. Porém, no tribossistema H13-abrasivo A2, o comportamento tribológico foi diferente, no qual a amostra 1 (destacada em azul) atingiu a maior perda de massa acumulada, igual a 112,91 mg.

A Figura 38 apresenta as médias das perdas das massas acumuladas para os aços estudados, nos períodos de 2, 4 e 6 h para os testes com polpas de minério, considerando os dois abrasivos A1 e A2. A Figura 38a apresenta os resultados para o minério A1. A perda de massa acumulada para o aço H13, corresponde a 64,20 mg, e, para o aço D2 este valor foi 31,65 mg. Logo, o aço D2 foi 2 vezes mais resistente ao desgaste tribocorrosivo que o aço H13.

A Figura 38b mostra o resultado para o tribossistema que fez uso do minério A2 como abrasivo. A média das perdas de massa acumulada para o aço H13, corresponde a 99,30 mg e para o aço D2 este valor foi de 55,92 mg, resultando em uma diferença de 1,8 vezes. Os dados detalhados das perdas de massas estão disponíveis no Apêndice B.

Figura 38 - Média das perdas de massa dos aços H13 e D2 em polpas de minério abrasivo: a) A1 e b) A2.

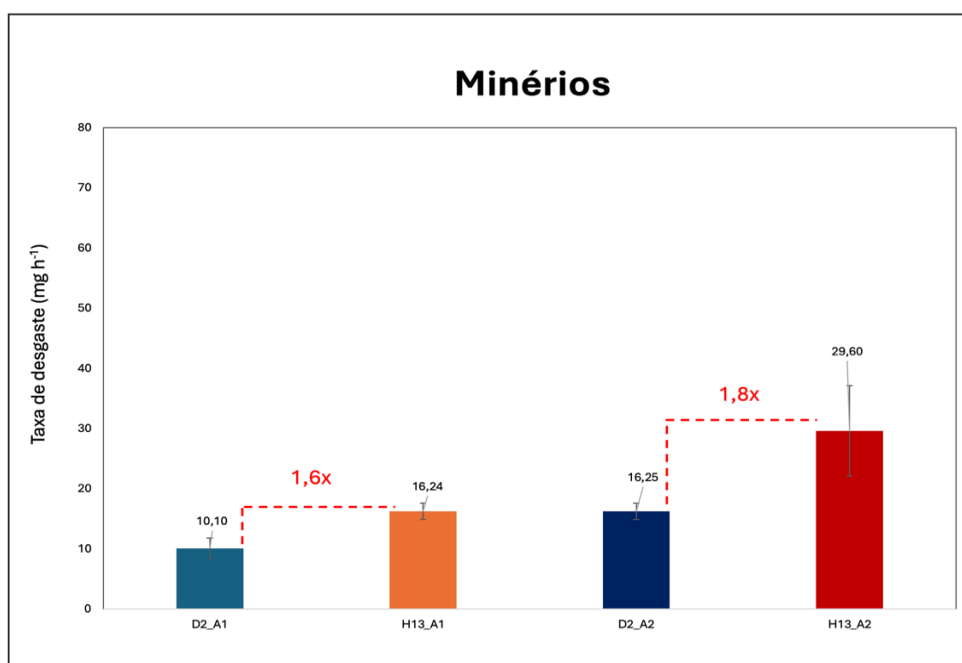


Fonte: Autoria própria.

As taxas de desgaste dos ensaios com polpa de MFe estão representadas na Figura 39, e os dados detalhados são apresentados no Apêndice C. Na polpa do abrasivo A1, o aço H13 apresentou uma taxa de desgaste de $16,24 \text{ mg h}^{-1}$ e o aço D2 de $10,10 \text{ mg h}^{-1}$; dessa forma, o aço H13 apresentou um comportamento tribocorrosivo 1,6 vezes inferior ao do aço D2. Já em polpa do abrasivo A2, as taxas de desgaste foram $29,60 \text{ mg h}^{-1}$ para

o aço H13 e $16,25 \text{ mg h}^{-1}$ para o aço D2. Neste tribossistema, o aço D2 apresentou um comportamento tribocorrosivo 1,8 vezes superior ao aço H13. Embora a diferença entre os ranqueamentos tenha sido pequena, os testes de hipótese confirmaram que todas as médias são estatisticamente diferentes, considerando um nível de 95% de confiança. No Apêndice D podem ser encontrados os dados estatísticos dos testes de hipótese.

Figura 39 - Taxa de desgaste dos aços H13 e D2 em polpas de minério.

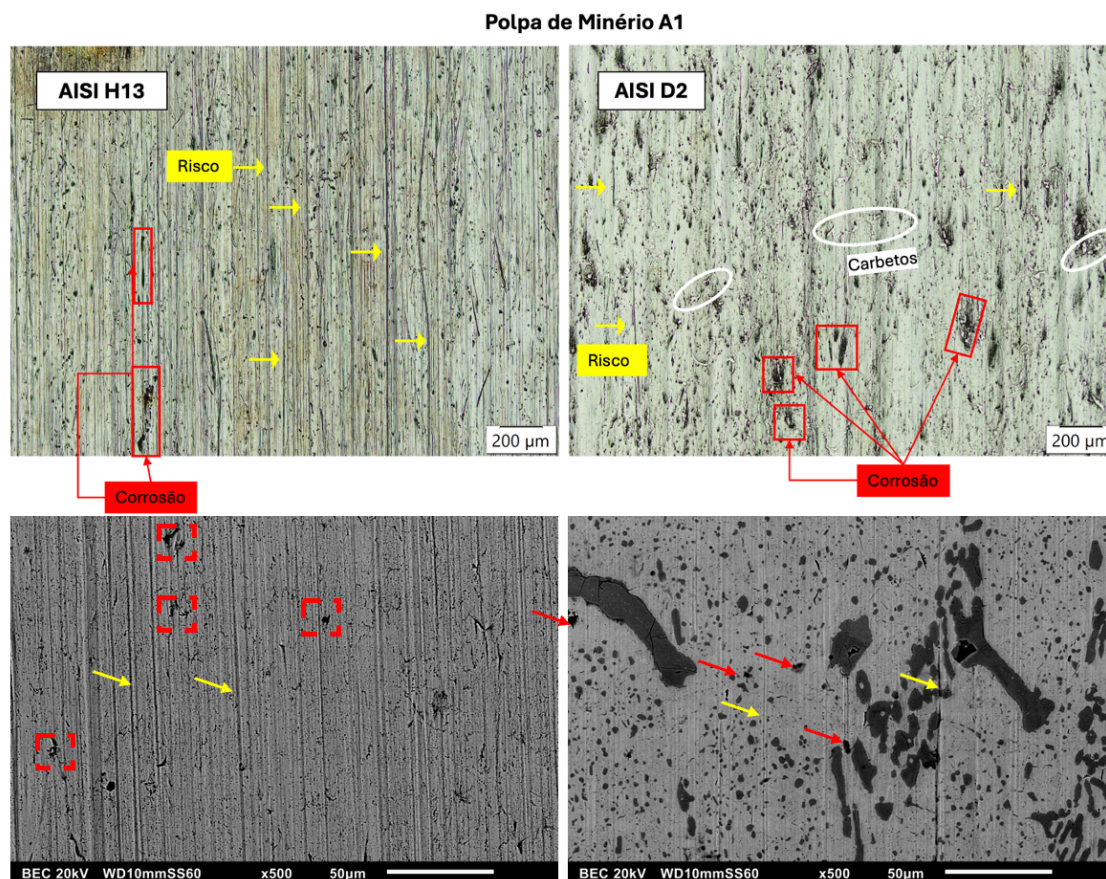


Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicaram que o MFe, composto essencialmente por hematitas, produziram as menores taxas de desgastes quando comparado aos resultados para areia na Figura 36. A correlação entre granulometria das partículas abrasivas e a taxa de desgaste constata que o aumento do tamanho do grão abrasivo contribui para o aumento da taxa (CORONADO; SINATORA, 2011; TRESSIA et al., 2017). Esta afirmação pode estar correlacionada aos resultados encontrados, tendo em vista as maiores taxas de desgaste do tribossistema com areia comercial.

As Figuras 40 e 41 mostram as superfícies de desgaste após ensaio de abrasão-corrosão com polpas de minério, por microscopia óptica e MEV.

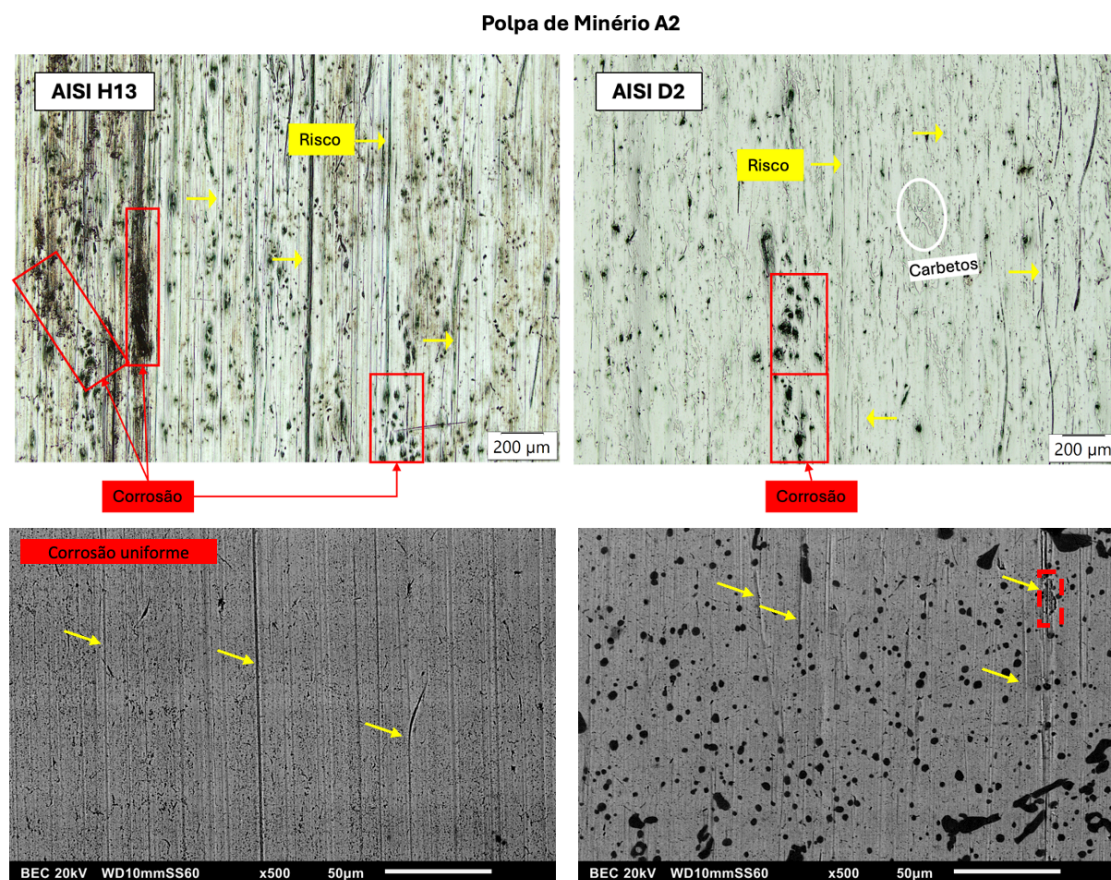
Figura 40 - Imagens de microscopia óptica e MEV da superfície de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de minério A1.



Fonte: Autoria própria.

As micrografias revelaram que no tribossistema contendo polpa de minério A1, a componente de corrosão se distribui uniformemente ao longo da superfície desgastada. Adicionalmente, destaca-se a componente de abrasão pela presença de riscos ininterruptos. Para o aço D2, a componente de corrosão se mostra mais evidente do que quando comparado ao tribossistema com areia #100. Embora presença de riscos que indicam microsulcamento tenha sido observada, a intensidade destes riscos foi menor.

Figura 41- Imagens de microscopia óptica e MEV da superfície de desgaste dos aços H13 e D2 em polpa de minério A2.



Fonte: Autoria própria.

Já as micrografias do tribossistema com polpa de minério A2, destacam a severidade da corrosão no aço H13. O efeito da abrasão também pode ser notado no aço D2, porém, no tribossistema D2-Abrasivo A2, a corrosão é focalizada.

Quanto à análise da corrosão na superfície desgastada, aços com elevado teor de cromo tendem a apresentar melhor resistência à corrosão. Porém, podem apresentar depleção do cromo nas regiões de interface entre carbeto e matriz, o que favorecem predominantemente mecanismos de corrosão (CARDOSO, et al. 2019). Este fenômeno resulta no empobrecimento localizado de cromo na interface carbeto-matriz. Embora o aço D2 apresente teor de cromo igual a 12%, observam-se que os focos de corrosão estão localizados próximos aos carbeto de cromo. Isso reforça a probabilidade do empobrecimento de cromo e, conseqüentemente, a geração de corrosão nestas regiões.

Trabalhos como o de Salasi, Stachowiak e Stachowiak (2011) destacam esta ocorrência em ferros fundidos alto cromo. As fendas estreitas entre os carbetos e a matriz são locais de diferentes energias e podem atuar como locais para os inícios de ataques localizados. A abrasão contribui para a severidade da corrosão, uma vez que a abrasão rompe a camada passiva da matriz e reduz a diferença de potencial entre a matriz e o carbetos.

6 CONCLUSÕES

O estudo do comportamento tribocorrosivo dos aços ferramenta, AISI H13 e D2, foi realizado pela primeira vez quanto aos efeitos da tribocorrosão em materiais candidatos à fabricação de capas de briquetagem. A avaliação da tribocorrosão em equipamento Miller, com metodologia adaptada da ASTM G75, permitiu compreender a influência dos fenômenos de abrasão e corrosão sob a durabilidade desses materiais.

O aço martensítico H13 serviu como referência para os ensaios, pois, é um aço comercial com microestrutura homogênea. E, em busca de maior vida útil, o aço D2, aço martensítico com segunda fase dura, mostrou-se como candidato para atuação na compactação contínua de MFe.

No processo de briquetagem podem ser empregados diversos tipos de minérios, incluindo minérios de ferro. Por isso, é importante fazer uma investigação desta variabilidade, especialmente quanto ao comportamento abrasivo. Embora os minérios A1 e A2 que em quase sua totalidade são compostos por hematitas, como visto pelo DRX e a microscopia óptica que resultou na composição mineralógica, eles apresentaram diferenças significativas na abrasividade e no perfil da superfície desgastada relevados pelas micrografias.

Adicionalmente, o comportamento tribocorrosivo dos aços foi influenciado pela composição da polpa, sendo que ambos os aços ferramenta apresentaram menor resistência à tribocorrosão em polpa de areia. No aço H13 houve predominância da componente do desgaste abrasivo, evidenciado pelo riscamento. A taxa de desgaste foi de $60,9 \text{ mg h}^{-1}$ para o H13 e $19,7 \text{ mg h}^{-1}$ para o D2, respectivamente. Aços com maior dureza apresentam maior sinergismo da abrasão-corrosão, e no tribossistema D2-Areia, este fenômeno foi confirmado.

O aço D2 apresentou maior resistência à tribocorrosão quando comparado ao aço H13 em todos os seis tribossistemas estudados, porém, as taxas de desgaste foram significativamente menores em polpas de MFe. Os testes de desgaste em equipamento Miller mostraram que a abrasividade da areia padrão foi maior que os dois minérios de ferro, estabelecendo o seguinte ranqueamento: areia #100 > minério A2 > minério A1. Esta resposta também pode ter sido influenciada pela proporção de quartzo nos abrasivos, pois a areia apresentou 96,1% de quartzo em sua composição, o percentual para o minério A2 foi de 1%, e no minério A1 apenas índices <1% foram medidos.

A análise das superfícies desgastadas, analisadas por microscopia ótica e MEV, destacaram maior intensidade de corrosão no aço H13 em todos os seis tribossistemas estudados. Porém, no aço D2 o efeito do componente da corrosão é menor, e a corrosão nas interfaces entre matriz e carbeto foi notada.

Por fim, os resultados deste estudo forneceram uma contribuição significativa para a compreensão do efeito dos constituintes do tribossistema, como o meio e os abrasivos, sobre o comportamento tribocorrosivo e durabilidade das capas de briquetagem. Com base nestas análises, o aço AISI D2 demonstrou notável resistência ao desgaste tribocorrosivo, apresentando um elevado potencial para fabricação de capas de briquetagem.

7 TRABALHOS FUTUROS

A avaliação do comportamento tribocorrosivo de materiais mediante metodologia adaptada da ASTM G75, apresenta as seguintes vertentes para continuidade:

- i. Inclusão de diferentes materiais candidatos à fabricação de capas;
- ii. Avaliação em escala piloto;
- iii. Estudar isoladamente as componentes do tribossistema: abrasão, corrosão e sinergismo;
- iv. Efeito da abrasividade, composição química e morfológica de diferentes tipos de minérios de ferro em materiais candidatos à fabricação de capas de briquetagem;
- v. Efeito da variação de pH do meio em materiais candidatos à fabricação de capas de briquetagem;
- vi. Comparação dos mecanismos de desgaste entre campo e laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? Revista USP: n. 103, p. 13-24, 2014.

ASM HANDBOOK. Metallography and microstructures. ASM International, 2004. 1184 p.

ASM HANDBOOK. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. ASM International, 2003. 1184 p.

ASM HANDBOOK. Friction, Lubrication, and Wear Technology. ASM International, v. 18, 1879 p., 1992.

ASTM. Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). Designation: G75-15, 2021.

ASTM. Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion. Designation: G119-09, 2022.

ASTM. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Designation: G65-16, 2017.

ASTM. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. Designation: E92-17, 2017.

ASTM. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. Designation: E384-17, 2017.

ASTM. Standard Specification for Tool Steel Alloy. Designation: A681-08, 2022.

ASTM. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Designation: G40, 2022.

AVERY, H. S. Classification and precision of abrasion tests, Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, St. Louis, MO., 1977, ASME, New York, p. 148 - 157.

BURWELL, J. T. Survey of possible wear mechanisms. Wear, v. 1, p. 119-141, 1958.

BEMBENEK, M. The issue of selection: shape and volume of briquettes agglomerated in a roller press. *Journal of KONES Powertrain and Transport*: v. 24, n.2, 2017.

BEMBENEK, M. The Influence of the Use of Polymer Lining within the Roller Press Gravity Feeder on Briquette Quality. *Polymers*, v. 12, p. 2489, 2020.

BEMBENEK, M.; KRAWCZYK, J.; PANKIEWICZ, K. The wear on roller press rollers made of 20Cr4/1.7027 steel under conditions of copper concentrate briquetting. *Materials*, v. 13, p. 5782, 2020.

BLAU, P. J. et al. Future Needs and Challenges in Tribo-Corrosion Research and Testing. *Tribo-Corrosion. Research, Testing, and Applications on April 19-20, 2012, in Atlanta, GA*; STP 1563, Peter J. Blau, Jean-Pierre Celis, and Dirk Drees, Editors, p. 214–226, Doi:10.1520/STP156320120051, ASTM International, West Conshohocken, PA 2013.

BRANCO, P. de M. Atmosfera Terrestre. Ministério de Minas e Energia, Serviço Geológico do Brasil. 2014. [Online]. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/atmosfera-terrestre>. Acesso em: 03 de fev. de 2025.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN: 978-85-216-2124-9.

CARDOSO, J. L. et al. Corrosion behavior of austenitic stainless steel in CO₂-saturated synthetic oil field formation water. *Materials Research*, v. 22, n. 4, 2019.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005. 599p.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.

CORONADO, J. J.; SINATORA, A. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1. *Wear*, v. 271, n. 9-10, p. 1794-1803, 2011.

DIOMIDIS, N. et al. Tribocorrosion of stainless steel in sulfuric acid: Identification of corrosion–wear components and effect of contact area. *Wear*, v. 269, p. 93-103, 2010. ISSN 0043-1648.

FONTANA, M. G. *Corrosion Engineering*. 3ed. New York: McGraw Hill, 1986. 576 p.

GATES, J. D. et al. Synergistic corrosion-abrasion of cast wear- resistant materials in HNO_3 . *Cast Metals*, v. 8, n. 2, p 73-90, 1995.

GENTIL, V. *Corrosão*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 1192p.

IPT. Certificado de Material de Referência nº 2417-103. 1p., 2023. [Online]. Disponível em: <http://ipt.br/areia-normal/>. Acesso em: 05 de março de 2025.

KAJDAS, C.; HIRATSUKA, K. *Tribocatalysis, Tribochemistry, and Tribocorrosion*. Singapura: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 337 p., 2018. ISBM: 978-1-315-36498-9.

KOPPERN. *Briquetting with Roller Presses*. Brochure Briquetting. 2024.

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

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials*. Londres, 2 ed., 2017.

JANEWICZ, A.; KOSTURKIEWICZ, B.; HRYNIEWICZ, M. Desgaste operacional e destruição da superfície de trabalho dos elementos formadores de prensas de rolos. Nos Anais da XXVI Conferência “Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Zakopane, Polônia, 28–31 de janeiro de 2013. (Em polonês)

JIANG, J.; TUFA, K. Y. The Effect of Corrosion on Slurry Abrasion of Wear Resistant Steels. *Tribo-Corrosion: Research, Testing, and Applications* on April 19-20, 2012. In: Atlanta, GA; STP 1563, Peter J. Blau, Jean-Pierre Celis, and Dirk Drees, Editors, p. 66-87. ASTM International, West Conshohocken, PA 2013.

JIANG, J.; YAO, B.; XIE, Y. The effect of test conditions on sliding abrasion-corrosion synergy of D2 tool steel in a salt slurry. *Wear*, v. 477, 2021.

KHRUSCHOV, M. Principles of abrasive wear. *Wear*, V. 28, n.1, p. 69-88, 1974.

LOGINOV, Y. N.; BOURKINE, S. P.; BABAILOV, N. A. Cinematics and volume deformations during roll-press briquetting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 118, p. 151-157, 2001.

LU, B.; LUO, J. CHIVELLI, S. Corrosion and Wear Resistance of Chrome White Irons - A Correlation to Their Composition and Microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 37, 2006.

MATHEW, M. T. et al. Significance of Tribocorrosion in Biomedical Applications: Overview and Current Status. *Advances in Tribology*, v. 20009. 12p., 2009.

MISCHLER, S. Sliding Tribo-Corrosion of Passive Metals: Mechanisms and Modeling. *Tribo-Corrosion: Research, Testing, and Applications* on April 19–20, 2012.

MUNOZ, A. I.; ESPALLARGAS, N.; MISCHLER, S. Tribocorrosion: Definitions and Relevance. *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*. Springer: cap. 3-5, p. 18-52, 2020.

NEVILLER, A.; HODGKIESS, T.; XU, H. An electrochemical and microstructural assessment of erosion–corrosion of cast iron. *Wear*, v. 233–235, p. 523-534, 1999.

NINS, B. et al. Abrasiveness of iron ores: Analysis of service-worn conveyor belts and laboratory Dry Sand/Rubber Wheel tests. *Wear*, v. 506, p. 204439, 2022.

NOEL, R. E. J; BALL, A. On the synergistic effects of abrasion and corrosion during wear. *Wear*, v. 87, p. 351-361, 1983.

ONU. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Brasil, 2023. [Online]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 18 de jul. de 2023.

PENAGOS, J. J. Efeito do refinamento da microestrutura e da adição de nióbio na resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos de alto cromo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

RIBEIRO, N. C. et al. Comportamento tribocorrosivo de aços ferramenta para aplicação em equipamentos de aglomeração de minério de ferro. In: 8° ABM Week, 2024, São Paulo. 10º Seminário de Aglomeração de Minérios, 2024. v. 10. p. 293-302.

ROBERGE, P. R. Handbook of Corrosion Engineering. United States: McGraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-076516-2.

RRUFF. Quartz R100134. 2025a. [Online]. Disponível em: <http://rruff.info/quartz/R100134>. Acesso em: 05 de março de 2025.

RRUFF. Hematite R110013. 2025b. [Online]. Disponível em: <http://rruff.info/hematite/R110013>. Acesso em: 05 de março de 2025.

SANTOS, J. M. A. et al. Tribocorrosive performance of grinding ball materials in Miller wear tests under sand and Cu ore slurries. Wear, p. 205820, 2025.

SALASI, M.; STACHOWIAK, G. B.; STACHOWIAK, G. W. Three-body tribocorrosion of high-chromium cast irons in neutral and alkaline environments. Wear, v. 271, p. 1385-1395, 2011.

SHIPWAY, P. H.; WIROJANUPATUMP, S. W. The role of lubrication and corrosion in abrasion of materials in aqueous environments. Tribology International, v. 35, p. 661-667, 2002.

SILVA, A. L. D. da C. e; MEI, P. R. Aços e ligas especiais. São Paulo: Eletrometal S. A. Metais Especiais. 2° ed., cap. 2, 1953.

SILVA, E. J. da. Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Revista Matéria, e-12497, v. 24, n. 4, 2019. ISSN 1517-7076.

STACHOWIAK, G. W. *Wear: Materials, Mechanisms and Practice*. 1 ed. Willey: 2006. 480 p.

TAN, Z. *Air Pollution and Greenhouse Gases: From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control*. Canada: Springer, 2017. ISSN 1865-3537.

TRESSIA, G.; PENAGOS, J. J.; SINATORA, A. Effect of abrasive particle size on slurry abrasion resistance of austenitic and martensitic steels. *Wear*, v. 376, p. 63-69, 2017.

UHLIG, H. H., *The Cost of Corrosion in the United States*. Chemical and Engineering News. v. 27, p. 2764, 1949.

UHLIG, H. H.; REVIE, R. W. *CORROSION AND CORROSION CONTROL: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. Canada: Wiley-Interscience, 2008.

VALE S.A. Vale testa com sucesso novo briquete para redução direta, que torna a produção de aço mais ‘limpa’. *Imprensa, Meio Ambiente, Minério de Ferro*, 2023a. [Online]. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/vale-testa-com-sucesso-novo-briquete-para-reducao-direta-que-torna-a-producao-de-aco-mais-limpa>. Acesso em: 18 de jul. de 2023.

VALE S.A. Vale inicia testes com carga da primeira planta de briquete de minério de ferro em Vitória. *Imprensa, Energia e Siderurgia, Meio ambiente*, 2023b. [Online]. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-inicia-testes-com-carga-da-primeira-planta-de-briquete-de-minerio-de-ferro-em-vitoria>. Acesso em: 08 de maio de 2024.

VALE S.A. Vale anuncia “briquete verde” que pode reduzir em até 10% as emissões de CO₂ de clientes siderúrgicos. *Notícias, Inovação, Sustentabilidade*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-announces-green-briquette-capable-of-reducing-co2-emissions-of-steelmaking-clients-by-up-to-10->. Acesso em: 18 de jul. de 2023.

VENKATRAMAN, M.; NEUMANN, J. P. The C-Cr (Carbon-Chromium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, vol. 11, n. 2, 1990.

WANG, S-H.; JIANG, J.; STACK, M. M. Methodology Development for Investigation of Slurry Abrasion Corrosion by Integrating an Electrochemical Cell to a Miller Tester. J Bio Tribo Corros, 9 p., 2015.

ZHANG, G.; SOL, Y.; XU, Y. Revisão de aglutinantes de briquetes e mecanismo de briquetagem. Renovar. Sustentar. Energia Rev., v. p. 82,477-487, 2018.

ZUM GAHR, K-H. Microstructure and Wear of Materials. Tribology Series, 10. Nova York: Elsevier v. 10, 1987.

APÊNDICES

Apêndice A – Dureza dos aços ferramenta estudados.

A dureza dos dois aços ferramentas investigados neste estudo foram medidas em 5 pontos por amostra. As tabelas abaixo descrevem os dados detalhados (Tabela A.6 a A.11).

Tabela A.6 - Dureza das amostras de H13 no tribossistema H13-Areia #100.

	H13-Areia (1)		H13-Areia (2)		H13-Areia (3)		H13-Areia (4)	
Medida	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
1	451,80	45,50	450,50	45,40	445,90	45,00	449,50	45,30
2	445,90	45,00	444,20	44,90	448,20	45,20	452,70	45,50
3	449,60	45,30	455,60	45,80	458,00	46,00	450,00	45,30
4	448,10	45,20	446,70	45,10	448,30	45,20	452,10	45,50
5	446,70	45,10	445,60	45,00	446,10	45,00	450,30	45,40
Média	448,42	45,22	448,52	45,24	449,30	45,28	450,92	45,40
D. Pad.	2,36	0,19	4,60	0,36	4,99	0,41	1,40	0,10
CV%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	0%	0%

Fonte: Autoria própria.

Tabela A.7 - Dureza das amostras de H13 no tribossistema H13-A1.

	H13-A1 (1)		H13-A1 (2)		H13-A1 (3)		H13-A1 (4)	
Medida	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
1	448,30	45,20	439,20	44,40	444,30	44,90	444,20	44,90
2	444,80	44,90	446,40	45,00	451,50	45,50	447,10	45,10
3	450,40	45,40	449,10	45,30	444,80	44,90	444,60	44,90
4	456,50	45,90	464,60	46,50	450,40	45,40	445,90	45,00
5	452,30	45,50	444,70	44,90	447,60	45,10	443,30	44,80
Média	450,46	45,38	448,80	45,22	447,72	45,16	445,02	44,94
D. Pad.	4,38	0,37	9,55	0,79	3,23	0,28	1,49	0,11
CV%	1%	1%	2%	2%	1%	1%	0%	0%

Fonte: Autoria própria.

Tabela A.8 - Dureza das amostras de H13 no tribossistema H13-A2.

	H13-A2 (1)		H13-A2 (2)		H13-A2 (3)		H13-A2 (4)	
Medida	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
1	445,20	44,90	453,00	45,60	451,90	45,50	446,20	45,00
2	449,20	45,30	451,90	45,50	452,10	45,50	449,60	45,30
3	454,50	45,70	448,30	45,20	456,10	45,80	452,60	45,60
4	449,10	45,30	458,60	46,00	455,30	45,80	447,00	45,10
5	454,70	45,70	454,30	45,70	453,00	45,60	446,80	45,10
Média	450,54	45,38	453,22	45,60	453,68	45,64	448,44	45,22
D. Pad.	4,04	0,33	3,75	0,29	1,91	0,15	2,67	0,24
CV%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	1%

Fonte: Autoria própria.

Tabela A.9 - Dureza das amostras de D2 no tribossistema D2-Areia #100.

	D2-Areia (5)		D2-Areia (6)		D2-Areia (7)		D2-Areia (8)	
Medida	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
1	655,60	58,10	661,50	58,40	650,90	57,90	680,80	59,30
2	670,70	58,80	653,40	58,00	653,80	58,00	689,50	59,70
3	657,40	58,20	660,30	58,30	656,50	58,20	683,90	59,40
4	658,30	58,30	649,30	57,80	654,20	58,10	677,70	59,20
5	677,30	59,10	648,90	57,80	650,70	57,90	689,00	59,70
Média	663,86	58,50	654,68	58,06	653,22	58,02	684,18	59,46
D. Pad.	9,60	0,43	5,96	0,28	2,44	0,13	5,12	0,23
CV%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	0%

Fonte: Autoria própria.

Tabela A.10 - Dureza das amostras de D2 no tribossistema D2-A1.

	D2-A1 (1)		D2-A1 (2)		D2-A1 (3)		D2-A1 (4)	
Medida	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
1	654,00	58,00	646,90	57,70	645,10	57,60	641,40	57,40
2	648,00	57,80	644,50	57,60	635,20	57,10	634,50	57,10
3	660,30	58,30	647,30	57,70	636,70	57,20	641,20	57,40
4	654,00	58,00	645,40	57,60	654,90	58,10	648,70	57,80
5	658,30	58,30	650,40	57,90	643,40	57,50	651,30	57,90
Média	654,92	58,08	646,90	57,70	643,06	57,50	643,42	57,52
D. Pad.	4,74	0,22	2,26	0,12	7,85	0,39	6,68	0,33
CV%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%

Fonte: Autoria própria.

Tabela A.11 - Dureza das amostras de D2 no tribossistema D2-A2.

	D2-A2 (1)		D2-A2 (2)		D2-A2 (3)		D2-A2 (4)	
Medida	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC	HV ₃₀	HRC
1	632,20	57,00	653,10	58,00	670,90	58,90	663,50	58,50
2	652,90	58,00	672,80	58,90	667,20	58,70	656,30	58,20
3	629,80	56,80	666,10	58,60	673,30	59,00	679,20	59,20
4	645,10	57,60	664,20	58,50	673,50	59,00	671,20	58,90
5	659,70	58,30	666,10	58,60	674,20	59,00	665,40	58,60
Média	643,94	57,54	664,46	58,52	671,82	58,92	667,12	58,68
D. Pad.	12,92	0,64	7,14	0,33	2,87	0,13	8,60	0,38
CV%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	1%

Fonte: Autoria própria.

Apêndice B – Dados de desgaste obtidos do ensaio Miller.

As Tabelas B.12 a B.18 mostram os dados de perda de massa acumulada para cada tribossistema estudado.

Tabela B.12 - Perda de massa das amostras de H13 no tribossistema H13-Areia #100.

H13_Areia #100				
Tempo de Ensaio	Massa Inicial	Perda de Massa	Perda de Massa Acumulada	Desv. Padrão
(h)	(g)	(g)	(mg)	
0	17,3723	0,0000	0,00	0,00
2	17,2855	0,0868	86,79	13,43
4	17,2165	0,1558	155,76	25,98
6	17,1648	0,2074	207,41	30,71

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.13 - Perda de massa das amostras de H13 no tribossistema H13-A1.

H13_A1				
Tempo de Ensaio	Massa Inicial	Perda de Massa	Perda de Massa Acumulada	Desv. Padrão
(h)	(g)	(g)	(mg)	
0	17,3733	0,0000	0,00	0,00
2	17,3424	0,0308	30,84	2,00
4	17,3222	0,0510	51,02	4,27
6	17,3091	0,0642	64,20	1,41

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.14 - Perda de massa das amostras de H13 no tribossistema H13-A2.

H13_A2				
Tempo de Ensaio	Massa Inicial	Perda de Massa	Perda de Massa Acumulada	Desv. Padrão
(h)	(g)	(g)	(mg)	
0	17,4230	0,0000	0,00	0,00
2	17,3878	0,0352	35,20	5,73
4	17,3593	0,0637	63,66	6,20
6	17,3237	0,0993	99,30	10,29

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.15 -Perda de massa das amostras de D2 no tribossistema D2-Areia #100.

D2_Areia #100				
Tempo de Ensaio	Massa Inicial	Perda de Massa	Perda de Massa Acumulada	Desv. Padrão
(h)	(g)	(g)	(mg)	
0	17,3152	0,0000	0,00	0,00
2	17,2864	0,0289	28,86	4,77
4	17,2653	0,0499	49,93	6,70
6	17,2470	0,0682	68,19	7,97

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.16 - Perda de massa das amostras de D2 no tribossistema D2-A1.

D2_A1				
Tempo de Ensaio	Massa Inicial	Perda de Massa	Perda de Massa Acumulada	Desv. Padrão
(h)	(g)	(g)	(mg)	
0	17,3382	0,0000	0,00	0,00
2	17,3267	0,0115	11,48	0,24
4	17,3159	0,0223	22,25	2,71
6	17,3065	0,0317	31,65	3,53

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.17 - Perda de massa das amostras de D2 no tribossistema D2-A2.

D2_A2				
Tempo de Ensaio	Massa Inicial	Perda de Massa	Perda de Massa Acumulada	Desv. Padrão
(h)	(g)	(g)	(mg)	
0	17,3673	0,0000	0,00	0,00
2	17,3547	0,0126	12,56	3,91
4	17,3445	0,0228	22,82	6,35
6	17,3335	0,0338	33,81	6,87

Fonte: Autoria própria.

Apêndice C – Ajuste linear para estimativa da taxa de desgaste.

A Tabela C.18 mostra as equações dos ajustes lineares e os respectivos R^2 para os aços ferramenta em polpa de areia comercial e em polpa dos dois minérios abrasivos de estudo.

Tabela C.18 - Ajustes lineares e R^2 para as amostras dos aços D2 e H13 em polpa de areia e polpa dos abrasivos A1 e A2.

Tribossistema	Amostra	Equação	R^2
H13_Areia #100	1	$y = 0,071x + 0,0403$	0,9872
	2	$y = 0,0485x + 0,0319$	0,9989
	3	$y = 0,0556x + 0,0297$	0,9957
	4	$y = 0,0661x + 0,0155$	0,9900
H13_A1	1	$y = 0,0166x + 0,0163$	0,9607
	2	$y = 0,0159x + 0,0194$	0,9428
	3	$y = 0,0155x + 0,0161$	0,9979
	4	$y = 0,0186x + 0,0096$	1,000
H13_A2	1	$y = 0,043x - 0,021$	0,9639
	2	$y = 0,0302x + 0,0097$	0,9999
	3	$y = 0,029x + 0,0083$	0,9993
	4	$y = 0,0259x + 0,0109$	0,9995
D2_Areia #100	1	$y = 0,0213x + 0,0128$	0,9971
	2	$y = 0,0207x + 0,0118$	0,9987
	3	$y = 0,0186x + 0,0085$	0,9984
	4	$y = 0,018x + 0,0056$	0,9989
D2_A1	1	$y = 0,0082x + 0,0029$	0,9934
	2	$y = 0,0091x + 0,0027$	0,9852
	3	$y = 0,0119x - 0,0006$	0,9999
	4	$y = 0,0111x + 0,0014$	0,9881
D2_A2	1	$y = 0,0107x - 0,0006$	0,9986
	2	$y = 0,0127x + 0,0039$	0,9997
	3	$y = 0,0104x + 0,005$	0,9988
	4	$y = 0,0087x - 0,001$	0,9871

Fonte: Autoria própria.

Apêndice D – Teste estatístico de hipótese.

A Tabela D.19 mostra os resultados dos testes estatísticos de hipóteses para os aços ferramenta, AISI H13 e D2, em polpa de MFe dos abrasivos A1 e A2. Para este teste foram considerados 95% de confiança com o número de amostras igual a quadro. As regiões críticas foram estabelecidas entre $z < -1,96$ e $z > 1,96$.

Tabela D.19 - Teste estatístico de hipótese.

Tribossistema	Média	Desv. Pad.	Variância	N	Z_{cal}	Resultado
D2_A1	10,10	1,72	2,96	4	-5,57	Diferente
H13_A1	16,24	1,38	1,90	4		
D2_A2	16,25	1,38	1,90	4	-3,48	Diferente
H13_A2	29,60	7,54	56,85	4		
H13_A1	16,24	1,38	1,90	4	-3,49	Diferente
H13_A2	29,60	7,54	56,85	4		
D2_A1	10,10	1,72	2,96	4	-5,58	Diferente
D2_A2	16,25	1,38	1,90	4		

Fonte: Autoria própria.

ANEXOS

Anexo 1 – Distribuição granulométrica dos abrasivos.

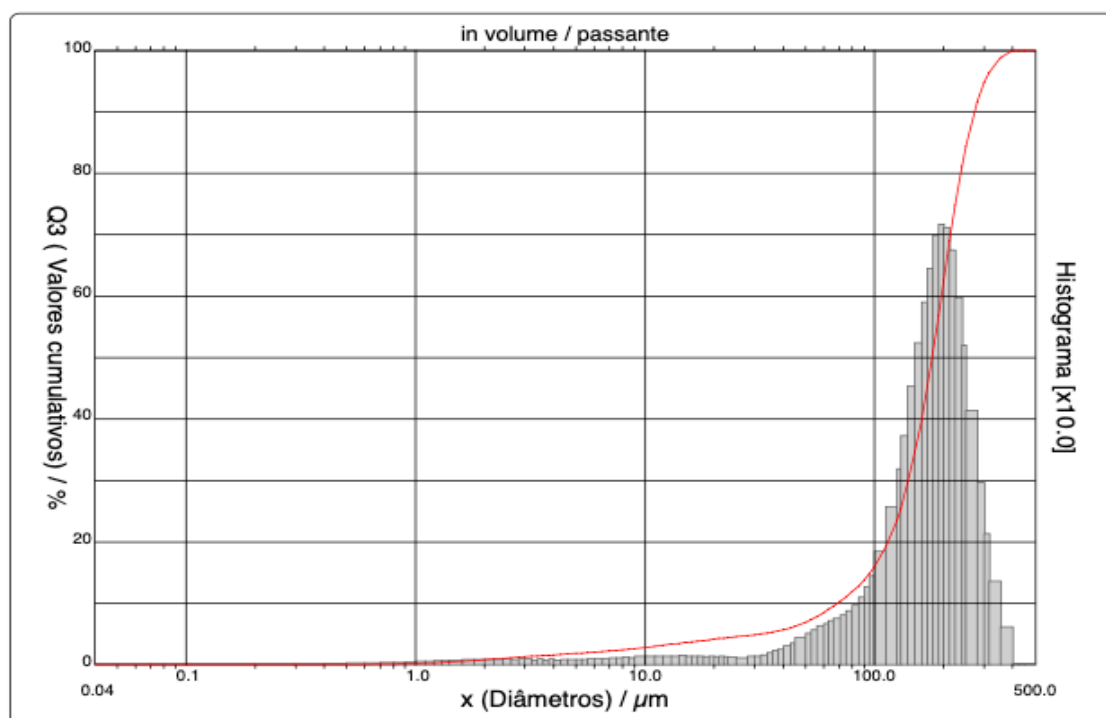
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1090 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample_X_
Sample type	: 1024-03-A100-RR
Sample type	:
Comentários	:
Líquido	:
Agente dispersante	:
Operador	: JORGE
Empresa	: DEMAT - CEFET MG
Localização	: Belo Horizonte
Data : 22/10/2024	Hora : 23:19:43
Índice med.	: 1295
Database name	: CilasDB1

Ultrassom	: 60	s
Obscuration	: 11	%
Diâmetro a 10%	: 68.57	μm
Diâmetro a 50%	: 178.11	μm
Diâmetro a 90%	: 272.90	μm
Diâmetro médio	: 175.54	μm
Fraunhofer		
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 60s/60s/4	
SOP name	: Fraunhofer	





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1090 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra : Sample_X_
 Sample type : 1024-03-A100-RR
 Sample type :
 Comentários :
 Líquido :
 Agente dispersante :
 Operador : JORGE
 Empresa : DEMAT - CEFET MG
 Localização : Belo Horizonte
 Data : 22/10/2024 Hora : 23:19:43
 Índice med. : 1295
 Database name : CilasDB1

Ultrassom : 60 s
 Obscuration : 11 %
 Diâmetro a 10% : 68.57 μm
 Diâmetro a 50% : 178.11 μm
 Diâmetro a 90% : 272.90 μm
 Diâmetro médio : 175.54 μm
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60s/60s/4
 SOP name : Fraunhofer

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.11	0.15
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.20	0.25	0.31	0.37	0.43	0.49	0.61	0.73	0.85	0.96
q3	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.06	1.16	1.24	1.32	1.40	1.46	1.53	1.58	1.64	1.71
q3	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06	0.08	0.06	0.08	0.06
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	1.78	1.87	1.93	1.99	2.07	2.17	2.26	2.36	2.46	2.56
q3	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	2.65	2.85	3.03	3.20	3.36	3.50	3.64	3.77	3.89	4.00
q3	0.10	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.12
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	4.10	4.20	4.29	4.38	4.46	4.60	4.78	4.91	5.04	5.18
q3	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.12	0.13	0.15
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	5.34	5.52	5.71	6.04	6.28	6.97	7.42	7.89	8.55	9.05
q3	0.18	0.21	0.24	0.29	0.34	0.42	0.50	0.55	0.62	0.66
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	9.56	10.40	11.08	11.94	12.84	13.80	14.85	15.99	19.20	23.55
q3	0.71	0.74	0.80	0.86	0.96	1.08	1.25	1.43	1.83	2.56
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	25.48	29.75	34.59	39.82	45.35	51.05	56.90	62.59	69.00	74.75
q3	3.17	3.72	4.53	5.23	5.88	6.43	6.98	7.16	7.10	6.74
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	81.12	84.40	91.64	94.79	96.39	98.88	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	5.96	5.18	4.12	2.95	2.12	1.34	0.61	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



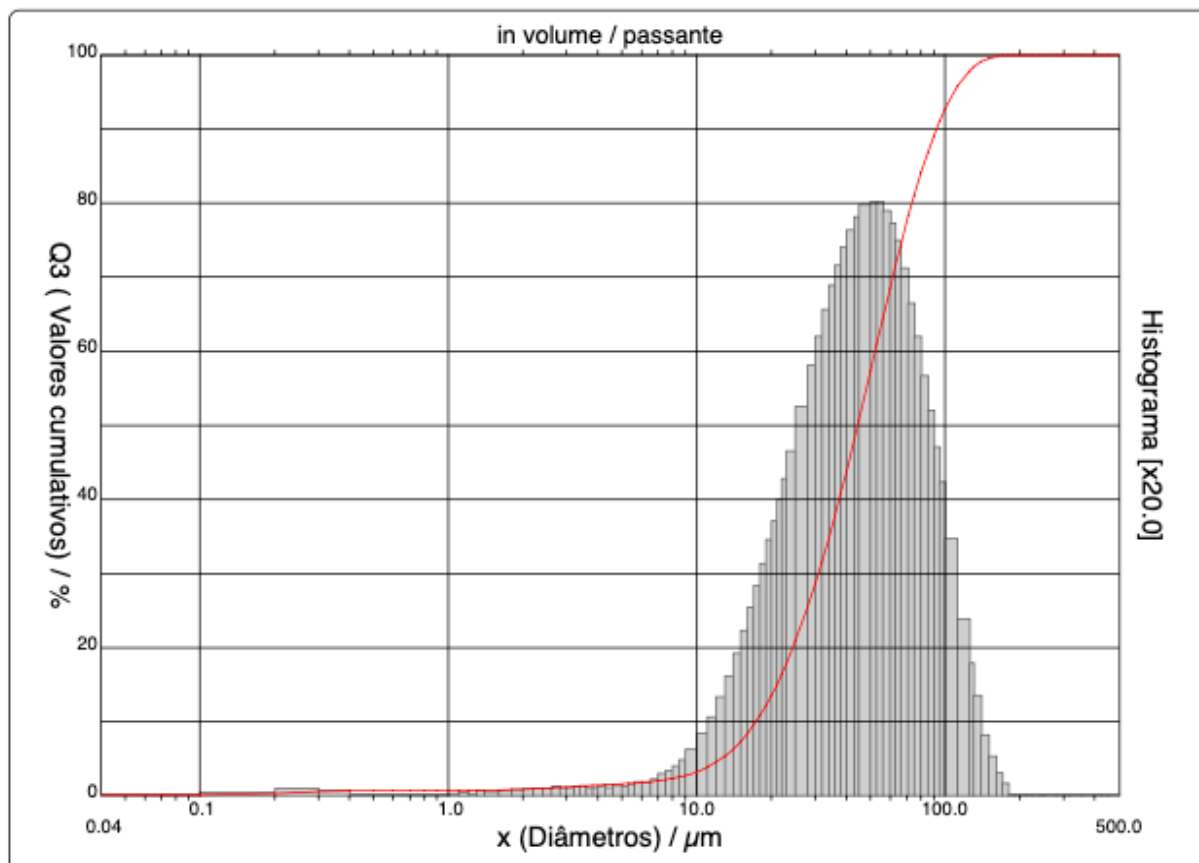
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1090 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra : Sample_X_
 Sample type : 1024-01-MA1-RR
 Sample type :
 Comentários :
 Líquido :
 Agente dispersante :
 Operador : JORGE
 Empresa : DEMAT - CEFET MG
 Localização : Belo Horizonte
 Data : 22/10/2024 Hora : 22:51:17
 Índice med. : 1293
 Database name : CilasDB1

Ultrassom : 60 s
 Obscuration : 15 %
 Diâmetro a 10% : 17.28 μm
 Diâmetro a 50% : 44.42 μm
 Diâmetro a 90% : 92.30 μm
 Diâmetro médio : 50.25 μm
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60s/60s/4
 SOP name : Fraunhofer





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1090 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample_X_	Ultrasom	: 60	s
Sample type	: 1024-01-MA1-RR	Obscuration	: 15	%
Sample type	:	Diâmetro a 10%	: 17.28	μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 44.42	μm
Líquido	:	Diâmetro a 90%	: 92.30	μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 50.25	μm
Operador	: JORGE	Fraunhofer		
Empresa	: DEMAT - CEFET MG	Densidade/Fator	-----	
Localização	: Belo Horizonte	Superfície específica	-----	
Data : 22/10/2024	Hora : 22:51:17	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 1293	Medida./Limp.	: 60s/60s/4	
Database name	: CilasDB1	SOP name	: Fraunhofer	

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.13	0.13	0.13	0.31	0.57	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
q3	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.71	0.71	0.72	0.74	0.75	0.78	0.82	0.87	0.93	0.99
q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.05	1.10	1.16	1.21	1.26	1.31	1.36	1.40	1.44	1.50
q3	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	1.55	1.63	1.68	1.74	1.83	1.94	2.06	2.21	2.37	2.55
q3	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.14	0.16	0.19
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	2.76	3.26	3.87	4.58	5.40	6.32	7.34	8.45	9.64	10.89
q3	0.24	0.31	0.41	0.53	0.66	0.80	0.95	1.11	1.26	1.41
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	12.20	13.57	14.97	16.41	17.88	20.88	25.48	28.58	31.68	34.76
q3	1.56	1.72	1.85	1.99	2.13	2.32	2.61	2.89	3.09	3.27
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	37.81	40.81	43.75	48.03	50.78	57.29	60.91	64.33	68.55	71.47
q3	3.44	3.57	3.69	3.81	3.90	3.98	4.00	4.00	3.94	3.85
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	74.17	78.20	81.02	84.12	86.78	89.08	91.05	92.73	95.77	97.79
q3	3.74	3.55	3.31	3.09	2.83	2.59	2.35	2.11	1.73	1.18
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	98.33	99.10	99.53	99.79	99.93	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.89	0.67	0.40	0.26	0.15	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



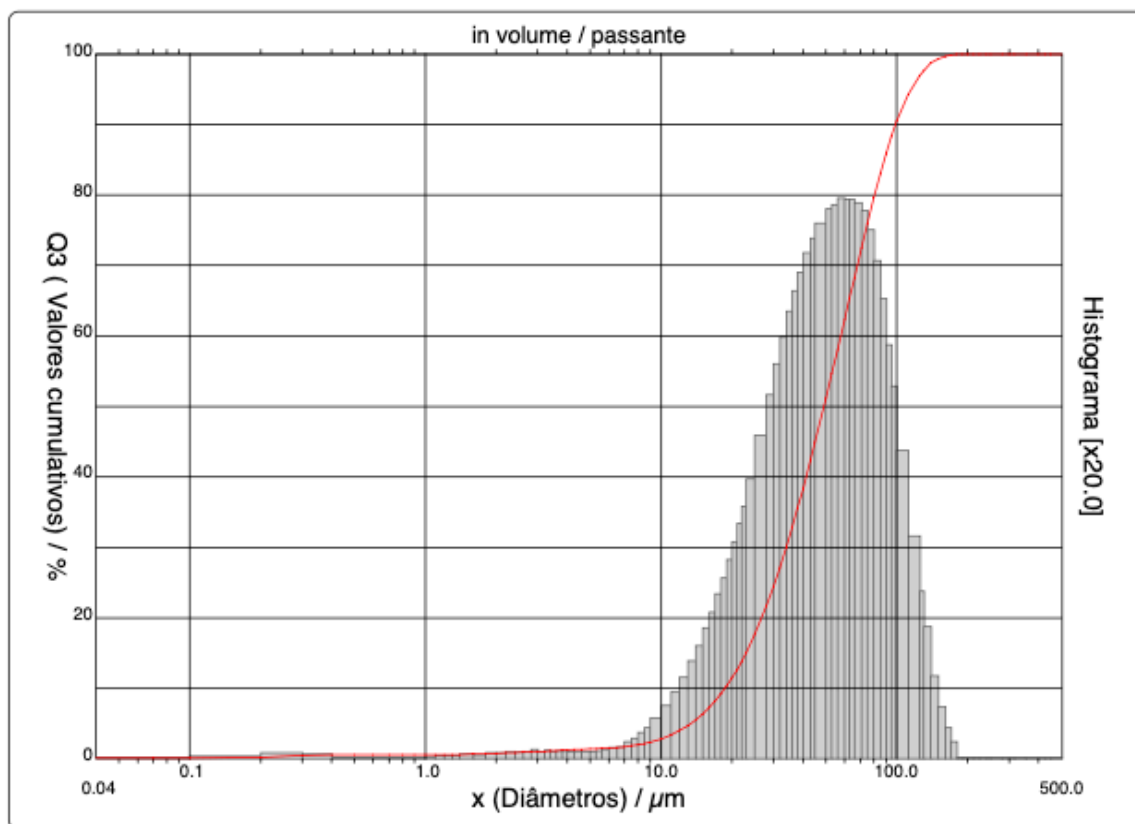
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1090 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra : Sample_X_
 Sample type : 1024-02-MA2-RR
 Sample type :
 Comentários :
 Líquido :
 Agente dispersante :
 Operador : JORGE
 Empresa : DEMAT - CEFET MG
 Localização : Belo Horizonte
 Data : 22/10/2024 Hora : 23:05:41
 Índice med. : 1294
 Database name : CilasDB1

Ultrassom : 60 s
 Obscuration : 14 %
 Diâmetro a 10% : 18.67 μm
 Diâmetro a 50% : 49.02 μm
 Diâmetro a 90% : 98.98 μm
 Diâmetro médio : 54.69 μm
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60s/60s/4
 SOP name : Fraunhofer





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1090 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra : Sample_X_
 Sample type : 1024-02-MA2-RR
 Sample type :
 Comentários :
 Líquido :
 Agente dispersante :
 Operador : JORGE
 Empresa : DEMAT - CEFET MG
 Localização : Belo Horizonte
 Data : 22/10/2024 Hora : 23:05:41
 Índice med. : 1294
 Database name : CilasDB1

Ultrassom : 60 s
 Obscuration : 14 %
 Diâmetro a 10% : 18.67 μm
 Diâmetro a 50% : 49.02 μm
 Diâmetro a 90% : 98.98 μm
 Diâmetro médio : 54.69 μm
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60s/60s/4
 SOP name : Fraunhofer

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.10	0.10	0.10	0.24	0.47	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.58	0.58	0.59	0.61	0.63	0.65	0.70	0.74	0.80	0.85
q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	0.91	0.96	1.01	1.07	1.11	1.16	1.20	1.24	1.28	1.33
q3	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	1.37	1.43	1.47	1.51	1.57	1.66	1.75	1.87	2.01	2.18
q3	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.11	0.14	0.18
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	2.37	2.83	3.38	4.01	4.72	5.51	6.36	7.28	8.25	9.28
q3	0.21	0.28	0.37	0.47	0.57	0.69	0.79	0.92	1.03	1.16
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	10.35	11.47	12.63	13.83	15.06	17.62	21.64	24.40	27.20	30.01
q3	1.27	1.41	1.53	1.66	1.78	1.98	2.28	2.58	2.79	2.99
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	32.82	35.60	38.34	42.36	44.96	51.16	54.68	58.03	62.28	65.28
q3	3.17	3.31	3.44	3.58	3.68	3.79	3.89	3.92	3.97	3.96
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	68.14	72.60	75.90	79.65	82.97	85.86	88.32	90.42	94.25	96.93
q3	3.96	3.93	3.88	3.74	3.53	3.26	2.93	2.64	2.18	1.57
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	97.65	98.72	99.34	99.70	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.18	0.93	0.58	0.36	0.21	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution