

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –**  
**Mestrado Profissional**

José Ricardo Baltazar

**INFLUÊNCIA DO MANUSEIO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO**  
**MINÉRIO DE FERRO NA CONFIABILIDADE OPERACIONAL DAS**  
**PLANTAS DE BENEFICIAMENTO**

Belo Horizonte

2024

José Ricardo Baltazar

**INFLUÊNCIA DO MANUSEIO E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO  
MINÉRIO DE FERRO NA CONFIABILIDADE OPERACIONAL DAS PLANTAS DE  
BENEFICIAMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como parte do requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro.

Belo Horizonte

2024

B197i

Baltazar, José Ricardo.

Influência do manuseio e caracterização mineralógica do minério de ferro na confiabilidade operacional das plantas de beneficiamento mineral [recurso eletrônico] / José Ricardo Baltazar. – 2024.  
1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Luiz Cláudio Monteiro Montenegro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de minas – Teses. 2. Tecnologia mineral – Teses.  
3. Usinas siderúrgicas – Teses. 4. Determinação mineralógica – Teses.  
5. Beneficiamento de minério – Teses. 6. Minério de ferro – Teses.  
I. Montenegro, Luiz Cláudio Monteiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



## **ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO** **JOSÉ RICARDO BALTAZAR**


Realizou-se, no dia 18 de abril de 2024, às 8:00 horas, demin, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada Influência do manuseio e caracterização mineralógica do minério de ferro na confiabilidade operacional das plantas de beneficiamento, apresentada por JOSÉ RICARDO BALTAZAR, número de registro 2021661258, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro – Orientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Roberto Galery (UFMG), Prof(a). George Eduardo Sales Valadão (UFMG) e Prof(a). Leonardo Junior Fernandes Campos (UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:


Aprovada

Reprovada


Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão. Belo Horizonte, 18 de abril de 2024.

Documento assinado digitalmente  
 **LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO**  
Data: 20/04/2024 21:40:58-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Prof(a). Luiz Claudio Monteiro Montenegro ( Doutor )

Documento assinado digitalmente  
 **ROBERTO GALERY**  
Data: 19/04/2024 16:04:44-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). Roberto Galery ( Doutor )

Documento assinado digitalmente  
 **GEORGE EDUARDO SALES VALADAO**  
Data: 20/04/2024 12:13:43-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). George Eduardo Sales Valadão ( Doutor )

Documento assinado digitalmente  
 **LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS**  
Data: 19/04/2024 16:19:59-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). Leonardo Junior Fernandes Campos ( Doutor )

A minha esposa Cintia e meus filhos Ricardo e Victor, pelo amor e apoio incondicional, à minha mãe Lourdes por ser minha referência de resiliência frente aos desafios da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Luiz Claudio Monteiro Montenegro, pela paciência, pela orientação objetiva e pelo tempo dedicado ao acompanhamento deste trabalho.

Aos engenheiros e amigos Frederico Quintano Goes e Cleiton Adriani de Souza, agradeço pelo suporte e pela valiosa contribuição técnica durante as análises e o desenvolvimento dos estudos.

Aos amigos Carlos Eduardo Sobral e José Cléber Rodrigues da Silva, registro meu reconhecimento pelo incentivo e apoio na decisão de ingressar no mestrado em mineração.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta dissertação.

## RESUMO

Estudos de confiabilidade operacional desenvolvidos para usinas de beneficiamento mineral identificaram diversos contribuintes para perdas de produção ao longo dos últimos anos. Em geral os principais fatores estão correlacionados com a características mineralógicas, propriedade de fluxo, tipo de beneficiamento, design de equipamentos e condições de operação. Importante ressaltar que os corpos minerários são diferentes nas diversas regiões do Brasil, assim como no restante do mundo, referente a granulometria, umidade, composição química e estrutura cristalina, fazendo com que a definição de critérios e padrões operacionais com alta assertividade sejam extremamente complexos. Da mesma forma, as usinas de beneficiamento são customizadas conforme as características do corpo mineral existente. As usinas observadas para o estudo de confiabilidade operacional são compostas pelas etapas de cominuição, classificação, filtragem, estocagem e expedição, e os problemas relacionados a perdas de produção estão presentes em todas as etapas, todavia com variações de intensidade ao longo do ano e também no avançar da lavra na mina. A fim de avaliar os contribuintes que impactam o processo de beneficiamento foram realizados diversos ensaios quanto a caracterização mineralógica, análise química, análise granulométrica, propriedade de fluxo e outros, com foco nas amostras de minério das Usinas B (MFUN) e A (MFB7030) para compreender as causas dos impactos nas perdas operacionais devido à dificuldade de fluidez do material. As análises revelam que as amostras da Usina B são predominantemente compostas por óxidos de ferro e gibbsita, enquanto as da Usina A apresentam principalmente óxidos de ferro. As diferenças na composição mineralógica refletem-se em comportamentos fluidodinâmicos distintos, com o MFUN demonstrando maior coesividade e necessidade de ângulos de chute superiores para fluidez em comparação com o MFB7030. Essas diferenças são explicadas pela rota de processamento, onde a Usina B utiliza processos via umidade natural, resultando em maior presença de frações finas de minerais terrosos, enquanto a Usina A emprega processos a úmido, removendo essas frações. Isso afeta a fluidez do material, influenciando a classificação em peneiramento e a performance dos britadores. Além disso, a presença de materiais coesivos pode levar a obstruções das várias etapas da cadeia. Assim, uma caracterização mineralógica adequada é essencial para definir as rotas de processos e condições operacionais. Considerando os resultados, identificou-se que aproximadamente 10% dos pontos de transição nas usinas são críticos e requerem estudos adicionais para minimizar gargalos. Através dos resultados é possível obter insumos para determinar de forma técnica informações importantes referentes a processos de beneficiamento e performance de ativos, sendo: aberturas de saída de silos e chutes do circuito de produtos, ocupações volumétricas, revestimento para otimização de fluidez de material, ângulos de chutes de repouso e de descarga, dimensionamento de morto, ocupação de correias, dimensionamento de capacidade de equipamentos, etc. Em suma, este estudo destaca a importância da interação entre propriedades de fluxo e caracterização mineralógica para otimizar a operação das usinas de beneficiamento.

Palavras-chave: caracterização mineralógica; minério de ferro; manuseio; beneficiamento mineral.

## ABSTRACT

Operational reliability studies developed for mineral processing plants have identified several contributors to production losses over the past years. Generally, the main factors are correlated with mineralogical characteristics, flow properties, beneficiation type, equipment design, and operational conditions. It is important to note that ore bodies vary across different regions of Brazil, as well as globally, in terms of particle size, moisture, chemical composition, and crystal structure, making the definition of operational criteria and standards highly complex. Likewise, beneficiation plants are customized according to the characteristics of the existing mineral deposit. The plants observed for the operational reliability study consist of comminution, classification, filtration, storage, and dispatch stages, with production loss-related issues present in all stages, although with varying intensities throughout the year and as mining progresses. In order to assess the contributors impacting the beneficiation process, various tests were conducted, including mineralogical characterization, chemical analysis, particle size analysis, flow property tests, among others, focusing on ore samples from Plants B (MFUN) and A (MFB7030) to understand the causes of operational losses due to material flow difficulty. The analyses reveal that samples from Plant B are predominantly composed of iron oxides and gibbsite, while those from Plant A mainly contain iron oxides. Differences in mineralogical composition are reflected in distinct fluid dynamic behaviors, with MFUN demonstrating greater cohesion and the need for higher chute angles for flow compared to MFB7030. These differences are explained by the processing route, where Plant B natural moisture processes, resulting in a higher presence of fine fractions of clay minerals, while Plant A employs wet processes, removing these fractions. This affects material flow, influencing screening classification and crusher performance. Additionally, the presence of cohesive materials can lead to obstructions at various stages of the production chain. Therefore, adequate mineralogical characterization is essential to define process routes and operational conditions. Considering the results, it was identified that approximately 10% of transition points between plants are critical and require further studies to minimize operational bottlenecks. Through the results, it is possible to obtain technical inputs to determine important information regarding beneficiation processes and asset performance, such as silo and chute outlet openings, volumetric occupancy (belts, chutes, silos, screens, and crushers), lining for material flow optimization, resting and discharge chute angles (chutes, silos, and yards), dead space sizing, belt occupancy, equipment capacity sizing, etc. In summary, this study highlights the importance of the interaction between flow properties and mineralogical characterization to optimize the operation of beneficiation plants.

Keywords: mineralogical characterization; iron ore; handling; mineral beneficiation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Minério de Ferro .....	19
Figura 2: Mapa Depósitos de Minério de Ferro .....	20
Figura 3: Complexo Minerário de Carajás .....	21
Figura 4: Yandi Mine BHP.....	22
Figura 5: Exportação Minério de Ferro Brasil.....	25
Figura 6: Mina Serra Norte – Mapa Geológico de .....	26
Figura 7: Fluxograma Usina Serra Norte .....	27
Figura 8: Mina Serra Sul .....	28
Figura 9: Hematita Mineral .....	32
Figura 10: Magnetita Mineral.....	34
Figura 11: Goethita Mineral .....	35
Figura 12: Caulinita .....	36
Figura 13: Gibbsita .....	37
Figura 14: Amostra Jaspilito.....	39
Figura 15: Canga Minério de Ferro .....	42
Figura 16: Diagrama típico de tratamento de minério.....	50
Figura 17: Fragmentação e desmonte Minério de Ferro.....	52
Figura 18: Chute de transferência para minério de ferro.....	55
Figura 19: Britagem Semi Móvel.....	56
Figura 20: Peneiras – Sistema de Classificação .....	58
Figura 21: Pátio de Estocagem de Minério de Ferro.....	65
Figura 22: Sistema de Gestão ISO 55000.....	67
Figura 23: Gráfico de Pareto .....	72
Figura 24: Ferramenta Matriz de Entrada.....	73
Figura 25: Diagrama Espinha de Peixe .....	74
Figura 26: Ferramenta Matriz de Classificação.....	74
Figura 27: Ferramenta Gráfico de Dispersão .....	75
Figura 28: Árvore de Falhas .....	76
Figura 29: Pluviometria cidade Parauapebas .....	79
Figura 30: Chute de Transferência .....	84
Figura 31: Exemplo de amostras geradas para testes de propriedades de fluxo.....	88

Figura 32: Exemplo de amostras geradas para testes de propriedades de fluxo.....	88
Figura 33: Fluxograma para preparação das amostras para análise granulo química e mineralógica. ....	89
Figura 34: Circuito de amostragem para análise granulo química .....	90
Figura 35: Fluxograma para análise granulométrica. ....	91
Figura 36: Direct Shear Tester.....	91
Figura 37: Esquema mostrando trajetória da partícula em relação a velocidade inicial e final e ângulo da parede do chute. ....	93
Figura 38: Representação gráfica de uma pilha e seus respectivos ângulos de repouso e de descarga. ....	94
Figura 39: Análise de lacunas do orçamento.....	95
Figura 40: Segregação das lacunas e análise das causas .....	96
Figura 41: Árvore de Falhas Corretivas – Usina A 2022 .....	96
Figura 42: Árvore de Falhas Corretivas – Usina B 2022 .....	97
Figura 43: Árvore de Falhas Corretivas – Usina A 2023 .....	97
Figura 44: Árvore de Falhas Corretivas – Usina B 2023 .....	98
Figura 45: Análise da Causa Raiz .....	98
Figura 46: Representação gráfica do ângulo de descarga, coesividade e umidade .....	102
Figura 47: Exemplos de variação de densidade aparente, na mesma amostra, pela alteração de parâmetros como teor de umidade e grau de compactação. Exemplo de MFB7030 testado. ....	106
Figura 48: Exemplos de variação de densidade aparente, na mesma amostra, pela alteração de parâmetros como teor de umidade e grau de compactação. Exemplo de MFUN testado. ....	107
Figura 49: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina A / 2022 .....	111
Figura 50: Análise dos ofensores Usina A - 2022 .....	112
Figura 51: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina A / 2022.....	112
Figura 52: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina B / 2022 .....	113
Figura 53: Análise dos ofensores Usina B - 2022 .....	113
Figura 54: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina B / 2022 .....	114
Figura 55: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina A / 2023 .....	115
Figura 56: Análise dos ofensores Usina A - 2023 .....	116

Figura 57: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina A / 2023.....	116
Figura 58: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina B / 2023 .....	117
Figura 59: Análise dos ofensores Usina B - 2023 .....	117
Figura 60: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina B / 2023 .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantificação mineralógica (%) simplificada .....	100
Tabela 2: Quantificação mineralógica (%) completa, .....	101
Tabela 3: Análise química (%) das amostras testadas, .....	101
Tabela 4: Resultados das análises dos tamanhos de partículas do MFB7030 e do MFUN....	101
Tabela 5: Resumo dos requisitos de dimensão crítica da saída por um silo/chute para Fator P igual a 1,0 .....	103
Tabela 6: Resumo dos resultados dos testes de densidade aparente.....	104
Tabela 7: Resumo dos resultados dos testes de compressibilidade e densidade da partícula	105
Tabela 8: Teste de compressibilidade e grau de compactação / Usinas A e B / 6,3mm .....	106
Tabela 9: Resumo dos ângulos máximos de parede calculados para fluxo máximo (graus de vertical).....	108
Tabela 10: Resumo dos resultados dos testes de chute. ....	109
Tabela 11: Resumo dos resultados do ângulo de acomodação na correia [graus da horizontal] .....	110
Tabela 12: Resultados dos ângulos de repouso e descarga [graus da horizontal] .....	110

## LISTA DE NOTAÇÕES

AC	Ângulo de acomodação na correia
AD	Ângulo de descarga
ANM	Agência Nacional de Mineração
AR	Ângulo de repouso
BIFs	<i>Band Iron Formations</i> – Formações Ferríferas Bandadas
CEFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CMA	Centro de Monitoramento de Ativos
C <sub>p</sub>	Índice de capacidade potencial do processo
C <sub>pk</sub>	Índice de capacidade real do processo
C <sub>pm</sub>	Índice de capacidade com foco na média-alvo
Dana et al.	Autores referência em mineralogia aplicada (utilizados em várias seções)
FA	Frequência de falha de ativos
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> – Análise de Modos de Falha e Efeitos
GCV	Gestão da Cadeia de Valor
GDC	Grau de compactação
GP	Gestão de Produção
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IC	Intervalo de Confiança
LSL	<i>Lower Specification Limit</i> – Limite inferior de especificação
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Minério de Ferro
MFB7030	Minério de Ferro Blendado com 70% Umidade Natural e 30% Úmido
MFUN	Minério de Ferro com Umidade Natural
Q <sub>v</sub>	Quociente de vazão
RC	Resistência coesiva <i>Reliability-Centered Maintenance</i> – Manutenção Centrada na
RCM	Confiabilidade
ROM	<i>Run-Of-Mine</i> – Minério bruto proveniente da mina
$\sigma$	Desvio padrão
$\bar{x}$	Média amostral
$\eta$	Eficiência operacional (ou rendimento)
TR	Tempo de repouso
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USL	<i>Upper Specification Limit</i> – Limite superior de especificação

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1. Objetivo geral .....	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
3.1. Minério de ferro.....	19
3.1.1. A importância do minério de ferro para o Brasil.....	23
3.1.2. Depósito mineral de Carajás .....	25
3.1.3. Quadrilátero Ferrífero.....	28
3.1.4. Aplicações do minério de Ferro.....	28
3.1.5. Estrutura cristalina.....	29
3.1.6. Propriedades físicas .....	31
3.1.7. Hematita .....	31
3.1.8. Magnetita.....	33
3.1.9. Goethita .....	34
3.1.10. Caulinita .....	36
3.1.11. Gibbsita.....	37
3.1.12. Jaspilite.....	38
3.1.13. Itabirite .....	40
3.1.14. Canga.....	42
3.2. Geometalurgia e caracterização mineralógica .....	44
3.2.1. Geometalurgia .....	44
3.2.2. Caracterização mineralógica e tecnológica .....	45
3.2.3. Umidade .....	47
3.2.4. Granulometria.....	48
3.3. Processo de beneficiamento.....	50

3.3.1. Desmonte e fragmentação .....	52
3.3.2. Manuseio minério de ferro .....	53
3.3.3. Britagem .....	55
3.3.4. Peneiramento .....	57
3.3.5. Moagem .....	59
3.3.6. Classificação .....	61
3.3.7. Flotação e concentração magnética .....	62
3.3.8. Estocagem e expedição.....	64
3.4. Confiabilidade de ativos .....	67
3.4.1. Confiabilidade na indústria.....	67
3.4.2. Confiabilidade na mineração .....	68
3.4.3. Análise de capacidade de processo.....	70
3.4.4. Análise da causa e modos de falha .....	72
3.5. Condições de operação e processo .....	77
3.5.1. Variações climáticas .....	77
3.5.2. Chuva.....	78
3.5.3. Umidade relativa.....	80
3.5.4. Quociente de vazão.....	81
3.5.5. Tempo de repouso .....	82
3.5.6. Propriedades de fluxo .....	83
3.5.7. Coesão .....	85
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>87</b>
4.1. Caracterização e propriedade de fluxo .....	87
4.1.1. Amostragem .....	87
4.1.2. Umidade .....	88
4.1.3. Caracterização mineralógica.....	89
4.1.4. Testes – Análise de tamanho de partícula .....	90

4.1.5. Teste – Resistência coesiva .....	91
4.1.6. Compressibilidade .....	91
4.1.7. Atrito com a parede .....	92
4.1.8. Teste ângulo de chute .....	92
4.1.9. Ângulo de acomodação na correia.....	93
4.1.10. Ângulo de repouso e de descarga .....	94
4.2. Análise da confiabilidade e árvore de falhas .....	94
4.2.1. Coleta de dados macro e visão geral .....	94
4.2.2. Coleta de dados e detalhamento das árvores de falhas .....	96
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>100</b>
5.1. Caracterização e propriedade de fluxo .....	100
5.1.1. Análise de caracterização mineralógica .....	100
5.1.2. Análise de tamanho de partícula.....	101
5.1.3. Testes de resistência coesiva .....	102
5.1.4. Teste de compressibilidade.....	104
5.1.5. Densidade e grau de compactação .....	105
5.1.6. Teste de atrito com parede (Ângulos de tremonha de fluxo mássico).....	107
5.1.7. Ângulos de chutes.....	108
5.1.8. Ângulo de acomodação na correia.....	109
5.1.9. Ângulo de repouso e descarga do material.....	110
5.2. Análise Performance Usina .....	111
5.2.1. Análise usinas 2022 .....	111
5.2.2. Análise usinas 2023 .....	115
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>123</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No contexto mundial, segundo a United State Geological Survey (USGS, 2023) os maiores produtores de minério de ferro no mundo em 2022 foram Austrália com 880Mt/a, Brasil com 410Mt/a, China com 380Mt/a e Índia com 290Mt/a. Juntos os quatro países representam aproximadamente 75% da produção anual de minério de ferro, que em 2022 foi de aproximadamente 2.600Mt/a.

Além da sua larga representatividade na indústria na transformação, visto que o minério de ferro é um dos principais componentes para fabricação de aço. O minério de ferro também possui uma representatividade expressiva no cenário econômico do Brasil e no mundo. Conforme os dados acima é possível observar que o processo de exploração e beneficiamento do minério está concentrado em quatro países.

No Brasil, de acordo com os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Mineração referente ao segundo relatório trimestral de Informe Mineral (ANM, 2022), o minério de ferro foi responsável por 77,6% das receitas da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), seguidos por outras substâncias minerais como: ouro, cobre, calcário, alumínio e outros. Os estados com maior arrecadação da CFEM foram Minas Gerais com 47% e Pará com 39,1%, totalizando 86,1% visto serem estados que concentram altos volumes de produção de minério de ferro. Por sua vez, as cidades com maior representatividade de receitas foram Parauapebas com 18,1% e Canaã do Carajás com 14,3%, sendo ambas localizadas no estado Pará.

Considerando o contexto acima é possível observar que o minério de ferro possui uma relevância significativa para o Brasil (ANM, 2022), visto seu volume expressivo de produção e também referente ao processo de concorrência com os demais países já citados. Dentro desse cenário, temas como vida útil das reservas, licenciamentos, restrições operacionais e performance das usinas de beneficiamento tem sido destaque constante nos relatórios de divulgação de resultados de grandes empresas, como Vale, Anglo American, CSN Mineração e outros.

Em busca de melhores resultados, os grandes produtores de minério de ferro têm investido no mapeamento de novas reservas visando compensar operações de menor teor, todavia devido

aos altos custos para implantação e operação de um novo projeto, muitas dessas empresas tem utilizado de outros métodos com foco em otimização do processo de beneficiamento e melhoria da performance das usinas, como alternativa para geração de melhor valor no processo produtivo. (BRASIL MINERAL, 2022)

O desafio na aplicação desses métodos se encontra relacionados a caracterização mineralógica *versus* as restrições das usinas existentes, uma vez que boa parte dessas usinas foram construídas considerando um cenário de corpo mineral e com o avanço do processo de lavra, boa parte das características foram sendo alteradas. A caracterização mineralógica fornece informações potenciais para definição das melhores rotas de processamento mineral. (NEUMANN, 1977 *apud*, BARBOSA et al, 2010).

As usinas de beneficiamento de minério de ferro são complexas principalmente devido ao porte dos equipamentos. A taxa horária de produção de usinas de grande porte varia de 5.000t/h à 20.000t/h, como os casos das usinas em operação na empresa Vale na região de Carajás (VALE, 2022). A performance operacional de uma usina de beneficiamento de minério de ferro é influenciada por fatores, tais como de propriedades de fluxo, tipo de beneficiamento, design de equipamentos e condições de operação.

O presente trabalho aborda os estudos referente a influência do manuseio e características mineralógicas do minério de ferro no processo de confiabilidade operacional das usinas de beneficiamento, visto a necessidade de maior geração de valor nas usinas. Fatores como umidade, sazonalidade, granulometria, tipos de equipamentos, porte, capacidade, layout e outros necessitam estar em equilíbrio para um processo com resultado positivo e sustentável.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho das usinas de beneficiamento considerando as variáveis de processo, as características mineralógicas do minério e comparar com as falhas operacionais que impactam de forma recorrente o processo produtivo.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar os fatores relacionados a propriedades de fluxo que influenciam na fluidez dos materiais sólidos.
- Avaliar condições de operação como temperatura, chuva, umidade relativa, quociente de vazão e outros que impactam no processo de beneficiamento.
- Correlacionar as variações do minério de ferro e características mineralógicas com as falhas operacionais das fases macro do processo de beneficiamento, sendo: cominuição, classificação, pátio de estocagem e expedição.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada, inicialmente, uma breve revisão sobre o minério de ferro, sua aplicação, composição e principais características. Na sequência será apresentado um breve resumo das principais etapas do processo de beneficiamento mineral. Posteriormente uma revisão sobre os detalhes referente ao design dos equipamentos e por fim as correlações das principais falhas operacionais.

#### 3.1. Minério de ferro

O minério de ferro, ver Figura 1, é um dos elementos mais abundantes na Terra, representando cerca de 30% da composição geoquímica. No entanto, apenas cerca de 4% da crosta superior consiste em ferro (TAYLOR & MCLENNAN, 1985). Essa diferença entre a composição da crosta superior e a composição total da Terra pode ser explicada pela presença de um núcleo rico em ferro e níquel no interior da Terra.

Figura 1: Minério de Ferro

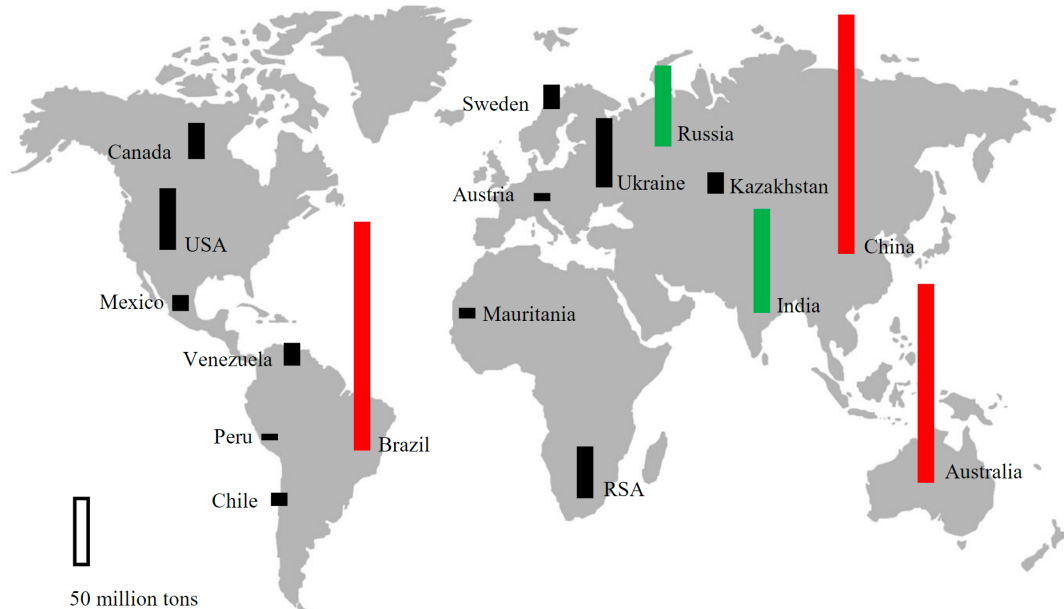


Fonte: Globo *apud* Equipe Brasil Mining (BM) 2019.

O minério de ferro é um recurso mineral abundante e amplamente distribuído pelo globo terrestre como já citado acima. O minério de ferro é de extrema importância para o mundo atual. É a principal matéria-prima na produção de aço, um dos materiais mais utilizados em diversas áreas da sociedade moderna.

Conforme demonstrado na Figura 2, o minério de ferro possui reservas significativas em diferentes países do mundo. Segundo o relatório da United States Geological Survey (USGS, 2019) *apud* (TRUSHKO, 2021), as maiores reservas de minério de ferro estão localizadas em países como Austrália, Rússia, Brasil, China e Índia. Essas reservas estão representadas pelas barras verdes e vermelhas na Figura 2 abaixo e representam bilhões de toneladas de minério de ferro para extração e suprimento da indústria global. Também existem reservas em países como Estado Unidos da América, Canadá, Ucrânia, África do Sul e outros, representados pela barra preta.

Figura 2: Mapa Depósitos de Minério de Ferro



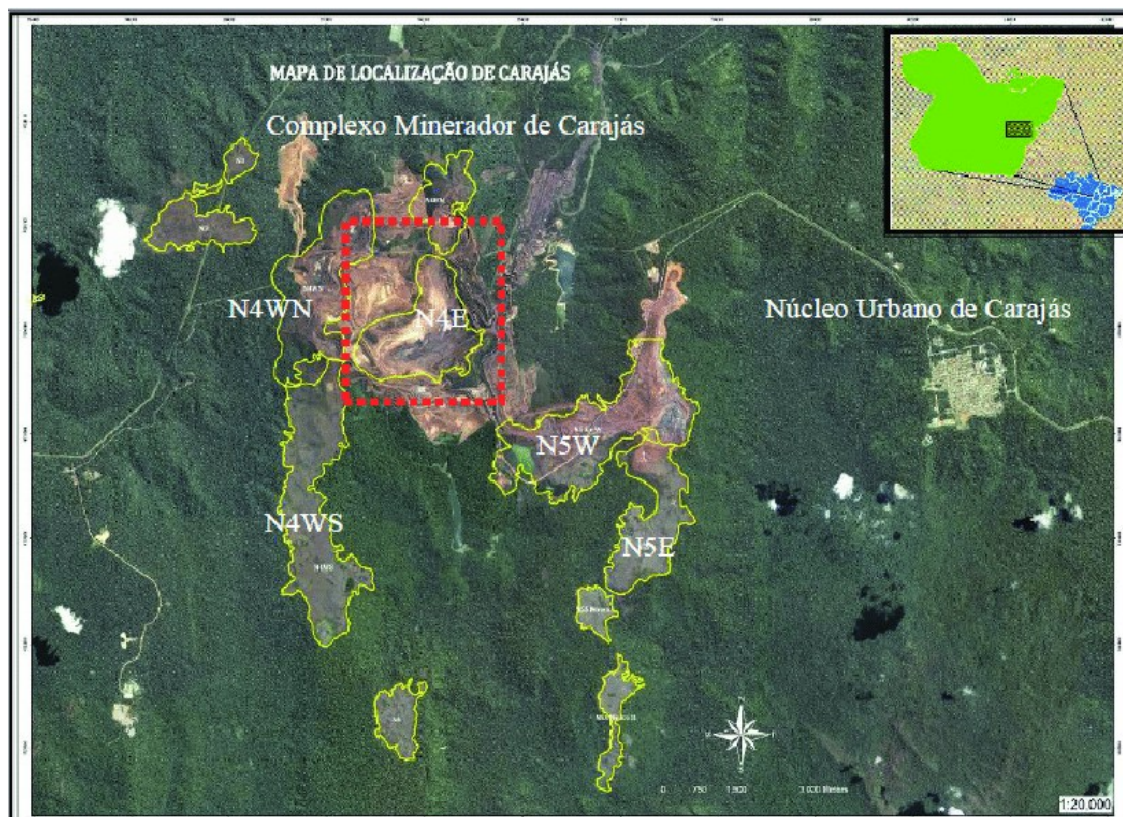
Fonte: USGS, (2019) *apud* Trushko, (2021)

As maiores minas de minério de ferro no mundo variam ao longo do tempo, pois novas descobertas são feitas periodicamente e a produção pode mudar. No entanto, algumas das maiores minas de minério de ferro e o tamanho aproximado de suas reservas são:

Mina de Carajás, localizada no estado do Pará – Brasil com uma das maiores minas de minério de ferro do mundo, ver

Figura 3. É operada pela empresa Vale e possui reservas estimadas em cerca de 7,2 bilhões de toneladas (VALE, 2021).

Figura 3: Complexo Minerário de Carajás



Fonte: Sá, Figueiredo e Magalhães (2013)

Mina de Hamersley, localizada na região de Pilbara, na Austrália Ocidental, o complexo minerário é composto por várias minas de minério de ferro operadas por empresas como Rio Tinto, BHP Billiton e Fortescue Metals Group, com reservas totais estimadas em mais de 30 bilhões de toneladas (RIO TINTO, 2021).

Mina de Minas-Rio, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil, com reservas estimadas em cerca de 8,3 bilhões de toneladas e é operada pela empresa Anglo American (ANGLO AMERICAN, 2020).

Mina de Yandi (Austrália), ver Figura 4, está localizada na região de Pilbara, Austrália Ocidental, a Mina de Yandi é operada pela Rio Tinto e tem reservas estimadas em cerca de 3,3 bilhões de toneladas (RIO TINTO, 2021).

Figura 4: Yandi Mine BHP



Fonte: Jamasmie (2014)

Mina de Shougang (China): Localizada em Qian'an, província de Hebei, na China, a Mina de Shougang é uma das maiores minas de minério de ferro do país, com reservas estimadas em cerca de 3,2 bilhões de toneladas (CHINA DAILY, 2019).

O Brasil possui a quinta maior reserva de minério de ferro do mundo. É um dos maiores países hegemônicos como China e Austrália. As duas maiores regiões produtoras do país estão localizadas no Quadrilátero Ferrífero (MG) e na Província de Minas de Carajás (PA). A parte norte do depósito de Carajás é considerada um dos maiores depósitos de minério de ferro da Terra, com o grupo de depósitos Serra Sul denominado Corpo S11D respondendo pelo maior percentual de depósitos explorados (CABRAL, 2016 *apud* NASCIMENTO et al., 2022).

O Quadrilátero Ferrífero é sustentado por um embasamento de terrenos graníticos gnáissicos e pelo cinturão *greenstone belt* Rio das Velhas. Esses terrenos graníticos gnáissicos, incluem gnaisses polideformados, migmatitos, anfíbolitos e metaultramafitos, e foram submetidos a metamorfismo nas fácies anfíbolito a granulito. O cinturão Rio das Velhas é dividido nos Grupos Nova Lima e Maquiné. Acima dessas unidades, encontram-se as rochas metassedimentares proterozoicas do Supergrupo Minas, que contornam o Quadrilátero Ferrífero

e foram depositadas discordantemente sobre o Supergrupo Rio das Velhas e os terrenos graníticos gnáissicos. O Supergrupo Minas é subdividido em três grupos principais: Grupo Caraça com a Formação Moeda (metaconglomerados e quartzitos) e a Formação Batatal (xistos e filitos), Grupo Itabira predominantemente químico, com a Formação Cauê (itabiritos) e a Formação Gandarela (carbonatos e filitos) e Grupo Piracicaba com rochas clásticas e químicas. O Grupo Sabará, formado por rochas sedimentares e vulcanogênicas, corresponde à bacia de antepaís associada ao Evento Transamazônico. (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Na literatura (COSTA, 2006; SOBRINHO, 2012 *apud* NASCIMENTO et al., 2022), o minério de ferro é classificado como hematita friável ou compacta. SOBRINHO (2012) propaga que essa distinção é baseada na fragilidade do material. Por outro lado, a goethita pode ter ocorrido nessas seções em proporções bem menores que os demais constituintes, próximo ao contato com jasperita alterada (COSTA, 2006 *apud* NASCIMENTO et al 2022).

Por ser a hematita um dos minerais mais comuns na região de Carajás, ela é extraída em grandes quantidades e é classificada de acordo com cinco classes microestruturais pré-definidas (granular, lamelar, lobular, martita e microcristalina). Atualmente, várias técnicas foram desenvolvidas para análise mais rápida desse minério, técnicas de caracterização de minério de ferro foram desenvolvidas por meio de análise de imagem digital, oferecendo maior velocidade, reprodutibilidade e confiabilidade (DIAS et al., 2021 *apud* NASCIMENTO et al 2022).

### **3.1.1. A importância do minério de ferro para o Brasil**

O minério de ferro desempenha um papel crucial na economia brasileira, sendo uma das principais commodities minerais produzidas e exportadas pelo país (IBRAM, 2023). Sua relevância decorre dos recursos naturais abundantes, da contribuição para a economia, da alavancagem do setor siderúrgico, das exportações e do impacto na balança comercial.

O Brasil detém extensas reservas de minério de ferro, destacando-se a região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais como uma fonte estratégica de matéria-prima para a indústria siderúrgica nacional e global (IBRAM, 2023).

A produção e exportação desse minério exercem um impacto significativo na economia brasileira, gerando empregos diretos e indiretos, promovendo o desenvolvimento de

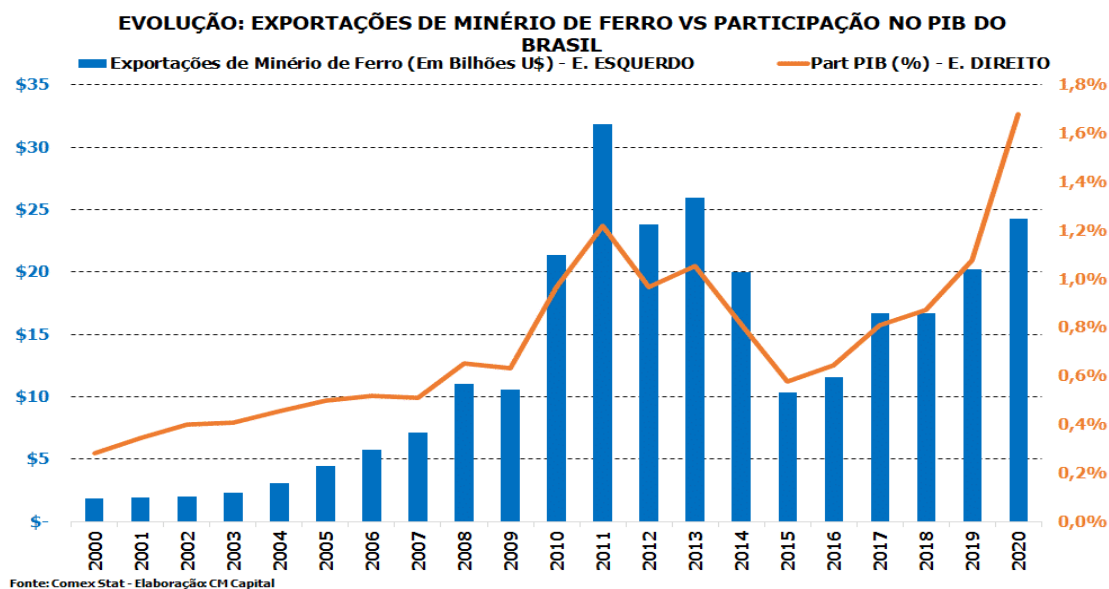
infraestrutura e contribuindo para a arrecadação de impostos e royalties (IBRAM, 2023). O setor mineral, que abrange a extração e o beneficiamento do minério de ferro, desempenha um papel crucial nesse cenário.

O minério de ferro é a matéria-prima essencial para a produção de aço, sendo a indústria siderúrgica brasileira uma das maiores do mundo e dependente do abastecimento desse minério para suas operações (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023). Empresas siderúrgicas de grande porte no Brasil consomem quantidades significativas desse recurso.

A indústria do aço desempenha um papel vital na construção civil, na fabricação de veículos, em estruturas industriais, na produção de energia e em diversos outros setores. Adicionalmente, o minério de ferro contribui para o desenvolvimento econômico e para o comércio internacional, impulsionando as indústrias e fomentando o crescimento econômico dos países produtores.

O Brasil destaca-se como um dos principais exportadores mundiais de minério de ferro, sendo que a demanda global, especialmente da China, impulsiona essas exportações. Tais transações contribuem para a balança comercial do país, gerando receitas significativas e ajudando a equilibrar a conta externa (IBRAM, 2023). A Figura 5 apresenta a evolução das exportações do minério de ferro ao longo dos últimos 20 anos.

Figura 5: Exportação Minério de Ferro Brasil



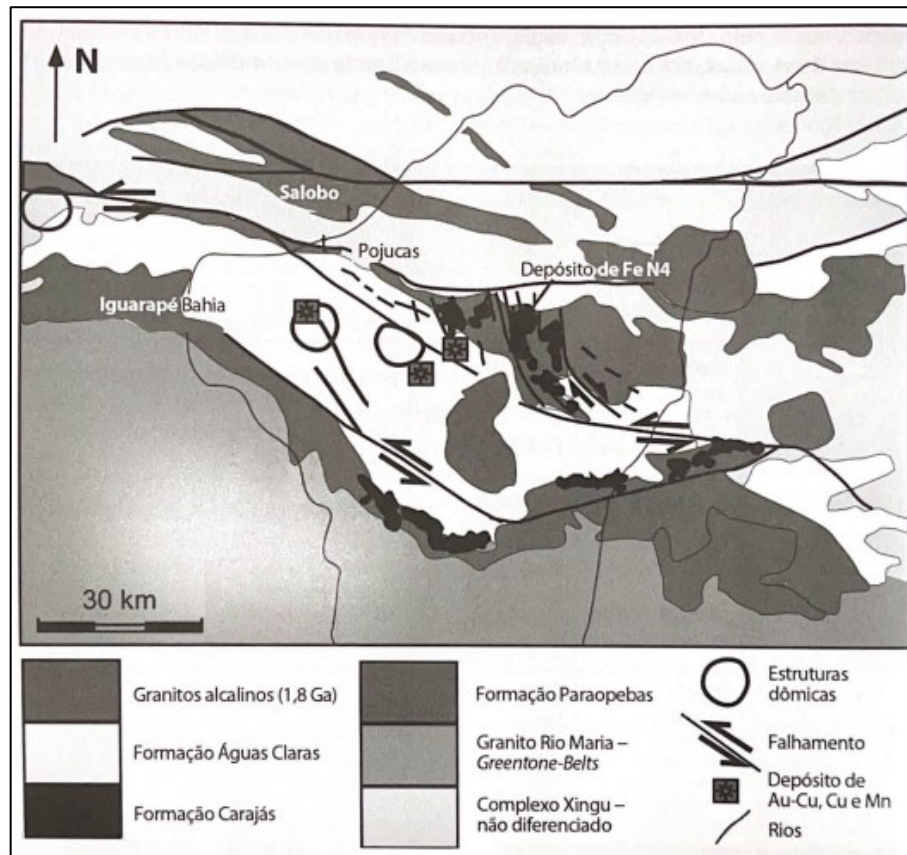
Fonte: Melo (2021)

### 3.1.2. Depósito minerário de Carajás

O depósito mineral de Carajás, situado no estado do Pará, Brasil, destaca-se como uma das maiores e mais relevantes províncias minerais globais, cuja formação está associada a processos geológicos complexos ao longo de milhões de anos (ALKMIM & MARSHAK, 1998).

A região de Carajás, ver Figura 6, é predominantemente composta por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, cuja formação teve início aproximadamente há 2,7 bilhões de anos, durante o período Proterozoico. Durante essa fase, atividades vulcânicas e magmáticas resultaram na formação de grandes corpos de rochas ígneas, como granitos e dioritos presentes na região. Subsequentemente, processos de intemperismo e erosão desgastaram essas rochas, liberando minerais valiosos, incluindo minério de ferro, ouro, cobre e outros elementos, os quais foram transportados e depositados em áreas de sedimentação, formando depósitos minerais ricos.

Figura 6: Mina Serra Norte – Mapa Geológico de



Fonte: Chemale (2009)

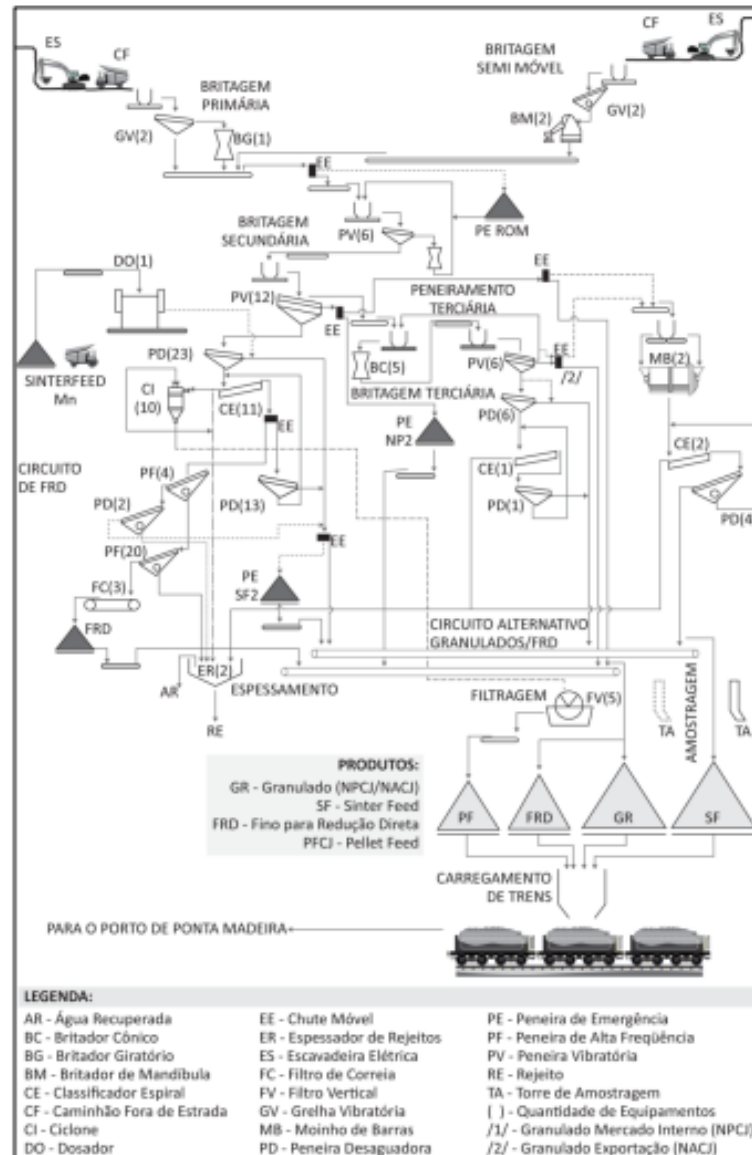
Quanto ao tamanho das reservas minerais de Carajás, é relevante observar que as estimativas podem variar. A reserva provada de minério de ferro na região de Carajás, especificamente na Serra Norte, era de aproximadamente 7,2 bilhões de toneladas em 2019 (VALE, 2021),

Além do minério de ferro, a região de Carajás destaca-se por outros minerais, como cobre, ouro, manganês, níquel e caulim. Entretanto, é importante ressaltar que a concentração e distribuição desses minerais podem variar dentro da província mineral de Carajás (ALKMIM & MARSHAK, 1998).

As operações da Vale na região de Carajás são projetos significativos no Brasil em termos de produção de minério de ferro. A mina de Serra Norte, está localizada na província mineral de Carajás, no estado do Pará, Brasil, é uma das maiores minas de minério de ferro do mundo e faz parte do Sistema Norte.

As operações em Serra Norte tiveram início em 1985 e sua capacidade nominal produtiva atual é de 150 milhões de toneladas por ano (VALE, 2020). Na Figura 7, é possível visualizar um fluxograma de uma das usinas do complexo.

Figura 7: Fluxograma Usina Serra Norte



Fonte: Luz & Lins (2018)

A mina de Serra Sul, ver Figura 8, também está localizada na província mineral de Carajás, no estado do Pará, Brasil. É uma das mais recentes expansões do complexo de mineração de Carajás e também faz parte do Sistema Norte. A primeira produção de minério de ferro na mina de Serra Sul ocorreu em janeiro de 2017, com capacidade nominal produtividade de 90 milhões de toneladas por ano (VALE, 2020).

Figura 8: Mina Serra Sul



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

### 3.1.3. Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero também é um importante depósito para Brasil, localizado na região Sudeste, mais precisamente no estado de Minas Gerais. Com área de 8.000 Km<sup>2</sup>, está inserido na porção do Cráton São Francisco, que compreende as cidades de Belo Horizonte, Santa Bárbara, Congonhas do Campo e Mariana (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

No Quadrilátero Ferrífero, assim como em Carajás, os depósitos de hematitas são vastos, sendo consideradas regiões de alta produção de minério de ferro (DANA et al., 2008). A exploração desses depósitos é de vital importância para o mercado global de aço, sendo o Brasil um dos principais exportadores de hematita no mundo.

### 3.1.4. Aplicações do minério de Ferro

O minério de ferro é um recurso mineral versátil que possui uma ampla variedade de aplicações em diversos setores industriais, suas principais aplicações estão relacionadas a Siderurgia, Indústria Automotiva, Construção Civil, Infraestrutura, Indústria de Máquinas e Equipamentos e Indústria de Energia (VALE, 2021)

A aplicação mais significativa do minério de ferro é na produção de aço. O minério de ferro é utilizado como matéria-prima essencial para a fabricação de aço em altos-fornos.

O minério de ferro é um componente importante na fabricação de automóveis. É usado na produção de carrocerias, motores, chassis e uma variedade de componentes automotivos, na fabricação de uma ampla gama de equipamentos industriais, incluindo máquinas agrícolas, equipamentos de construção, máquinas pesadas, ferramentas e muitos outros. (VALE, 2021)

O aço por sua vez é amplamente utilizado na construção civil e na infraestrutura, como na fabricação de vigas, pilares, estruturas metálicas, cabos de pontes e vergalhões para concreto armado, na construção de torres eólicas, estruturas de geração de energia, oleodutos e gasodutos, contribuindo de forma relevante com a indústria de energia. (VALE, 2021)

Essas são apenas algumas das aplicações mais comuns do minério de ferro. Sua versatilidade e disponibilidade tornam-no um recurso mineral indispensável para diversas indústrias. (VALE, 2021)

### **3.1.5. Estrutura cristalina**

A estrutura cristalina dos minerais de ferro é um fator crucial para a compreensão de suas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, que afetam diretamente os processos de extração e beneficiamento. Os principais óxidos de ferro presentes nos minérios são a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). A hematita possui uma estrutura cristalina romboédrica, enquanto a magnetita apresenta uma estrutura cúbica, características que influenciam suas densidades, durezas e comportamentos magnéticos. Esses fatores são decisivos para a escolha dos métodos de beneficiamento, como separação magnética ou flotação, adequados à composição mineralógica do minério (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

A hematita, com sua estrutura romboédrica, é o principal mineral de minério de ferro explorado no Brasil, predominando nas jazidas da região de Minas Gerais. Devido à sua alta densidade e dureza, o processo de cominuição, especialmente na britagem e moagem, torna-se mais intensivo em termos de consumo energético. Embora a hematita tenha propriedades magnéticas fracas, o que limita o uso da separação magnética, a flotação tem sido amplamente utilizada como método de concentração eficaz para esse mineral. A formação geológica da hematita em ambientes de oxidação e alta temperatura também afeta suas texturas e composição mineral,

impactando a eficiência dos processos metalúrgicos subsequentes (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

A magnetita, por sua vez, é conhecida por sua estrutura cúbica e forte magnetismo, características que facilitam sua separação em processos de beneficiamento que utilizam separação magnética de alta intensidade. A magnetita oferece vantagens em termos de eficiência energética, já que sua fragmentação requer menos energia do que a hematita, e o processo de concentração é mais eficaz devido às suas propriedades magnéticas. No entanto, depósitos economicamente viáveis de magnetita são menos comuns no Brasil, limitando sua exploração em larga escala. Esses depósitos estão geralmente associados a ambientes geológicos de metamorfismo e magmatismo, onde a magnetita cristaliza em condições de temperatura mais baixa em comparação com a hematita, afetando sua distribuição no minério (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

A goethita, com estrutura ortorrômbica, é outro mineral frequentemente encontrado em minérios de ferro de baixo teor, especialmente em regiões tropicais onde há maior incidência de processos de intemperismo. A goethita é geralmente formada pela alteração da hematita ou da magnetita e apresenta características que dificultam o beneficiamento, como maior geração de finos e um comportamento mais complexo em processos de concentração. O beneficiamento de minérios com elevado teor de goethita muitas vezes requer o uso de tecnologias mais avançadas, como peneiras de alta frequência e técnicas de desaguamento para garantir a recuperação adequada das frações finas e reduzir as perdas (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Além dos minerais principais, a caracterização cristalina de fases minerais secundárias, como a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e a limonita, também é importante para otimizar o processo de beneficiamento. A siderita, com sua estrutura trigonal, e a limonita, um mineral amorfo, influenciam o comportamento do minério durante os processos de concentração, afetando a eficiência de recuperação. O conhecimento detalhado das estruturas cristalinas auxilia na definição dos parâmetros de beneficiamento, especialmente em processos como flotação e separação magnética, otimizando a recuperação e minimizando as perdas no processamento do minério (DANA & HURLBUT, 1978; DANA et al., 2008).

A aplicação de técnicas avançadas, como a difração de raios-X e a microscopia eletrônica de varredura, tem permitido uma compreensão mais aprofundada das estruturas cristalinas dos minerais de ferro. Essas técnicas possibilitam a análise detalhada de fases minoritárias e texturas complexas, como intercrescimentos de hematita e goethita, que são frequentes em depósitos brasileiros. O uso dessas ferramentas de caracterização ajuda a refinar o controle do processo de beneficiamento, garantindo uma maior eficiência na recuperação do minério e melhorando a qualidade do produto final (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

### **3.1.6. Propriedades físicas**

O minério de ferro é uma rocha que contém minerais ricos em ferro, sendo os principais a hematita, a magnetita e a goethita. Sua extração e beneficiamento são fundamentais para a produção de ferro e aço (KLEIN & HURLBUT, 1999).

As propriedades físicas influenciam diretamente o teor de ferro do minério, sendo essencial conhecer essas características para estimar o potencial de aproveitamento econômico (KLEIN & HURLBUT, 1999).

A complexidade no beneficiamento surge das variações nas propriedades físicas entre diferentes depósitos de minério. Minerais como a goethita, com alta umidade, apresentam desafios específicos durante o processamento (KLEIN & HURLBUT, 1999).

Compreender e controlar as propriedades físicas do minério de ferro resulta em benefícios como eficiência operacional, redução de perdas durante o beneficiamento e produção de produtos finais de alta qualidade na indústria siderúrgica (KLEIN & HURLBUT, 1999).

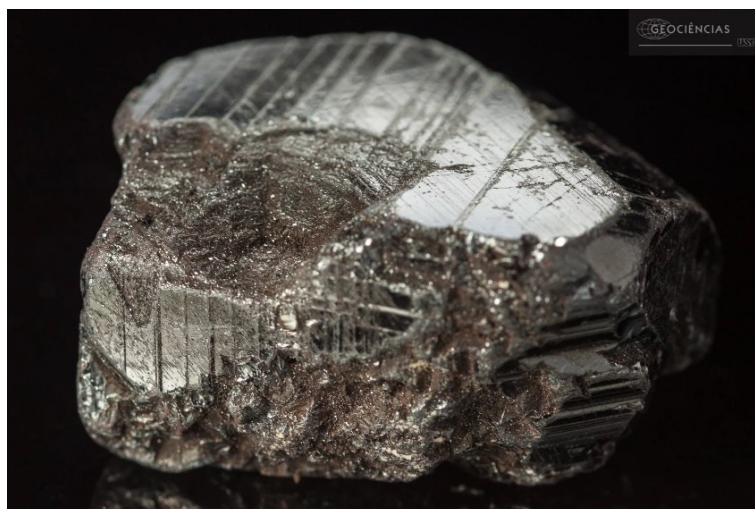
### **3.1.7. Hematita**

A hematita, ver

Figura 9, é o principal mineral de ferro explorado mundialmente e constitui uma das mais importantes fontes de ferro para a indústria siderúrgica. A sua fórmula química é  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e possui uma estrutura cristalina trigonal. As características físicas incluem uma dureza que varia de 5 a 6,5 na escala de Mohs e uma densidade média de  $5,26 \text{ g/cm}^3$  (DANA et al., 2008). É

amplamente conhecida pela sua cor vermelha característica, especialmente na sua forma pulverizada, que é usada como pigmento. Suas propriedades de elevada densidade e estabilidade fazem da hematita um material altamente resistente à corrosão.

Figura 9: Hematita Mineral



Fonte: Instituto de Geociências – USP (2017)

A hematita é especialmente relevante na produção de ferro-gusa e aço, materiais essenciais para a construção civil, automotiva, infraestrutura e uma vasta gama de indústrias. Ela se destaca pela elevada pureza de ferro (cerca de 70%) e pela baixa quantidade de impurezas, como fósforo e enxofre, que são prejudiciais nos processos siderúrgicos (DANA et al., 2008). No beneficiamento do minério de ferro, a hematita é processada através de técnicas como moagem, peneiramento e separação magnética. A sua estrutura densa e a alta concentração de ferro facilitam o processo de sinterização, essencial para a produção de aço de alta qualidade.

Uma das características mais importantes da hematita é sua formação geológica em grandes depósitos sedimentares e metamórficos. Sua relevância econômica se deve à facilidade de extração e beneficiamento, uma vez que a hematita é frequentemente encontrada em formações de alto teor de ferro e com baixa presença de contaminantes (DANA et al., 2008).

Além disso, o minério de hematita tem um impacto ambiental menor em comparação com outros minerais de ferro, como a magnetita, pois requer menos processamento energético para sua redução em fornos siderúrgicos. Sua elevada pureza minimiza a necessidade de etapas complexas de purificação no processo de produção do ferro, o que contribui para a redução de

emissões de carbono e outros poluentes (DANA et al., 2008). Contudo, o desafio maior está na presença de hematita de granulometria fina, que demanda processos mais elaborados, como a flotação.

### **3.1.8. Magnetita**

A magnetita é um dos minerais mais notáveis em termos de propriedades magnéticas, sendo o óxido de ferro de maior intensidade magnética natural. Possui a fórmula  $Fe_3O_4$ , cristaliza no sistema cúbico do tipo espinélio, e apresenta dureza entre 5,5 e 6,5 na escala de Mohs, com densidade aproximada de  $5,18 \text{ g/cm}^3$  (DANA et al., 2008). Essas características fazem da magnetita um mineral de alta densidade e grande importância industrial, tanto na mineração quanto na metalurgia.

Na siderurgia, a magnetita é uma matéria-prima essencial para a produção de ferro e aço. Sua composição química e estrutura cristalina permitem que ela seja facilmente magnetizada e desmagnetizada, o que a torna ideal para o uso em separadores magnéticos no beneficiamento de minérios de ferro. Durante o processo de beneficiamento, a magnetita pode ser separada de outros minerais presentes no minério bruto com alta eficiência, reduzindo custos e aumentando a pureza do ferro extraído (DANA et al., 2008). Outro aspecto importante da magnetita é sua ocorrência em grandes depósitos, como em Carajás, no Brasil, e nas formações ferríferas da Austrália e Canadá.

A magnetita, ver Figura 10, é também utilizada em diversas aplicações tecnológicas, como em dispositivos de armazenamento magnético e em catalisadores industriais. Sua estrutura permite o uso em processos químicos de purificação e remoção de impurezas, devido à sua reatividade com compostos químicos específicos. Além disso, a magnetita é usada em reações de desfosforização no refino de metais, processo que melhora a qualidade final do aço produzido (DANA et al., 2008).

Figura 10: Magnetita Mineral



Fonte: Instituto de Geociências – USP (2017)

Um dos desafios no uso da magnetita é o seu processamento. Embora seja possível extrair ferro de alta qualidade, a magnetita requer um maior gasto energético durante a sua redução em comparação com a hematita. Isso ocorre porque a magnetita precisa ser oxidada antes de ser convertida em ferro metálico, o que aumenta os custos de produção e a emissão de gases de efeito estufa. Ainda assim, a sua eficiência nos processos de separação magnética e concentração de ferro justifica o seu uso em larga escala na industrial (DANA et al., 2008).

### 3.1.9. Goethita

A goethita, ver Figura 11, é um mineral hidróxido de ferro comum, cuja fórmula química é  $\text{FeO}(\text{OH})$ . Ela cristaliza no sistema ortorrômbico, apresenta uma dureza de 5 a 5,5 na escala de Mohs e uma densidade de cerca de  $4,3 \text{ g/cm}^3$ . A goethita é frequentemente formada por processos de intemperismo químico, sendo abundante em zonas tropicais e subtropicais, onde o clima úmido favorece a oxidação e hidratação de minerais de ferro (DANA et al., 2008; DANA & HURLBUT, 1978). Ela ocorre em depósitos lateríticos, frequentemente em associação com outros minerais, como a hematita e a gibbsita, em camadas de oxidação superficial.

Figura 11: Goethita Mineral



Fonte: Instituto de Geociências – USP (2018)

Na indústria de mineração, a goethita é considerada um mineral de interesse, especialmente por ser comum em minérios de ferro de baixa qualidade. O principal desafio no processamento da goethita está na sua alta quantidade de água, que eleva o custo energético durante o processo de redução. Contudo, o beneficiamento da goethita pode incluir etapas como calcinação e sinterização, que visam remover a água e aumentar o teor de ferro, tornando-a competitiva com outros minérios (DANA et al., 2008). O uso de técnicas avançadas de flotação e separação magnética também tem contribuído para o aumento da eficiência no processamento de goethita.

Apesar das dificuldades, a goethita desempenha um papel importante na produção de ferro-gusa, sendo misturada com hematita e magnetita para melhorar a qualidade final do produto. Além disso, sua cor amarelada e marrom a torna um pigmento natural utilizado em tintas, cerâmicas e cosméticos. A goethita também tem sido utilizada em pesquisas ambientais, especialmente no estudo de solos tropicais e de processos de formação de lateritas (DANA et al., 2008).

Geologicamente, a goethita é um indicador de ambientes de oxidação, onde ocorre a transformação de minerais primários, como a magnetita e a pirita, em formas mais estáveis e hidratadas. Esse processo ocorre em regiões de intensa intemperização, o que faz da goethita um mineral abundante em zonas de transição entre superfícies frescas e alteradas de depósitos

ferríferos (DANA & HURLBUT, 1978). A formação de goethita está associada a climas tropicais e subtropicais, onde o intemperismo químico de rochas ricas em ferro é mais ativo, tornando-a comum em solos e sedimentos superficiais.

### 3.1.10. Caulinita

A caulinita, ver Figura 12, é um mineral argiloso pertencente ao grupo dos filossilicatos, com a fórmula  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Cristaliza no sistema triclinico e apresenta uma dureza de 2 a 2,5 na escala de Mohs, com uma densidade entre 2,6 e 2,7  $\text{g/cm}^3$  (DANA et al., 2008). Ela é amplamente conhecida por sua utilização na fabricação de porcelana, papel e cerâmica, devido à sua plasticidade e resistência a altas temperaturas.

Figura 12: Caulinita



Fonte: Instituto de Geociências – USP (2018)

A caulinita é um dos principais componentes das argilas brancas, formando-se principalmente por meio da alteração química de feldspatos em ambientes úmidos e ácidos, especialmente em solos tropicais. Suas camadas cristalinas bidimensionais são formadas por uma folha de tetraedros de sílica ( $\text{SiO}_4$ ) e uma folha de octaedros de alumina ( $\text{AlO}_6$ ), o que lhe confere estabilidade química e baixa expansão ao ser hidratada (DANA & HURLBUT, 1978). A caulinita é amplamente utilizada em indústrias que requerem materiais de alta resistência térmica e baixa expansão, como a cerâmica e a produção de refratários.

Além de seu uso tradicional, a caulinita também é aplicada em processos de desacidificação de solos, sendo utilizada como corretivo em áreas agrícolas. Sua plasticidade e capacidade de reter

água a tornam uma matéria-prima ideal para a indústria de papel, pois melhora a textura e a qualidade das superfícies de impressão (DANA et al., 2008). A caulinita também é usada na fabricação de cosméticos e produtos farmacêuticos, sendo um agente absorvente natural em produtos dermatológicos.

No contexto de mineração, a caulinita ocorre em depósitos de argila residual, resultantes do intemperismo químico de rochas ricas em alumínio, como os granitos e basaltos. Durante o beneficiamento de minérios de ferro, sua presença pode interferir na qualidade do produto final, uma vez que ela contribui para o aumento de impurezas no processo siderúrgico. No entanto, quando bem separada e purificada, a caulinita tem grande valor comercial e pode ser utilizada em várias aplicações industriais (DANA & HURLBUT, 1978).

### 3.1.11. Gibbsita

A gibbsita, ver Figura 13, é um mineral hidróxido de alumínio que cristaliza no sistema monoclinico e apresenta uma dureza entre 2,5 e 3,5 na escala de Mohs, com uma densidade de aproximadamente  $2,4 \text{ g/cm}^3$  (DANA et al., 2008). Este mineral é o principal constituinte do minério de bauxita, a fonte primária de alumínio industrial. A gibbsita se forma em zonas tropicais e subtropicais, onde o intemperismo intenso causa a lixiviação de minerais de alumínio.

Figura 13: Gibbsita



Fonte: Weinrich Mineral (2023)

A extração de gibbsita, com fórmula  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , é um processo-chave para a indústria do alumínio, que utiliza o método Bayer para refinar o minério de bauxita em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) antes de convertê-la em alumínio metálico. A relevância da gibbsita na economia global é inquestionável, uma vez que o alumínio é amplamente utilizado na fabricação de produtos como embalagens, materiais de construção, automóveis e componentes eletrônicos (DANA & HURLBUT, 1978).

Em termos de mineração e beneficiamento, a gibbsita apresenta um desafio, pois pode se associar a outros minerais, como a caulinita, complicando o processo de purificação. A complexidade no beneficiamento está na remoção de impurezas, já que a presença de sílica reativa pode causar problemas durante a etapa de refino (DANA et al., 2008). Apesar dessas dificuldades, a gibbsita é considerada um recurso abundante e de alto valor econômico, especialmente em países como o Brasil e a Austrália, que possuem grandes depósitos de bauxita.

### **3.1.12. Jaspilito**

O jaspilito, ver Figura 14, é uma rocha de origem sedimentar, comumente encontrada em formações ferríferas bandadas (BIFs), característica de jazidas de minério de ferro como as da Serra dos Carajás, no Brasil. Sua composição é formada por camadas alternadas de sílica (quartzo) e minerais de ferro, como hematita e magnetita. Essa estrutura lamelar confere ao jaspilito propriedades específicas que influenciam sua viabilidade econômica e as técnicas de beneficiamento utilizadas. A alta dureza da sílica presente no jaspilito torna os processos de cominuição, como britagem e moagem, mais desafiadores e energeticamente intensivos, necessitando de equipamentos robustos e etapas adicionais de fragmentação para a liberação dos minerais de ferro (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Figura 14: Amostra Jaspilito



Fonte: Museo de história natural e jardim botânica – UFMG (2023)

O beneficiamento de jaspilite exige técnicas avançadas devido à sua complexa estrutura mineralógica. A presença de bandas ricas em sílica, intercaladas com óxidos de ferro, afeta diretamente os processos de concentração, como a flotação e a separação magnética. A baixa suscetibilidade magnética de alguns minerais de ferro contidos no jaspilite, como a hematita, limita a eficiência da separação magnética, especialmente em processos convencionais (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Geologicamente, os depósitos de jaspilite são formados em ambientes de fundo oceânico, onde a precipitação de sílica e óxidos de ferro ocorre em camadas, muitas vezes sob condições de baixo oxigênio. Essa origem geológica influencia não apenas a mineralogia do jaspilite, mas também sua distribuição e textura nas jazidas. Depósitos de jaspilite são geralmente encontrados em profundidades maiores, o que aumenta os custos de extração, mas, em contrapartida, apresentam teores relativamente altos de ferro, tornando-os economicamente viáveis, especialmente em minas a céu aberto (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Os avanços tecnológicos no processamento mineral têm permitido a exploração mais eficiente de depósitos de jaspilite. Tecnologias de moagem ultrafina e separação magnética de alta intensidade têm sido aplicadas para melhorar a liberação dos minerais de ferro das camadas de sílica. Além disso, o uso de sensores automatizados e modelos geometalúrgicos permite otimizar as operações de britagem e moagem, garantindo uma maior recuperação de ferro e reduzindo o consumo energético (DANA & HURLBUT, 1978). Dessa forma, o jaspilite, apesar

de seus desafios de processamento, tem se tornado uma fonte cada vez mais relevante de minério de ferro, especialmente à medida que os depósitos de hematita de alto teor se tornam menos abundantes.

Outra característica importante do jaspilito é sua porosidade reduzida, o que dificulta o processo de desaguamento e requer a utilização de equipamentos especializados, como filtros prensa de alta pressão, para otimizar a retirada de água do minério concentrado. Além disso, a presença de sílica em altas concentrações aumenta a geração de finos durante o processo de cominuição, o que demanda técnicas adicionais de controle de poeira e de recuperação de partículas finas no beneficiamento (DANA et al., 2008). Essas características tornam o tratamento de jaspilitos mais complexo em comparação a outros tipos de minérios de ferro, como os itabiritos.

### **3.1.13. Itabirito**

O itabirito é uma rocha metamórfica composta predominantemente por minerais de ferro, como hematita e magnetita, intercalados com camadas de quartzo. É amplamente encontrado em grandes depósitos de minério de ferro no Brasil, especialmente na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Esse tipo de rocha é resultado do metamorfismo de formações ferríferas bandadas (BIFs) e possui uma textura lamelar, caracterizada pela alternância de bandas ricas em óxidos de ferro e sílica. Essa estrutura influencia diretamente o comportamento do minério nos processos de extração e beneficiamento, tornando o itabirito um importante recurso mineral (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Do ponto de vista do beneficiamento, o itabirito apresenta desafios técnicos devido à sua estrutura mineralógica complexa. O processo de cominuição, que inclui a britagem e moagem, é mais exigente em termos de energia quando comparado a outros tipos de minério de ferro, como a hematita maciça, por conta da presença de quartzo, que é um mineral muito duro. Esse aumento no consumo energético impacta diretamente os custos operacionais das minas e exige equipamentos robustos para garantir a eficiente fragmentação dos grãos minerais, sem comprometer a recuperação de ferro (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

No processo de concentração, a separação magnética é uma das técnicas mais utilizadas no beneficiamento do itabirito, devido à presença de magnetita, que possui propriedades

magnéticas favoráveis para esse tipo de tratamento. Contudo, em muitos depósitos, a hematita, que não é tão suscetível ao magnetismo, é o mineral predominante. Nesses casos, a flotação reversa é uma alternativa eficiente, na qual reagentes coletores são utilizados para separar o ferro do quartzo. A escolha do método de concentração depende da mineralogia específica do depósito de itabirito em questão, assim como das características do minério extraído (DANA et al., 2008).

Geologicamente, o itabirito se forma em ambientes de bacias sedimentares antigas, onde o ferro precipitou na forma de óxidos e foi subsequentemente submetido a processos de metamorfismo. Esse tipo de rocha é associado a depósitos formados em períodos geológicos muito antigos, como o Pré-Cambriano, e é frequentemente encontrado em profundidades que podem variar consideravelmente. As camadas metamorizadas do itabirito preservam registros importantes sobre os processos geológicos que ocorreram ao longo de bilhões de anos, o que torna seu estudo relevante não apenas para a mineração, mas também para a geologia estrutural (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

O beneficiamento de itabiritos requer etapas de desaguamento eficientes devido à presença de finos gerados durante o processo de cominuição. A alta presença de sílica e outros materiais finos reduz a densidade do concentrado, impactando negativamente a eficiência dos processos de separação. Assim, técnicas de desaguamento, como o uso de espessadores e filtros prensa, são essenciais para garantir a remoção adequada de água e maximizar a recuperação de ferro. Esse processo é especialmente importante em minas que exploram depósitos de itabirito, pois garante a sustentabilidade econômica do projeto, ao melhorar a qualidade do produto final (DANA & HURLBUT, 1978).

Com o esgotamento progressivo dos depósitos de hematita de alto teor no Brasil, o itabirito tem se tornado uma das principais fontes de minério de ferro, especialmente devido aos avanços tecnológicos em técnicas de concentração e beneficiamento. A utilização de novas tecnologias, como separadores magnéticos de alta intensidade e células de flotação mais eficientes, tem permitido que o itabirito seja tratado de maneira mais eficaz, aumentando a recuperação de ferro e reduzindo a geração de rejeitos. Além disso, a aplicação da geometurgia tem sido crucial para otimizar o beneficiamento de itabirito, integrando dados mineralógicos e

metalúrgicos para ajustar as operações em tempo real (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

### 3.1.14. Canga

A canga, ver Figura 15, é um tipo de solo residual ferruginoso encontrado em zonas superficiais de depósitos de minério de ferro, caracterizada por sua formação a partir do intemperismo de rochas ferríferas, como itabiritos e hematitas. Esse material apresenta uma textura heterogênea, composta por fragmentos de hematita, goethita, quartzo e minerais de ganga cimentados por óxidos de ferro. A canga é um material típico de ambientes tropicais, podendo ser encontrada nos depósitos de Carajás e Quadrilátero Ferrífero, e está associada à formação de lateritas e outros solos ricos em ferro (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Do ponto de vista do beneficiamento, a canga, ver Figura 15, apresenta desafios específicos devido à sua composição heterogênea e à alta presença de finos. O processo de britagem da canga é dificultado pela presença de materiais de dureza variável, que requerem ajustes constantes nos equipamentos de cominuição para garantir a fragmentação eficiente dos componentes mais duros, como a hematita, sem gerar excessiva pulverização dos materiais mais frágeis. A alta quantidade de finos produzida nesse processo pode comprometer a eficiência das etapas subsequentes de peneiramento e classificação, exigindo o uso de peneiras de alta frequência e sistemas avançados de despoeiramento (DANA & HURLBUT, 1978).

Figura 15: Canga Minério de Ferro



Fonte: Instituto de Geociências – USP (2024)

A composição mineralógica da canga influencia diretamente a escolha dos métodos de concentração. Devido à presença predominante de goethita e hematita, a separação magnética é frequentemente utilizada para a concentração do minério de ferro presente. No entanto, a presença de minerais de ganga, como quartzo e argilominerais, pode reduzir a eficiência desse processo, exigindo técnicas complementares, como a flotação reversa, para aumentar a recuperação de ferro (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023). Além disso, a alta porosidade da canga aumenta a necessidade de etapas adicionais de desaguamento, como o uso de espessadores e filtros prensa, para garantir a remoção adequada de umidade do concentrado.

Do ponto de vista geológico, a canga é formada por processos intensos de intemperismo químico e físico, que resultam na oxidação dos minerais de ferro e no enriquecimento residual desses elementos no solo superficial. Esse processo de formação geológica faz com que a canga seja frequentemente associada a depósitos de minério de ferro em zonas de baixa topografia, onde os processos de erosão e deposição são predominantes. A exploração da canga, portanto, ocorre principalmente em áreas superficiais, facilitando sua extração em minas a céu aberto (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

A canga é considerada uma fonte secundária de minério de ferro, mas sua importância tem crescido à medida que os depósitos primários, como os de hematita de alto teor, se tornam mais escassos. Tecnologias modernas de beneficiamento, como a classificação em meio denso e a separação magnética de alta intensidade, têm sido aplicadas para melhorar a recuperação de ferro da canga, tornando-a uma fonte cada vez mais viável economicamente. Além disso, o desenvolvimento de modelos geometalúrgicos tem permitido um melhor planejamento e controle das operações de beneficiamento, garantindo uma recuperação mais eficiente dos recursos minerais presentes na canga (DANA et al., 2008).

## 3.2. Geometalurgia e caracterização mineralógica

### 3.2.1. Geometalurgia

A geometalurgia é uma abordagem integrada que combina a geologia, metalurgia e engenharia de minas, com o objetivo de otimizar o processo de extração e beneficiamento de minérios, em particular o minério de ferro. O foco principal dessa metodologia reside na caracterização mineralógica e metalúrgica do recurso mineral, permitindo que as operações sejam adaptadas às características específicas do minério ao longo de todo o ciclo de vida do projeto. Essa prática não apenas melhora a recuperação de recursos, mas também reduz custos e minimiza impactos ambientais, promovendo uma mineração mais sustentável (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Um aspecto crucial da geometalurgia é a caracterização detalhada do minério, que envolve a coleta de amostras em diferentes pontos da jazida e a análise de suas propriedades físicas e químicas. Essa caracterização é realizada através de técnicas avançadas, como espectroscopia, microscopia eletrônica e análise química, que permitem identificar a mineralogia, a granulometria e a presença de impurezas. A criação de um modelo geometalúrgico a partir desses dados possibilita prever como o minério se comportará durante as etapas de britagem, moagem e concentração. Isso é especialmente relevante no caso do minério de ferro, onde a variabilidade mineral pode impactar diretamente a eficiência do beneficiamento e a qualidade do produto final (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Além da caracterização, a geometalurgia enfatiza a importância da integração entre equipes multidisciplinares, que incluem geólogos, engenheiros de minas e metalurgistas. Essa colaboração permite uma gestão mais eficaz dos recursos e a implementação de estratégias adaptativas durante as operações. Por exemplo, informações sobre a mineralogia obtidas na fase de caracterização podem influenciar o planejamento da malha de perfuração e as metodologias de desmonte, garantindo que o material extraído atenda às exigências dos processos de beneficiamento subsequentes. A comunicação constante entre essas equipes é essencial para o sucesso do projeto e para a maximização da recuperação mineral (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

A geometalurgia também se destaca pela sua contribuição à sustentabilidade das operações de mineração. O entendimento aprofundado das características do minério permite a implementação de processos que reduzem a geração de rejeitos e o consumo de insumos como água, energia e reagentes químicos. Essas práticas são fundamentais para atender às crescentes demandas por uma mineração responsável e sustentável. Medidas como o tratamento de efluentes e a reciclagem de água, além da adoção de tecnologias que minimizam o consumo energético, são aspectos centrais da geometalurgia moderna (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Outro pilar da geometalurgia é a utilização de ferramentas tecnológicas avançadas. O uso de softwares de modelagem geológica e metalúrgica, aliado a técnicas de simulação computacional, permite a previsão do desempenho dos minérios em diferentes cenários operacionais. A aplicação de inteligência artificial e aprendizado de máquina na análise de dados geometalúrgicos pode potencializar a eficiência das operações, ajustando em tempo real os parâmetros do processo de beneficiamento com base nas características do minério em processamento. Essa abordagem proativa resulta em um aumento da recuperação e na redução de custos operacionais (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

Por último, a formação e capacitação contínua das equipes envolvidas na implementação da geometalurgia são fundamentais para o sucesso dessa abordagem. A educação em novas tecnologias, métodos analíticos e práticas de gestão de recursos minerais é essencial para a competitividade da indústria. Além disso, a disseminação da cultura geometalúrgica entre os profissionais do setor contribui para a inovação e a melhoria contínua, assegurando que a mineração atenda às necessidades econômicas, sociais e ambientais da atualidade (CHEMALE JUNIOR & TAKEHARA, 2023).

### **3.2.2. Caracterização mineralógica e tecnológica**

A caracterização mineralógica é um passo fundamental no beneficiamento de minérios de ferro, pois fornece uma compreensão detalhada da composição mineral e das propriedades físicas e químicas do material extraído. Essa etapa utiliza uma variedade de métodos analíticos, como a difração de raios X (DRX), espectroscopia e microscopia eletrônica de varredura, que permitem identificar a presença e a proporção dos minerais, como hematita, magnetita e goethita, entre

outros (CHAVES, 2021). A informação obtida é crucial para a elaboração de um plano de beneficiamento eficaz, que atenda às especificidades do minério em questão.

Além da identificação mineral, a caracterização mineralógica também abrange a análise das texturas e estruturas dos minerais, que influenciam diretamente o comportamento do minério durante o processamento. Texturas como granulação, forma e distribuição das partículas têm implicações significativas nas operações de britagem e moagem, pois materiais com diferentes texturas podem exigir ajustes nas técnicas de processamento para otimizar a recuperação do ferro (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Portanto, uma caracterização detalhada possibilita uma abordagem mais direcionada e eficaz nas etapas subsequentes do beneficiamento.

As propriedades tecnológicas do minério, como dureza, resistência à abrasão e comportamento em condições operacionais variadas, são igualmente cruciais para o sucesso do beneficiamento. A dureza do minério, por exemplo, influencia diretamente o consumo de energia nas etapas de britagem e moagem. Minérios mais duros demandam maior energia para serem fragmentados, o que pode aumentar os custos operacionais (CHAVES, 2021). Por outro lado, uma avaliação adequada das propriedades tecnológicas permite a seleção de equipamentos mais apropriados, minimizando os custos e maximizando a eficiência do processo.

Um aspecto muitas vezes negligenciado, mas de extrema importância, é o impacto ambiental associado à composição mineral do minério. A presença de contaminantes, como sílica ou alumínio, pode não apenas afetar a qualidade do produto final, mas também gerar passivos ambientais, exigindo medidas de controle mais rigorosas. Portanto, a caracterização mineralógica não apenas orienta o processo de beneficiamento, mas também é fundamental para a gestão ambiental e a sustentabilidade das operações de mineração (VALADÃO & ARAÚJO, 2012).

Adicionalmente, o conhecimento sobre a mineralogia do minério é essencial para a formulação de estratégias de recuperação que minimizem a geração de rejeitos. Por exemplo, a escolha do método de beneficiamento pode variar conforme a natureza mineralógica do minério. Em casos de minérios com alta concentração de minerais indesejáveis, pode ser mais vantajoso empregar processos que favoreçam a separação seletiva (CHAVES, 2021). Assim, a caracterização

mineralógica desempenha um papel fundamental não apenas na maximização da recuperação do ferro, mas também na minimização dos impactos ambientais associados.

Por fim, a caracterização mineralógica e tecnológica não é um processo único, mas sim um ciclo contínuo de análise e ajuste. À medida que novas informações são coletadas ao longo do beneficiamento, é possível refinar as estratégias operacionais, levando a um processo mais eficiente e sustentável. Essa abordagem adaptativa é essencial em um cenário de constantes mudanças na demanda do mercado e nas exigências ambientais (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Assim, a caracterização mineralógica é um pilar fundamental para garantir a viabilidade econômica e a sustentabilidade das operações de beneficiamento de minérios de ferro.

### **3.2.3. Umidade**

A umidade é uma variável crucial no beneficiamento de minérios de ferro, pois impacta significativamente tanto a eficiência do processo quanto a qualidade do produto final. A medição precisa do teor de umidade é realizada através de métodos laboratoriais, que incluem a secagem do minério e a pesagem para determinar a quantidade de água presente (CHAVES, 2021). Esse dado é essencial para otimizar as operações de manuseio e processamento, uma vez que a umidade excessiva pode levar a problemas como aglomeração e dificuldades no transporte.

A presença de umidade no minério afeta diretamente as etapas de britagem e moagem. Em situações em que o teor de umidade é elevado, o minério pode se tornar mais difícil de ser fragmentado, resultando em um aumento no consumo de energia e na possibilidade de desgaste dos equipamentos (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Além disso, a umidade pode afetar a eficiência da separação de partículas, uma vez que partículas úmidas tendem a se agregar, prejudicando a classificação granulométrica e a recuperação em processos subsequentes.

Controlar o teor de umidade é também uma questão econômica. O transporte de minérios úmidos implica em custos adicionais, uma vez que o peso extra da água pode resultar em maiores despesas com frete e armazenamento (CHAVES, 2021). Em operações em larga escala, a redução do teor de umidade pode levar a economias significativas, tornando-se um objetivo estratégico nas atividades de beneficiamento.

Os métodos de desaguamento, como secagem em estufas e processos de centrifugação, são frequentemente utilizados para reduzir o teor de umidade dos minérios antes do processamento (CHAVES, 2022). A escolha do método adequado depende das características do minério e dos requisitos do processo. Uma análise cuidadosa das opções disponíveis pode maximizar a eficiência do desaguamento, melhorando a qualidade do concentrado e reduzindo os custos operacionais.

Além disso, o monitoramento contínuo do teor de umidade durante as operações é fundamental. O uso de tecnologias de medição em tempo real pode permitir ajustes imediatos nas operações, garantindo que o teor de umidade se mantenha dentro de limites ideais (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Essa abordagem proativa é essencial para manter a eficiência e a sustentabilidade do beneficiamento de minérios de ferro.

Por fim, a gestão do teor de umidade também está ligada a considerações ambientais. O manejo adequado da água e a minimização de desperdícios são práticas que contribuem para a sustentabilidade das operações de mineração. A conscientização sobre o impacto da água no processo de beneficiamento pode levar a inovações que aumentem a eficiência hídrica, tornando o processo mais sustentável a longo prazo (CHAVES, 2022).

#### **3.2.4. Granulometria**

A granulometria é um fator determinante na eficiência do beneficiamento de minérios de ferro. A análise granulométrica, que consiste na medição da distribuição do tamanho das partículas, é essencial para otimizar as etapas de britagem, moagem e separação (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Diferentes processos exigem tamanhos de partículas específicos, e a adequação da granulometria às necessidades do processo pode aumentar significativamente a recuperação do mineral valioso.

A britagem é a primeira etapa que exige controle granulométrico. Equipamentos como britadores de mandíbula, cônicos e de impacto são utilizados, e a escolha do britador deve levar em consideração a dureza e a textura do minério. Britadores inadequados podem resultar em partículas muito grandes, que não são processadas de forma eficiente nas etapas subsequentes (CHAVES & PERES, 2021). Portanto, um circuito de britagem bem projetado é fundamental para garantir a qualidade do produto final e a eficiência energética.

Após a britagem, o peneiramento é a etapa responsável pela separação das partículas de acordo com seu tamanho. Essa operação é crítica, pois partículas fora da faixa ideal podem causar perdas significativas na recuperação do ferro. O uso de peneiras vibratórias, com ajustes na amplitude e frequência, pode ser uma solução eficaz para maximizar a eficiência do peneiramento (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Um controle rigoroso do processo de peneiramento assegura que as frações desejadas sejam direcionadas para as fases de concentração, enquanto as partículas indesejadas são descartadas.

A moagem também está intimamente relacionada à granulometria. A escolha dos moinhos, seja de bolas ou autógenos, deve ser feita com base na granulometria do produto desejado. Moinhos mal ajustados podem levar a uma moagem excessiva ou insuficiente, afetando diretamente a recuperação e a qualidade do concentrado (CHAVES & PERES, 2021). O monitoramento contínuo da granulometria do produto da moagem é fundamental para garantir que o material atenda às especificações exigidas.

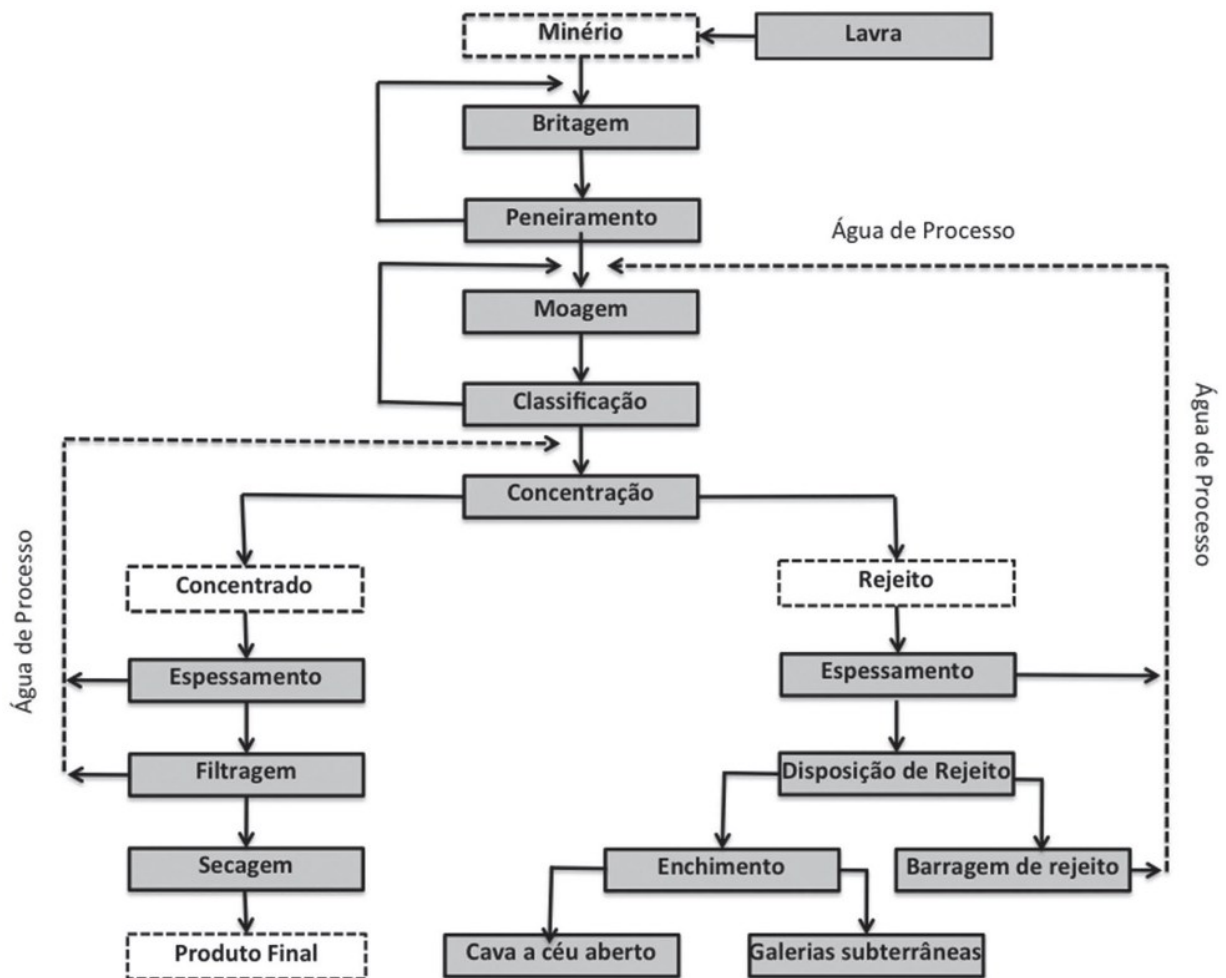
Além das operações de britagem e moagem, a granulometria impacta também as etapas de separação e concentração, como flotação e separação magnética. O desempenho desses processos pode ser prejudicado se a granulometria não estiver adequada, resultando em perdas de material e redução na qualidade do concentrado (CHAVES, 2022). Portanto, a granulometria não é apenas uma medida de tamanho, mas um elemento crítico que influencia todas as etapas do beneficiamento.

Por fim, a implementação de tecnologias modernas, como a análise em tempo real da granulometria, pode proporcionar melhorias significativas na operação. Ferramentas de monitoramento podem facilitar ajustes dinâmicos durante o processamento, garantindo que a granulometria esteja sempre dentro dos limites ideais. Essa abordagem não apenas aumenta a eficiência do processo, mas também contribui para a sustentabilidade das operações de beneficiamento de minérios de ferro (VALADÃO & ARAÚJO, 2012).

### 3.3. Processo de beneficiamento

O processo de beneficiamento de minério de ferro é uma sequência interligada de operações que visa aumentar a concentração do mineral valioso e remover impurezas. As principais etapas desse processo incluem britagem, peneiramento, moagem, desaguamento, flotação e separação magnética, ver Figura 16. Cada uma dessas etapas desempenha um papel vital e deve ser cuidadosamente projetada e integrada para garantir a eficiência e a qualidade do produto final (CHAVES, 2022).

Figura 16: Diagrama típico de tratamento de minério



Fonte: Tavares (2009) *apud* Silva, Ferreira, Scotti (2015)

A britagem é a primeira fase do beneficiamento e tem como objetivo reduzir o tamanho das partículas do minério. Para isso, são utilizados britadores de diferentes tipos, como britadores

de mandíbula e cônicos. A escolha do britador deve ser baseada nas características do minério e nos objetivos do processo, pois britadores mal ajustados podem levar a perdas significativas de material e aumento do consumo de energia (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Um circuito de britagem bem projetado maximiza a recuperação do minério e minimiza o custo operacional.

Após a britagem, o peneiramento é realizado para separar as partículas por tamanho. Esta etapa é crítica, pois partículas fora da faixa ideal podem resultar em ineficiências nas operações subsequentes, como a flotação. O uso de peneiras vibratórias, com configurações adequadas de amplitude e frequência, pode otimizar a separação das frações desejadas (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). A eficiência do peneiramento é fundamental para garantir que apenas o material adequado siga para as próximas etapas do processamento.

A moagem é outra etapa essencial que visa reduzir ainda mais o tamanho das partículas e aumentar a área de superfície do minério, facilitando as etapas de separação. O tipo de moinho, seja de bolas ou autógeno, deve ser selecionado com base nas características do minério e nas especificações desejadas para o produto final (CHAVES & PERES, 2021). A moagem inadequada pode resultar em perdas de material e aumentar o consumo de energia, o que representa um custo significativo nas operações.

O desaguamento é uma etapa fundamental que visa remover a água do concentrado, aumentando sua densidade e reduzindo os custos de transporte e armazenamento. Equipamentos como espessadores e filtros de prensa são frequentemente utilizados para essa finalidade (CHAVES, 2022). O controle adequado da umidade é essencial, pois um concentrado muito úmido pode afetar a qualidade do produto e aumentar os custos operacionais.

As etapas finais do beneficiamento incluem a flotação e a separação magnética, que são técnicas complementares utilizadas para concentrar o minério de ferro. A flotação é baseada nas propriedades hidrofóbicas dos minerais e envolve o uso de reagentes químicos que promovem a flutuação dos minerais desejados, enquanto a separação magnética utiliza as diferenças nas propriedades magnéticas dos minerais para realizar a separação (CHAVES, 2022). A integração dessas técnicas em um circuito de beneficiamento pode aumentar significativamente a eficiência e a qualidade do produto final.

### 3.3.1. Desmonte e fragmentação

O desmonte de minério de ferro desempenha um papel crucial na extração mineral, focando na fragmentação da rocha matriz para liberar o minério desejado. A técnica predominante para essa etapa é o uso de explosivos, que possibilita uma fragmentação rápida e eficaz, permitindo o acesso ao material, ver Figura 17. A seleção do tipo de explosivo e a configuração da malha de perfuração são fundamentais para assegurar uma fragmentação eficiente, evitando a geração de blocos de tamanho inadequado que poderiam comprometer as etapas subsequentes de britagem e beneficiamento (SILVA, 2019).

Figura 17: Fragmentação e desmonte Minério de Ferro



Fonte: Costa, Candia, Mazzinghy (2021)

Além da detonação, técnicas de desmonte mecânico têm sido utilizadas, especialmente em contextos onde o uso de explosivos é limitado por razões de segurança ou ambientais. Equipamentos como escavadeiras e cortadores podem realizar o desmonte de forma controlada, proporcionando uma gestão mais precisa da granulometria do material extraído. Embora esses métodos geralmente demandem mais tempo, eles oferecem a vantagem de minimizar a produção de finos indesejados, que podem prejudicar os processos de concentração (SILVA, 2019).

A eficiência do desmonte está intimamente ligada à qualidade da fragmentação resultante. Um desmonte bem planejado resulta em partículas de tamanho ideal para o processo de britagem, evitando sobrecargas nos britadores e desgaste excessivo dos equipamentos. Por outro lado, uma fragmentação inadequada pode elevar os custos operacionais e reduzir a recuperação do minério, impactando a viabilidade econômica da operação (SILVA, 2019).

Outro aspecto importante é o impacto ambiental associado ao desmonte. A detonação e o manuseio de rochas podem gerar poeira e vibrações, que não apenas afetam a saúde dos trabalhadores, mas também impactam o meio ambiente ao redor. A implementação de práticas operacionais que minimizem esses efeitos, como o uso de barreiras acústicas e sistemas de controle de poeira, é essencial para garantir a sustentabilidade e a conformidade com as regulamentações ambientais (SILVA, 2019).

Ademais, o planejamento do desmonte deve estar integrado com as etapas de beneficiamento, assegurando uma transição eficiente entre os processos. Uma abordagem que considera as necessidades de britagem e moagem pode resultar em operações mais fluidas e eficientes, otimizando a recuperação do minério e reduzindo custos. Essa sinergia entre as etapas é vital para maximizar o rendimento global da planta (SILVA, 2019).

Por fim, a formação contínua e o treinamento das equipes envolvidas no desmonte são fundamentais para garantir a adoção das melhores práticas. A colaboração entre engenheiros de minas, operadores de equipamentos e equipes de segurança é essencial para a realização de operações mais seguras e eficientes, promovendo a inovação e a melhoria contínua nos processos de desmonte de minério de ferro (SILVA, 2019).

### **3.3.2. Manuseio minério de ferro**

O manuseio de minério de ferro é uma etapa crucial na cadeia produtiva, envolvendo uma série de operações que garantem o transporte eficiente e seguro do material desde a extração até o beneficiamento. O processo de manuseio abrange a movimentação, transferência, carga e descarga do minério, sendo fundamental para minimizar perdas e garantir a qualidade do produto final (CHAVES, 2023). A escolha adequada de equipamentos e técnicas de manuseio impacta diretamente nos custos operacionais e na eficiência do sistema como um todo.

Os sistemas de transporte, como correias transportadoras, são amplamente utilizados no manuseio de minério de ferro. Esses sistemas oferecem vantagens significativas em termos de eficiência e segurança, permitindo o transporte contínuo do material entre diferentes etapas do processo (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). A configuração das correias deve ser projetada considerando a granulometria do minério, a distância a ser percorrida e as características do

terreno. A manutenção regular dos sistemas de transporte é fundamental para evitar paradas não programadas e garantir a operação contínua.

Além das correias transportadoras, o manuseio de minério pode incluir o uso de equipamentos como pás carregadeiras, escavadeiras e caminhões fora de estrada. Esses equipamentos desempenham um papel vital na movimentação inicial do minério extraído, e a escolha do equipamento deve ser baseada em fatores como a capacidade de carga, a mobilidade e a eficiência do combustível (CHAVES, 2023). A operação eficiente desses equipamentos requer treinamento adequado da equipe e um planejamento cuidadoso para maximizar a produtividade. Outro aspecto importante do manuseio de minério de ferro é a mitigação de riscos ambientais e operacionais. O controle de poeira, por exemplo, é uma preocupação significativa em operações de manuseio, pois a liberação de partículas finas pode ter impactos negativos na saúde dos trabalhadores e no meio ambiente (CHAVES, 2022). Medidas como o uso de umidificadores e barreiras de contenção são frequentemente implementadas para minimizar esses riscos, garantindo um ambiente de trabalho seguro e sustentável.

O manuseio também deve considerar as características do minério, como seu teor de umidade e a presença de impurezas. Minérios úmidos podem causar aglomeração e dificultar o transporte, ver Figura 18, enquanto impurezas podem afetar a qualidade do concentrado. Portanto, a implementação de estratégias de controle de qualidade durante o manuseio é essencial para garantir que o minério chegue ao beneficiamento em condições ideais (VALADÃO & ARAÚJO, 2012).

Figura 18: Chute de transferência para minério de ferro



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Por fim, a tecnologia está se tornando um aliado fundamental no manuseio de minério de ferro. O uso de sistemas automatizados, como drones para monitoramento e sensores para detecção de falhas, pode aumentar a eficiência e a segurança das operações. A digitalização dos processos de manuseio proporciona um controle mais preciso e em tempo real, permitindo ajustes dinâmicos que melhoram a eficiência operacional e reduzem custos (CHAVES, 2023).

### 3.3.3. Britagem

A britagem, ver Figura 19, é uma das primeiras etapas do beneficiamento mineral e consiste na fragmentação do minério em pedaços menores, visando prepará-lo para as fases subsequentes do processo, como a moagem e a concentração. A britagem pode ser dividida em diferentes estágios, como britagem primária, secundária e terciária, dependendo do tamanho final desejado para o minério. Na britagem primária, utiliza-se principalmente britadores de mandíbulas ou giratórios, que aplicam forças de compressão sobre o material, resultando em fragmentos de maior dimensão, com tamanho variando de 10 a 30 cm (CHAVES, 2021). Esse tipo de equipamento é indicado para materiais de alta resistência mecânica, como minérios de ferro, uma vez que suporta grandes forças de compressão sem sofrer desgastes excessivos.

Figura 19: Britagem Semi Móvel



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Na britagem secundária e terciária, os britadores cônicos e de impacto são comumente utilizados. O britador cônico é ideal para a produção de fragmentos de granulometria mais uniforme, aplicando forças de compressão contínuas, o que resulta em um produto mais adequado para a moagem posterior. Esse tipo de britador é amplamente utilizado no beneficiamento de minérios metálicos, como o ferro, onde a demanda por uma redução mais controlada do tamanho do material é essencial para garantir a eficiência das etapas subsequentes (CHAVES, 2021). Por outro lado, os britadores de impacto, que aplicam forças de alta velocidade e impacto sobre o minério, são mais indicados para materiais menos abrasivos e podem gerar partículas com alta cubicidade, úteis em aplicações específicas.

Outro aspecto importante da britagem, é a escolha adequada dos equipamentos e sua configuração para lidar com a variabilidade do minério. A dureza, a abrasividade e a tenacidade do minério influenciam diretamente no tipo de britador a ser utilizado e nos parâmetros de operação, como a taxa de alimentação e a abertura do britador. Para minérios de ferro, por exemplo, o desafio está em lidar com materiais altamente abrasivos, o que requer o uso de materiais resistentes ao desgaste nos componentes dos britadores, como revestimentos de aço manganês (CHAVES, 2021). A automação do processo de britagem tem sido uma tendência crescente, com o uso de sensores que monitoram continuamente o desgaste das partes móveis e ajustam automaticamente os parâmetros operacionais para otimizar a eficiência energética e minimizar o tempo de parada.

A eficiência da britagem está diretamente relacionada ao controle da granulometria do material. Um processo de britagem mal dimensionado pode resultar em partículas muito grandes, que sobrecarregam os moinhos na etapa de moagem, ou partículas muito finas, que podem se perder no processo de peneiramento ou flotação (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). A correta combinação entre os diferentes estágios de britagem e a escolha de equipamentos apropriados para cada tipo de minério são fatores determinantes para a eficiência global do processo de beneficiamento.

Além disso, o desgaste dos britadores e o consumo energético são fatores críticos que devem ser considerados no planejamento da planta de britagem. Equipamentos sobredimensionados ou subutilizados podem resultar em consumo excessivo de energia e redução da vida útil dos componentes móveis. O uso de tecnologias modernas, como sistemas de controle automatizado, pode contribuir para otimizar a operação, garantindo maior precisão na quebra do material e redução dos custos operacionais (CHAVES, 2022). A britagem, portanto, é uma etapa crítica e estratégica para garantir a produtividade e a eficiência das plantas de beneficiamento mineral

#### **3.3.4. Peneiramento**

O peneiramento é uma etapa subsequente à britagem e tem como principal objetivo a classificação dos materiais com base no tamanho das partículas. O processo utiliza peneiras com diferentes aberturas, que permitem a separação do material britado em frações de granulometria distinta. As peneiras vibratórias são as mais utilizadas nas plantas de

beneficiamento devido à sua alta eficiência e versatilidade, sendo capazes de operar em diferentes escalas de produção e tipos de minério. A escolha do tipo de peneira depende de vários fatores, como a granulometria do material a ser processado, a quantidade de umidade e as características físicas do minério (CHAVES, 2021).

As peneiras, ver Figura 20, podem ser classificadas em dois tipos principais: peneiras de movimento linear e de movimento circular. As primeiras são indicadas para materiais mais grossos e secos, enquanto as de movimento circular são mais eficientes para a separação de partículas finas ou materiais com maior teor de umidade. Em plantas de beneficiamento de minério de ferro, por exemplo, o uso de peneiras de alta frequência tem se mostrado uma solução eficaz para a classificação de partículas finas, permitindo a recuperação de partículas com teor de ferro que seriam descartadas em sistemas convencionais (CHAVES, 2021). Essas peneiras possuem uma taxa de vibração elevada, o que impede o entupimento das malhas e aumenta a precisão na classificação.

Figura 20: Peneiras – Sistema de Classificação



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

O peneiramento eficiente exige um controle rigoroso das condições operacionais, como a taxa de alimentação e a inclinação da peneira. Um excesso de material alimentado pode sobrecarregar a peneira, reduzindo sua eficiência de separação e aumentando o desgaste das telas. Da mesma forma, a presença de umidade excessiva no minério pode causar o entupimento

das malhas, resultando em perdas de eficiência e na necessidade de intervenções frequentes para limpeza e manutenção (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Para mitigar esses problemas, muitas plantas adotam práticas de desaguamento prévio do material ou a utilização de peneiras com telas autolimpantes, que possuem estruturas flexíveis capazes de remover materiais aderentes de forma automática.

Uma vantagem do peneiramento é a possibilidade de reutilização dos finos no processo de beneficiamento. Em algumas plantas, as partículas finas geradas no peneiramento são direcionadas para processos de concentração, como a flotação ou separação magnética, onde podem ser recuperadas para aumentar o rendimento global da planta (CHAVES, 2021). reduz a geração de rejeitos e maximiza o aproveitamento do recurso mineral. Além disso, o peneiramento adequado contribui para a qualidade do produto final, permitindo que o material classificado atenda às especificações granulométricas exigidas pelo mercado.

A automação também tem revolucionado o peneiramento, permitindo ajustes em tempo real nas condições operacionais com base no feedback de sensores instalados nas peneiras. Esses sensores monitoram parâmetros como a vibração, o desgaste das telas e a eficiência de separação, otimizando a operação e reduzindo os custos de manutenção. Essa inovação é especialmente útil em plantas de beneficiamento de grande escala, onde o controle preciso da granulometria é fundamental para garantir a eficiência das etapas subsequentes e a qualidade do produto final (CHAVES, 2022).

### **3.3.5. Moagem**

A moagem é uma das etapas mais críticas do processamento mineral, responsável pela fragmentação fina das partículas de minério após a britagem, visando a liberação dos minerais de interesse. O processo envolve a aplicação de forças mecânicas sobre o minério em equipamentos como moinhos de bolas, moinhos de barras e moinhos SAG (semi-autógenos). A moagem fina é essencial para reduzir as partículas a tamanhos microscópicos, permitindo que os minerais sejam liberados de sua matriz gangue e fiquem disponíveis para os processos de concentração. Esse processo exige grande quantidade de energia, sendo uma das fases de maior custo energético nas plantas de beneficiamento mineral (CHAVES & PERES, 2021).

Existem diferentes tipos de moagem, sendo a mais comum a moagem a seco e a úmida. A moagem úmida é frequentemente utilizada em processos que envolvem minerais de ferro e cobre, pois o uso de água facilita o transporte das partículas dentro do moinho e evita a geração de poeira. Além disso, o meio líquido ajuda a dispersar o material moído, prevenindo a re-aglomeração de partículas finas. Já a moagem a seco é aplicada em minérios que não reagem bem com água, ou em plantas onde o consumo de água precisa ser reduzido (CHAVES, 2021). A escolha entre moagem úmida ou seca depende de fatores como as propriedades do minério e o custo operacional.

O tipo de moinho utilizado também varia conforme a granulometria desejada e as características do minério. Moinhos de bolas, por exemplo, são usados para moagens finas, onde as partículas precisam ser reduzidas a tamanhos menores que 100 micrômetros. Já os moinhos SAG, que utilizam fragmentos grandes do próprio minério como meio moedor, são empregados em operações que requerem alta capacidade de processamento e redução de custos com corpos moedores (CHAVES & PERES, 2021). No entanto, esses equipamentos exigem um controle rigoroso dos parâmetros de operação, como a taxa de alimentação e a velocidade de rotação, para garantir eficiência e evitar desgastes excessivos.

A moagem eficiente depende de uma série de fatores, incluindo a distribuição de tamanho do material alimentado, a carga de corpos moedores e a rotação do moinho. Para minérios de ferro, é comum o uso de moinhos de bolas com carga controlada de bolas de aço, que proporcionam uma quebra controlada do minério e permitem um controle rigoroso sobre a granulometria final. Um desafio comum nas operações de moagem é o controle do consumo de energia, que pode representar até 50% do custo total do processo de beneficiamento. Portanto, otimizar as condições de operação dos moinhos é crucial para garantir a viabilidade econômica da planta (VALADÃO & ARAÚJO, 2012).

O controle granulométrico na moagem é uma questão estratégica, especialmente em processos subsequentes, como flotação e separação magnética, que dependem de uma distribuição de tamanho de partículas adequada para garantir a eficiência da separação. A moagem inadequada, com partículas muito finas ou muito grossas, pode comprometer a recuperação dos minerais valiosos, resultando em perdas no processo (CHAVES, 2021). Assim, tecnologias como

classificadores de alta eficiência e sensores de controle de granulometria têm sido incorporadas às plantas modernas para otimizar a operação da moagem.

A automação da moagem tem sido cada vez mais aplicada nas plantas de beneficiamento, permitindo ajustes em tempo real das variáveis operacionais com base em dados coletados de sensores instalados nos moinhos. Esses sistemas automatizados monitoram parâmetros como a carga de material, a densidade da polpa e a energia consumida, otimizando a eficiência do processo e reduzindo o desgaste dos corpos moedores. Com isso, a automação não só melhora a produtividade, mas também reduz os custos de manutenção e operação, além de garantir maior controle sobre a qualidade do produto final (CHAVES, 2021).

### **3.3.6. Classificação**

A classificação mineral é uma etapa essencial para a separação das partículas finas e grossas geradas durante o processo de moagem. Essa separação granulométrica é realizada por meio de equipamentos como ciclones, hidrociclones e classificadores espirais, que utilizam princípios de sedimentação ou centrífugos para separar as partículas com base em sua densidade e tamanho. A classificação eficiente é crucial para garantir que as partículas finas sejam direcionadas para os processos de concentração, como a flotação, enquanto as partículas maiores podem ser recirculadas para a moagem, evitando desperdícios e melhorando a eficiência do circuito (CHAVES, 2022).

O principal objetivo da classificação é garantir que o material esteja dentro das especificações granulométricas adequadas para as etapas subsequentes de beneficiamento. Equipamentos como hidrociclones são amplamente utilizados para a separação de partículas finas, com tamanhos variando de 10 a 100 micrômetros, enquanto classificadores espirais são mais apropriados para a separação de materiais mais grosseiros (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). O controle da granulometria é fundamental em operações de concentração, como a flotação e a separação magnética, pois garante que as partículas estejam no tamanho adequado para interagir com os reagentes e campos magnéticos.

O princípio de funcionamento dos hidrociclones se baseia na aplicação de uma força centrífuga que separa as partículas de acordo com sua densidade e tamanho. Partículas mais pesadas são

forçadas para as paredes do equipamento, sendo direcionadas para o underflow, enquanto partículas leves e finas são carregadas pelo fluxo de água para o overflow. Esse processo permite uma separação precisa das partículas, garantindo maior eficiência nas etapas subsequentes de concentração. No entanto, a eficiência dos hidrociclones pode ser afetada pela densidade da polpa e pela taxa de alimentação, sendo necessário um controle rigoroso dessas variáveis para garantir uma operação eficiente (CHAVES, 2021).

A classificação também é um passo importante para o controle do consumo energético nas plantas de beneficiamento. A recirculação de partículas maiores para a moagem evita o desperdício de energia, uma vez que essas partículas ainda precisam ser reduzidas em tamanho. Além disso, a correta separação de partículas finas permite que a flotação e outros processos de concentração operem com maior eficiência, resultando em uma maior recuperação dos minerais valiosos. A automação dos sistemas de classificação, com o uso de sensores para monitorar o tamanho das partículas e a densidade da polpa, tem se mostrado uma solução eficaz para otimizar o processo e reduzir os custos operacionais (CHAVES & PERES, 2021).

Em plantas modernas de beneficiamento, a integração dos processos de classificação com as etapas de moagem tem sido cada vez mais comum, com circuitos fechados que permitem a recirculação contínua de partículas fora da especificação granulométrica. Isso garante que o material enviado para as etapas de concentração esteja no tamanho adequado, aumentando a recuperação de minerais e a eficiência do processo global. Tecnologias avançadas de controle de processos, como classificadores automáticos e hidrociclones otimizados, têm sido implementadas para melhorar ainda mais a precisão e a eficiência da classificação (CHAVES, 2021).

### **3.3.7. Flotação e concentração magnética**

A flotação é um dos métodos mais importantes para a concentração de minérios de ferro, sendo utilizada especialmente quando o minério apresenta impurezas que dificultam a obtenção de um concentrado de alta qualidade. O processo de flotação se baseia na diferença de propriedades superficiais dos minerais, onde partículas hidrofóbicas são separadas de partículas hidrofílicas por meio da formação de bolhas de ar em uma suspensão aquosa (CHAVES, 2022).

O uso de reagentes químicos, como coletores e espumantes, é fundamental para promover a adesão das partículas desejadas às bolhas de ar.

Os coletores são substâncias que aumentam a hidrofobicidade dos minerais de interesse, enquanto os espumantes formam uma espuma estável que retém as bolhas de ar, permitindo a separação dos minerais. A escolha dos reagentes deve ser cuidadosamente feita, considerando a mineralogia do minério e os objetivos do processo (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). controle rigoroso das condições operacionais, como pH e temperatura, também é necessário para maximizar a eficiência do processo de flotação.

A flotação pode ser realizada em células de flotação, que variam em design e capacidade. Células de flotação mecânicas e colunas de flotação são comumente utilizadas, cada uma com suas vantagens e desvantagens. As células mecânicas proporcionam uma mistura mais intensa, enquanto as colunas podem oferecer melhores taxas de recuperação em determinadas condições (CHAVES, 2022). A escolha do tipo de célula deve ser feita com base nas características específicas do minério e nas condições operacionais desejadas.

Após a flotação, a separação magnética é frequentemente utilizada como um método complementar para a concentração de minérios de ferro. Esse processo aproveita as diferenças nas propriedades magnéticas dos minerais, permitindo a separação dos minerais magnéticos, como a magnetita, dos não magnéticos (CHAVES, 2022). A separação magnética pode ser realizada em equipamentos como separadores magnéticos de alta intensidade, que oferecem uma recuperação eficiente em minérios que apresentam uma concentração significativa de minerais magnéticos.

A combinação de flotação e separação magnética em um circuito de beneficiamento pode resultar em uma eficiência significativa na recuperação do ferro e na melhoria da qualidade do concentrado. A integração dessas técnicas é especialmente benéfica em minérios complexos, onde a presença de vários minerais pode dificultar a obtenção de um produto de alta pureza (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Portanto, o uso combinado dessas tecnologias pode otimizar o processo de beneficiamento, maximizando a recuperação e minimizando os custos.

Por fim, a aplicação de tecnologias emergentes, como a flotação em microescala e a separação magnética de alta intensidade, está se tornando cada vez mais comum no beneficiamento de minérios de ferro. Essas inovações prometem aumentar ainda mais a eficiência dos processos, permitindo a recuperação de partículas menores e a melhoria da qualidade do concentrado (CHAVES, 2022). O contínuo avanço tecnológico nesse campo é essencial para atender às crescentes demandas por minerais de alta qualidade e de baixo impacto ambiental.

### **3.3.8. Estocagem e expedição**

A estocagem e expedição de minério de ferro são etapas críticas que garantem a continuidade das operações e a eficiência do sistema logístico. A estocagem envolve o armazenamento do minério, enquanto a expedição refere-se ao envio do produto final para os clientes. A gestão eficaz dessas etapas é vital para evitar perdas, otimizar o uso do espaço e garantir a qualidade do minério (CHAVES, 2023).

Os depósitos de estocagem devem ser projetados para acomodar grandes volumes de minério, considerando a granulometria e as características do material, ver Figura 21. A escolha do método de estocagem — seja em pilhas ou em silos — depende das características do minério e das condições operacionais (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). Pilhas de estocagem, por exemplo, oferecem flexibilidade, mas requerem cuidados especiais para evitar a contaminação e a degradação do material. O controle do teor de umidade e a prevenção da formação de polvo são essenciais para garantir a qualidade do minério durante o armazenamento.

Figura 21: Pátio de Estocagem de Minério de Ferro



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Durante a estocagem, o monitoramento das condições do material é fundamental. Técnicas como a análise de temperatura e umidade do estoque podem fornecer informações valiosas sobre a integridade do minério, permitindo intervenções proativas quando necessário (CHAVES, 2023). O uso de tecnologias avançadas, como sensores e sistemas de automação, pode facilitar esse monitoramento, garantindo que o minério permaneça em condições ideais.

A expedição do minério de ferro envolve o planejamento cuidadoso do transporte até os clientes, considerando fatores como custo, tempo e segurança. O carregamento do minério deve ser realizado de forma eficiente, utilizando equipamentos como carregadores e guas, para minimizar o tempo de inatividade e maximizar a produtividade (VALADÃO & ARAÚJO, 2012). O controle da qualidade do produto durante a expedição é igualmente importante, pois a entrega de um concentrado de alta qualidade é essencial para manter a satisfação do cliente e a reputação da empresa.

Os sistemas logísticos também desempenham um papel fundamental na expedição. A escolha do modal de transporte, seja ferroviário, rodoviário ou marítimo, deve ser feita com base nas características do mercado e na localização dos clientes (CHAVES, 2022). A gestão eficaz do transporte pode reduzir custos e melhorar a eficiência da cadeia de suprimentos, contribuindo para a competitividade da empresa.

Além disso, a sustentabilidade é um aspecto crescente nas operações de estocagem e expedição. A implementação de práticas sustentáveis, como a redução de emissões de carbono e o uso de materiais recicláveis para embalagem, pode agregar valor às operações e atender às crescentes exigências dos consumidores por práticas responsáveis (CHAVES, 2023). A adoção de tecnologias verdes e soluções inovadoras pode não apenas beneficiar o meio ambiente, mas também gerar economia de custos a longo prazo.

Por fim, o gerenciamento integrado da estocagem e expedição é essencial para garantir a eficiência operacional. A coordenação entre as diferentes etapas do processo logístico, desde o recebimento do minério até a entrega ao cliente, é fundamental para maximizar a eficiência e minimizar custos. O uso de sistemas de gestão integrada pode facilitar essa coordenação, permitindo uma visão abrangente das operações e possibilitando a tomada de decisões mais informadas e estratégicas (VALADÃO & ARAÚJO, 2012).

### 3.4. Confiabilidade de ativos

#### 3.4.1. Confiabilidade na indústria

A confiabilidade na indústria é entendida como a capacidade de um sistema ou componente realizar suas funções sem falhas, mantendo-se operacional sob condições específicas. Essencialmente, trata-se da habilidade de prever e prevenir falhas em ativos industriais (DOUGLAS, 2019).

Diversas metodologias são empregadas na gestão da confiabilidade e ativos industriais. A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) e a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) são abordagens amplamente utilizadas para identificar e mitigar possíveis falhas nos ativos (NAKAJIMA, 2017).

A gestão de ativos e confiabilidade passou por uma evolução notável na indústria, ver Figura 22, migrando de estratégias predominantemente corretivas para práticas mais proativas. A análise preditiva e preventiva tornou-se proeminente, refletindo uma busca por eficiência operacional e sustentabilidade (MOUBRAY, 2018).

Figura 22: Sistema de Gestão ISO 55000



Fonte: Santos et al (2016)

A gestão da confiabilidade é intrinsecamente complexa, devido à variedade de ativos industriais, suas interconexões e ao ambiente operacional dinâmico. A complexidade reside na necessidade de equilibrar custos, desempenho e riscos ao longo do ciclo de vida dos ativos (MOBLEY, 2017).

Os cálculos de confiabilidade envolvem a aplicação de modelos estatísticos para avaliar a probabilidade de falha de um sistema ao longo do tempo. Técnicas como a Distribuição Exponencial e a Análise de Sobrevivência são utilizadas para estimar o desempenho dos ativos (HOLLNAGEL, 2016).

A confiabilidade é fundamental para otimizar a disponibilidade operacional e reduzir custos associados a paradas não programadas. A gestão eficaz da confiabilidade resulta em benefícios tangíveis, como aumento da vida útil dos ativos, redução de custos de manutenção e melhoria da segurança operacional (DOUGLAS, 2019).

Desafios na gestão da confiabilidade incluem a falta de dados históricos confiáveis, a incerteza na predição de falhas e a adaptação a ambientes operacionais dinâmicos. Superar esses desafios requer estratégias robustas de coleta de dados e o desenvolvimento contínuo de técnicas analíticas avançadas (KLEYNER, 2019).

Setores industriais como petróleo e gás, aviação e energia nuclear são reconhecidos como referências na implementação bem-sucedida de práticas de confiabilidade. Esses segmentos destacam-se por suas abordagens avançadas na gestão de ativos, evidenciando a aplicabilidade generalizada dos princípios de confiabilidade (SMITH, 2016).

### **3.4.2. Confiabilidade na mineração**

A gestão de ativos e confiabilidade em usinas de beneficiamento mineral é um conjunto de práticas e estratégias voltadas para assegurar a operacionalidade contínua dos equipamentos e sistemas envolvidos na extração e processamento de minerais. Essencialmente, busca-se minimizar falhas e otimizar o desempenho operacional (DOUGLAS, 2019).

Diversas metodologias são empregadas na gestão de ativos em usinas de beneficiamento mineral. A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) e a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) são metodologias fundamentais, proporcionando uma abordagem sistemática para identificar e mitigar potenciais falhas nos ativos (NAKAJIMA, 2017).

A evolução da gestão de ativos e confiabilidade nas usinas de beneficiamento mineral é evidente na transição de abordagens reativas para estratégias mais proativas. A indústria tem adotado análises preditivas e preventivas, buscando antecipar falhas e aumentar a eficiência operacional (MOUBRAY, 2018).

A complexidade inerente à gestão de ativos em usinas de beneficiamento mineral é influenciada pela diversidade de equipamentos, variabilidade mineralógica e exigências operacionais. A necessidade de equilibrar custos, desempenho e riscos ao longo do ciclo de vida dos ativos adiciona camadas de complexidade ao processo (MOBLEY, 2017).

Os cálculos de confiabilidade em usinas de beneficiamento mineral envolvem a aplicação de modelos estatísticos. Técnicas como análise de Weibull e Distribuição Exponencial são comumente utilizadas para estimar a probabilidade de falha e a vida útil dos ativos (HOLLNAGEL, 2016).

A importância da confiabilidade nas usinas de beneficiamento mineral é crucial para a continuidade das operações. Uma gestão eficaz proporciona benefícios como aumento da vida útil dos equipamentos, redução de paradas não programadas e otimização dos processos produtivos (DOUGLAS, 2019).

Desafios na gestão de ativos incluem a variabilidade mineralógica, que demanda estratégias de manutenção específicas, e a necessidade de lidar com ambientes operacionais adversos. A coleta de dados confiáveis e a adaptação a ambientes dinâmicos representam desafios significativos (KLEYNER, 2019).

Setores como petróleo e gás, aviação e energia nuclear são reconhecidos como referências em confiabilidade industrial. Esses segmentos implementam práticas avançadas de gestão de

ativos, evidenciando a aplicabilidade generalizada dos princípios de confiabilidade (SMITH, 2016).

### 3.4.3. Análise de capacidade de processo

Na indústria de forma geral, a análise de capacidade de processo e o desvio padrão são ferramentas frequentemente utilizadas para avaliar a qualidade do desempenho de um processo. Para isso, é realizada uma série de medições de uma característica específica de um parâmetro do processo. Posteriormente, calcula-se a média e o desvio padrão dessas medições e os compara com os limites de especificação estabelecidos. O desvio padrão representa uma unidade padrão de variação e é a medida mais utilizada em estatística para avaliar a variabilidade dos dados (PALADY, 2011).

A fórmula para o desvio padrão é dada por:

$$\sigma = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{\sqrt{(n - 1)}}$$

onde:

$\sigma$  é o desvio padrão;

$X_i$  representa cada valor observado;

$\bar{X}$  é a média das observações;

$n$  é o número total de observações.

Essa métrica permite avaliar se o processo está funcionando dentro dos limites esperados de variação, auxiliando na tomada de decisões para melhorias e controle de qualidade.

Para análise da capacidade de processos são utilizados três índices, sendo: Cp, Cpk e Cpm. O índice de capacidade de processo Cp representa a proporção entre a variação permitida pelas especificações e a variação observada nas medições de um projeto ou processo. Esse índice, no entanto, não leva em consideração a média das medições nem o alvo especificado, o que pode ser problemático: é possível obter um valor de Cp aceitável mesmo quando a maioria das medições está fora dos limites de especificação (PALADY, 2011).

O Cpk tem por finalidade solucionar limitação do Cp. Assim como Cp, o Cpk relaciona a variação permitida pela especificação com a variação das medições. No entanto, a fórmula do Cpk também considera a posição da média das medições em relação aos limites de especificação. Essa inclusão da média assegura que um índice de capacidade aceitável só possa ser obtido se as medições estiverem dentro dos limites de especificação. Ainda assim, o Cpk não relaciona a média das medições diretamente com o alvo de especificação, permitindo, por exemplo, que um valor de Cpk satisfatório seja alcançado mesmo que as medições estejam concentradas próximas a um dos limites, afastando-se do alvo ideal (PALADY, 2011).

Para avaliar a capacidade do processo considerando a proximidade com o alvo de especificação, utiliza-se o índice Cpm. Esse índice compara a variação permitida pelos limites de especificação com a variação observada nas medições e, além disso, considera a localização da média em relação à meta de especificação, proporcionando uma visão mais completa da adequação do processo (PALADY, 2011).

As fórmulas para Cp, Cpk e Com são dadas por:

$$Cp = \frac{(LSE - LIE)}{6(\sigma)}$$

$$Cpk = \frac{Z \text{ mínimo}}{3}$$

$$Cpm = \frac{(LSE - LIE)}{\sqrt[6]{(\rho^2 + (\bar{X} - M))^2}}$$

$$Z (\text{Espec. Superior}) = \frac{(LSE - X)}{\sigma}$$

$$Z (\text{Espec. Inferior}) = \frac{(LSE - X)}{\sigma}$$

Onde:

*LSE* é o Limite Superior de Especificação

*LIE* é o Limite Inferior de Especificação

*Z* é a distância mínima entre limites e a média calculada a partir das medições

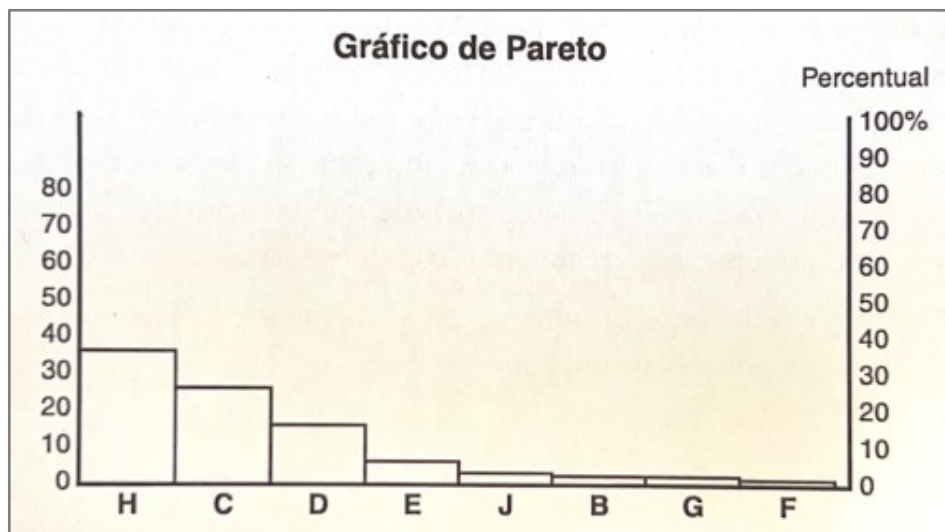
*M* é a Meta de Especificação

#### 3.4.4. Análise da causa e modos de falha

Para o processo de análise de causa de modos de falha, temos diversas ferramentas de suporte disponíveis na indústria. De forma geral as mais utilizadas são: Gráfico de Pareto, Matriz de Entrada, Diagrama de Espinha de Peixe, Matriz de Classificação, Gráficos de Dispersão, Gráfico de Área, Análise da Árvore de Falhas e outros. A seguir um breve detalhamento das ferramentas mais utilizadas.

Gráfico de Pareto, ver Figura 23, é utilizado para identificar as causas principais que levam a um modo de falha. A análise de Pareto permite avaliar dados de projetos similares, organizando informações obtidas em diários, formulários de inspeção ou relatórios de garantia. O princípio de Pareto sugere que apenas algumas causas identificadas serão responsáveis pela maior parte dos modos de falha potenciais. Essas causas, chamadas de causas principais, devem ser registradas no formulário do FMEA. O exemplo a seguir ilustra a construção de um gráfico de Pareto a partir de dados de registros (PALADY, 2011).

Figura 23: Gráfico de Pareto



Fonte: Palady (2011)

Matriz de Entrada, ver Figura 24, facilita a colaboração entre indivíduos localizados em diferentes instalações, cidades, estados ou países. Esse recurso tem se mostrado extremamente útil para empresas que possuem centros de engenharia e operações de manufatura em localidades distintas. A matriz se revela mais eficiente e eficaz tanto em termos de economia de tempo quanto na precisão das informações extraídas da equipe de análise de falhas e efeitos (PALADY, 2011).

Figura 24: Ferramenta Matriz de Entrada

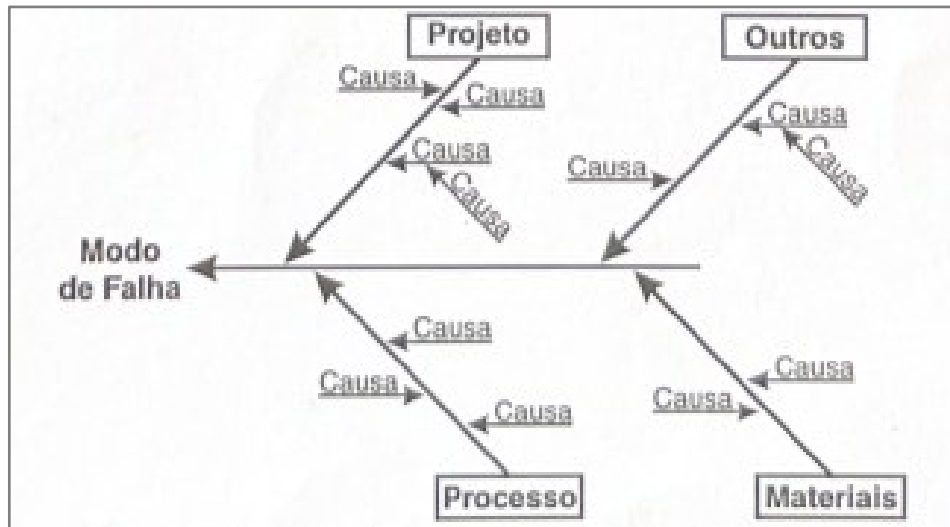
Modos de Falha	Efeitos	Severidade	Causa	Ocorrência	Deteção
<b>1</b>	<b>a</b>	#		#	
	<b>b</b>	#		#	
<b>2</b>	<b>a</b>	#		#	
<b>3</b>	<b>a</b>	#		#	
	<b>b</b>	#		#	
	<b>c</b>	#		#	

↙ Coordenadas X, Y ↘

Fonte: Palady (2011)

Diagrama de Espinha de Peixe, ver Figura 25, conhecido também como Diagrama de Causa e Efeito ou Diagrama de Ishikawa, o Diagrama de Espinha de Peixe é empregado para organizar as causas identificadas em discussões abertas durante reuniões. Normalmente, as discussões no processo de análise são menos estruturadas e mais espontâneas. Um facilitador utiliza o diagrama para estruturar as causas associadas a cada modo de falha identificado na reunião (PALADY, 2011).

Figura 25: Diagrama Espinha de Peixe



Fonte: Palady (2011)

Matriz de Classificação, ver Figura 26, possui três objetivos principais, sendo: obter uma classificação representativa de uma equipe, identificar divergências extremas nas classificações dos membros e priorizar itens classificando-os em ordem decrescente. Esse método é considerado mais preciso do que a votação ponderada ou o critério de decisão pelos profissionais de maior salário, além de ser mais econômico e eficiente em comparação ao consenso (PALADY, 2011).

Figura 26: Ferramenta Matriz de Classificação

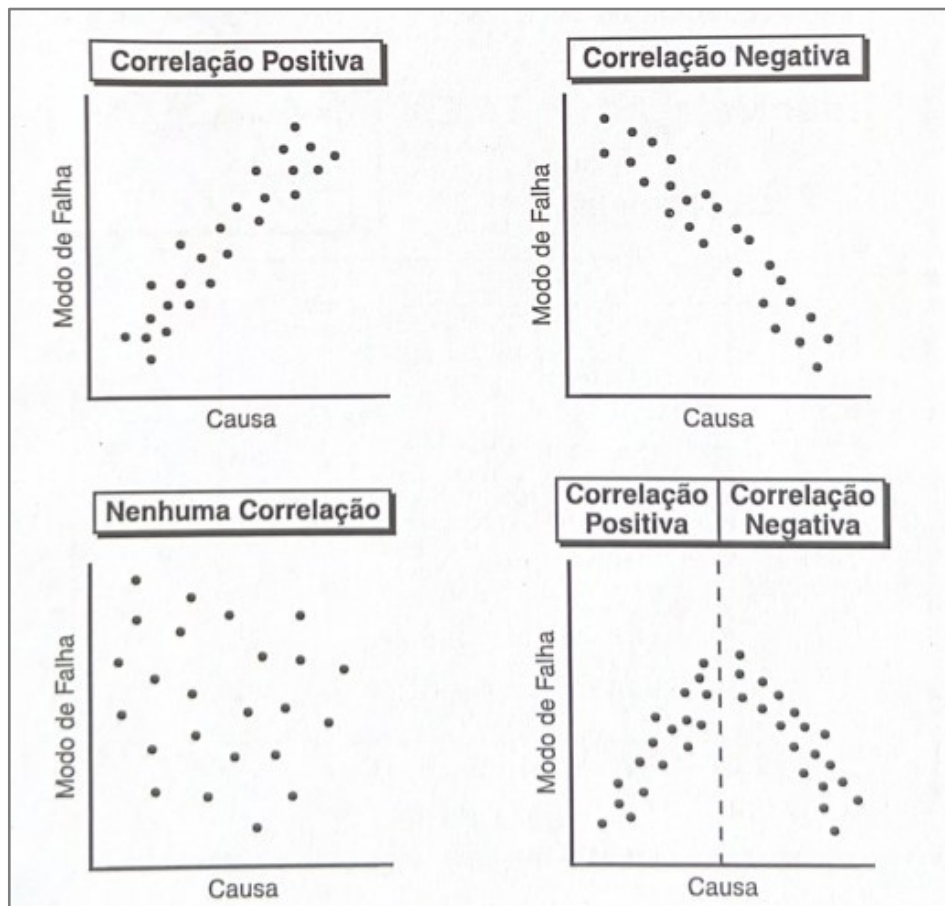
Modos de Falha	Efeitos	Severidade	Causa	Ocorrência	Deteccção
<b>1</b>	<b>a</b>	#		#	
	<b>b</b>	#		#	
<b>2</b>	<b>a</b>	#		#	
<b>3</b>	<b>a</b>	#		#	
	<b>b</b>	#		#	
	<b>c</b>	#		#	

↙ Coordenadas X, Y ↘

Fonte: Palady (2011)

Gráficos de Dispersão, ver Figura 27, é uma ferramenta gráfica simples usada para investigar a correlação entre um modo de falha e uma possível causa. Este recurso é aplicado quando a equipe não possui consenso ou dúvida sobre se uma causa específica pode resultar em um modo de falha. Geralmente, as divergências ou "extremos" identificados na Matriz de Classificação que não são resolvidos por meio de discussões podem ser esclarecidos com o auxílio de um gráfico de dispersão (PALADY, 2011).

Figura 27: Ferramenta Gráfico de Dispersão

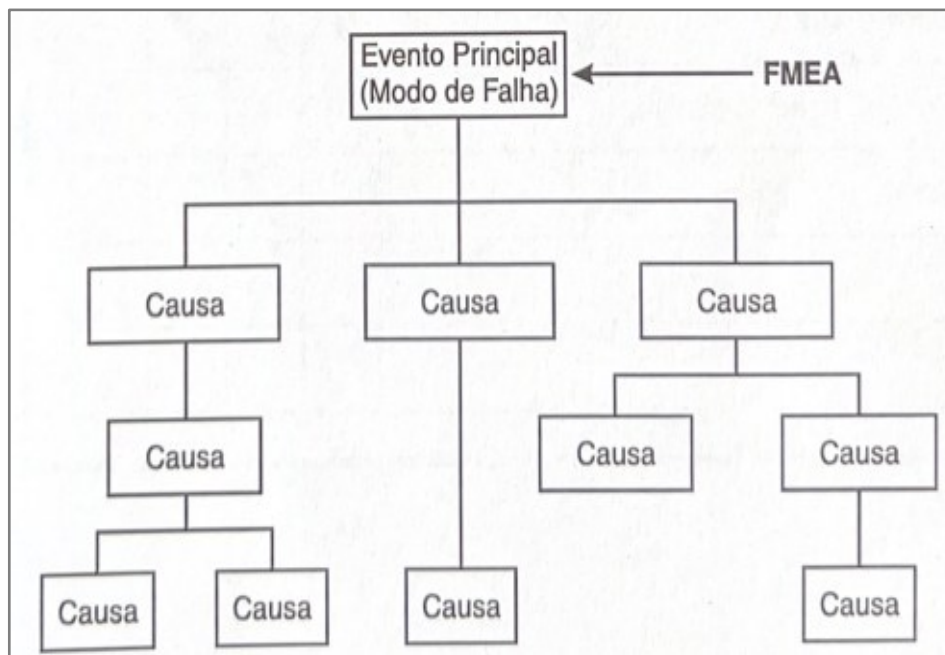


Fonte: Palady (2011)

Gráfico de Área, é uma ferramenta recente que classifica os modos de falha identificados em três categorias: Alta Prioridade, Prioridade Média e Baixa Prioridade. A vantagem dessa abordagem em relação aos métodos tradicionais de avaliação de risco é que o gráfico de área considera apenas as classificações de severidade e ocorrência, oferecendo uma avaliação proativa do modo de falha (PALADY, 2011).

Análise da Árvore de Falhas, ver Figura 28, é uma ferramenta gráfica que permite uma avaliação aprofundada de um único evento de falha ou modo de falha, denominado "evento principal". Árvores de falhas podem ser construídas para modos específicos de alta severidade ou ocorrência identificados na análise. A construção inicia-se com a identificação do evento principal, seguido das causas relacionadas, que são conectadas por linhas. Se essas causas são resultado de causas mais fundamentais, estas são dispostas em níveis subsequentes, sempre conectadas. A árvore de falhas pode incluir diversos níveis de causas que levam ao evento principal. Além disso, a lógica da combinação das causas para gerar o evento principal é representada na árvore, sendo útil para prever ou estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha ou de suas causas (PALADY, 2011).

Figura 28: Árvore de Falhas



Fonte: Palady (2011)

### **3.5. Condições de operação e processo**

#### **3.5.1. Variações climáticas**

As variações climáticas no processo de beneficiamento do minério de ferro referem-se às influências das condições meteorológicas nas operações de extração, processamento e transporte desse recurso mineral. Tais variações incluem mudanças de temperatura, umidade e eventos climáticos, impactando diretamente a eficiência e a confiabilidade das etapas de beneficiamento (SILVA et al., 2018).

Diversas metodologias são empregadas para analisar e mitigar os efeitos das variações climáticas no beneficiamento do minério de ferro. A modelagem climática, o monitoramento meteorológico contínuo e a aplicação de técnicas estatísticas são métodos utilizados para compreender e antecipar as variações climáticas (SANTOS et al., 2020).

A consideração das variações climáticas no beneficiamento do minério de ferro tem evoluído, acompanhando a crescente conscientização ambiental e a busca por práticas sustentáveis na indústria. Novas abordagens integradas têm emergido para lidar com os desafios climáticos, visando reduzir impactos negativos nas operações (ALMEIDA, 2019).

A complexidade das variações climáticas reside na imprevisibilidade e intensidade desses fenômenos. Mudanças sazonais, eventos extremos e padrões climáticos irregulares podem afetar a qualidade do minério, aumentar o desgaste de equipamentos e impactar os custos operacionais, exigindo adaptação contínua (SANTOS et al., 2020).

A consideração das variações climáticas é vital para garantir a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental no beneficiamento de minério de ferro. Estratégias adaptativas permitem mitigar riscos de paralisações não programadas, reduzir perdas de produção e otimizar o consumo de recursos naturais (ALMEIDA, 2019).

Desafios associados às variações climáticas incluem a necessidade de implementar infraestrutura resistente a condições adversas, a gestão de estoques em períodos de clima desfavorável e a mitigação dos impactos ambientais. A gestão eficaz desses desafios requer a integração de dados climáticos em estratégias operacionais (Silva et al., 2018).

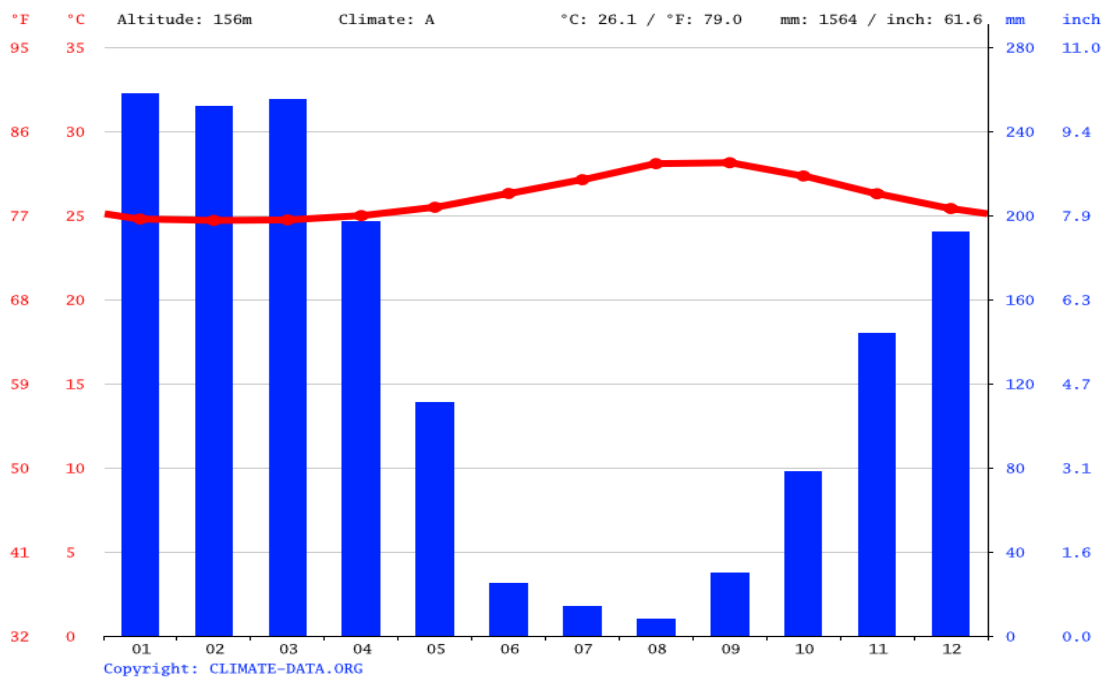
Setores da indústria mineral, especialmente em regiões climáticas extremas, destacam-se como referências em lidar com variações climáticas. Empresas que implementam práticas avançadas de monitoramento climático e adaptação operacional servem como modelos para mitigação de impactos nas operações de beneficiamento de minério de ferro (SANTOS et al., 2020).

### **3.5.2. Chuva**

A chuva no processo de beneficiamento do minério de ferro refere-se à presença e intensidade de precipitação pluviométrica durante as diversas etapas de extração, processamento e transporte desse recurso mineral. As condições climáticas associadas à chuva podem impactar significativamente as operações e a qualidade do produto final (SILVA et al., 2018).

A pluviometria, medida da quantidade de precipitação em determinada região e período, desempenha papel crucial na análise do impacto da chuva no beneficiamento do minério de ferro. O monitoramento da distribuição e intensidade das chuvas, ver Figura 29, é fundamental para compreender como essas variáveis climáticas afetam as operações minerárias (ALMEIDA, 2019).

Figura 29: Pluviometria cidade Parauapebas



Fonte: Climate Data Org (*online*)

A consideração da chuva no beneficiamento de minério de ferro tem evoluído à medida que a indústria busca estratégias mais resilientes e sustentáveis. Estudos mais recentes enfocam a integração de dados pluviométricos em modelos operacionais, permitindo uma abordagem mais preditiva e adaptativa (SANTOS et al., 2020).

A complexidade associada à chuva no processo de beneficiamento reside na variabilidade sazonal e regional das chuvas, bem como na necessidade de adaptação às condições climáticas extremas. A gestão eficaz requer não apenas infraestrutura resistente, mas também estratégias operacionais que considerem a sazonalidade das chuvas (SILVA et al., 2018).

A importância de compreender e gerenciar a chuva no beneficiamento do minério de ferro está na preservação da qualidade do produto final e na prevenção de impactos ambientais adversos. A chuva influencia diretamente a eficiência operacional, a segurança do trabalho e os custos associados à logística e manutenção (ALMEIDA, 2019).

Desafios enfrentados incluem o aumento do desgaste de equipamentos devido à exposição à umidade, a necessidade de adaptar processos de transporte e estocagem durante períodos chuvosos, e a gestão de riscos associados a eventos climáticos extremos. Estratégias eficazes

demandam uma abordagem integrada e adaptativa às condições climáticas variáveis (SANTOS et al., 2020).

Setores referência em gestão climática são aqueles que implementam práticas avançadas para lidar com os desafios da chuva no beneficiamento de minério de ferro. Empresas que integram previsões meteorológicas em seus processos decisórios e implementam medidas proativas de adaptação são consideradas referência na gestão climática eficiente (SILVA et al., 2018).

### **3.5.3. Umidade relativa**

A umidade relativa no processo de beneficiamento do minério de ferro refere-se à quantidade de vapor d'água presente no ar em relação à máxima quantidade possível para a temperatura e pressão específicas. Trata-se de um fator climático crítico que pode influenciar as etapas de extração, processamento e transporte do minério (SILVA et al., 2018).

Diversas metodologias são empregadas para controlar e monitorar a umidade relativa durante o beneficiamento do minério de ferro. Técnicas de sensoriamento remoto, instrumentação específica em locais-chave e a aplicação de modelos preditivos são métodos essenciais para garantir a manutenção de condições operacionais ideais (ALMEIDA, 2019).

A consideração da umidade relativa no beneficiamento de minério de ferro tem evoluído à medida que a indústria busca estratégias mais sofisticadas para otimizar processos. Estudos recentes enfocam a integração de dados de umidade relativa em sistemas de controle automatizado, visando melhorias na eficiência operacional (SANTOS et al., 2020).

A complexidade associada à umidade relativa reside na sua variabilidade temporal e espacial, impactando diretamente as características físicas e químicas do minério. A gestão eficaz requer a adaptação a mudanças sazonais, variações climáticas e a implementação de estratégias que minimizem os impactos da umidade nas operações (SILVA et al., 2018).

A umidade relativa é crucial no processo de beneficiamento do minério de ferro, pois afeta diretamente a eficiência das etapas de britagem, moagem e separação magnética. Variações na

umidade podem influenciar a granulometria do material, comprometendo a qualidade do produto final e aumentando os custos operacionais (ALMEIDA, 2019).

Desafios associados à umidade relativa incluem a necessidade de estratégias dinâmicas de controle para lidar com variações abruptas, a mitigação dos efeitos adversos da umidade nos equipamentos e a implementação de práticas de manuseio e armazenamento adaptadas às condições climáticas específicas (SANTOS et al., 2020).

A umidade relativa exerce influência significativa nas propriedades físicas do minério, afetando a eficácia dos processos de separação, aglomeração e transporte. A umidade excessiva pode levar à formação de aglomerados indesejados, enquanto a umidade insuficiente pode resultar em poeira e perdas de material durante o transporte (SILVA et al., 2018).

#### **3.5.4. Quociente de vazão**

O quociente de vazão no processo de beneficiamento do minério de ferro refere-se à relação entre a quantidade de água utilizada nas operações e a vazão total do minério. Esse indicador é crucial para avaliar a eficiência e sustentabilidade dos processos, influenciando diretamente a qualidade do produto final e os impactos ambientais associados (SILVA et al., 2018).

Diversas metodologias são empregadas para controlar e monitorar o quociente de vazão no beneficiamento do minério de ferro. A implementação de sistemas de medição precisa, sensores avançados e tecnologias de automação tem se mostrado eficaz para otimizar o uso da água, garantindo a eficiência operacional (ALMEIDA, 2019).

O tema do quociente de vazão tem evoluído na indústria do minério de ferro à medida que se intensifica o foco na sustentabilidade e redução do consumo de recursos hídricos. Abordagens mais recentes visam não apenas a monitorar, mas também a otimizar dinamicamente o quociente de vazão, integrando tecnologias avançadas aos processos tradicionais (SANTOS et al., 2020).

A complexidade associada ao quociente de vazão reside na necessidade de equilibrar o uso eficiente da água com a manutenção da qualidade do minério de ferro. A variação nas

características do minério e as demandas sazonais adicionam camadas de complexidade, exigindo estratégias adaptativas para garantir a eficácia operacional (SILVA et al., 2018).

O quociente de vazão é de extrema importância no beneficiamento de minério de ferro, impactando diretamente os custos operacionais, a sustentabilidade ambiental e a conformidade com regulamentações. Estratégias eficazes de controle contribuem para a redução do consumo de água, minimizando os impactos negativos nas operações (ALMEIDA, 2019).

Desafios relacionados ao quociente de vazão incluem a necessidade de equilibrar as demandas operacionais com metas de sustentabilidade, a gestão eficaz de períodos sazonais de escassez hídrica e a adaptação a condições climáticas variáveis. Estratégias integradas que consideram a variabilidade do minério e das condições climáticas são fundamentais (SANTOS et al., 2020).

O quociente de vazão exerce influência direta no processo de beneficiamento do minério de ferro, afetando a eficiência das etapas de moagem, separação e concentração. Um quociente otimizado não apenas reduz o consumo de água, mas também contribui para a maximização da recuperação de minerais valiosos, melhorando a viabilidade econômica do processo (SILVA et al., 2018).

### **3.5.5. Tempo de repouso**

O tempo de repouso no processo de beneficiamento do minério de ferro refere-se ao intervalo de tempo durante o qual o material extraído é deixado em repouso antes de ser submetido às etapas subsequentes do processo. Este período permite a sedimentação e separação natural de fases, impactando diretamente as propriedades físicas e químicas do minério (SILVA et al., 2018).

Diversas metodologias são empregadas para controlar e monitorar o tempo de repouso. A utilização de sensores de sedimentação, análises granulométricas e modelos matemáticos são ferramentas fundamentais para garantir a otimização deste parâmetro no beneficiamento de minério de ferro (ALMEIDA, 2019).

A complexidade associada ao tempo de repouso reside na variabilidade das características mineralógicas do minério, nas condições ambientais e nas demandas específicas do processo. A gestão eficaz requer a consideração de múltiplos fatores, incluindo a granulometria do minério, a presença de minerais valiosos e a eficiência desejada nas etapas subsequentes (SILVA et al., 2018).

O tempo de repouso desempenha papel crucial no beneficiamento de minério de ferro, influenciando a eficácia das etapas subsequentes, como a flotação e a separação magnética. Um tempo de repouso adequado contribui para a maximização da recuperação de minerais valiosos e a obtenção de produtos finais de alta qualidade (ALMEIDA, 2019).

Desafios relacionados ao tempo de repouso incluem a necessidade de adaptação dinâmica a variações nas características do minério, a gestão eficaz de períodos de maior demanda e a minimização do consumo de recursos, como água e energia. Estratégias integradas são essenciais para superar esses desafios (SANTOS et al., 2020).

O tempo de repouso influencia diretamente a eficácia das etapas subsequentes do beneficiamento, afetando a concentração de minerais valiosos e a qualidade do concentrado final. Um controle preciso deste parâmetro é vital para otimizar a eficiência operacional e econômica do processo (SILVA et al., 2018).

### **3.5.6. Propriedades de fluxo**

As propriedades de fluxo no processo operacional de beneficiamento do minério de ferro referem-se às características que influenciam o movimento eficiente do material ao longo das diferentes etapas do processo, como granulometria, umidade, coesão e adesão. Essas propriedades são cruciais para o adequado funcionamento das operações de manuseio, transporte e processamento (SILVA et al., 2018).

Os desafios associados às propriedades de fluxo incluem a necessidade de lidar com variações nas características do minério, sazonalidades, e a minimização de bloqueios e obstruções em dutos e equipamentos. A gestão eficiente desses desafios é vital para garantir a continuidade das operações (ALMEIDA, 2019).

As propriedades de fluxo exercem impactos significativos no processo produtivo, afetando diretamente a eficiência das etapas subsequentes do beneficiamento, como britagem, moagem e separação. Um fluxo adequado para chutes de transição, conforme demonstrado na Figura 30, é essencial para maximizar a recuperação de minerais valiosos e otimizar a qualidade do concentrado final (SILVA et al., 2018).

Figura 30: Chute de Transferência



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

A complexidade relacionada às propriedades de fluxo reside na interação dinâmica entre diferentes características do minério. A granulometria, umidade e outras propriedades devem ser gerenciadas de forma integrada, considerando a variabilidade natural do material e as demandas específicas de cada etapa do beneficiamento (SANTOS et al., 2020).

As propriedades de fluxo são de extrema importância no contexto do beneficiamento de minério de ferro, pois impactam diretamente a eficiência operacional, a qualidade do produto final e os custos associados às operações. Estratégias eficazes de controle dessas propriedades contribuem para a otimização global do processo (ALMEIDA, 2019).

As propriedades de fluxo têm impactos diretos nos ativos de beneficiamento, influenciando a seleção e o desgaste de equipamentos. A gestão eficaz dessas propriedades contribui para a minimização do desgaste prematuro, aumentando a vida útil dos ativos e reduzindo os custos de manutenção (SILVA et al., 2018).

A influência das propriedades de fluxo no produto final é crucial para a obtenção de concentrados de alta qualidade. Um controle adequado dessas propriedades permite atender às especificações do mercado, garantindo a competitividade dos produtos finais no setor siderúrgico (SANTOS et al., 2020).

Além de impactar a produção, as propriedades de fluxo têm implicações diretas na confiabilidade dos ativos. A compreensão e gestão dessas propriedades contribuem para estratégias de manutenção preventiva mais eficazes, promovendo a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos ao longo do tempo (ALMEIDA, 2019).

### **3.5.7. Coesão**

O estudo de coesividade no beneficiamento do minério de ferro refere-se à análise das propriedades que determinam a adesão e integração das partículas do material. Essa coesividade desempenha um papel crucial nas fases do processo operacional, influenciando o comportamento do minério em diferentes etapas (SILVA et al., 2018).

Os métodos de estudo da coesividade abrangem técnicas laboratoriais, como ensaios de compressão uniaxial, para avaliar a resistência interna do material. Além disso, simulações computacionais avançadas são empregadas para modelar as interações complexas entre as partículas em diversas condições operacionais (ALMEIDA, 2019).

A coesividade impacta significativamente o processo produtivo, afetando a fluidez do material em transportadores, dutos e operações de descarga. Coesividade inadequada pode resultar em obstruções, desgaste prematuro de equipamentos e redução da eficiência operacional (SILVA et al., 2018).

A complexidade associada ao estudo da coesividade reside na interação dinâmica entre diversas propriedades do minério, como granulometria, umidade e composição mineralógica. A variabilidade dessas características exige uma abordagem integrada para compreender e controlar a coesividade em diferentes contextos operacionais (SANTOS et al., 2020).

A importância do estudo da coesividade reside na capacidade de evitar problemas operacionais. O controle adequado dessa propriedade é essencial para prevenir bloqueios em dutos, reduzir desgastes e otimizar a eficiência nas fases de manuseio e transporte (ALMEIDA, 2019).

O estudo da coesividade impacta diretamente os ativos de beneficiamento, influenciando a seleção de equipamentos e o desgaste de componentes. Estratégias de manutenção preventiva devem levar em conta a coesividade do material processado para maximizar a vida útil dos ativos (SILVA et al., 2018).

A coesividade influencia diretamente a qualidade do produto beneficiado. Um estudo preciso dessa propriedade contribui para a produção de concentrados mais homogêneos, atendendo às especificações do mercado e aprimorando a competitividade do produto (SANTOS et al., 2020).

Além de afetar a produção, o estudo da coesividade tem implicações na confiabilidade dos ativos, interferindo nas estratégias de manutenção preventiva e na durabilidade dos equipamentos. O entendimento dessa propriedade contribui para a confiabilidade e disponibilidade dos ativos ao longo do tempo (ALMEIDA, 2019).

O avanço das tecnologias, como sensores avançados e sistemas de monitoramento em tempo real, está proporcionando novas abordagens para o estudo da coesividade. Essas inovações visam oferecer um controle mais preciso e dinâmico, melhorando a eficácia das estratégias de gerenciamento (SANTOS et al., 2020).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização e propriedade de fluxo

#### 4.1.1. Amostragem

Os testes foram realizados utilizando duas amostras, sendo uma amostra proveniente de uma campanha de amostragem na Usina A – MFB7030 (Minério de Ferro *Blend* 70% Umidade Natural e 30% Úmido), com massa de 410 Kg e outra amostra da Usina B – MFUN (Minério de Ferro Umidade Natural) com massa de 400 Kg, conforme Figura 31 e

Figura 32.

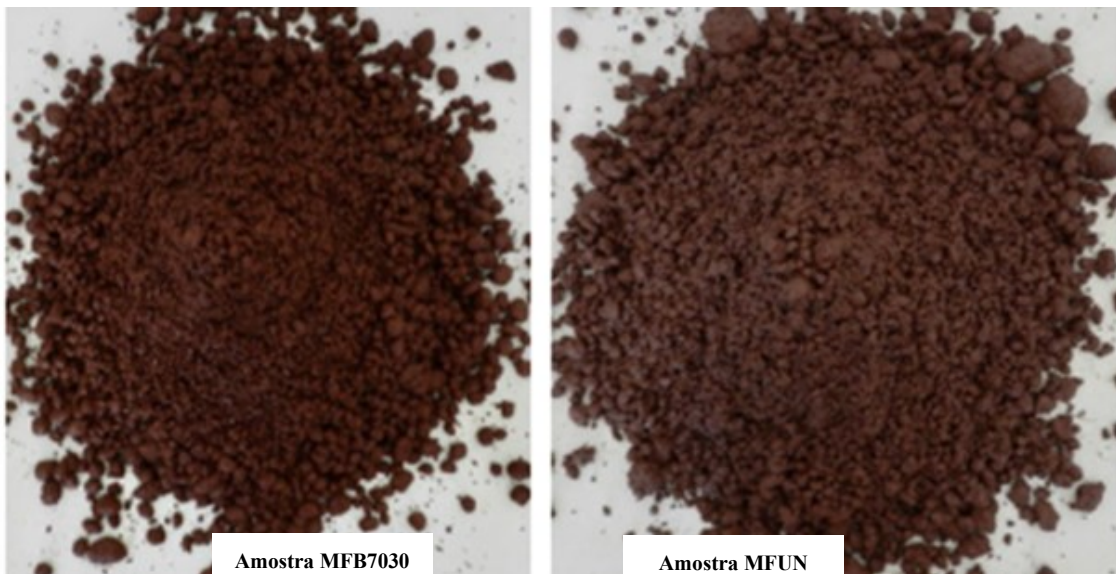
As amostras foram coletadas diretamente na correia de produto na saída das usinas A e B, sentido pátio de estocagem e expedição. Para a análise mineralógica as amostras se desdobraram em quatro alíquotas, sendo visto uma alíquota de minérios hematíticos e outra de base goethíticos. Importante citar que as usinas A e B são alimentadas por diversos litotipos de forma simultânea.

Figura 31: Exemplo de amostras geradas para testes de propriedades de fluxo.



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Figura 32: Exemplo de amostras geradas para testes de propriedades de fluxo



Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

#### 4.1.2. Umidade

Os testes foram realizados em 03 teores de umidade para cada pré-produto variando de acordo com suas rotas de processo e seu teor de umidade final.

- MFB7030: 8,8; 9,7 e 10%.
- MFUN: 8,0; 8,9 e 10%.

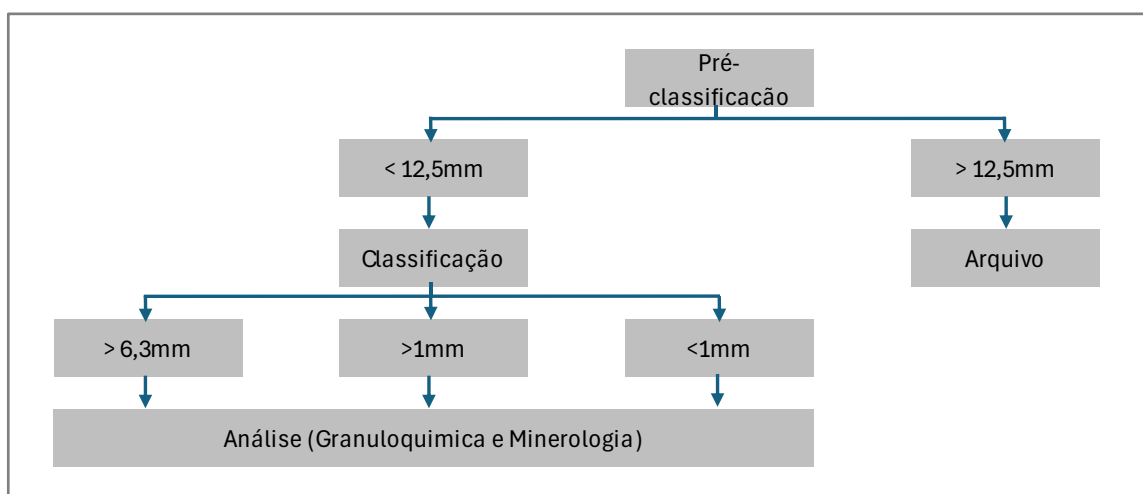
A definição das umidades para as amostras foram realizadas nas Usinas A e B a partir de dados históricos, sendo a menor a umidade a realizada na usina, a intermediária sendo a mediana e a mais alta a histórica realizada.

É importante salientar que as frações (-6.3 mm) dos materiais sólidos tendem a absorver mais umidade que as frações mais grossas. Em amostras com granulometria variada, as umidades devem ser verificadas conforme a relação de umidade de cada fração, para que os testes de fluidez com a fração finas sejam representativos.

#### 4.1.3. Caracterização mineralógica

Para todo material coletado foram realizadas análises químicas e caracterização mineralógica através de análise em microscópio de luz refletida e eventualmente utilizado difração de Raios-X para segregação das goethitas, caulinitas e gibbsitas. As amostras foram classificadas em três frações para caracterização granulo química e mineralógica: + 6,3mm; +1,0mm e -1,0mm. Ver na Figura 33, o fluxograma para preparação das amostras.

Figura 33: Fluxograma para preparação das amostras para análise granulo química e mineralógica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.1.4. Testes – Análise de tamanho de partícula

A amostragem é conduzida em conformidade com os requisitos da norma ISO 3082 por base de massa. Os sistemas de amostragem são compostos basicamente por amostrador primário (cortador de fluxo linear), amostrador secundário (cortador de fluxo linear) e amostrador terciário (divisor rotativo). Ver Figura 34.

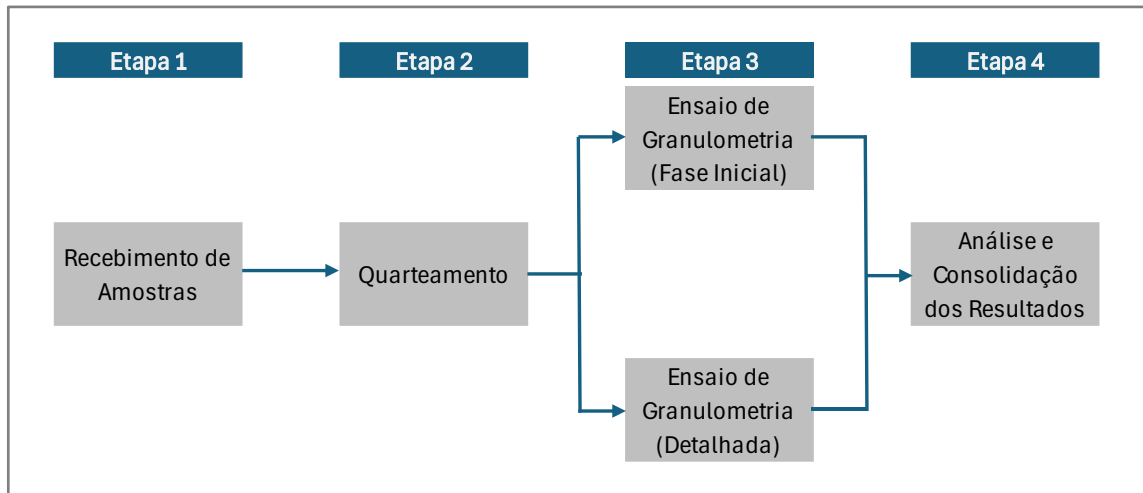
Figura 34: Circuito de amostragem para análise granulo química



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

Quatro ou cinco amostras parciais para granulometria e análise química e doze ou quinze amostras parciais para umidade são coletadas para cada produto embarcado, a depender do tamanho da carga. Conforme fluxograma demonstrado na Figura 35, cada amostra parcial de umidade, granulometria e química é submetida a ensaio e o resultado é calculado pela média ponderada dos resultados individuais em função da tonelagem correspondente à cada amostra parcial.

Figura 35: Fluxograma para análise granulométrica.



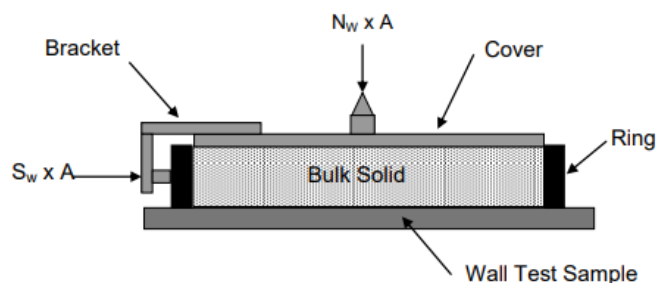
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.1.5. Teste – Resistência coesiva

Para calcular as dimensões críticas dos silos e chutes para um fluxo confiável afim de evitar arcos coesivos e “*ratholes*”, é necessário identificar o esforço realizado para movimentar uma partícula sobre outra partícula da mesma amostra. Através deste teste podemos observar que os dois pré-produtos variam de coesivos e muito coesivos a depender da condição dos testes.

Ver na Figura 36, o exemplo de *Direct Shear Tester* usado para determinar a coesividade de uma amostra. O vetor “*shear stress*” exerce a força para que uma parte da amostra possa se locomover sobre uma base de mesmo material.

Figura 36: Direct Shear Tester



Fonte: HAN (2011)

#### 4.1.6. Compressibilidade

O teste de compressibilidade foi utilizado para determinar a relação entre densidade aparente (densidade contemplando presença de ar e água) e a pressão de consolidação.

- Densidade solta e batida: Determinar a densidade aparente através dos métodos de batidas.
- Densidade das partículas: Método de deslocamento de líquidos para determinar a densidade real (sem levar em consideração ar e água) das partículas.

#### **4.1.7. Atrito com a parede**

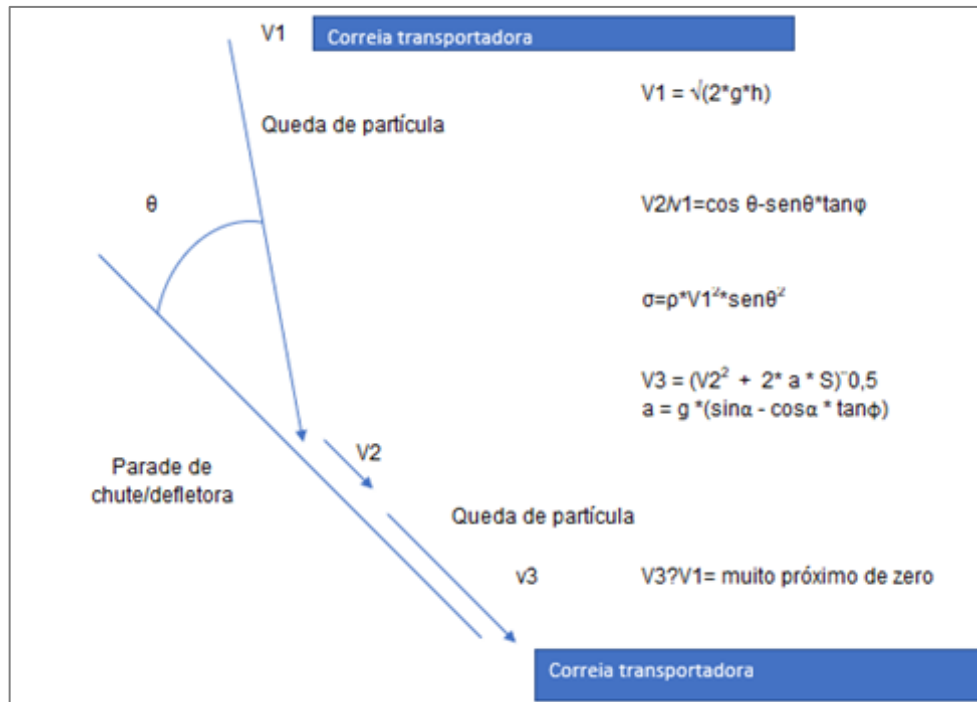
Para calcular os ângulos da tremonha para fluxo mássico. Depois de definido o tamanho adequado de sávida, o projeto de um silo de fluxo mássico deve considerar os ângulos da parede da tremonha, os materiais de construção e o acabamento da superfície. As paredes da tremonha devem ser íngremes o suficiente e ter atrito suficientemente baixo para permitir que o material flua ao longo delas.

Na Figura 36 é possível observar o *Wall Friction Test* usado para determinar o atrito entre uma parede de revestimento sobre uma amostra. O Vetor "*shear stress*" exerce a força para que uma parte da amostra possa se locomover sobre uma base de revestimento

#### **4.1.8. Teste ângulo de chute**

Testes foram utilizados para determinar os ângulos necessários para que chutes planos e não-convergentes sejam capazes de escoar uma camada de 12 mm de material, após um impacto que reduz a velocidade para zero. Ver Figura 37

Figura 37: Esquema mostrando trajetória da partícula em relação a velocidade inicial e final e ângulo da parede do chute.



Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

Para definição do ângulo de chute é preciso determinar:

$h$ : Altura de queda da partícula.

$V_0$ : Velocidade da correia recebedora.

$\Theta$ : Ângulo de fluxo de entrada da partícula em relação à superfície de chute.

$\Phi$ : Ângulo de atrito da parede entre as partículas e a superfície do chute.

$P$ : Densidade aparente levando em consideração a pressão de consolidação.

$\sigma$ : Pressão de impacto da partícula.

$\alpha$ :  $90 - \theta$ .

$a$ : será negativo por estar desacelerando

#### 4.1.9. Ângulo de acomodação na correia

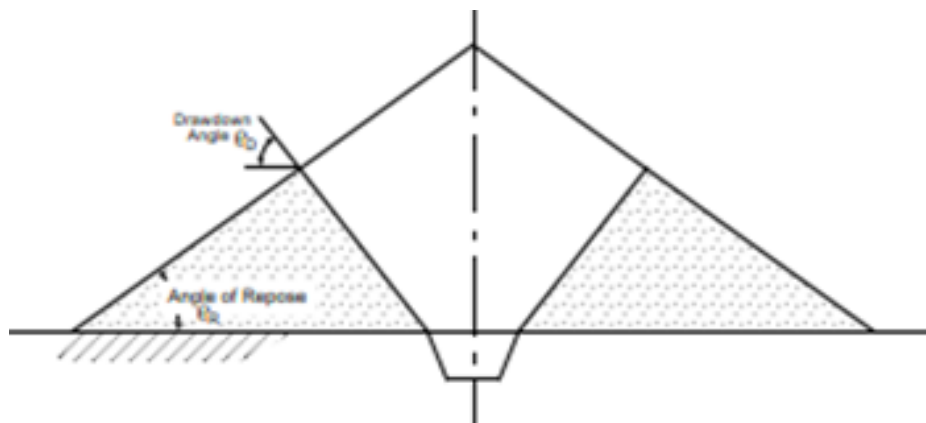
Testes de ângulo de acomodação em correia foram realizados simulando o efeito na catenária de uma correia transportadora horizontal passando por uma série de roletes. Cada teste foi realizado até que o ângulo de acomodação fosse constante, considerando tempo típico de 5

minutos. O ângulo é medido com a horizontal, sendo fornecidos 2 valores, um para o lado esquerdo e outro para o direito do equipamento de teste. O ângulo de repouso é o ângulo da pilha formado pelo preenchimento solto do material e é medido antes do início do teste. O ângulo de acomodação na correia é o ângulo do material acomodado medido na conclusão do teste.

#### 4.1.10. Ângulo de repouso e de descarga

Os ângulos de repouso de descarga são referenciados pela horizontal, observe que foi fornecido um intervalo, pois isso reflete a mudança no ângulo da base da pilha para o topo, bem como ao redor da circunferência da pilha. Estes testes ilustram a faixa de ângulo de repouso (enchimento) e os ângulos aproximados de retomada esperados em pilhas de armazenamento de recuperação por gravidade. Ver Figura 38

Figura 38: Representação gráfica de uma pilha e seus respectivos ângulos de repouso e de descarga.



Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

## 4.2. Análise da confiabilidade e árvore de falhas

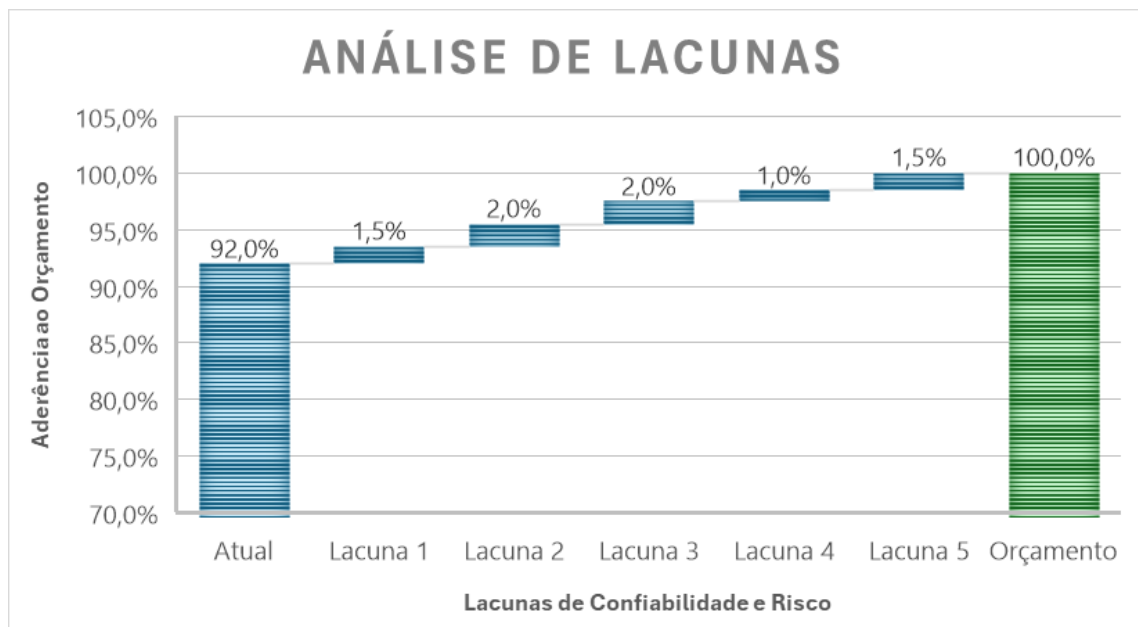
### 4.2.1. Coleta de dados macro e visão geral

Os resultados dos modelos são apresentados em duas perspectivas, sendo a visão acumulada anual e a visão mensalizada considerando o orçamento de produção em curso. A visão

acumulada tem como objetivo avaliar o histórico até a data da coleta no ano para minimizar variabilidade do indicador, identificar situações pontuais de desvio e os impactos de forma geral. A visão mensalizada visa melhor entendimento do curto prazo com definição de ações de correção imediata.

Visando a confidencialidade dos dados observados, vamos considerar a visão quanto a aderência aos indicadores, neste caso a produção anual, com necessidade de atendimento de 100%, ver Figura 39

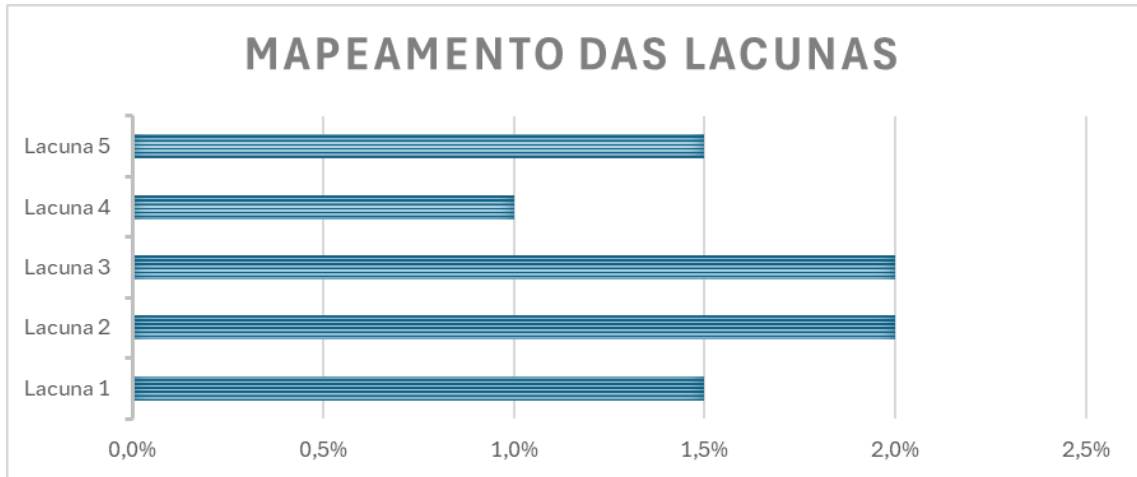
Figura 39: Análise de lacunas do orçamento



Fonte: Elaborado pelo autorl (2022)

Após identificação das lacunas do orçamento, as mesmas são segregadas para facilitar as tratativas e análise das causas, ver Figura 40.

Figura 40: Segregação das lacunas e análise das causas

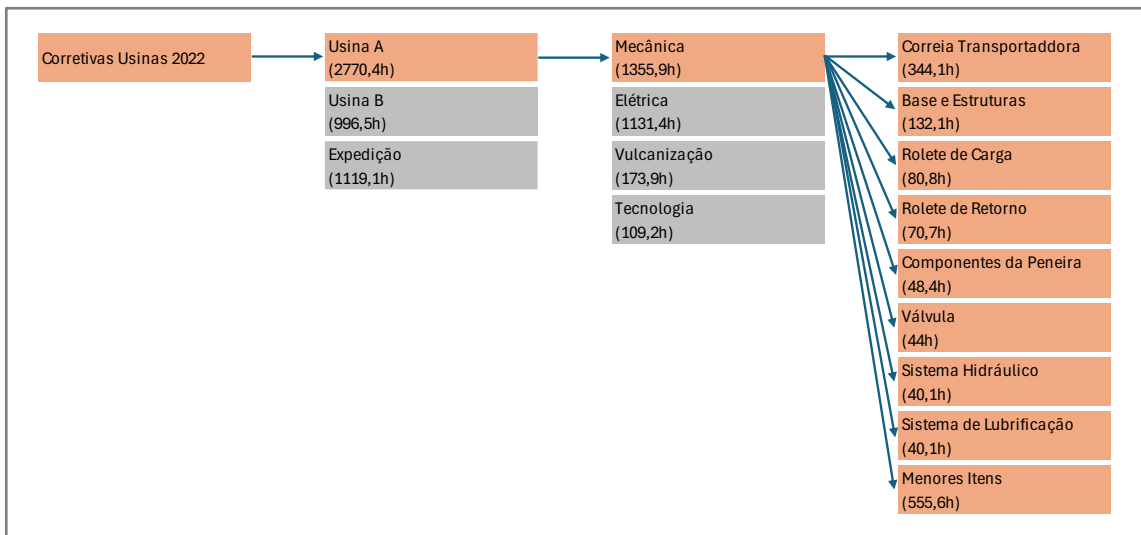


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

#### 4.2.2. Coleta de dados e detalhamento das árvores de falhas

Nos mesmos moldes dos indicadores de produção, também é feito o detalhamento dos desvios e impactos considerando indicadores como taxa em t/h, disponibilidade física e utilização física. Na Figura 41, é possível ver de forma macro o detalhamento das perdas no formato de árvore de falhas corretivas da Usina A em 2022.

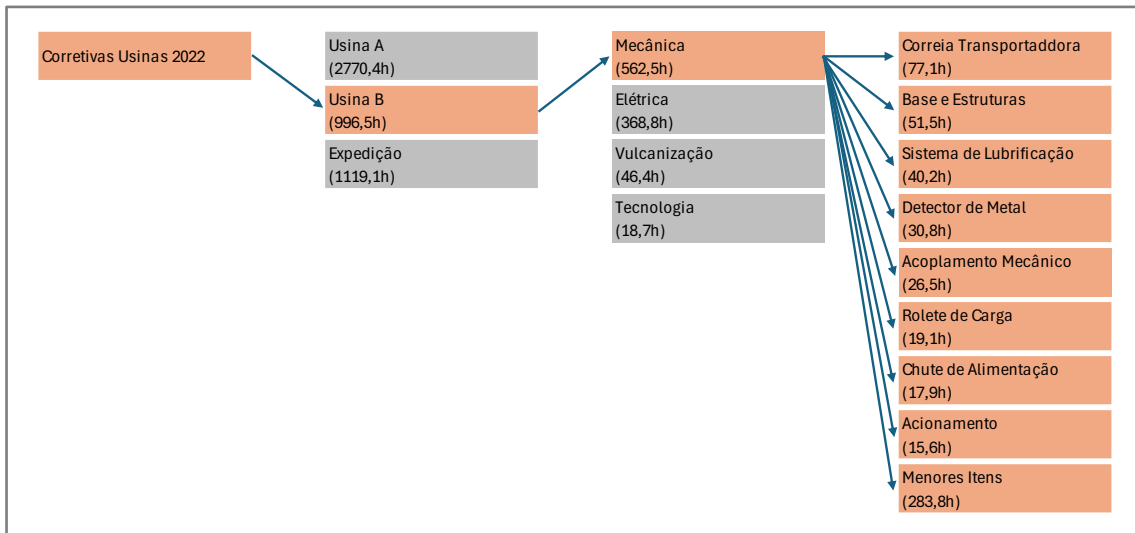
Figura 41: Árvore de Falhas Corretivas – Usina A 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 1, de forma macro o detalhamento das perdas no formato de árvore de falhas corretivas da Usina B em 2022.

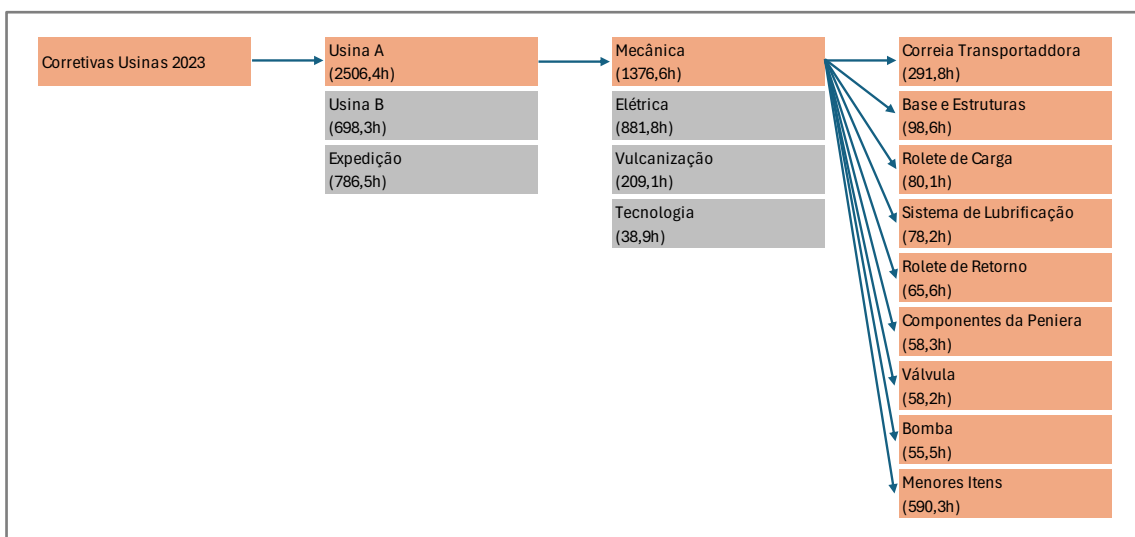
Figura 42: Árvore de Falhas Corretivas – Usina B 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 43, de forma macro o detalhamento das perdas no formato de árvore de falhas corretivas da Usina A em 2023.

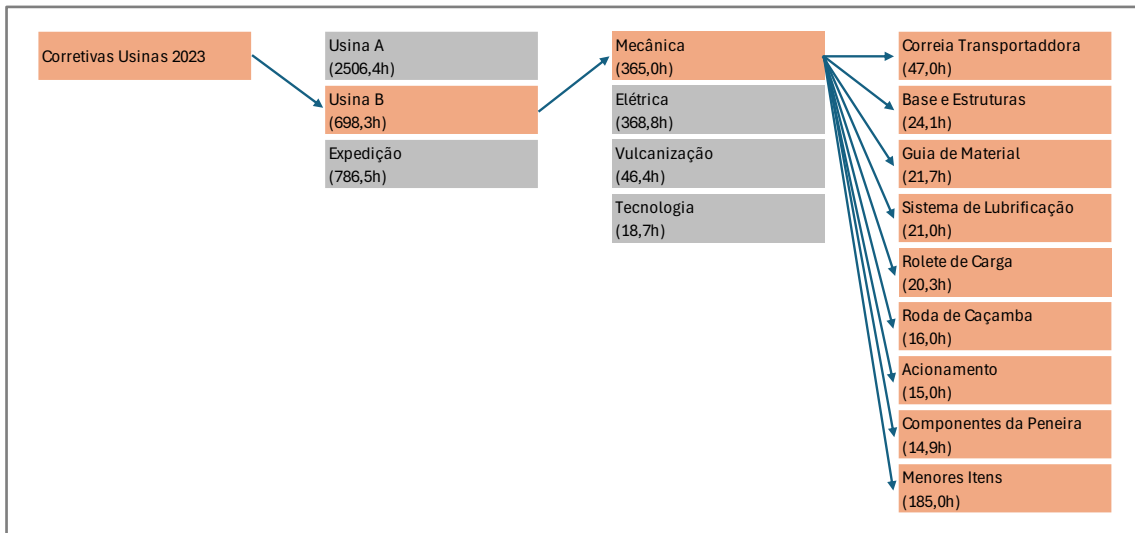
Figura 43: Árvore de Falhas Corretivas – Usina A 2023



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 44, de forma macro o detalhamento das perdas no formato de árvore de falhas corretivas da Usina B em 2023.

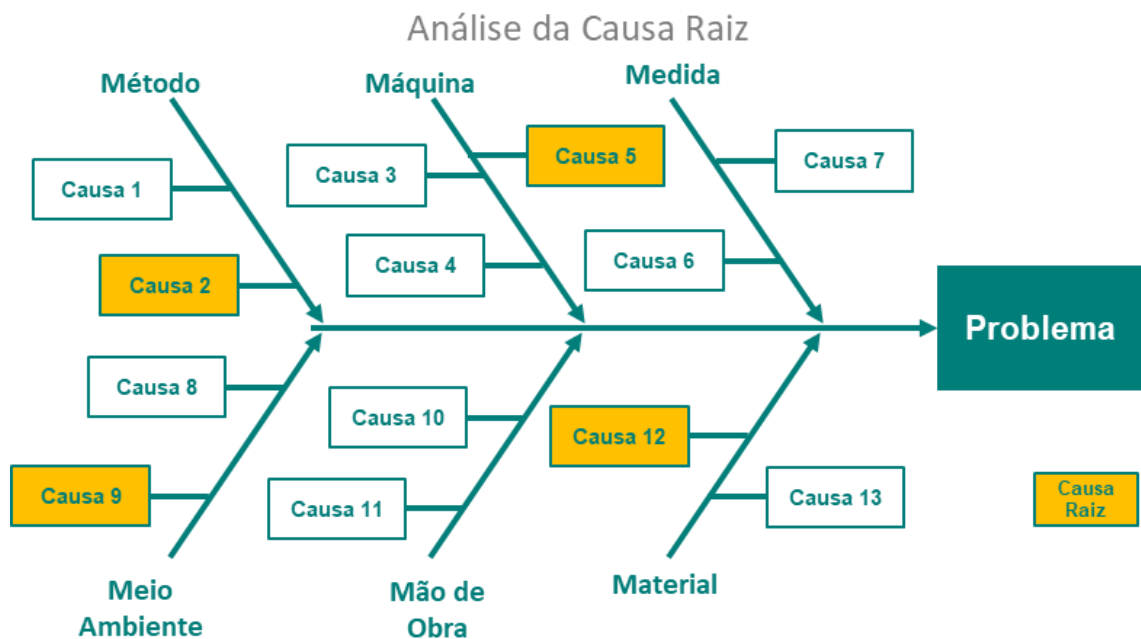
Figura 44: Árvore de Falhas Corretivas – Usina B 2023



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na fase seguinte, após identificação das principais causas é necessário o aprofundamento para identificação da causa raiz, ver Figura 45. Após identificação da causa é necessário a definição de ações para adequação e/ou recuperação do plano de produção. Para essa etapa diversas metodologias podem ser executadas, sendo observado o mais comum o método com A3 com Solução de Problemas.

Figura 45: Análise da Causa Raiz



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Ao definir o plano de ação para mitigação e bloqueio das causas raízes, é crucial dimensionar a extensão da resolução do problema alcançada por meio da execução de ações específicas e/ou conjuntos de ações (% da lacuna). Essa etapa é essencial para avaliar se os objetivos propostos serão atingidos com o plano delineado.

Portanto, é imperativo que as ações sejam programadas ao longo do tempo, de acordo com suas datas de conclusão, e que seja elaborada uma "curva S", possibilitando a avaliação da evolução do indicador em comparação com as necessidades do plano de produção. O A3 de Solução de Problemas deve ser incorporado às rotinas de confiabilidade e produtividade das áreas operacionais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram apresentados nos itens 5.1 e 5.2, divididos nos tópicos, sendo: Caracterização mineralógica e propriedades de fluxo, e Análise de Performance das Usinas A e B.

### 5.1. Caracterização e propriedade de fluxo

#### 5.1.1. Análise de caracterização mineralógica

Com base nas análises realizadas, ver Tabela 1, identificamos que a amostra 01 de MFUN e amostra 03 de MFB7030, considerando o cenário de impacto por manuseio, devido ao tipo minério tende a apresentar uma melhor condição de fluidez para a usina, bem como melhor performance nas etapas de britagem e classificação. Essa constatação é possível devido ao baixo percentual de minérios hidratados (Goethitas) e Gibbsita, associado ao alto percentual de óxidos de ferros (Hematitas, Martitas e Magnetitas).

Tabela 1: Quantificação mineralógica (%) simplificada

Quantificação Mineralógica (%)										
Amostra	Hematitas	Martitas	Magnetitas	Goethitas	Goethita Ferrosa	Quartzo	Óxido Mn	Caulinita	Gibbsita	Outras
Am 01 MFUN	40,98	28,58	9,95	17,00	1,97	0,92	0,12	0,03	0,39	0,06
Am 02 MFUN	23,81	2,17	0,74	42,48	17,49	0,34	0,00	0,00	12,56	0,41
Am 03 MFB7030	84,02	6,27	1,18	6,46	0,23	1,32	0,02	0,02	0,47	0,01
Am 04 MFB7030	32,15	3,88	1,30	33,16	15,20	0,14	0,00	0,00	14,10	0,07

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

Na Tabela 2, foram detalhados os percentuais de hematitas considerando os tipos, sendo: Espacular, Lamelar, Granular, Micro Cristalina e Sinuosa. Da mesma para as goethitas, sendo: Anfibolítica, Alveolar, Maciça e Transição. Devido à alta influência no processo, optamos por destacar na tabela 2 a hematita Martítica e a Goethita Terrosa.

Tabela 2: Quantificação mineralógica (%) completa,

Quantificação Mineralógica (%)																
Amostra	Hematitas					Magnetita	Goethitas					Quartzo	Óxidos Mn	Caulinita	Gibbsita	Outros
	Especular	Lamelar	Granular	Sinuosa	Martítica		Anfibolítica	Alveolar	Maciça	Transição	Terrosa					
Am 01 MFUN	0,00	0,10	0,36	13,28	27,24	9,95	0,12	0,04	8,32	8,52	1,97	0,92	0,12	0,03	0,39	0,06
Am 02 MFUN	0,00	0,06	0,10	4,25	19,40	0,74	0,00	0,00	42,42	0,06	17,49	0,34	0,00	0,00	12,56	0,41
Am 03 MFB7030	2,11	4,81	2,21	41,25	33,64	1,18	0,00	0,00	3,60	2,86	0,23	1,32	0,02	0,02	0,47	0,01
Am 04 MFB7030	0,00	0,03	0,06	4,10	27,96	1,30	0,00	2,90	30,00	0,26	15,20	0,14	0,00	0,00	14,10	0,07

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

Para a mineralógica, identificamos que a amostra 02 – MFUN e amostra 04 – MFB7030 apresentam maior percentual de goethitas e gibbsitas, além disso, na análise química observamos elevadores teores de P, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn e PPC. Ver Tabela 3.

Tabela 3: Análise química (%) das amostras testadas,

Análise Química (%)									
Amostra	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
Am 01 MFUN	66,99	1,06	0,013	0,70	0,16	0,039	0,014	0,056	2,15
Am 02 MFUN	55,73	0,63	0,128	10,74	0,038	1,385	0,01	0,031	7,67
Am 03 MFB7030	67,39	1,65	0,017	0,51	0,06	0,016	0,01	0,10	1,06
Am 04 MFB7030	55,88	0,63	0,122	10,27	0,038	1,313	0,01	0,01	3,36

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

### 5.1.2. Análise de tamanho de partícula.

A Tabela 4, demonstra os resultados referente as análises de tamanho das partículas. Observamos um comportamento típico de fino de minério de ferro comum.

Tabela 4: Resultados das análises dos tamanhos de partículas do MFB7030 e do MFUN

Análise de Tamanho da Partícula (%)										
Amostra	Top Size	13mm	6,3mm	3,4mm	1,7mm	850µm	425µm	212µm	150µm	Pan
MFUN	27mm	NA	15,0	15,0	13,0	10,0	11,0	10,0	8,0	18,00
MFB7030	32mm	NA	17,0	16,0	13,0	10,0	11,0	10,0	6,0	17,00

NA - Não aplicável

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

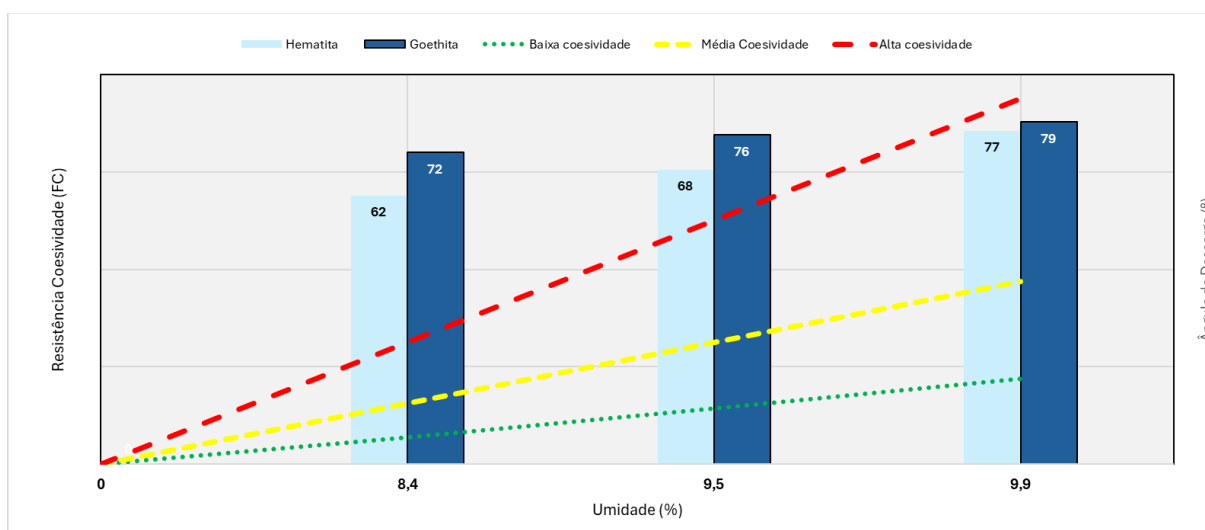
### 5.1.3. Testes de resistência coesiva

Em um fluxo funil tanto o MFUN quanto o MFB7030 podem formar “ratholes” estáveis, ausência de fluxo ou fluxo errático, agravar a segregação granulométrica do material e consequentemente a redução de capacidade útil de silo/chute. Além disso pode permitir a degradação de partículas (aglomeração) nas regiões estagnadas e induzir altas cargas na estrutura e no equipamento a jusante, devido ao colapso dos “ratholes” e canais de fluxo excêntricos.

As amostras MFB7030 apresentam resultados satisfatórios nos testes de coesividade, em fluxo constante e após intervalo de tempo em repouso (aproximadamente 24h). Para o MFUN, os resultados demonstrados apresentam maior coesividade. Isso pode ocorrer porque esse tipo de material é processado em rota com umidade natural e dessa forma apresentar maior quantidade de finos.

Comparando as duas amostras, o MFB7030 apresenta melhores resultados nos testes de coesividade, sendo que o MFUN apresenta materiais coesivos em fluxo visto ter maior presença de goethitas, ver Figura 46.

Figura 46: Representação gráfica do ângulo de descarga, coesividade e umidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Esses materiais devem ser manuseados em silo de fluxo mássico afim de eliminar “ratholes”. Isso é possível quando dimensionado adequação para saída do material em chutes e silos. A Tabela 5, demonstra com base nos testes os dimensionamentos necessários de aberturas de saídas de tremonhas para ou a fim de evitar obstrução de material estagnado e minimizar efeitos de segregação. Um dos requisitos necessários para obter fluxo mássico e dimensionar as saídas dos silos/chutes grandes o suficiente para evitar arcos, sendo:

D1: Diâmetro crítico da saída, tremonha cônica de fluxo mássico.

D2: Diâmetro crítico do “rathole”, mostrado para uma “altura efetiva” de 2,5m.

L1: Largura crítica de saída, saída ranhurada ou oval com comprimento com comprimento 3X a largura, em fluxo mássico.

L2: Largura crítica de saída retangular em fluxo funil. Dimensões críticas da saída para evitar arco coesivo em sistema de fluxo mássico com saída circular de diâmetro BC e com saída retangular com largura BP, através da relação comprimento/largura da saída retangular seja no mínimo 3:1.

Fator P: Sobrepressões, devido a vibração ou impacto após enchimento (= 1.0).

Tabela 5: Resumo dos requisitos de dimensão crítica da saída por um silo/chute para Fator P igual a 1,0

Requisitos de Dimensão Crítica da Saída Silo/Chute						
Amostra	Teor de Umidade (%)	Tempo de Repouso (h)	Fluxo Mássico		Fluxo Funil	
			D1 (m)	L1 (m)	L2 (m)	D2 (m)
MFB7030	10	0	0,36	0,2	0,2	1,64
		24	0,36	0,2	0,2	1,64
	9,7	0	0,28	0,1	0,1	1,32
		24	0,3	0,1	0,2	1,72
	8,8	0	0,2	0,1	0,1	2,14
		24	0,2	0,1	0,1	2,2
MFUN	10	0	1,2	0,6	0,6	3,9
		24	1,5	0,72	0,8	4,27
	8,9	0	0,41	0,2	0,29	4,44
		24	0,68	0,32	0,48	4,7
	8	0	0,2	0,1	0,1	3,82
		24	0,3	0,1	0,2	3,88

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

#### 5.1.4. Teste de compressibilidade

A densidade aparente, em função da pressão de consolidação, da maioria dos sólidos a granel varia com a pressão de consolidação e teor de umidade. A Tabela 6, apresenta os resultados de densidade solta e batida variando em relação ao teor de umidade.

Tabela 6: Resumo dos resultados dos testes de densidade aparente.

<b>Análise de Densidade Aparente</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>Densidade Solta / Batida (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
MFB7030	9,9	2.528 / 3.541
	9,5	2.494 / 3.441
	8,4	2.438 / 3.115
MFUN	9,6	2.474 / 3.399
	8,4	2.277 / 2.972
	7,6	2.270 / 2.825

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

Na Tabela 7, apresentamos os resultados dos testes referentes a densidade aparente em relação ao teor de umidade e os resultados de densidade da partícula, que se refere a densidade real do sólido.

Tabela 7: Resumo dos resultados dos testes de compressibilidade e densidade da partícula

<b>Análise de Compressibilidade e Densidade da Partícula</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Máximo Tamanho da Partícula Testado (mm)</b>	<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>Faixa Medida de Densidade Aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade da Partícula (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
MFB7030	6,3	10,0	2.030 / 2.580	NA
		9,7	2.131 / 2.641	NA
		8,8	1.901 / 2.481	NA
		0,4	NA	4466
MFUN	6,3	10,0	2.176 / 2.720	NA
		8,9	1.960 / 2.566	NA
		8,0	1.884 / 2.489	NA
		0,5	NA	4406

NA - Não aplicável

Fonte: Adaptado de Janeki &amp; Johanson (2023)

Através dos testes de compressibilidade podemos determinar com mais exatidão as densidades dos minérios em diferentes etapas do processo produtivo/logístico, como por exemplo em correias, chutes, peneiras, britadores, pátios de estocagem, vagões de trens e porões de navios. Sempre utilizando as variáveis de pressão de consolidação calculado pela altura efetiva de queda do material em metros.

### 5.1.5. Densidade e grau de compactação

A densidade varia de acordo com alguns fatores, dentre eles o teor de ferro presente no minério, o teor de umidade e o grau de compactação. O teor de ferro altera a densidade real da partícula e conseqüentemente a densidade aparente dela, neste trabalho não iremos alterar os teores de ferro do material.

O teor de umidade altera a densidade aparente visto que este sofre variação pela presença de sólido (partículas minerais), líquido (água) e gás (ar). A Tabela 8, demonstra que quanto maior o percentual de umidade presente no minério, menor a quantidade da fase gasosa e como consequência maior a densidade aparente. A variação de densidade determina a ocupação volumétrica em cada etapa anteriormente descrita. Os dados da tabela x e figura y demonstram esse comportamento para o MFUN e MFUN.

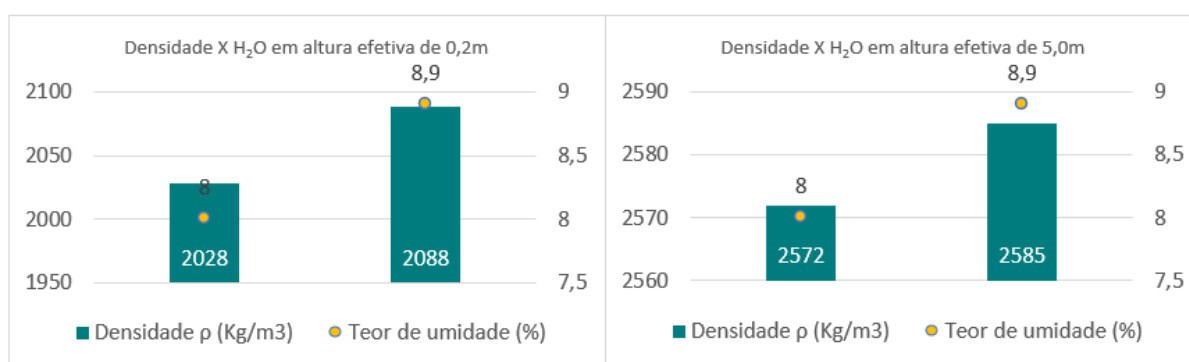
Tabela 8: Teste de compressibilidade e grau de compactação / Usinas A e B / 6,3mm

Análise de Densidade e Grau de Compactação							
Amostra	Teor de Umidade (%)	Altura Efetiva (m)	0,2	0,5	1,0	2,5	5,0
MFB7030	10	$\sigma_1$ (Kpa)	4,22	11,10	23,08	60,93	127,10
		$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2153,00	2261,00	2354,00	2485,00	2591,00
	8,8	$\sigma_1$ (Kpa)	3,99	10,60	22,08	58,46	122,10
		$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2035,00	2155,00	22,51	2385,00	2491,00
MFUN	10	$\sigma_1$ (Kpa)	4,53	11,60	24,08	63,89	134,80
		$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2311,00	2376,00	2456,00	2606,00	2749,00
	8,9	$\sigma_1$ (Kpa)	4,09	10,70	22,38	59,93	126,70
		$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2088,00	2183,00	2283,00	2444,00	2585,00
	8	$\sigma_1$ (Kpa)	3,98	10,40	21,68	57,93	122,30
		$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2028,00	2117,00	2210,00	2363,00	2572,00
Fase do Processo			Transp. Correia	Chute	Britagem Chute	Silo	Pátio / Expedição

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

A Figura 47 demonstra de forma gráfica que o grau de compactação altera a densidade aparente do material visto que aumenta a quantidade de partículas e conseqüentemente a massa por metro cúbico, e que no mesmo grau de compactação, teores de umidades diferentes geram densidades diferentes.

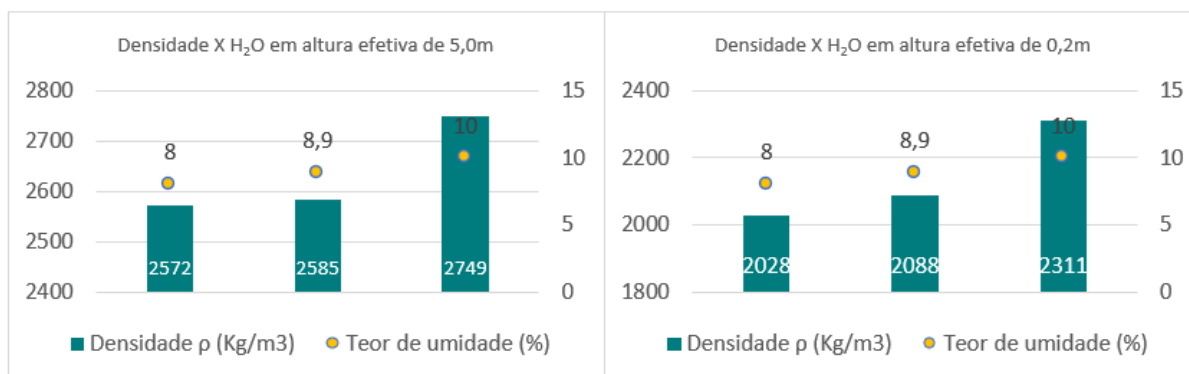
Figura 47: Exemplos de variação de densidade aparente, na mesma amostra, pela alteração de parâmetros como teor de umidade e grau de compactação. Exemplo de MFB7030 testado.



Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

Nos mesmos moldes da Figura 47, para a amostra MFB7030, a Figura 48 referente a amostra MFUN, demonstra de forma gráfica que o grau de compactação altera a densidade aparente do material visto que aumenta a quantidade de partículas e conseqüentemente a massa por metro cúbico, com variação de comportamento de umidade e densidade.

Figura 48: Exemplos de variação de densidade aparente, na mesma amostra, pela alteração de parâmetros como teor de umidade e grau de compactação. Exemplo de MFUN testado.



Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

### 5.1.6. Teste de atrito com parede (Ângulos de tremonha de fluxo mássico)

Os resultados do teste, se uma tremonha plana com uma saída retangular de largura de 0,5 m (assumindo que o comprimento da saída fosse pelo menos três vezes a largura) for revestida ou fabricada usando os materiais de parede listados, os ângulos de parede correspondentes seriam o máximo calculado para obter fluxo mássico.

Tremonhas com saídas cônicas necessitam ângulos significativamente mais íngremes que tremonhas planares (normalmente 10° a 12° mais íngremes).

O ângulo máximo da parede calculado pode variar, dependendo do tamanho da saída. Os ângulos especificados aqui aplicam-se apenas para tamanho das saídas indicadas como um exemplo, o que pode não ser aplicável devido as dimensões de arco coesivo do material. O ângulo máximo da parede calculado deve ser selecionado de uma tabela apropriada neste relatório, baseado no tamanho da saída atual para um certo projeto.

Para esse trabalho foram testadas 04 superfícies de revestimentos: CDP 3952, CDP 4666 (Lixado/Sanded), UHMW Tivar 88-2 e Hardox 500. O teste de fricção na parede lembra os

direct shear test, com a diferença que a amostra de ser movimentada sobre o revestimento e não sobre ela mesma. Os testes estão demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9: Resumo dos ângulos máximos de parede calculados para fluxo máximo (graus de vertical)

Resumo Ângulos Máximos / Fluxos Máximos								
Amostra	Material do Revestimento		Para Tremonha Planar com Largura da Saída = 0,5m					
			Fluxo Contínuo			1 dia em repouso		
MFB7030	Superfície da Parede	MC	10,0%	9,7%	8,8%	10,0%	9,7%	8,8%
	CDP® 3955		15°	18°	18°	NA	NA	NA
	CDP® 4666 (lixado)		12° (*)	15°	12° (*)	12° (*)	15°	12° (*)
	UHMW Tivar® 88-2 1/4"		26°	27°	26°	25°	25°	26°
	HARDOX 500 (No primer)		18°	17°	15°	17°	16°	15°
MFUN	Superfície da Parede	MC	10,0%	8,9%	8,0%	10,0%	8,9%	8,0%
	CDP® 3955		20°	19°	19°	N.T.	N.T.	N.T.
	CDP® 4666 (lixado)		13°	17°	11°	13°	16°	11°
	UHMW Tivar® 88-2 1/4"		24°	24°	26°	24°	23°	23°
	HARDOX 500 (No primer)		17°	19°	21°	17°	18°	21°

(\*) Fluxo ao longo da parede é questionável

NA - Não aplicável

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

### 5.1.7. Ângulos de chutes

Foram feitos testes para determinar os ângulos necessários para chutes planos não-convergentes, a fim de limpar uma camada de 12 mm, depois de um impacto que reduz a velocidade para zero, os resultados estão demonstrados na Tabela 10.

Tabela 10: Resumo dos resultados dos testes de chute.

Resultado Teste de Chute								
Amostra	Material do Revestimento		Ângulo Máximo do Chute Medido [Graus da Horizontal]					
			Pressão Impacto 0,3 kPa			Pressão Impacto 8 kPa		
MFB7030	Superfície da Parede	MC	10,0%	9,7%	8,8%	10,0%	9,7%	8,8%
	CDP® 3955		36°	38°	37°	48°	46°	44°
	CDP® 4666 (lixado)		39°	38°	40°	45°	46°	45°
	UHMW Tivar® 88-2 1/4"		31°	29°	29°	39°	41°	40°
	HARDOX 500 (No primer)		41°	41°	39°	48°	49°	50°
MFUN	Superfície da Parede	MC	10,0%	8,9%	8,0%	10,0%	8,9%	8,0%
	CDP® 3955		38°	38°	38°	49°	51°	48°
	CDP® 4666 (lixado)		42°	38°	40°	53°	50°	48°
	UHMW Tivar® 88-2 1/4"		31°	32°	29°	43°	42°	44°
	HARDOX 500 (No primer)		40°	38°	35°	47°	47°	43°

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

Os ângulos dos chutes variam de acordo com a presença e variação do teor de umidade além do revestimento utilizado nas paredes.

### 5.1.8. Ângulo de acomodação na correia

Os testes de ângulo de acomodação na correia foram realizados simulando o efeito de catenária de uma correia transportadora horizontal passando por uma série de roletes. Cada teste foi realizado até que o ângulo de acomodação fosse constante (tempo típico de 5 minutos).

Os ângulos são medidos com a horizontal. Observe na Tabela 11, que são fornecidos dois valores, um para o lado esquerdo e outro para o lado direito do equipamento de teste. O ângulo de repouso é o ângulo da pilha formada pelo preenchimento solto do material e é medido antes do início do teste. O ângulo de acomodação na correia é o ângulo do material acomodado medido na conclusão do teste.

Tabela 11: Resumo dos resultados do ângulo de acomodação na correia [graus da horizontal]

<b>Resultado Teste de Chute / Ângulo de Acomodação</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>Ângulo de Repouso</b>		<b>Ângulo de Acomodação na Correia</b>	
		<b>Esquerda</b>	<b>Direita</b>	<b>Esquerda</b>	<b>Direita</b>
MFB7030	9,9	39°	48°	8°	13°
	8,4	33°	38°	21°	29°
MFUN	9,6	36°	34°	25°	22°
	7,6	27°	31°	22°	20°

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

### 5.1.9. Ângulo de repouso e descarga do material

O ângulo de repouso pode ser usado na determinação das capacidades do silo e de pilha de armazenamento, mas nunca deve ser usado para especificar os ângulos da tremonha para fluxo mássico. Observe que os testes de ângulo de repouso foram realizados com momento mínimo de partícula; portanto, os valores reais do ângulo de acomodação no campo podem ser mais baixos devido a vários métodos de formação de pilhas. Ver Tabela 12.

Tabela 12: Resultados dos ângulos de repouso e descarga [graus da horizontal]

<b>Resultado Teste de Chute / Ângulo de Repouso e Descarga</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Ângulo de Repouso</b>	<b>Ângulo de Repouso (Faixa)</b>	<b>Ângulo de Descarga</b>	<b>Ângulo de Descarga (Faixa)</b>
MFB7030	9,9	47°	42° - 52°	77°	74° - 79°
	9,5	47°	40° - 52°	73°	68° - 77°
	8,4	44°	35° - 51°	68°	66° - 69°
MFUN	9,6	41°	34° - 46°	72°	71° - 72°
	8,4	43°	38° - 46°	76°	75° - 76°
	7,6	39°	34° - 43°	71°	62° - 79°

Fonte: Adaptado de Janeki & Johanson (2023)

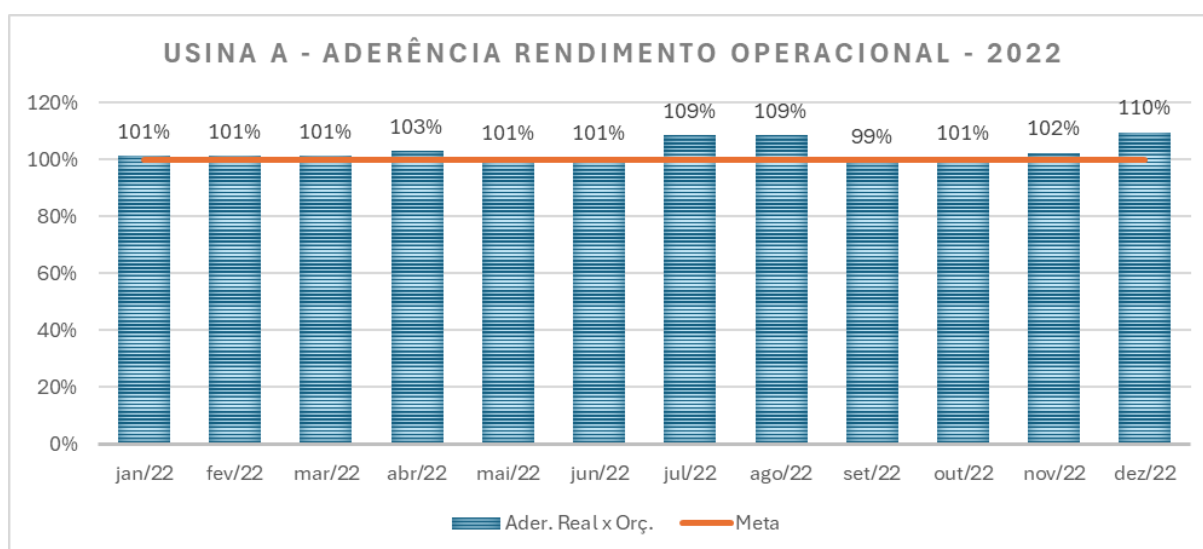
## 5.2. Análise Performance Usina

### 5.2.1. Análise usinas 2022

Em 2022 as performances das usinas observadas foram consideradas aderentes ao orçamento, sendo que a Usina A apresentou rendimento operacional médio de 103% e a Usina B com média de 96%.

Referente a Usina A, ver Figura 49, é possível observar que a performance em geral esteve em conformidade com as metas estabelecidas para a unidade operacional, registrando performance a menor somente no mês de novembro de 2022.

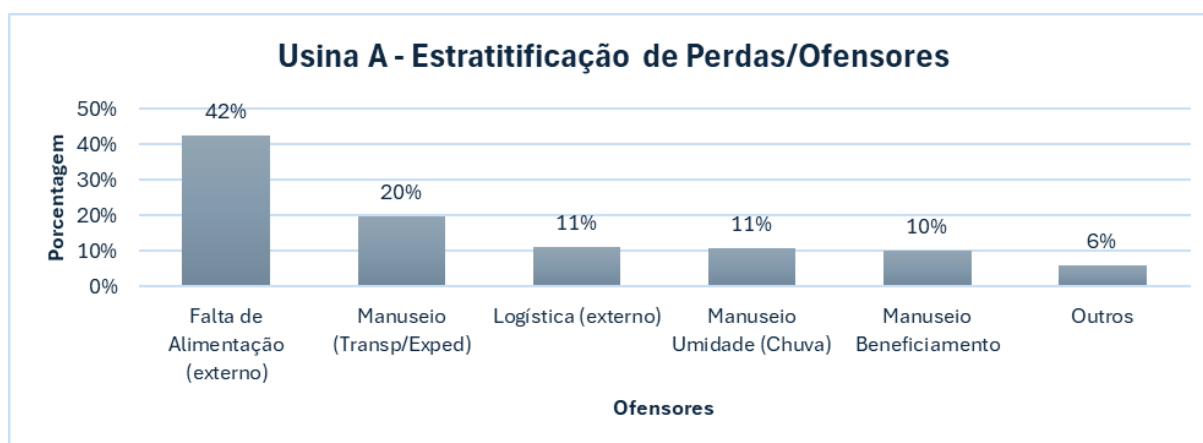
Figura 49: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina A / 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Estratificando as perdas ao longo do ano, ver Figura 50, observamos que ofensores referentes ao manuseio estiveram presentes nos eventos, contribuindo aproximadamente com 41% das falhas e/ou perdas no processo produtivo.

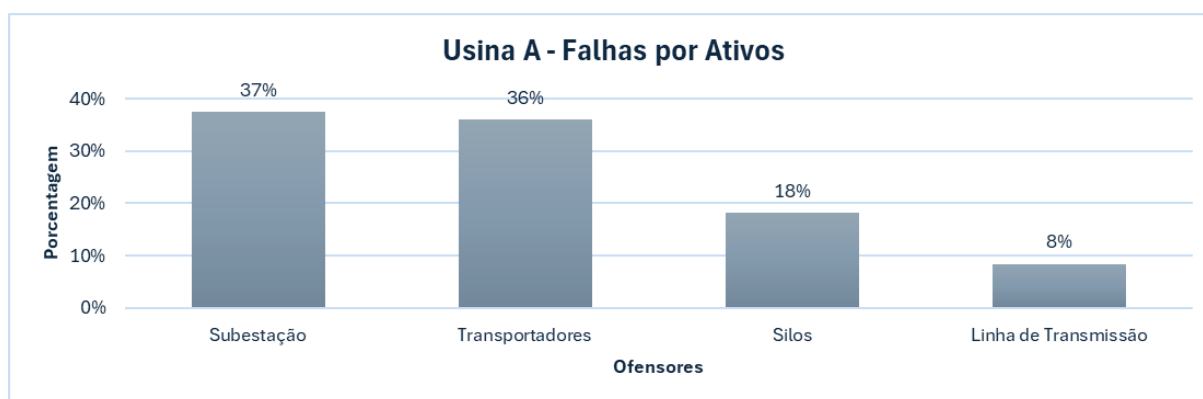
Figura 50: Análise dos ofensores Usina A - 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para um maior nível de detalhe e confirmação de alguns dados, também foi estratificado as falhas referentes aos ativos de produção, ver Figura 51. Neste caso observamos as principais falhas da Usina A estiveram correlacionadas por problemas elétricos, todavia seguido por falhas referente aos transportadores de minério e silos, tendo como causa comumente entupimentos, desalinhamentos, rasgos e outros.

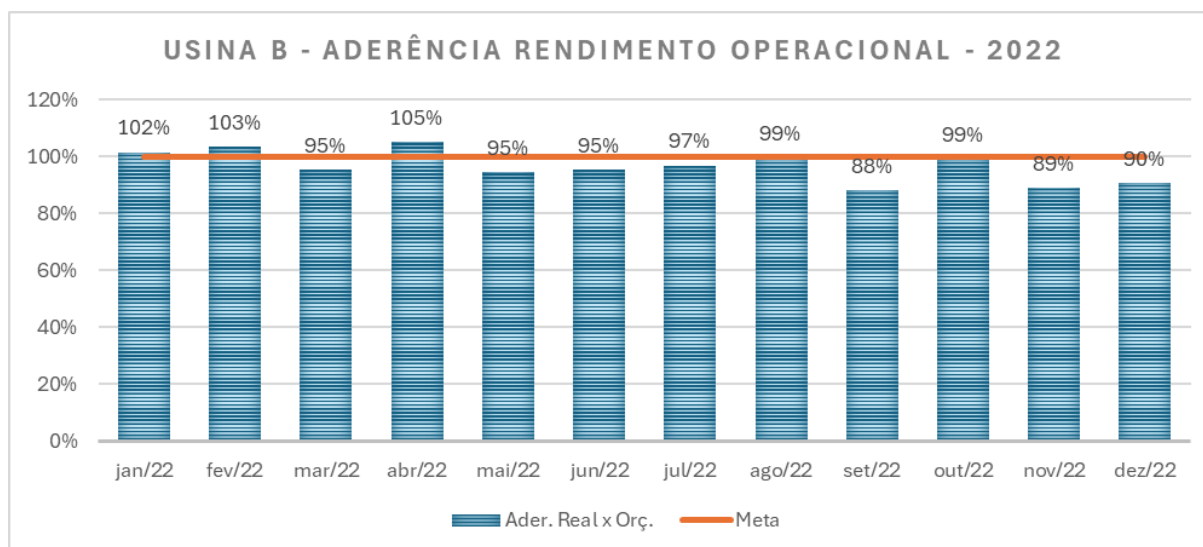
Figura 51: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina A / 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

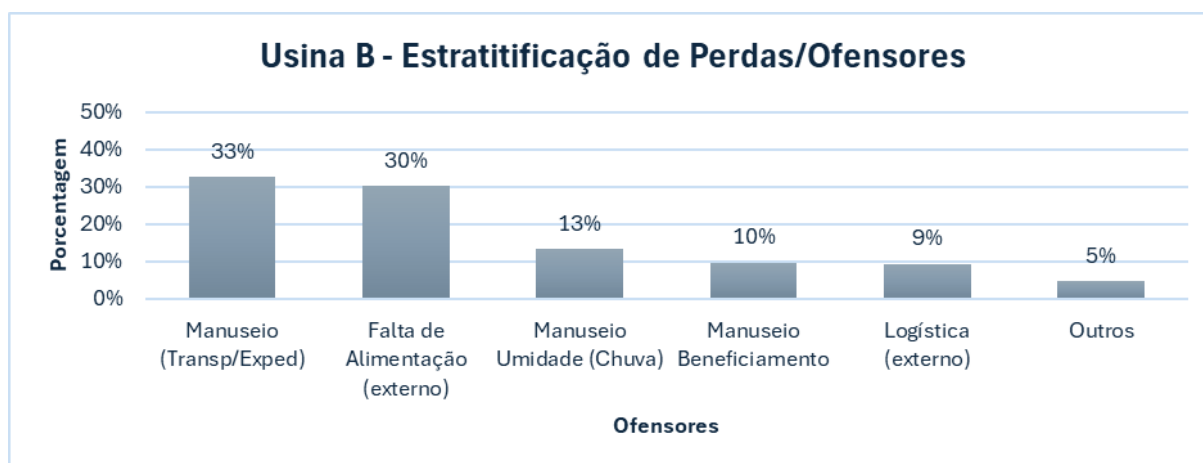
Referente a Usina B, a performance apresentou performance a menor nos indicadores de produção. No gráfico a seguir, ver Figura 52, identificamos que em 9 dos 12 meses do ano, a performance sofreu algum tipo de desvio, seja de disponibilidade física e/ou utilização física.

Figura 52: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina B / 2022



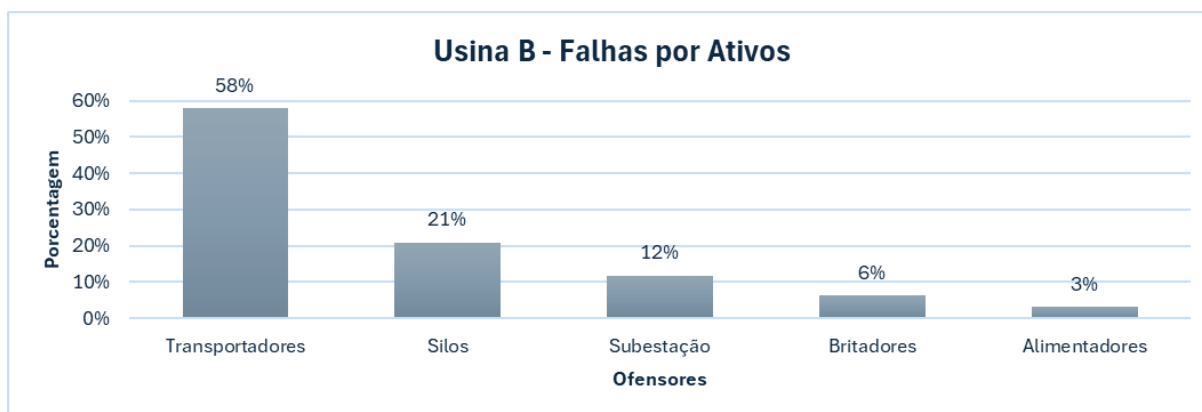
Quanto a estratificação para a Usina B, ver Figura 53, os eventos correlacionados com manuseio também tiveram relevante representatividade, contribuindo aproximadamente com 56% das falhas e/ou perdas no processo produtivo.

Figura 53: Análise dos ofensores Usina B - 2022



Para os ativos de produção, a estratificação das falhas apresentou relevante correlação com ativos comumente impactados por manuseio, sendo transportadores e silos responsáveis por 79% das horas perdidas, gerando impacto na unidade operacional. Ver Figura 54.

Figura 54: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina B / 2022



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Nas análises realizadas, foi constatado que além do impacto no rendimento operacional, as disciplinas de propriedades de fluxo, manuseio e a umidade, também são contribuintes relevantes para a disciplina confiabilidade do processo e dos ativos da usina.

Falhas nos sistemas de transporte e manuseio de material, como entupimentos ou danos aos equipamentos, aumentam o risco de interrupções não planejadas. Isso compromete a confiabilidade, pois exige manutenção corretiva frequente, resultando em maior tempo de inatividade e menos previsibilidade no desempenho da planta.

O desempenho inconsistente dos equipamentos de beneficiamento, muitas vezes devido à alimentação inadequada de minério, compromete a eficiência a longo prazo dos ativos e aumenta o custo com manutenção e outros. Melhorias nesses aspectos poderiam aumentar significativamente tanto a eficiência operacional quanto a previsibilidade e confiabilidade dos processos e ativos da usina.

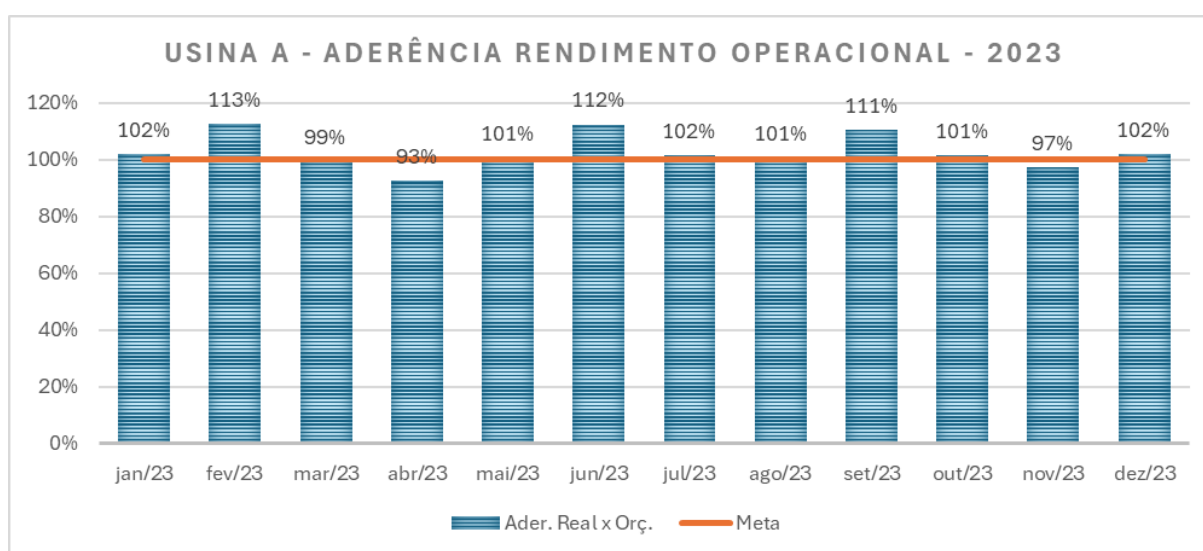
Considerando cenário de aumento de corretivas em ativos relacionados a manuseio, o cenário de risco foi ligeiramente impactado, fazendo as com que as taxas planejadas nas usinas estivessem muito arrojadas para o período seco de 2022, elevando assim o nível de incerteza, conforme dados internos

### 5.2.2. Análise usinas 2023

Em 2023 as performances das usinas observadas apresentaram uma ligeira mudança quando comparado com 2022. A Usina A se manteve com aderência ao rendimento operacional em 103%, já a Usina B teve uma ligeira queda de performance com aderência ao rendimento operacional na ordem de 92%, ou seja, 4% a menor em relação a 2022.

Referente a Usina A, ver Figura 55, não houve mudanças significativas. Os principais desvios estiveram concentrados nos meses de março, abril e novembro.

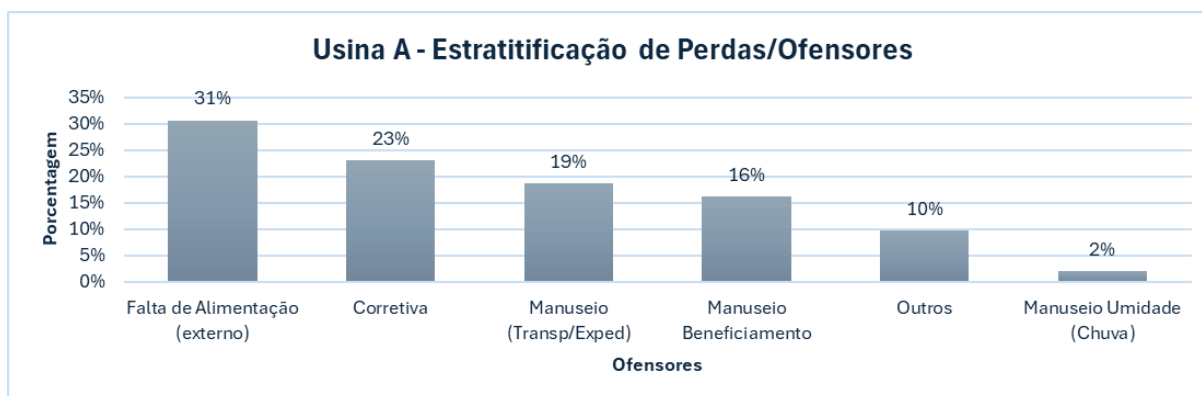
Figura 55: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina A / 2023



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Estratificando as perdas ao longo do ano, ver Figura 56, observamos que ofensores referentes ao manuseio apresentaram uma ligeira redução quando comparada a 2022, saindo de 41% para 37% das falhas e/ou perdas no processo produtivo.

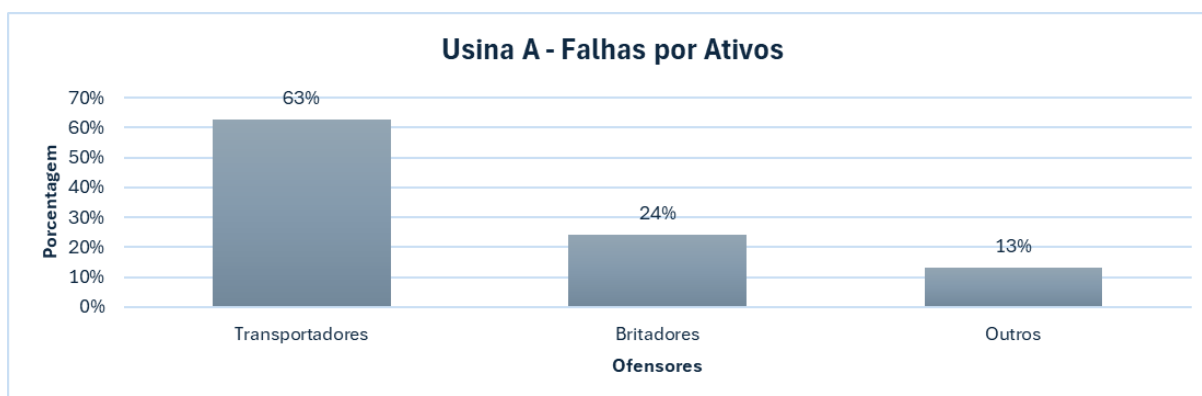
Figura 56: Análise dos ofensores Usina A - 2023



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Referente as falhas por ativos, os transportadores de correia permanecem em destaque com representatividade de 63%. Ver Figura 57.

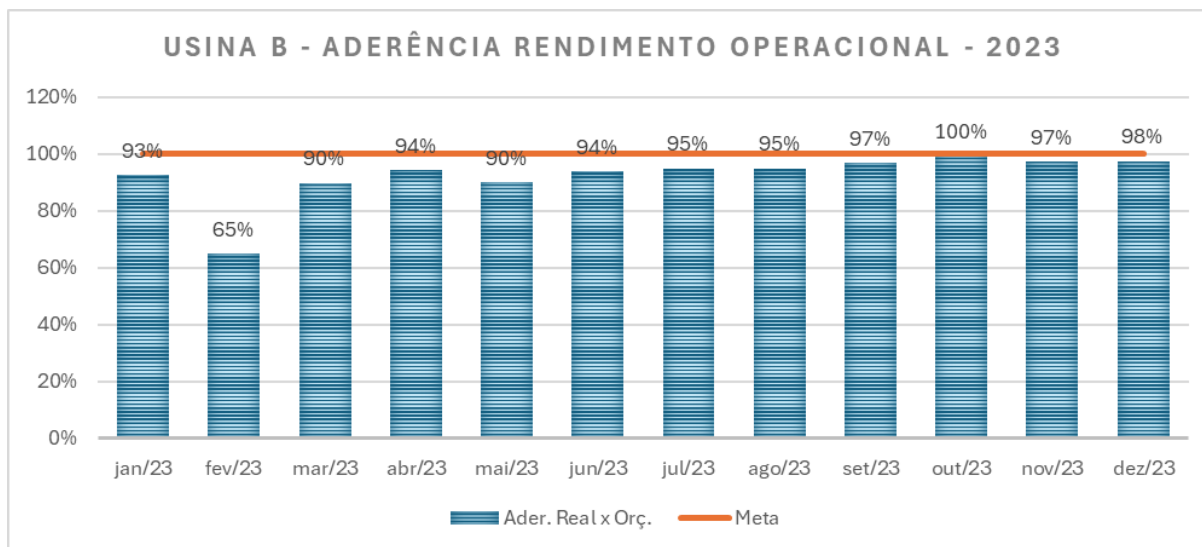
Figura 57: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina A / 2023



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

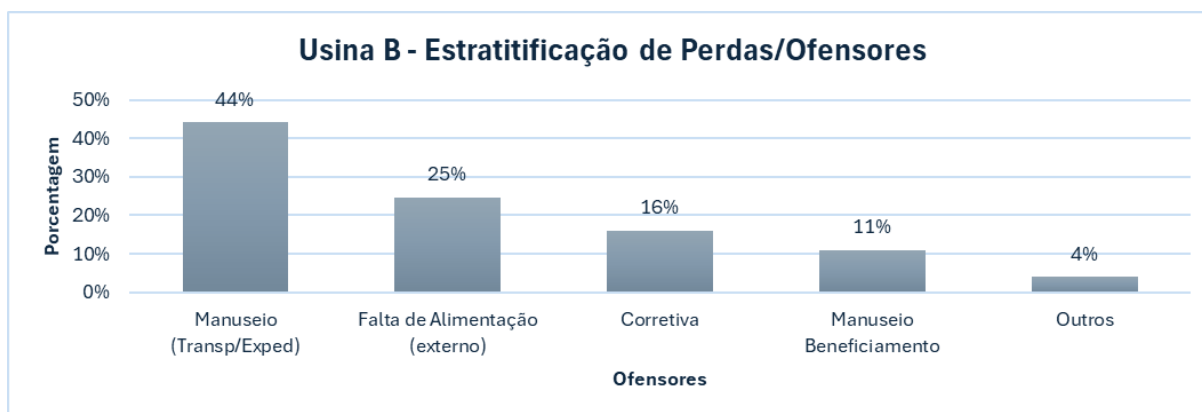
Referente a performance da Usina B, foi identificado um desafio a maior quando comparado a 2023. Com exceção do mês de outubro, todos os demais meses tiveram sua performance impactada no que se refere a disponibilidade e/ou utilização física, ver Figura 58. O primeiro trimestre de 2023 foi de grande impacto para a unidade operacional.

Figura 58: Aderência ao rendimento operacional (disponibilidade e utilização física) – Usina B / 2023



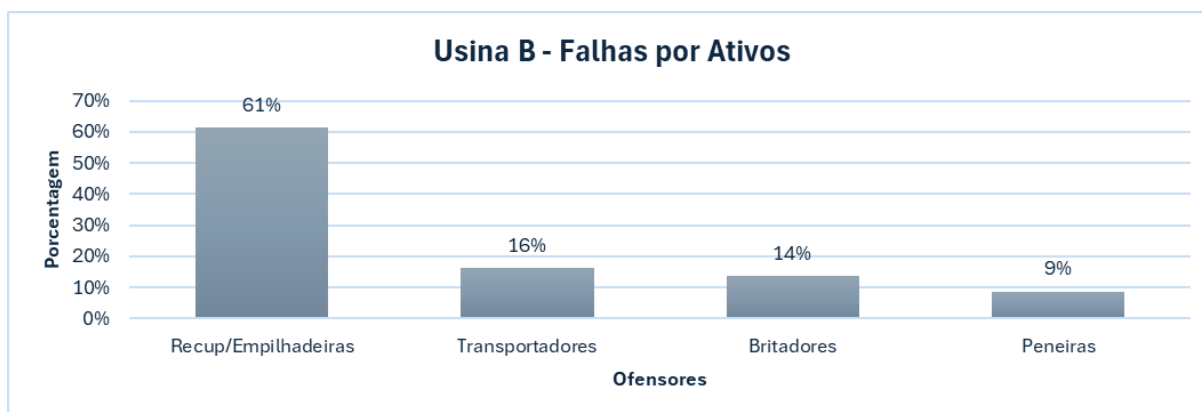
Na estratificação dos ofensores, ver Figura 59, identificamos um destaque para o ofensor manuseio referente aos transportadores de correia e ativos de expedição, com representatividade de 44%. O manuseio nas demais áreas do beneficiamento também impactaram em 11%, totalizando um impacto total de 55%.

Figura 59: Análise dos ofensores Usina B - 2023



Na estratificação dos ativos, ver Figura 60, os grupos de equipamentos de pátio (empilhadeiras e recuperadoras) e transportadores de correia, contribuíram para 77% dos eventos.

Figura 60: Estratificação de Falhas por Ativos - Usina B / 2023



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Em linhas gerais, os resultados das usinas entre os anos 2022 e 2023 em termos de performance para rendimento operacional, apresentaram situações distintas. A Usina A se manteve estável, já a Usina B apresentou uma piora no ano de 2023. Em ambas as usinas, as falhas estão correlacionadas a equipamentos comumente afetados por problemas relacionados a propriedade de fluxo, manuseio, umidade e outros, como já citado nas análises de 2022.

## 6. CONCLUSÕES

A análise de propriedades de fluxo, caracterização mineralógica e os impactos em usinas de beneficiamento são aspectos inter-relacionados cruciais para compreender a dinâmica do minério de ferro, especialmente ao considerar dados provenientes das usinas de Beneficiamento de Minério de Ferro. Ao longo desta pesquisa, examinamos como a análise de propriedades de fluxo e caracterização influenciam diretamente o desempenho do minério durante os processos de beneficiamento e cadeia produtiva. As características diversas do minério de ferro, essenciais para a eficiência operacional, foram destacadas, com foco na otimização dos métodos de transporte e manipulação, considerando a visão integrada do processo.

A caracterização mineralógica revelou a complexidade da composição do minério de ferro, identificando a presença de diferentes fases minerais. Essa compreensão aprofundada da mineralogia é crucial para a definição de estratégias de beneficiamento mais eficazes, permitindo a adaptação dos processos às particularidades da matéria-prima. Além disso, a identificação precisa das fases minerais influencia diretamente na determinação das propriedades mecânicas e químicas do minério, impactando a qualidade final do produto.

Através dos resultados das caracterizações de propriedade de fluxo das amostras MFB7030 e MFUN, é possível obter insumos para determinar de forma técnica informações importantes referentes a processos de beneficiamento e performance de ativos das Usinas A e B, sendo: as aberturas de saída de silos e chutes do circuito de produtos, ocupações volumétricas (correias, chutes, silos, peneiras e britadores), revestimento para otimização de fluidez de material, ângulos de chutes de repouso e de descarga (chutes, silos e pátios), dimensionamento de morto, ocupação de correias etc.

Frequentemente, esses dados também são utilizados para melhoria de processos de manuseio e performance de ativos para os sistemas logísticos, que envolvem pátios de estocagem, vagões de trens, porões de navios e outros.

A análises mineralógicas das amostras 01/02 de MFUN e 03/04 do MFB7030 mostram quais são os principais minerais formadores dos respectivos pré-produtos e através dessas informações pode-se tirar conclusões sobre as causas dos impactos em perdas operacionais

relacionados a dificuldade de fluidez do material. As amostras 01 (MFUN) e 03 (MFB7030) são compostas predominantemente por óxidos de ferro na forma de hematitas martíticas (28,58%), sinuosas (27,24%) e microcristalinas (13,28%) totalizando 69,1% dos minerais presentes na amostra 01 (MFUN), no caso da amostra 03 (MFB7030) apesar de ser formada principalmente por óxidos de ferro ocorre uma mudança na partição destes minerais sendo o mineral predominante a hematita microcristalina (41,25%) seguido da hematita sinuosa (33,64%) somando 74,89% desta composição mineralógica. As amostras 02 (MFUN) e 04 (MFB7030) apresentam os hidróxidos de ferro como principal conjunto de mineral formadores.

A amostra 02 (MFUN) é composta por 59,97% de goethitas sendo as principais: goethitas maciças (42,42%) e terrosas (17,49%), a gibbsita é outro mineral que apresenta marcante presença compondo 12,56% do universo amostral. A amostra 04 (MFB7030) apresenta o mesmo padrão descrito anteriormente sendo composta, prioritariamente, por goethitas (48,36%) – maciças (30%) e terrosas (15,2%) e gibbsitas (14,1%). A grande quantidade de hidróxidos de ferro e gibbsita presente nas amostras 02 (MFUN) e 04 (MFB7030) se reflete na análise química onde se pode observar presença marcante de fósforo (P), óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) além de apresentar altos valores de perda por calcinação (PPC) quando comparado com as amostras 01 (MFUN) e 03 (MFB7030).

Os minérios da Usina B (MFUN) apresentam maior dificuldade de fluidez em comparação aos materiais processados pela Usina A (MFB7030), sendo observado diferenças nos resultados nos testes de coesividade, compressibilidade e ângulos de chute de acomodação e de repouso. O MFUN se comporta de maneira coesiva e muito coesiva a depender da condição de testes em movimento ou em repouso, já o MFB7030 varia entre comportamento fluido e coesivo para as mesmas condições de testes.

A amostra da Usina B apresenta maiores valores de compressibilidade que visto pelo material da Usina A. Os ângulos de chutes necessários para melhor escoabilidade do MFUN são superiores aos medidos para fluidez do MFB7030, a mesma relação pode ser feita para os ângulos de acomodação de correria dessas duas amostras. O MFUN apresenta menor ângulo de repouso quando comparado com o MFB7030.

As diferenças entre os comportamentos fluidodinâmicos observadas entre as duas amostras podem ser explicadas por duas variáveis que são relacionáveis entre si: Composição mineralógica e rota de processo. A Usina B processa 100% do minério em rotas a seco e por esse motivo todo material que é alimentado na usina se transforma em produto, já a Usina A apresenta rotas a seco e a úmido de beneficiamento mineral. As rotas de processamento a úmido tem a capacidade de “lavar” o minério retirando as frações abaixo de 0,045 mm. Nessa fração se encontram a predominância dos minerais terrosos de hidróxido de ferro. Por esse motivo as análises mineralógicas de MFUN apresentaram menor participação de hematitas, martitas e magnetitas que o encontrado no MFB7030, além de ter apresentado maior percentual de goethitas, especialmente as terrosas.

A maior participação de fração fina, sendo essa composta de minerais terrosos, explica a maior coesividade, densidade aparente e conseqüentemente necessidade de maiores ângulos de chutes para fluidez do MFUN. Cristais finos e ultrafinos (abaixo de 0,045mm) de goethitas terrosas tem maior capacidade de absorção e retenção de água causando maior coesividade/adesividade, maior densidade aparente devido a presença dos finos e sua capacidade de conter água entre partículas.

Essas diferenças ajudam a explicar as performances de usinas, visto que minérios mais coesivos apresentam pior classificação em processo de peneiramento, também pode ser notado a piora dos resultados em britadores pela quantidade de materiais não britáveis presentes no processo e conseqüentemente aumento de material presente no circuito terciário, causando retenção de material novo a ser alimentados nas usinas.

Além disso esses materiais podem gerar excesso de paradas devido a obstrução em diversas etapas da cadeia produtiva, sendo: chutes, silos, britadores e peneiras. Por esse motivo todo material a ser processado deve ter uma boa caracterização mineralógica e tecnológica, e de propriedades de fluxo para definição de rotas de processos e condições de contornos mais adequadas para o ROM a ser processado pelas usinas e para o produto que será transportado pelo resto da cadeia produtiva.

No contexto das usinas de beneficiamento, os impactos operacionais foram examinados em detalhes. A interação entre as propriedades de fluxo e a caracterização mineralógica foi

fundamental para entender os desafios enfrentados. A performance do beneficiamento, perfis de perda, análises de riscos e outros foram relevantes para entender as práticas aplicadas, bem como a estratégia de operação.

Nas Usinas A e B foram identificados aproximadamente 400 pontos de transição, na sua maioria chutes, onde a fluidez do material é relevante. Considerando os resultados acima, estima-se que aproximadamente 10% dos pontos de transição são considerados críticos e necessitam de estudos mais aprofundados para adequação de design e/ou layout visando minimizar gargalos.

## 7. REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** *Precambrian Research*, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.

ALMEIDA, E. S. Sustainability assessment in iron ore sintering. *Journal of Cleaner Production*, v. 229, p. 912-921, 2019.

ANGLO AMERICAN. **Minas-Rio.** 2020. Disponível em: <<https://www.angloamerican.com.br/en/our-businesses/iron-ore-brazil>>. Acesso em: 10.abr.2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Publicações. **Economia Mineral. Informe Mineral.** 2022. Disponível em: < Economia Mineral — Agência Nacional de Mineração ([www.gov.br](http://www.gov.br)) >. Acesso em: 10. Mar.2023.

BARBOSA, Marília Inês M. . PORPHÍRIO Ney H (in memorian). BERTOLINI, Luiz Carlos Bertolino. NUEMANN, Reiner, SCHNEIDE, Claudio Luiz, NETO Arnaldo Alcover. **Caracterização Tecnológica de Minério.** Parte I e II.2010. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Cap. 3(Parte I) – pág. 57–84. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/726/1/CCL00240010.pdf>> Acesso em: 13.mar.2023.

BRASIL MINERAL. **As moires empresas do setor mineral.** Revista nº 422. Edição Especial. 2022. Disponível em: < <https://www.brasilmineral.com.br/revista/422/?p=6> Acesso em: 13.mar.2023.

BRASIL MINING (BM). **Entenda o que é minério de ferro, rejeito e barragem. 2019** Disponível em: < <https://brasilminingsite.com.br/entenda-o-que-e-minerio-de-ferro-rejeito-e-barragem>. Acesso em: 20.jul.2023.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - 1. Bombeamento de Polpa e Classificação.** 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - 2. Desaguamento, Espessamento e Filtragem.** 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - 4. A Flotação no Brasil.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - 5. Manuseio de Sólidos Granulados.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2023.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - 6. Separação Densitária.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antonio Eduardo Clark. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - 3. Britagem, Peneiramento e Moagem**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

CHEMALE JUNIOR, Farid; TAKEHARA, Lucy. **Minério de Ferro: Geologia e Geometalurgia**. São Paulo: ABM, 2023.

China Daily. **Profile: Shougang Group**. 2019. Disponível em: <<http://www.chinadaily.com.cn/a/201907/02/WS5d1ac40fa3103dbf1432c7b7.html>>. Acesso em: 10.abr.2023.

CLIMATE DATA ORG. **Clima Parauapebas**. Online. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/para/parauapebas-764140/> > Acesso em: 10.jun.2023

COSTA, Renato J. CANDIA, Renan C. MAZZINGHY, Douglas B. Artigo: **Matemática de desmonte de rochas visando a otimização das etapas de britagem na mina de pitinga da mineração taboca**. UFMG. 2021. Disponível em: < <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/04/T-69-Renato-J.-Costa.pdf> > Acesso em: 02.jul.2023.

DANA, James Dwight; HURLBUT, Cornelius Searle. **Manual de Mineralogia**. 21. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1978.

DANA, James Dwight; KLEIN, Cornelis; DUTROW, Barbara. **Manual of Mineral Science**. 23ª ed. Hoboken: Wiley, 2008.

DOUGLAS, D. **Engenharia de Confiabilidade: Teoria e Prática na Prevenção de Falhas em Componentes Mecânicos**. Wiley, 2019.

HAN, Tin. **Comparison of Wall Friction Measurements by Jenike Shear Tester and Ring Shear Tester**. Kona Powder and Particle Journal No.29. 2011. Disponível em < [PDF] Comparison of Wall Friction Measurements by Jenike Shear Tester and Ring Shear Tester | Semantic Scholar > Acesso em: 20.mar.2023.

HOLLNAGEL, E. **Engenharia de Resiliência na Prática: Um Guia Prático**. Routledge, 2016.

IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração). **Panorama 2023**. c2023. Disponível em: < <https://www.ibram.org.br/publicacoes/#publication> >. Acesso em: 05.mai.2023.

INSTITUTO DA GEOCIÊNCIAS (ICG) - USP. Material didático. **Minerais. Hematita**. 2017. Disponível em: < <https://didatico.igc.usp.br/wp-content/uploads/2017/04/hematita-3-1536x1024.jpg> > Acesso em: 19.jul.2023.

INSTITUTO DA GEOCIÊNCIAS (ICG) - USP. Material didático. **Minerais. Magnetita**. 2017. Disponível em: < <https://didatico.igc.usp.br/wp-content/uploads/2017/04/magnetita-4-1536x1024.jpg> > Acesso em: 19.jul.2023.

INSTITUTO DA GEOCIÊNCIAS (ICG) - USP. Material didático. **Minerais. Goethita**. 2018. Disponível em: < <https://didatico.igc.usp.br/wp-content/uploads/2018/08/goethita-1-1024x678.jpg>> Acesso em: 20.jul.2023.

INSTITUTO DA GEOCIÊNCIAS (ICG) - USP. Material didático. **Minerais. Caulinita**. 2018. Disponível em: < <https://didatico.igc.usp.br/wp-content/uploads/2018/05/caulinita.jpg> > Acesso em: 20.jul.2023.

INSTITUTO DA GEOCIÊNCIAS (ICG) - USP. Material didático. **Sedimentares. Canga**. 2018. Disponível em: < <https://didatico.igc.usp.br/rochas/sedimentares/canga/> > Acesso em: 21.jul.2023.

JAMASMIE, Cecilia. **Rio Tinto planning Australia's largest iron ore mine**. 2014. Disponível em: < <https://www.mining.com/rio-tinto-planning-australias-largest-iron-ore-mine-57176/>> Acesso em: 11.abr.2023.

JENIKE & JOHANSON. Science Engineering Design. **Relatório 72740 - 1 de resultados de testes de propriedades de fluxo em amostra de minério de ferro, 2023**.

KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. Jr. **Manual de Mineralogia**. Wiley, 1999.

KLEYNER, A. **Engenharia Prática de Confiabilidade**. Wiley, 2019.

LUZ, Adão Benvindo da. LINS, Fernando Antonio Freitas. Introdução ao **Tratamento de Minérios**. Cap 1. 6ª Edição. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo1.pdf>. Acesso em: 17.abr.2023.

MELO, Sandro.CM Capital. Artigo. **China no Mercado de Minério de Ferro: saiba a importância**. 2021. Disponível em: < <https://cmcapital.com.br/blog/china-no-mercado-de-minerio-de-ferro/> > Acesso em: 14.jun.2023.

MOBLEY, R. K. **Introdução à Manutenção Preditiva**. Elsevier, 2017.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. Butterworth-Heinemann, 2018.

MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL E JARDIM BOTÂNICA – UFMG. 2023. Disponível em: < <https://www.ufmg.br/mhnpj/acervo/geologia/mhnpj-ge-022016-0000009/> > Acesso em: 16.jun.2023.

NASCIMENTO Damares da Cruz Barbosa. ROSA, Diemison Lira Santa. SOARES, Edson Miranda. NEVES. Alacid do Socorro Siqueira. PAULA, Marcos Vinicius da Silva. **Características mineralógicas e aplicações do minério de ferro oriundo da província mineral de Carajás: uma revisão**. 2022. Research, Society and Development, v. 11, n. 7, e59811730254, 2022 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30254>. Disponível em: < [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/36111730254) > Acesso em: 08.abr.2023.

NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM: Manutenção Produtiva Total**. Productivity Press, 2017.

POLIVEIRA, J. et al. **Reliability-Centered Maintenance of Ship Loading Equipment: A Case Study**. Minerals, v. 10(12), 2020.

PEREIRA, L. A.; TAVARES, L. M. **Circuitos de cominuição de minérios de ferro - Britagem e Moagem**. Instituto Tecnológico Vale. 2016.

RIO TINTO. **Iron Ore**. 2021. Disponível em: <<https://www.riotinto.com/our-businesses/iron-ore>>. Acesso em: 20.mar.2023.

SÁ, Gilvan. FIGUEIREDO, Rodrigo P. de. MAGALHÃES, Fábio Soares. 2013. Revista ABGE. **Ruptura do talude sudeste da mina de n4e – um estudo de caso, Carajás, Estado do Pará**. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Localizacao-das-minas-de-ferro-do-Complexo-Minerador-de-Carajas\\_fig1\\_299507544](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Localizacao-das-minas-de-ferro-do-Complexo-Minerador-de-Carajas_fig1_299507544)> Acesso em: 05.abr.2023.

SANTOS, G. M. et al. Overview of climate change impacts on iron and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118-750, 2020.

SANTOS, Diego Henrique Lebron. AGUIAR, Igor Bruno Costa de. SILVA, Nayara Cristhine da, FREITAS, Thiago Henriques Lima de. **Artigo: NBR ISO 55000: sistema de gestão de ativos simples e eficaz**. Belo Horizonte UNIBH. 2016. Disponível em: < <https://pmkb.com.br/artigos/nbr-iso-55000-sistema-de-gestao-de-ativos-simples-e-eficaz/> > Acesso em: 15.jun.2023.

SILVA, Valdir. Desmonte de Rochas. São Paulo: Oficina de Textos, 2019, p. 15-45.

SILVA, J. P. et al. Climate variability and the iron ore industry in Brazil. **Resources Policy**, v. 55, p. 168-176, 2018.

SMITH, P. **Confiabilidade, Manutenibilidade e Risco: Métodos Práticos para Engenheiros**. Butterworth-Heinemann, 2016.

TAVARES, S. M.; BARBOSA, R. C. **Análise de Falhas de Máquinas e Equipamentos Industriais**. Editora Blucher, [ano].

TAYLOR S. R. & MCLENNAN S. M. **The Continental Crust: Its Composition and Evolution**. Oxford, London, Edinburgh, Boston.1985

TRUSHKO. Vlademir L. TRUSHKO Olga V. **Journal of Mining Institute. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground**. Vol. 250, pag 569-577. 2021 Disponível em: < Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies | Vladimir L. Trushko | Journal of Mining Institute (spmi.ru) Acesso em: 27.mar.2023.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Iron Ore Statistics and Information**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/nmic/iron-ore-statistics-and-information>>. Acesso em: 15.jun.2023.

VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAUJO, Armando Correia de. *Introdução ao Tratamento de Minérios*. 1. ed. Minas Gerais: UFMG, 2012.

VALE S.A. Iron Ore Production Summary. 2021. Disponível em: <<https://www.vale.com/EN/investors/information-market/iron-ore-production-summary>>. Acesso em: 05.mar.2023

VALE S.A. Uses of Iron Ore. [s.d]. Disponível em: < <https://vale.com/mining> >. Acesso em: 05.mar.2023

WEINRICH MINERAL. Mineral for sale. **Gibbsite**. 2023 Disponível em: < 8602602.jpg (1280×1280) (weinrichmineralsinc.com)> Acesso em: 08.mai.2023.

WORLD STEEL ASSOCIATION (WSA). **Steel Statistical Yearbook**. c2023 Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/steel-statistical-yearbook.html>>. Acesso em: 17.abr.2023.