



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO- UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
E DE MATERIAIS**



**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**ANÁLISE DE VARIAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA
DO PRODUTO DA MOAGEM PRIMÁRIA DE MINÉRIOS
ITABIRÍTICOS DA MINERAÇÃO DA MINA DO SAPO APÓS
ALTERAÇÃO OPERACIONAL DO CONSUMO ENERGÉTICO**

GLAUBER RODRIGO DINIZ

**OURO PRETO – MG
2022**

Glauber Rodrigo Diniz

**ANÁLISE DE VARIAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO
PRODUTO DA MOAGEM PRIMÁRIA DE MINÉRIOS ITABIRÍTICOS DA
MINERAÇÃO DA MINA DO SAPO APÓS ALTERAÇÃO OPERACIONAL DO
CONSUMO ENERGÉTICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dsc. Danton Heleno Gameiro

Coorientadores: Eng. Dsc. Luís Cláuzio de Rennó Machado

Eng. Dsc. Henrique Nogueira Soares

**OURO PRETO – MG
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D585a Diniz, Glauber Rodrigo.

Análise de variação na distribuição granulométrica do produto da moagem primária de minérios itabiríticos da mineração da Mina do Sapo após alteração operacional do consumo energético. [manuscrito] / Glauber Rodrigo Diniz. - 2022.

83 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Danton Heleno Gameiro.

Coorientadores: Prof. Dr. Henrique Nogueira Soares, Dr. Luís Cláuzio de Rennó Machado.

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

1. Energia - Consumo. 2. Granulometria. 3. Partículas (Física, química, etc.) - Pellet Feed. 4. Beneficiamento de minério - Moagem Primária. I. Gameiro, Danton Heleno. II. Machado, Luís Cláuzio de Rennó. III. Soares, Henrique Nogueira. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 669.01

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Glauber Rodrigo Diniz

Análise da variação na distribuição granulométrica do produto da moagem primária de minérios itabiriticos da mineração da Minas do Sapo após alteração operacional do consumo energético.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em 08 de novembro de 2022.

Membros da banca

Dr. Danton Heleno Gameiro - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Maria Aparecida Pinto - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Henrique Nogueira Santos - (Membro externo)

Danton Heleno Gameiro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/12/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Danton Heleno Gameiro**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/12/2022, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0440210** e o código CRC **1AF0566A**.

Essa conquista só foi possível por não desistir de se tornar um sonho em uma realidade. Desistir de um sonho é perder um pedaço de nossa própria alma.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, pelo cuidado, carinho, amor incondicional, incentivo e apoio emocional desde o início desta trajetória.

Aos meus pais, Jorge e Terezinha, pelas orientações, ensinamentos e preocupações.

Aos meus irmãos, Wagner e Helder, por desejarem e torcerem sempre pelo meu sucesso e que eu alcance a realização dos mais inestimáveis sonhos da minha vida.

À minha namorada, Gabriella, que dentro de suas atitudes de carinho e cuidado me apoiaram em momentos difíceis, sendo companhia e morada segura de minhas emoções. Por seus conhecimentos compartilhados e valiosos conselhos que me impulsionaram na concretização dessa etapa na minha vida.

Aos meus orientadores, pelo aconselhamento e mentoria.

Ao meu orientador Luís Cláuzio, que por meio do compartilhamento de seu intelecto pude desenvolver este trabalho. Por ser meu mentor de estágio. Por todo apoio, ensinamento e diálogo a me formar um profissional melhor.

À Anglo American por proporcionar através do seu programa de estágio uma oportunidade indescritível de ganho de experiência, aprendizado e amizades. Por fomentar o desenvolvimento e realização desse trabalho.

À toda Gerência de Processos e Qualidade da Anglo American, pela oportunidade de estágio, ensinamentos e por incentivarem todos os dias o meu desenvolvimento.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino público e de qualidade que me proporcionou desenvolvimento intelectual e profissional.

Ao Departamento de Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto, por me proporcionar a obtenção de conhecimentos excepcionais por meio seus professores de extrema capacitação e me tornar Engenheiro Metalúrgico.

Ao Gustavo Salles, pela amizade, apoio e compartilhamento de experiências. Pelos ensinamentos de vida.

À República Bastilha, por seu meu lar durante esses árduos anos. Pelos ensinamentos de vida. Pelos bons momentos vividos e amizades. Viva a vida republicana!

“L'amour pour principe et l'ordre pour base; le progrès pour but.”

Auguste Comte

RESUMO

Na indústria mineral a produção de *pellet feed* tem grande participação quando se avalia a produção de minério de ferro para as variadas cadeias de produção siderúrgica. O processo de produção do *pellet feed* engloba uma série de etapas de operação de beneficiamento, entre elas: britagem, peneiramento, moagem, deslamagem, flotação, espessamento e filtragem. Neste trabalho foram realizados estudos sobre alguns parâmetros da moagem primária, sendo os parâmetros: consumo energético e distribuição granulométrica do produto da moagem primária de minérios itabiríticos na Mina do Sapo no sistema Minas – Rio da empresa Anglo American PLC. O que justifica esta investigação é a necessidade de validar uma observação empírica, em que, após uma parada preventiva de uma das linhas de moagem primária, retornou-se a operação desta com um consumo energético menor ($\cong 14100\text{kW}$) que o habitual ($\cong 14800\text{kW}$) e o produto da moagem se manteve dentro do idealizado. Foram utilizados os *softwares* Microsoft Excel® e Minitab® para o estudo. Foi aferido com 95% de confiança, que houve um aumento de $7\mu\text{m}$ na peneira de abertura de malha pela qual 80% do material do produto é passante após a mudança de redução do consumo energético, diferentemente do que é proposto pela informação empírica. Foi possível compreender também que houve redução de aproximadamente 0,32 no valor da variável adimensional *GRAU DE REDUÇÃO*. Para validação da modificação no sistema de moagem primária utilizando-se um consumo energético inferior ao especificado, é necessário avaliar o impacto desta modificação na recuperação em massa e recuperação metalúrgica da flotação mecânica, por isso, sugere-se que se faça uma avaliação considerando os possíveis impactos nos parâmetros de controle da flotação mecânica do processo de beneficiamento de minério de ferro avaliado.

Palavras chaves: Consumo Energético, Granulometria, *Pellet Feed*, Moagem Primária.

ABSTRACT

In the mining industry, pellet feed production has great participation when we assess the production of iron ore for the various steel production chains. The pellet feed production process includes a series of processing operation steps, including: crushing, sieving, grinding, desliming, flotation, thickening and filtering. In this work, studies will be carried out on some parameters of primary grinding, such as: energy consumption and particle size distribution of the primary grinding product in the Minas - Rio system of Anglo-American PLC. The justifies of this investigation is the need to validate an empirical statement that has started after a preventive shutdown of a one primary grinding line, and after the preventive maintenance the primary grinding operation was returned with an energetic consumption lower ($\cong 14100\text{kW}$) than usual ($\cong 14800\text{kW}$) and the grinding product remained within the ideal. In the study was used Microsoft Excel® software and Minitab® software. With 95% of confidence, was possible measure that the particle size distribution was increased by $7\mu\text{m}$ by P80 analyzing, unlike the empirical statement. It was also possible to understand that there was a reduction of approximately 0,32 in the value of the dimensionless variable *REDUCTION DEGREE*. In order to validate a modification in the primary grinding system using an energy consumption lower than usual, it is necessary to evaluate the impact of this modification on the mechanical flotation, therefore, it is suggested that an evaluation be carried out considering the possible impacts on the parameters of mechanical flotation control of the studied iron ore beneficiation process.

Keywords: Energy Consumption, Granulometry, Pellet Feed, Primary Grinding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Cidades de atuação do Projeto Minas – Rio da empresa Anglo American.....	15
Figura 1.2: Fluxograma de produção.....	16
Figura 1.3: (A) Mapa geológico-estrutural da área em estudo. (B) Localização da área estudada em mapa geológico regional.	17
Figura 1.4: Ilustração para moinho de bolas do tipo <i>overflow</i>	19
Figura 1.5: Foto do interior do moinho de bolas MB02 durante inspeção de revestimento. ...	19
Figura 1.6: Representação esquemática de um moinho de bolas com trommel.....	20
Figura 3.1: Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição dos fragmentos resultantes.....	25
Figura 3.2: Esquema de moinho de bolas.....	26
Figura 3.3: Moagem em regime de catarata.	28
Figura 3.4: Moagem em regime de cascata.	28
Figura 3.5: Representação de um gráfico do tipo <i>boxplot</i>	33
Figura 5.1: Gráfico de potência para o moinho de bolas MB02, por período, sem tratamento de dados.....	50
Figura 5.2: Histograma para variável <i>A80</i> nos dois períodos.....	52
Figura 5.3: Gráfico de potência para o moinho de bolas MB02, por período, após tratamento de dados.....	53
Figura 5.4: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para <i>POTÊNCIA</i> no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para <i>POTÊNCIA</i> no 2º período.	54
Figura 5.5: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para <i>TX. ALIM.</i> no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para <i>TX. ALIM.</i> no 2º período.	55
Figura 5.6: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para <i>A80</i> . no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para <i>A80</i> . no 2º período.	56
Figura 5.7: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para <i>P80</i> . no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para <i>P80</i> . no 2º período.	57
Figura 5.8: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para <i>GRAU DE REDUÇÃO</i> . no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para <i>GRAU DE REDUÇÃO</i> no 2º período.	58
Figura 5.9: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para <i>REQ. ENERGÉTICO</i> . no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para <i>REQ. ENERGÉTICO</i> no 2º período.....	59
Figura 5.10: Relatório resumo para teste <i>t-Student</i> comparativo entre períodos para a variável <i>POTÊNCIA</i>	60
Figura 5.11: Relatório resumo para teste <i>t-Student</i> comparativo entre períodos para a variável <i>TX. ALIM.</i>	61
Figura 5.12: Relatório resumo para teste <i>t-Student</i> comparativo entre períodos para a variável <i>A80</i>	62

Figura 5.13: Curva granulométrica da alimentação do moinho MB02 em ambos os períodos agrupamento de dados.....	63
Figura 5.14: Relatório resumo para teste <i>t-Student</i> comparativo entre períodos para a variável <i>P80</i>	64
Figura 5.15: Curva granulométrica do produto do moinho MB02 em ambos os períodos do agrupamento de dados.....	65
Figura 5.16: Relatório resumo para teste <i>t-Student</i> comparativo entre períodos para a variável <i>GRAU DE REDUÇÃO</i>	66
Figura 5.17: Relatório resumo para teste <i>t-Student</i> comparativo entre períodos para a variável <i>REQ. ENERGÉTICO</i>	67
Figura 5.18: Teste de <i>Mann-Whitney</i> para a variável <i>GRAU DE REDUÇÃO</i> no 1° e 2° período.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Nomeação das variáveis.	46
Tabela 5.1: Resultados dos testes t-student compilados.....	69

LISTA DE SIMBOLOS

n – Número de termos.

x_i – Valor amostral aferido.

\bar{x} – Média aritmética.

σ^2 – Variância.

σ – Desvio padrão.

f_i - Frequência de classe.

D_M – Desvio absoluto médio.

Σ - Somatório.

A_{80} – Abertura de malha da peneira da qual 80% do material da alimentação do moinho é passante.

P_{80} – Abertura de malha da peneira da qual 80% do material do produto da moagem é passante.

W – Potência, consumo específico.

LISTA DE SIGLAS

PLC – Public Limited Company.

S.A – Sociedade Anônima.

LTDA – Limitada.

EBITDA – Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization.

WI – Work Index.

MB01 – Moinho de Bolas da linha 1 de moagem primária.

MB02 – Moinho de Bolas da linha 2 de moagem primária.

tms – Tonelada métrica seca.

AIQ – Amplitude Interquartil.

PRO – Procedimento de rotina operacional.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Descrição do Empreendimento	14
1.2	Jazida	16
1.3	Formulação do Problema	18
1.4	Justificativa	21
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo Geral	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	Cominuição.....	23
3.2	Mecanismos de Fratura.....	24
3.2.1	Mecanismo de fratura por abrasão.....	24
3.2.2	Mecanismo de compressão ou esmagamento	24
3.2.3	Mecanismo de fratura por choque ou impacto	25
3.2.4	Tamanho das partículas como produto dos mecanismos de fratura	25
3.3	Tipos de Moagens Comumente Usadas para Minério de Ferro.....	26
3.4	Moinho de Bolas.....	26
3.5	Consumo Energético para a Redução Granulométrica – Leis da Cominuição.....	29
3.5.1	A primeira lei da cominuição	29
3.5.2	A segunda lei da cominuição	29
3.5.3	A terceira lei da cominuição	30
3.6	Avaliação Estatística de Dados.....	31
3.7	Medidas de Dispersão.....	31
3.7.1	Desvio absoluto médio	31
3.7.2	Variância.....	32
3.7.3	Desvio padrão	32
3.7.4	Gráficos <i>Boxplot</i>	33
3.7.5	Teste de normalidade de <i>Anderson-Darling</i>	35
3.8	Método comparativo – teste de <i>Mann-Whitney</i>	37
3.9	Método comparativo – teste <i>t-Student</i>	40
3.10	Inferência Estatística.....	41
3.10.1	Identificação do problema ou situação	42
3.10.2	Coleta de dados.....	42
3.10.3	Tratamento dos dados	43

3.10.4	Apresentação das variáveis.....	43
3.10.5	Análise e interpretação dos resultados	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	Identificação do Problema	44
4.2	Levantamento das Variáveis.....	44
4.3	Determinação do Espaço Temporal.....	47
4.4	Localização das Informações Necessárias.....	47
4.5	Coleta de Dados	47
4.6	Determinação de Limites e Tratamento de Dados.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	Determinação dos Limites e Pontos Excepcionais das Variáveis.....	50
5.1.1	Taxa de alimentação dos moinhos.....	50
5.1.2	Consumo específico – potência	51
5.1.3	A80	51
5.2	Representação Gráfica e Verificação de Normalidade Distributiva dos Dados para os Parâmetros.....	52
5.3	Análise Comparativa.	59
6	CONCLUSÃO.....	70
	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXO A.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Empreendimento

A *Anglo American Public Limited Company* é um conglomerado de origem britânica que remonta desde a data de 1917. Tendo mais de 100 anos é um dos maiores agentes de mineração no setor mundial, possuindo um portfólio de produtos de mineração diversificado, sendo alguns deles: diamantes, minério de cobre, níquel e magnésio, minérios do grupo da platina, carvão mineral e minério de ferro (ANGLO AMERICAN PLC, 2020a).

Desde os anos 1973 a empresa possui instalações no Brasil, tendo o início de suas atividades no país com o projeto de mineração de níquel, na Cidade de Niquelândia no estado de Goiás. Apesar da presença desde a década de 1970, a empresa somente entrou no ramo de mineração de minério de ferro no Brasil a partir dos anos 2008 após a compra e execução total do projeto Minas-Rio da empresa MMX Mineração e Metálicos S.A. A Anglo American embarcou sua primeira produção de *pellet feed* somente em outubro de 2014 (ANGLO AMERICAN PLC, 2017).

O projeto Minas-Rio, que é 100% pertencente à empresa, com exceção da instalação portuária, a qual tem 50% em *joint venture* com a empresa Ferroport, é o maior projeto de mineroduto atualmente do mundo. Com extensão aproximada em 526 quilômetros, o mineroduto atravessa 33 municípios brasileiros, iniciando no estado de Minas Gerais na cidade de Conceição do Mato Dentro, onde se localiza sua mina. O material lavrado é enviado para a planta de beneficiamento localizada na cidade de Alvorada de Minas, em seguida, o produto já beneficiado é enviado por mineroduto, passando por diversas cidades, especialmente pelas cidades de Santo Antônio do Gramma e Tombos, onde se localizam as estações de apoio de bombeamento, indo até a cidade São João da Barra, onde se localiza a estação de filtragem e o porto hidroviário (ANGLO AMERICAN PLC, 2020a).

Conforme pode-se observar na Figura 1.1, a cidade de São João da Barra se encontra no estado do Rio de Janeiro, sendo esta o destino final para que o *pellet feed*, único produto dessa operação, seja embarcado para seus diversos clientes no mundo por meio do Porto do Açú.



Figura 1.1: Cidades de atuação do Projeto Minas – Rio da empresa Anglo American (ANGLO AMERICAN PLC, 2018).

O minério de ferro processado no sistema Minas-Rio, unidade de negócio da Anglo American, possui capacidade para produção aproximada em 26,5 milhões de toneladas/ano de *pellet feed*, que são extraídos da jazida da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, no estado de Minas Gerais (TURRER et al., 2017).

Na Figura 1.2, pode-se observar que o processamento se inicia nas etapas de cominuição, que são etapas em que o minério passa por britadores de mandíbulas, grelhas, britadores cônicos, peneiras, prensas de rolos, moinhos de bolas e hidrociclones. Após a passagem do minério por esses equipamentos, ele é enviado para as etapas de deslamagem, flotação, remoagem em moinhos verticais (único e exclusivamente para adequação da granulometria e geração de *blaine* para o transporte pelo mineroduto), espessamento, bombeamento (por 526km de mineroduto) e filtragem para a separação sólido-líquido para embarque (TURRER et al., 2017).

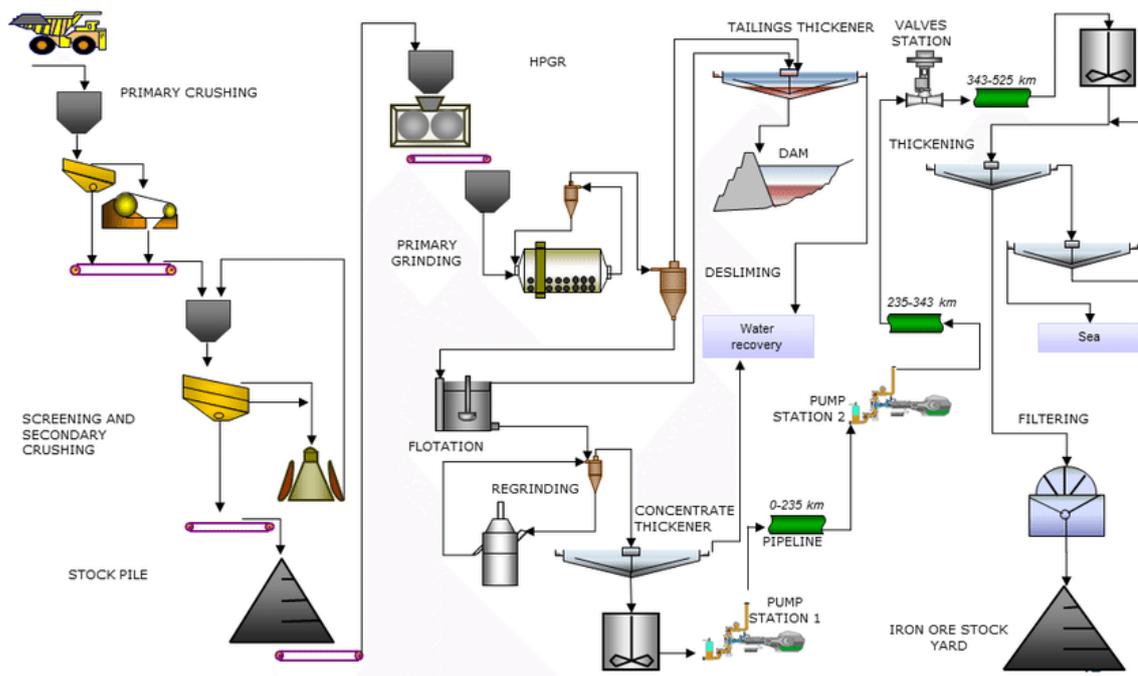


Figura 1.2: Fluxograma de produção (TURRER et al., 2017).

Anualmente, o projeto apresenta grande rentabilidade para a empresa e seus acionistas, em que resultados apresentados indicam que no ano de 2019 alcançou-se o valor de US\$ 1,2 bilhão de EBITDA (*Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization*) gerados, com produção de 23,1 milhões de toneladas em base úmida de embarque no porto (ANGLO AMERICAN PLC, 2020b).

1.2 Jazida

Conforme pode-se observar na Figura 1.3, a jazida está localizada na borda leste da Serra do Espinhaço. Com isso, a produção de *pellet feed*, único e exclusivo produto final proveniente das operações do sistema Minas – Rio da empresa Anglo American PLC, têm início na extração do mineral itabirítico friável em sua mina localizada na cidade de Conceição do Mato Dentro, cidade do estado de Minas Gerais (ROLIM, 2016).

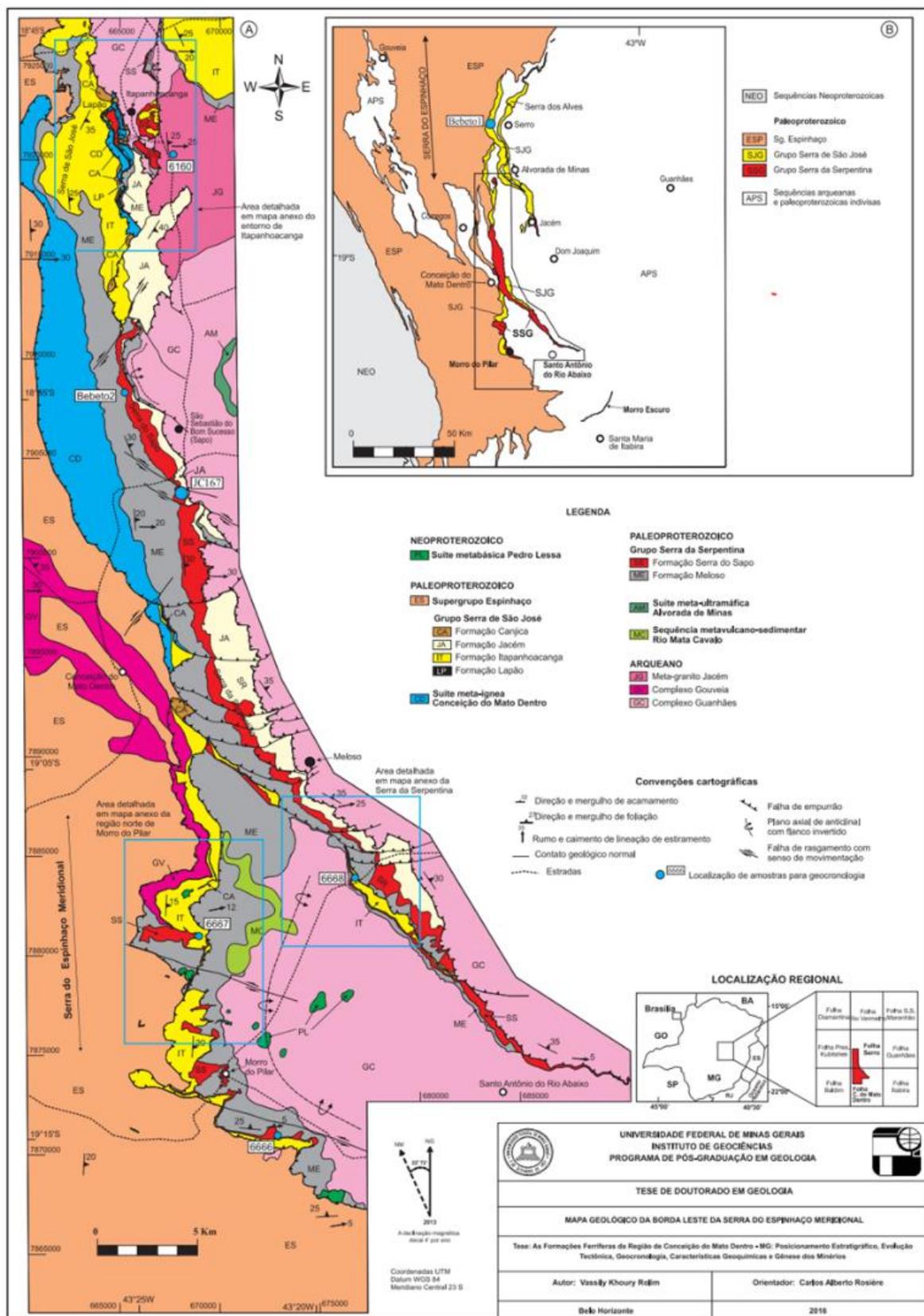


Figura 1.3: (A) Mapa geológico-estrutural da área em estudo. (B) Localização da área estudada em mapa geológico regional, adaptado de Rolim (2016).

1.3 Formulação do Problema

A eficiência na etapa de beneficiamento de minérios é resultado de uma combinação assertiva entre etapas de cominuição e classificação, ou seja, entre os métodos, técnicas e os diversos tipos de processos que envolvem fragmentação e separação de partículas minerais (SAMPAIO; DELBONI JUNIOR, 2018).

Os circuitos de cominuição em escala industrial são configurados em estágios sucessivos para induzir a fragmentação e a separação das partículas de acordo com as respectivas especificações (SAMPAIO; DELBONI JUNIOR, 2018).

A operação unitária de moagem pode representar grande valor no custo de operação, podendo chegar a representar 40% dos custos totais da operação. Por isso, operações em que há um consumo energético superior ao que é necessário para o processo têm como principal consequência o desgaste da carga moedora e também dos revestimentos do moinho de forma abrasiva e prematura (ROVERI; CHAVES, 2011).

É importante que se tenha um controle muito bem realizado do consumo energético dos moinhos, para que se evite gastos financeiros com desgaste desnecessário dos corpos moedores e sua rotação redundante. Nesse âmbito, investimento em esforços e estudos para mitigar ou encontrar a operação de moagem ideal é fundamental para o processo.

No processo de produção de *pellet feed* do sistema Minas-Rio, a etapa de moagem primária e as etapas que antecedem o espessamento, antes do material ser bombeado pelo mineroduto, são divididas em duas linhas de operação distintas, contendo cada uma, os mesmos tipos de equipamentos. Os moinhos de bolas de cada linha são nomeados em MB01 e MB02, respectivamente da linha 1 e linha 2 de produção.

Os moinhos de bolas MB01 e MB02 são de fabricação da empresa METSO:OUTOTEC LTDA e possuem dimensões de 7,9m de diâmetro e 12,8m de comprimento (26' x 42'), contudo, sua dimensão útil de operação retirando-se o volume ocupado pelos revestimentos de proteção é de 6m de diâmetro e 11m de comprimento (METSO:OUTOTEC, 2022).

Na Figura 1.4, tem-se uma representação ilustrativa de um moinho do tipo *overflow*, modelo usado no processo de moagem primária do sistema de beneficiamento Minas-Rio. Esse tipo de modelo de moinho possui como principais características o uso em via úmida, rotação promovida/controlada por meio de estrutura do tipo eixo-pinhão e a saída do material moído de

dentro do moinho ocorre pelo transbordamento através do furo do munhão da tampa da descarga, no qual o nível da descarga da polpa situa-se normalmente de 2” a 4” abaixo do nível da abertura da alimentação, o que permite um leve gradiente no escoamento da polpa (Silva, 2014).

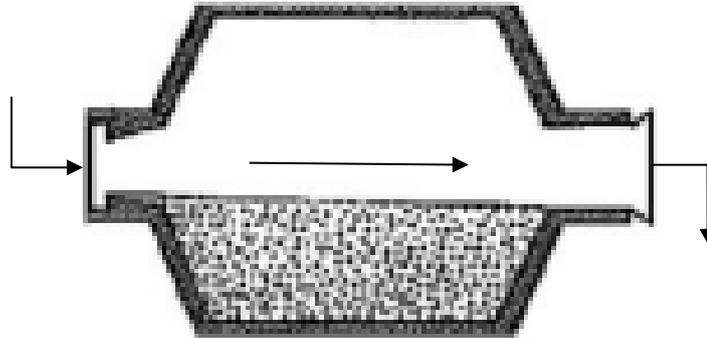


Figura 1.4: Ilustração para moinho de bolas do tipo *overflow*, adaptado de Silva (2014).

A moagem primária é operada em regime do tipo cascata, a potência instalada para operação de cada moinho de bolas no sistema Minas-Rio é de 15000kW e os corpos moedores utilizados são de 63mm de diâmetro. Na Figura 1.5, tem-se uma imagem retirada em uma inspeção de revestimentos por escaneamento 3D do moinho MB02. A foto foi retirada através da abertura da janela de descarga do moinho onde o trommel fica acoplado. Na imagem é possível ter-se uma melhor compreensão do interior do moinho e do “leito de bolas”, que são os corpos moedores responsáveis pela cominuição do minério alimentado.



Figura 1.5: Foto do interior do moinho de bolas MB02 durante inspeção de revestimento (AUTOR, 2022).

O trommel é um tipo de peneira rotativa acoplada a descarga do moinho para evitar-se o expurgo de corpos moedores e também de material com granulometria acima da sua abertura de malha. Na Figura 1.6, tem-se uma representação esquemática de um moinho de bolas com o trommel acoplado ao seu sistema de descarga.

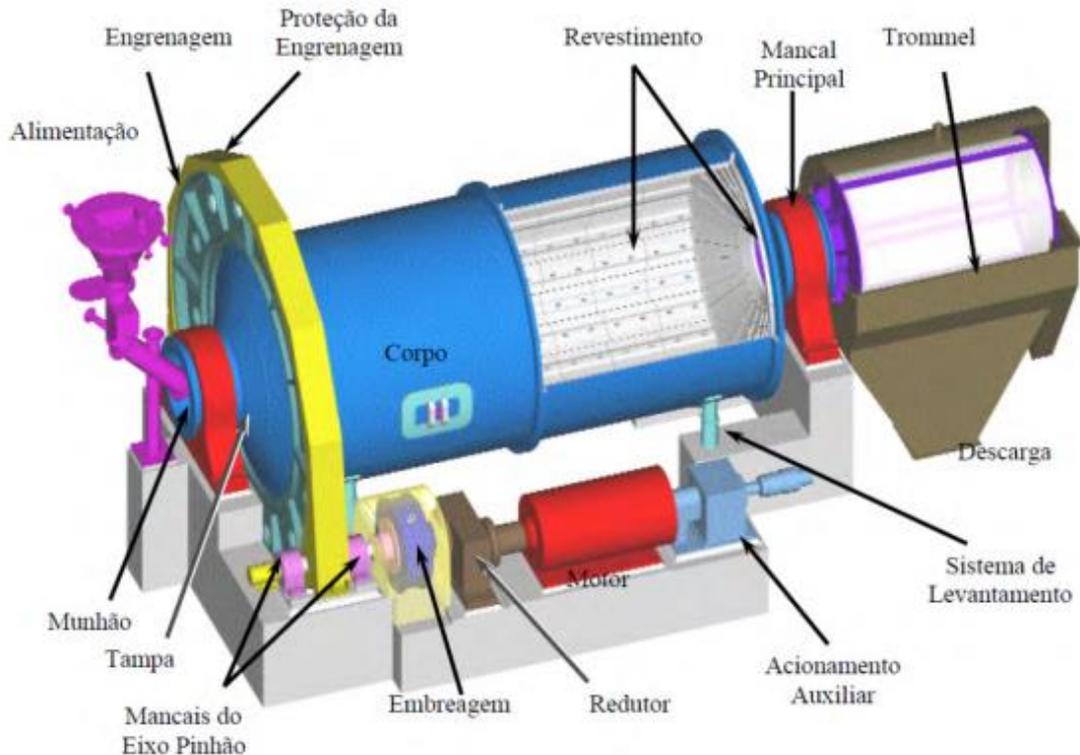


Figura 1.6: Representação esquemática de um moinho de bolas com trommel (SILVA, 2014).

Durante o processo de rotina operacional, foi identificado que, no moinho de bolas MB02, a polpa de minério estava infiltrando o moinho através de uma ruptura no revestimento interno próximo a sua descarga. Devido ao fato de o trommel ser um equipamento de elevado peso e por ser acoplado ao sistema de descarga do moinho, região em que se situava a trinca no revestimento, este estava ajudando na propagação da trinca e comprometendo severamente a integridade estrutural de operação do moinho.

Levando em consideração o ocorrido, no dia 16/01/2021, houve uma parada de operação para a retirada do trommel do moinho de bolas MB02 a fim de se retardar a propagação da trinca. Contudo, a fabricação das peças necessárias, do reparo do revestimento interno e estrutural do moinho e a instalação do trommel não tinha prazo determinado.

Após avaliação técnica a equipe de operação que controla a etapa de produção da moagem primária, retornou a operação do moinho de bolas da linha 2 (MB02) sem o trommel acoplado a sua descarga e com um consumo energético menor ($\cong 14100\text{kW/h}$) que a especificada para o equipamento ($\cong 14800\text{kW/h}$). O objetivo da redução do consumo energético foi evitar-se o expurgo de bolas junto à descarga do moinho e, com isso, conseguir cumprir as metas de produção.

Conforme descrito, após alguns meses de operação do moinho de bolas MB02 sem o trommel acoplado ao seu sistema de descarga e por meio somente de observação empírica do produto granulométrico, no qual não identificaram alteração, quiseram validar a interferência na operação de moagem primária para que, assim, toda a moagem primária fosse realizada utilizando um consumo energético menor que o idealizado até o momento.

Portanto, pode-se listar alguns questionamentos pertinentes, dos quais:

- i. Será que o consumo energético tem sido operado em uma escala ótima de trabalho ou é operado em excesso?
- ii. Houve alterações estatisticamente significantes na distribuição granulométrica do produto da moagem primária com a utilização de um consumo energético inferior ao especificado?

1.4 Justificativa

Compreendendo o problema descrito no item 1.3 deste trabalho, é evidente que não pode-se utilizar somente de observações empíricas para validações e, por isso, um estudo analítico e estatístico faz-se necessário para que seja possível validar asserções, responder questionamentos pertinentes e aferir quais são os impactos dessa interferência na etapa de moagem primária.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é analisar estatisticamente se houve variação do produto granulométrico após a modificação do consumo energético da operação de moagem primária do moinho de bolas MB02 do sistema Minas-Rio.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar um estudo temporal e estatístico sobre o consumo energético da linha 02 da moagem primária do sistema Minas-Rio durante o período de janeiro de 2020 até janeiro de 2022.
- Realizar um estudo temporal e estatístico de distribuição granulométrica do produto da linha 02 da moagem primária do sistema Minas-Rio durante o período de janeiro de 2020 até janeiro de 2022.
- Comparar em nível estatístico a distribuição granulométrica da linha 02 na moagem primária do sistema Minas-Rio antes e após a interferência no consumo energético.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cominuição

Em beneficiamento de minérios, a operação de fragmentação consiste em um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir um sólido de determinado tamanho em elementos de tamanho menor. A cominuição é definida como o processo de redução de tamanho por processos mecânicos. O processo de fragmentação consiste em várias etapas que se aplicam ao minério a ser britado, para se adequar ao posterior processo industrial (RIBEIRO, 2004).

Segundo Ribeiro (2004, p. 5), os principais objetivos de se reduzir o tamanho das partículas são:

- i. Permitir a geração de partículas em tamanho adequado às etapas posteriores de processo;
- ii. Desagregar os minerais de interesse econômico dos minerais de ganga;
- iii. Aumentar a superfície específica das partículas, facilitando o acesso de agentes químicos, (por exemplo, processos de lixiviação), ou agentes físicos (por exemplo, calor nos processos pirometalúrgicos).

Para reduzir as partículas de minério de ferro, é necessária uma combinação de diferentes mecanismos de fragmentação. Pode-se observar que, à medida que os materiais tornam-se mais finos, ou seja, pulverizados, em volumes iguais, sua área superficial aumenta, sendo possível medir seu grau de moagem (CHAGAS, 2008).

Considerando todos os processos de beneficiamento do minério, a fragmentação é a etapa responsável pela maior parte da energia consumida, por isso, a racionalização do consumo de energia nesta etapa vem sendo estudada há mais de um século e meio. Com a evolução na mineração, é necessário considerar fatores influenciadores como: o aumento dos custos de energia; redução dos custos dos produtos da mineração; os depósitos com minérios são mais complexos e têm menores teores dos elementos de interesse conforme são lavrados; requisitos ambientais mais rígidos, etc. A fase de fragmentação na mineração, por si só, é responsável por alguns pontos percentuais do consumo de toda a eletricidade produzida em nosso planeta. Muitos especialistas da área, bem como fabricantes de equipamentos e os operadores, afirmam que o desafio que se apresenta é, sobretudo, buscar uma maior eficiência energética à cominuição, de forma a criar negócios de mineração sustentáveis, os quais sempre foram

essenciais para o desenvolvimento e a prosperidade da humanidade (SAMPAIO; DELBONI JUNIOR, 2018).

Ressalta-se que, mesmo com o desenvolvimento da pesquisa científica e tecnológica, o processo de cominuição industrial ainda não é eficiente. Sendo possível dizer que os avanços alcançados até o presente podem ser considerados apenas incrementais e ainda mais lenta são suas incorporações aos circuitos industriais (SAMPAIO; DELBONI JUNIOR, 2018).

3.2 Mecanismos de Fratura

A quebra de uma partícula mineral é realizada pela formação de outras novas superfícies, e isso ocorre no momento em que a aplicação de alguma força, que deve ser maior que as forças de coesão que existem ao longo da superfície das partículas. Com isso, para que haja o surgimento de novas superfícies, o resultado do processo de quebra é uma distribuição em fragmentos menores. A distribuição de tamanho de partícula característica do produto de fragmentação depende não apenas da natureza das forças de coesão internas das partículas, ela depende também, da forma de energia e da intensidade com que ela foi aplicada sobre a partícula. Comumente, para os processos de fragmentação utilizam-se de energias térmica, elétrica, acústica e mecânica (RIBEIRO, 2004).

Pode-se citar três tipos principais de mecanismos de fratura, em ordem crescente de intensidade de energia aplicada, sendo eles: abrasão, compressão e impacto (RIBEIRO, 2004).

3.2.1 Mecanismo de fratura por abrasão

Na abrasão por cisalhamento, o fraturamento ocorre quando as forças envolvidas, ou seja, as forças que são aplicadas são insuficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula, com isso, as forças aplicadas no material concentram-se na área periférica, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas (RIBEIRO, 2004).

3.2.2 Mecanismo de compressão ou esmagamento

No mecanismo de compressão ou esmagamento, a fratura ocorre quando as forças são pouco superiores à resistência das rochas ou das partículas e são aplicadas de forma lenta e progressivamente, permitindo que haja o alívio com o aparecimento da fratura (RIBEIRO, 2004).

3.2.3 Mecanismo de fratura por choque ou impacto

Para que ocorra a fratura por meio do mecanismo de choque ou impacto, deve-se ter as forças de fragmentação aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas submetidas à fragmentação (RIBEIRO, 2004).

3.2.4 Tamanho das partículas como produto dos mecanismos de fratura

A fragmentação por meio do mecanismo de abrasão tem uma distribuição granulométrica em que partículas muito menores em tamanho convivem com partículas de tamanho próximo ao original. Para o mecanismo de choque ou impacto, são gerados fragmentos de tamanhos relativamente grandes e em pequeno número. E por último, para o mecanismo de choque ou impacto a distribuição granulométrica resultante é, em grande parte, de partículas de tamanho inferior ao tamanho da partícula original (RIBEIRO, 2004).

Na Figura 3.1, tem-se os tipos de mecanismo de fratura de partículas e energia aplicada juntamente com a distribuição granulométrica dos produtos da quebra (RIBEIRO, 2004).

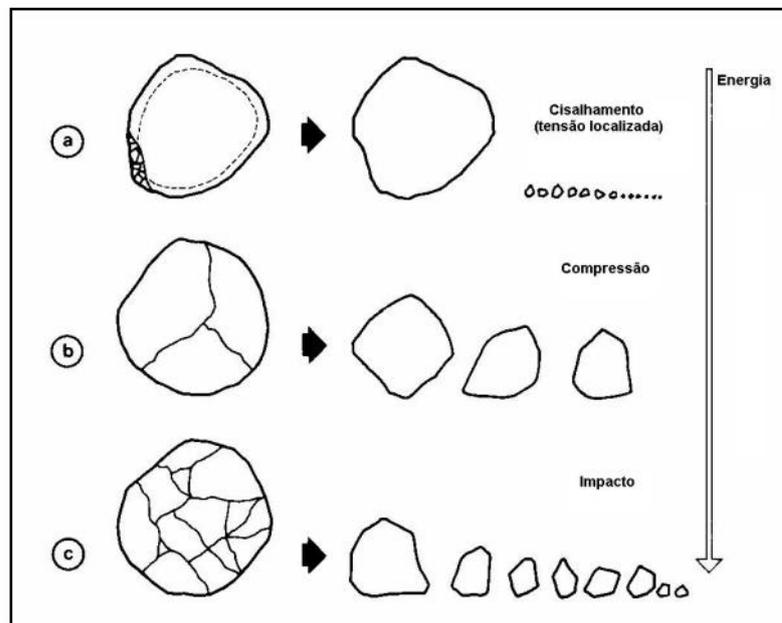


Figura 3.1: Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição dos fragmentos resultantes (RIBEIRO, 2004).

3.3 Tipos de Moagens Comumente Usadas para Minério de Ferro

O último estágio do processo de fragmentação é a moagem, onde, as partículas são reduzidas por uma combinação de impacto, compressão, abrasão, até um tamanho adequado para liberar o mineral de interesse, que é, em geral, concentrado em processos posteriores, como processos de deslamagem e flotação. Os equipamentos mais utilizados no processo de moagem são: moinhos cilíndricos (barras, bolas ou rolos), moinhos de martelo, entre outros (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

3.4 Moinho de Bolas

Conforme pode-se observar na Figura 3.2, os moinhos de bolas são moinhos constituídos de uma carcaça cilíndrica de ferro fundido, revestida internamente com placas de aço ou borracha, que gira sobre mancais e contém, no interior, uma carga de bolas de ferro fundido ou aço (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

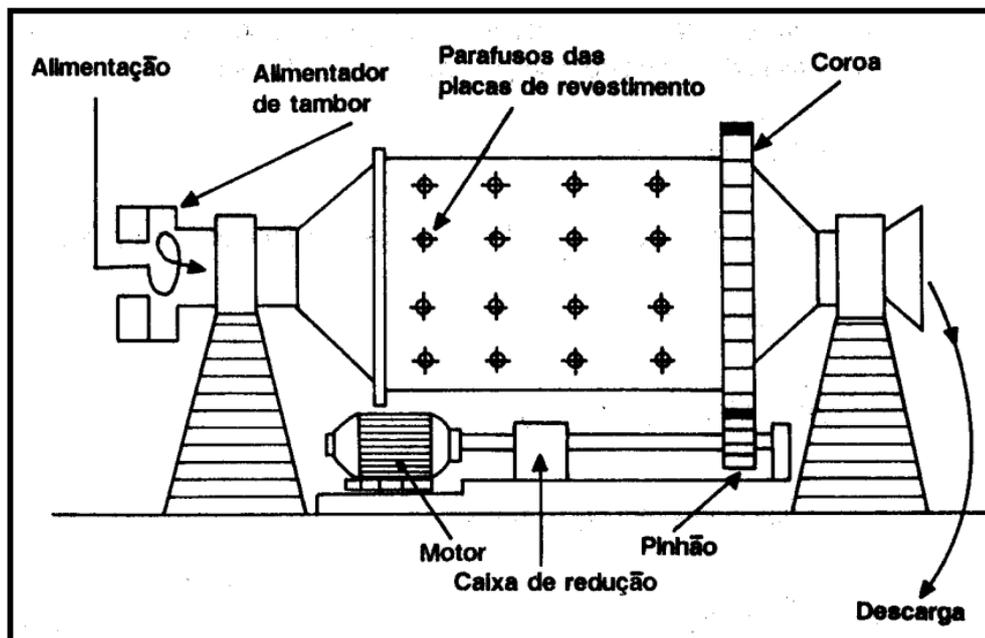


Figura 3.2: Esquema de moinho de bolas (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Dentro do moinho, os corpos moedores são elevados pelo movimento da carcaça até uma determinada altura, de onde caem sobre outras bolas que estão na parte inferior do cilindro e também sobre o minério que ocupa os espaços livres entre as bolas seguindo um trajeto parabólico (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Existe um “jogo” de forças entre a força centrífuga envolvida e a gravidade, onde, enquanto a força centrífuga é maior que a força gravitacional envolvida, as bolas permanecem nesta trajetória. No instante em que a componente da força gravitacional oposta à força centrífuga é maior que este momento, as bolas abandonam a trajetória e começam a seguir um caminho parabólico (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Os corpos moedores em uma etapa de moagem, usando moinho de bolas, apresentam quatro movimentos, sendo eles: rotação, translação, deslizamento e queda. No movimento de rotação as bolas giram em torno do próprio eixo e produzem uma fragmentação por compressão. No movimento de translação, tem-se o movimento de acompanhamento das bolas com o movimento circular da carcaça do moinho, até uma dada altura. O movimento de deslizamento é o movimento oposto ao movimento realizado pelo moinho, onde, as várias camadas de bolas deslizam umas sobre as outras e também pela superfície interna do moinho, causando a fragmentação devido ao atrito. O movimento de deslizamento torna-se maior quanto menor for a velocidade de rotação do moinho. O movimento de queda é o movimento das bolas devido à ação da força gravitacional e que leva à fragmentação por impacto. O movimento de queda aumenta de acordo com o aumento da velocidade de rotação do moinho. O fator de enchimento do moinho, que é o volume de bolas dentro do moinho em relação ao volume total do moinho, bem como a velocidade de rotação e outros fatores determinam o regime de operação do moinho, que podem ser de dois tipos, sendo eles o regime catarata e o regime cascata (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Na moagem em catarata a força centrípeta do moinho carrega as bolas até uma posição bem elevada e quando a força gravitacional é maior que a força centrípeta, as bolas iniciam um movimento de queda, caindo sobre as outras bolas e sobre a polpa presente causando fragmentação por colisão. O regime em catarata é recomendado na fragmentação de material com faixas granulométricas maiores e para evitar a produção de faixas granulométricas muito pequenas, ou seja, quando não se deseja a produção de muitos finos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A Figura 3.3 representa um esquema típico de moagem em regime catarata.

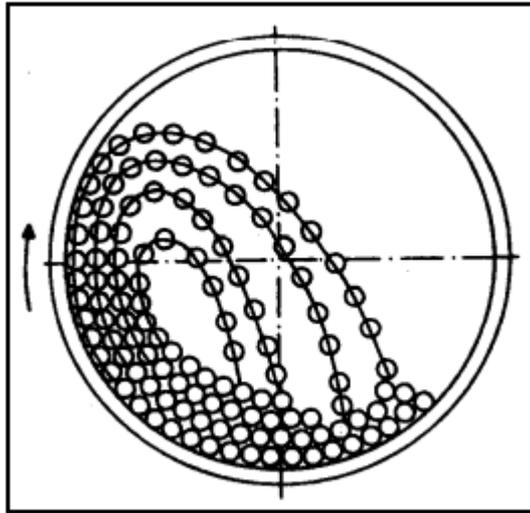


Figura 3.3: Moagem em regime de catarata (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Na moagem em cascata a força centrípeta é baixa e/ou o alto fator de enchimento fazem com que as bolas, ao alcançarem uma certa altura, não tenham efeito de queda, mas sim de rolamento umas sobre as outras. Na moagem em cascata quase não há impacto entre as bolas e a moagem ocorre por meio da abrasão por cisalhamento. O regime cascata é recomendado na fragmentação para produção de faixas granulométricas menores, ou seja, com bastante material de granulometria fina (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A Figura 3.4 representa um esquema típico de moagem em regime cascata.

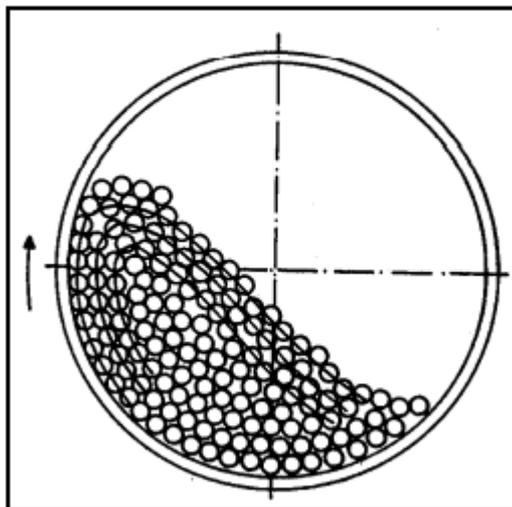


Figura 3.4: Moagem em regime de cascata (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

3.5 Consumo Energético para a Redução Granulométrica – Leis da Cominuição

Devido ao aumento da produção mineral, em meados do século XIX surgiu a necessidade de estabelecer condições operacionais padrão para os equipamentos de moagem. Nessa época, alguns grupos de pesquisadores realizaram diversos esforços na tentativa de formular e verificar experimentalmente as relações matemáticas que caracterizassem os diversos mecanismos de fratura que ocorrem nos moinhos de bolas (ALVES, 2006).

No trabalho de Sampaio e Delboni Júnior (2018), é descrito que Peter Ritter von Rittinger, em 1867, formulou e postulou as primeiras teorias sobre a cominuição. Anos depois foi a vez de Friedrich Kick, em 1883. Apesar de serem antigos, é informado também por Sampaio e Delboni Júnior (2018) que estes postulados serviram de base para uma compreensão e desenvolvimento mais amplo da fragmentação e que, posteriormente, Fred Chester Bond, em 1952, com base nos conhecimentos adquiridos até então sobre o assunto, formulou seu postulado com base em dados experimentais e analisou uma série de dados experimentais e análises de uma ampla gama de circuitos de moagem industrial.

É dito também no trabalho de Sampaio e Delboni Júnior (2018), que os dois primeiros postulados são trabalhos teóricos de natureza científica. Já Fred Chester Bond, engenheiro de aplicação na época da Allis-Chalmers, trabalhou com um grande banco de dados obtido em ambientes industriais, além de criar métodos e testes para caracterizar minérios de acordo com os processos e respectiva fragmentação.

3.5.1 A primeira lei da cominuição

Peter Ritter von Rittinger, em 1867, foi autor da chamada primeira lei de redução de tamanho, que determinou que a relação entre a energia específica consumida e o aumento de superfície específica produzia pela redução de tamanho das partículas no moinho é diretamente proporcional à nova superfície gerada. Esta teoria considera apenas a energia necessária para induzir a ruptura de corpos sólidos ideais homogêneos, isotrópicos e sem falhas. A fratura ocorrerá uma vez que o material tenha alcançado sua deformação crítica do limite de ruptura (von RITTINGER, 1897 apud ALVES, 2006).

3.5.2 A segunda lei da cominuição

Em 1885, Friedrich Kick postulou a chamada segunda lei da cominuição. Ele sugeriu que a energia requerida para a fragmentação é proporcional à redução do volume das partículas,

o que significa que quantidades iguais de energia produziriam mudanças geométricas iguais no tamanho de um sólido. Na teoria apresentada por Friedrich Kick, ele sugeriu que a energia usada para fraturar um corpo sólido ideal homogêneo, isotrópico e sem falhas era somente aquela necessária para deformar o sólido até seu limite de ruptura. Então, por exemplo, para dividir um corpo em duas partes iguais pela teoria de Friedrich Kick, seria necessário uma unidade de energia e , para depois dividir essas duas partes em outras quatro, é necessária outra unidade de energia e e assim por diante (KICK, 1885 apud ALVES, 2006).

3.5.3 A terceira lei da cominuição

Em 1952, Fred Chester Bond postulou a terceira lei da cominuição, como resultado de uma extensa pesquisa em escalas de laboratório, planta-piloto e industrial. Estabelece pontos específicos quanto ao dimensionamento de moinhos requeridos para atingir um determinado objetivo, em termos de capacidade de processamento e granulometria do produto da moagem (BOND, 1952 apud ALVES, 2006).

O fator de trabalho de um moinho deve ser chamado de “Work Index” (WI), que é definido como sendo o trabalho necessário (em kWh) para moer 1st (tonelada curta) do material desde o valor de A_{80} até o valor de P_{80} . Segundo Bond (1952), o consumo específico de energia do processo de redução de tamanho da partícula é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho (SAMPAIO; DELBONI JUNIOR, 2018)

A potência consumida é dada pela Equação 3.1, em que:

$$W = 10WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{A_{80}}} \right) \quad (3.1)$$

Sendo:

W = potência consumida; consumo energético (J/s).

A_{80} e P_{80} são os diâmetros da abertura das peneiras nas quais passam 80% do material do produto e da alimentação, respectivamente (μm).

WI = Work index (kWh/st)

3.6 Avaliação Estatística de Dados

Um conjunto de técnicas analíticas utilizadas para resumir um determinado conjunto de amostras coletadas em uma determinada investigação pode ser considerado uma estatística descritiva. Normalmente esses dados são organizados por meio de números, tabelas e gráficos. A estatística descritiva tem como objetivo fornecer relatórios que apresentem informações sobre a tendência central e a dispersão dos dados (MORAIS, 2005).

3.7 Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão, também conhecidas como medidas de variabilidade ou difusividade, indicam o quanto a distribuição de uma determinada variável de amostral é esticada ou comprimida. Os exemplos mais comuns de medidas de dispersão estatística são a variância e o desvio padrão (SAMPAIO; ASSUMPÇÃO; FONSECA, 2018).

Entende-se que as medidas de dispersão refletem variabilidade de um conjunto de dados em torno do ponto médio do conjunto amostral, ou seja, as medidas de dispersão demonstram se há uma maior ou menor variabilidade dos resultados obtidos. As medidas de dispersão permitem medir quão bem ou não os resultados se concentram ao redor da tendência central de um conjunto amostral (MORAIS, 2005).

3.7.1 Desvio absoluto médio

A média dos valores absolutos das diferenças entre as observações e a média pode ser compreendida como o desvio absoluto médio (D_M), de um conjunto de n observações, (MORAIS, 2005), sendo representado pela Equação 3.2:

$$D_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (3.2)$$

Em que:

\bar{x} é a média aritmética, e pode ser considerado o quociente entre somatório das variáveis analisadas pelo o número de variáveis. A média aritmética (\bar{x}) pode ser obtida pela Equação 3.3, em que:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.3)$$

3.7.2 Variância

A variância pode ser representada por σ^2 e, sendo ela a medida que se obtém somando os quadrados dos desvios das observações da amostra com relação à média amostral, e dividindo por n (MORAIS, 2005). Sendo a variância representada pela Equação 3.4, tem-se que:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.4)$$

Caso sejam analisados dados em uma tabela de frequência, a variância será dada pela Equação 3.5 (SAMPAIO; ASSUMPÇÃO; FONSECA, 2018), sendo:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 * f_i}{n} \quad (3.5)$$

Em que:

f_i é a frequência do intervalo, ou seja, o número de recorrência daquele valor amostral.

3.7.3 Desvio padrão

O desvio padrão é uma forma de medir o nível de dispersão dos dados em um conjunto amostral, logo, por meio do desvio padrão, pode-se determinar a uniformidade do conjunto de dados amostrado.

O desvio padrão (σ) pode ser compreendido como sendo a raiz quadrada da variância (SAMPAIO; ASSUMPÇÃO; FONSECA, 2018), pode ser encontrado a partir da Equação 3.6:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.6)$$

3.7.4 Gráficos *Boxplot*

Os gráficos do tipo *boxplot*, também conhecidos como diagramas de caixa, são considerados representações gráficas de avaliação quantitativa. O gráfico do tipo *boxplot* possui 5 medidas de posição para uma determinada variável que está sendo avaliada. As medidas de posições em um gráfico do tipo *boxplot* são:

- i. Valor mínimo.
- ii. 1° quartil (Q_1).
- iii. Mediana ou 2° quartil (Q_2).
- iv. 3° quartil (Q_3).
- v. Valor máximo

As cinco medidas de posição acima citadas são muito importantes pois permitem avaliar a simetria e a distribuição dos dados visualmente. Em um gráfico do tipo *boxplot* tem-se o 1° quartil (Q_1) que descreve 25% dos primeiros dados (devem estar ordenados em forma crescente). Já a *Mediana*, também sendo considerada o 2° quartil (Q_2), corresponde o valor no qual 50% dos dados ordenados situam-se abaixo dela e os outros 50% restantes acima dela. Para o 3° quartil (Q_3) tem-se a descrição ordenada dos dados corresponde a 75% das observações. Para as medidas de posição, *Valor mínimo* e *Valor máximo*, tem-se o valor mínimo e o valor máximo da distribuição dos dados, respectivamente (FÁVERO; BELFIORE, 2017). É possível observar uma representação para um gráfico do tipo *boxplot* na Figura 3.5:

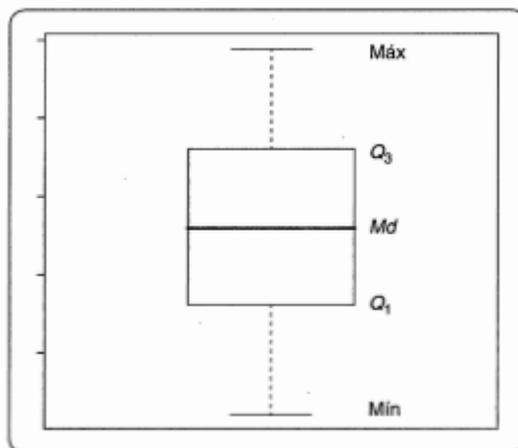


Figura 3.5: Representação de um gráfico do tipo *boxplot* (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

Outro dado de grande importância que pode-se inferir visualmente em um gráfico do tipo *boxplot* são os dados que apresentam grande afastamento dos demais ou inconsistência. Esses dados inconsistentes recebem o nome de *outliers* e a existência deles pode ser identificada por meio da amplitude interquartil (AIQ) que corresponde à diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil (FÁVERO; BELFIORE, 2017):

A amplitude interquartil (AIQ) pode ser compreendida como sendo diferença entre o 3º quartil (Q_3) e o 1º quartil (Q_1), pode ser encontrada a partir da Equação 3.7 (FÁVERO; BELFIORE, 2017):

$$AIQ = Q_3 - Q_1 \quad (3.7)$$

Sendo:

AIQ = Amplitude Interquartil

Q_1 = Amplitude do 1º Quartil

Q_3 = Amplitude de 3º Quartil

É possível observar que a *Amplitude Interquartil* (AIQ) é o comprimento da caixa no gráfico do tipo *boxplot*. Quaisquer valores situados abaixo do 1º quartil (Q_1) ou acima do 3º quartil (Q_3) por mais que 3 vezes o valor de AIQ devem ser considerados *outliers*, e em um gráfico do tipo *boxplot* deverão ser representados por asterisco (*) (FÁVERO; BELFIORE, 2017). Como pode ser observado nas Equações 3.8 e Equação 3.9, atribuindo a variável X^* como sendo o parâmetro de determinação, se o valor do dado é um *outlier*, tem-se que (FÁVERO; BELFIORE, 2017):

$$X^* < Q_1 - 3AIQ \quad (3.8)$$

$$X^* > Q_3 + 3AIQ \quad (3.9)$$

Portanto, é possível compreender que os *outliers* são dados que possuem os valores inferiores a Q_1 subtraído de 3 vezes a amplitude interquartil e os valores superiores a Q_3 somado em 3 vezes a amplitude interquartil.

3.7.5 Teste de normalidade de *Anderson-Darling*

Existem diversos tipos de testes de normalidade, podendo serem citados os testes mais divulgados como os testes de D'Agostino-Pearson, Kolmogorov-Smirnov, Cramér-von Mises, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk. Procura-se, para todos esses testes citados, verificar se a distribuição de um conjunto de dados para uma dada variável descreve uma distribuição normal (SANTOS; FERREIRA, 2003 apud SANTOS 2012). Conforme pode-se inferir no trabalho realizado por Torman, Coster e Riboldi (2012), para grandes amostras as diferenças entre os métodos são mínimas, porém para pequenas amostras elas podem ser significativas.

O teste proposto por Anderson-Darling (1954) baseia-se na distância entre a função de distribuição empírica e a função de distribuição acumulada hipotética (ANDERSON; DARLING, 1954 apud SILVA; CAMPOS; SILVA, 2018).

No teste de *Anderson-Darling* é considerada uma distribuição normal se no resultado o *Valor-p* for maior que 0,05 (*Valor-p*>0,05). Com isso, tem-se que há uma probabilidade maior que 5% em cometer erro ao rejeitar a hipótese de distribuição normal do conjunto de dados avaliados no teste (MORAES; FERREIRA; BALESTRASSI, 2005 apud FERREIRA; SOUZA; SILVA, 2013).

As duas hipóteses para o teste de Anderson-Darling para uma distribuição normal são expressas por (SILVA; ARAÚJO; COSTA FILHO, 2010 apud FERREIRA; SOUZA; SILVA, 2013):

- i. H_0 (*Hipótese nula*): os dados seguem uma distribuição de probabilidade normal.
- ii. H_1 (*Hipótese alternativa*): os dados não seguem uma distribuição de probabilidade normal.

Pode-se compreender que havendo valor maior que 0,05 para o *Valor-p* (*Valor-p*>0,05) deve-se aceitar a *Hipótese nula* (H_0) e inferir com 95% de significância que os dados seguem uma distribuição normal. Caso o contrário, havendo valor menor que 0,05 para o *Valor-p* (*Valor-p*<0,05), deve-se rejeitar a *Hipótese nula* (H_0) e aceitar a *Hipótese alternativa* (H_1), indicando que os dados avaliados no teste não seguem uma distribuição normal, pois há uma possibilidade de se cometer um erro maior que 5%, caso se aceite a *Hipótese nula* (H_0) (SILVA; ARAÚJO; COSTA FILHO, 2010 apud FERREIRA; SOUZA; SILVA, 2013).

A estatística do teste de normalidade de *Anderson-Darling* pode ser descrita por meio da Equação 3.10 (LUCAMBIO, 2008):

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [2i - 1] [\ln(p_i) + \ln(1 - p_{(n-i+1)})] \quad (3.10)$$

Sendo:

AD = Valor da estatística de Anderson-Darling;

n = números de termos do conjunto avaliado no teste;

i = posição da i -ésima amostra quando os dados estão ordenados em ordem crescente;

$p_{(i)}$ = percentil ordenado da distribuição normal padrão, pode ser calculado por meio da Equação 3.11:

$$p_{(i)} = \varphi \left(\frac{[y_{(i)} - \bar{y}]}{s} \right) \quad (3.11)$$

Sendo:

φ = Função de distribuição acumulada normal padrão;

Pode-se calcular o valor da distribuição normal padrão (Z) para o método de *Anderson-Darling* por meio da Equação 3.12 (LUCAMBIO, 2008):

$$Z = \left(1 + \frac{0,75}{n} + \frac{2,25}{n^2} \right) * AD \quad (3.12)$$

Sendo:

AD = Valor da estatística de Anderson-Darling;

n = Números de termos do conjunto avaliado no teste;

Z= Função de distribuição normal padrão.

Utilizando do valor da distribuição normal padrão (Z), as equações necessárias para calcular o *Valor-p* para o teste de normalidade de *Anderson-Darling* seguem dispostas na Equação 3.13, Equação 3.14, Equação 3.15 e Equação 3.16 (LUCAMBIO, 2008):

i. Para $Z < 0,2$;

$$\text{Valor} - p = 1 - e^{-13,436+101,14Z-22,73Z^2} \quad (3.13)$$

ii. Para $0,2 \leq Z < 0,34$;

$$\text{Valor} - p = 1 - e^{-8,318+42,796Z-59,938Z^2} \quad (3.14)$$

iii. Para $0,34 \leq Z < 0,6$;

$$\text{Valor} - p = e^{0,9177-4,279Z-1,38Z^2} \quad (3.15)$$

iv. Para $Z \geq 0,6$;

$$\text{Valor} - p = e^{1,2937-5,709Z+0,0186Z^2} \quad (3.16)$$

3.8 Método comparativo – teste de *Mann-Whitney*

Com o intuito de se comparar duas amostras não pareadas ou independentes, o teste *de Mann-Whitney* é um dos testes não paramétricos mais poderosos e é aplicado para variáveis quantitativas ou qualitativas em escala ordinal. É uma alternativa ao teste *t de Student* quando a hipótese de normalidade for violada ou quando o tamanho da amostra for pequeno, podendo ser considerada a versão não paramétrica do teste *t de Student* para duas amostras independentes (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

Segundo Fávero e Belfiore (2017), diferente do teste *t de Student*, que verifica a igualdade das médias de duas populações independentes e com dados contínuos, o teste de

Mann-Whitney avalia a igualdade das medianas. Para um teste bilateral, a *Hipótese nula* (H_0) é de que a mediana das duas populações seja igual (Equação 3.17), isto é:

$$H_0: \eta_1 = \eta_2 \quad (3.17)$$

Sendo

H_0 (*Hipótese nula*): As medianas dos conjuntos amostrais são iguais entre si.

η_1 = Mediana do conjunto amostral 1

η_2 = Mediana do conjunto amostral 2

Já a *Hipótese alternativa* (H_1) é a hipótese na qual a mediana das populações é diferente, conforme pode ser averiguado na Equação 3.18 (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

$$H_1: \eta_1 \neq \eta_2 \quad (3.18)$$

Sendo

H_1 (*Hipótese nula*): As medianas dos conjuntos amostrais não são iguais entre si.

η_1 = Mediana do conjunto amostral 1

η_2 = Mediana do conjunto amostral 2

No teste de *Mann-Whitney* é considerado que as medianas são iguais se no resultado do teste o *Valor-p* for maior que 0,05 ($\text{Valor-p} > 0,05$). Com isso, tem-se a probabilidade maior que 5% em cometer erro ao rejeitar a hipótese de que as medianas entre os conjuntos de dados avaliados no teste iguais (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

Pode-se compreender que, havendo valor maior que 0,05 para o *Valor-p* ($\text{Valor-p} > 0,05$), deve-se aceitar a *Hipótese nula* (H_0) e inferir com 95% de significância que os valores das medianas são iguais entre si. Caso contrário, havendo valor menor que 0,05 para o *Valor-p* ($\text{Valor-p} < 0,05$), deve-se rejeitar a *Hipótese nula* (H_0) e aceitar a *Hipótese alternativa* (H_1), indicando que os dados avaliados no teste não possuem as medianas iguais entre si, pois há uma possibilidade de se cometer um erro maior que 5%, caso se aceite a *Hipótese nula* (H_0).

Segundo Fávero e Belfiore (2017) para calcular a estatística do teste de *Mann-Whitney* deve-se seguir os seguintes passo-a-passo:

- i. Assumindo-se que as duas amostras sejam independentes, deve-se considerar N_1 o tamanho da amostra com menor quantidade de observações e N_2 o tamanho da amostra com maior quantidade de observações.
- ii. Para aplicar o teste de *Mann-Whitney*, deve-se juntar as duas amostras numa única amostra combinada que será formada por $N = N_1 + N_2$ elementos. Porém, deve-se identificar a amostra de origem de cada observação na amostra combinada, que deve ser ordenada de forma crescente com postos atribuídos a cada observação. Por exemplo, o posto 1 é atribuído à menor observação e o posto N à maior observação. Caso haja empates, atribuí-se a média dos postos correspondentes.
- iii. Em seguida, deve-se calcular a soma dos postos para cada amostra, isto é, calcular R_1 que corresponde à soma dos postos da amostra com menor número de observações e R_2 que corresponde à soma dos postos da amostra com maior número de observações.
- iv. Assim, pode-se calcular as quantidades W_1 e W_2 conforme exposto na Equação 3.18 e Equação 3.19:

$$W_1 = N_1 * N_2 + \frac{N_1 * (N_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (3.19)$$

$$W_2 = N_1 * N_2 + \frac{N_2 * (N_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (3.19)$$

- v. A estatística W de Mann-Whitney é dada pela Equação 3.20, na qual:

$$W = \min(U_1, U_2) \quad (3.20)$$

Pode-se calcular o valor da distribuição normal padrão (Z) para o teste de *Mann-Whitney* por meio da Equação 3.21 (FÁVERO; BELFIORE, 2017):

$$Z = \frac{\left(W - N_1 * \frac{N_2}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{N_1 * N_2}{N * (N - 1)}\right) * \left(\frac{N^3 - N}{12} - \frac{\sum_{j=1}^g [t_j^3] - \sum_{j=1}^g [t_j]}{12}\right)}} \quad (3.21)$$

Em que:

$$\frac{\sum_{j=1}^g [t_j^3] - \sum_{j=1}^g [t_j]}{12} = \text{fator de correção quando houver empates.}$$

Utilizando do valor da distribuição normal padrão (Z), para o *teste de Mann-Whitney* é possível encontrar o *Valor-p* com o uso de uma tabela de conversão ou funções programadas em *softwares* como o Microsoft Excel® e o Minitab®.

3.9 Método comparativo – teste *t-Student*

Segundo Sperandei (2007), o teste *t-Student* é um teste para comparação de médias, em que o objetivo é observar a probabilidade de ocorrência do resultado encontrado para a média calculada a partir da Hipótese nula (H_0) que é a de igualdade entre as médias populacionais das amostras comparadas.

Para aplicação do teste *t-Student* é necessário primeiramente que haja algumas validações, sendo (FÁVERO; BELFIORE, 2017):

- i. As observações devem ser independentes;
- ii. A amostra deve ser retirada de populações com distribuição normal;
- iii. As populações devem ter variâncias iguais para testes de comparação de duas médias populacionais emparelhadas ou k médias populacionais;
- iv. As variáveis em estudo devem ser medidas em escala intervalar ou de razão, de modo que seja possível utilizar operações aritméticas sobre os respectivos valores.

Segundo Casado (2013), a estatística para o teste *t-Student* pode ser obtida por meio da Equação 3.22 abaixo:

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\left(\frac{S_1^2}{n_1 - 1} + \frac{S_2^2}{n_2 - 1}\right)}} \quad (3.22)$$

Em que:

\bar{X}_1 e \bar{X}_2 são médias amostrais;

μ_1 e μ_2 são as médias populacionais;

S_1^2 e S_2^2 são as variâncias amostrais;

n é o tamanho da amostra;

Utilizando do valor da distribuição normal padrão (Z), após converter t para Z para o teste *t-Student*, é possível encontrar o *Valor-p* com o uso de uma tabela de conversão ou funções programadas em *softwares* como o Microsoft Excel® e o Minitab®.

3.10 Inferência Estatística

O processo pelo qual é possível tirar conclusões acerca da população, usando informações de uma amostra ou um espaço amostral, é chamado de inferência estatística (MORAIS, 2005).

Nesse contexto, para saber que será realizada uma boa inferência estatística é necessário que se tenha um bom espaço amostral, e que este represente o que deseja ser estudado. O fator similaridade é fundamental, em que o tamanho do espaço amostral não determina se ela é apta ou não apta, sendo de boa ou má qualidade para inferência estatística. Mais importante do que o tamanho do espaço amostral, ou seja, seu tamanho, é a sua representatividade, portanto, o mais importante para uma amostra é o seu grau de similaridade com a população em estudo (MORAIS, 2005).

Para certificar de que está-se caminhando para uma direção certa de inferência estatística, pode-se seguir uma sequência lógica de passos, como uma metodologia, um *checklist* (SASSI, 2020).

Existe a necessidade de um passo a passo para inferência estatística. O *checklist* que deve ser seguido em termos simples é (SAMPAIO; ASSUMPCÃO; FONSECA, 2018):

- i. Identificação do problema ou situação.
- ii. Coleta de dados
- iii. Tratamento dos dados
- iv. Apresentação das variáveis
- v. Análise e interpretação dos resultados.

3.10.1 Identificação do problema ou situação

Na identificação do problema, deve-se atentar em delinear cuidadosamente o que será abordado no estudo. Deve-se certificar que a finalidade do estudo ou análise é clara e direta no que se propõem. Nessa etapa inicial, o objetivo da pesquisa deve ser definido (SAMPAIO; ASSUMPCÃO; FONSECA, 2018)

Pode-se ressaltar a necessidade de compreender qual é o tipo de variável que está sendo estudada no trabalho de inferência estatística. Se, em cada objeto que será observado, o interesse é apenas em um único aspecto, então os dados resultantes são ditos univariados; se para cada objeto observado será obtido simultaneamente valores de dois aspectos relevantes, diz-se que os dados são bivariados; se para que cada objeto que será observado será obtido valores de vários aspectos relevantes simultaneamente, diz-se que os dados são multivariados e, assim, generalizando, se para cada objeto que será observado será obtido, simultaneamente, valores de p aspectos diz-se que os dados são p-variados (MORAIS, 2005).

3.10.2 Coleta de dados

Para que seja realizada uma inferência estatística, o primeiro passo é determinar a amostra, ou seja, sua população. Uma população amostral pode ser entendida como um conjunto de unidades individuais, que podem ser pessoas ou resultados experimentais, que apresentam uma ou mais características comuns para fins de pesquisa. A população refere-se a todos os casos ou situações em que o entrevistador deseja fazer inferências ou estimativas (MORAIS, 2005).

Nesse segundo passo deve-se verificar qual é a população alvo, como será realizada a amostragem, qual sua área de atuação, dimensionar o tamanho da amostra, ou seja, o espaço amostral, como se fará a pesquisa, etc. Nesse passo, deve-se atentar e cuidar de todas as

premissas envolvidas para que sejam coletados os dados necessários para que o estudo de caso possa ser realizado (SAMPAIO; ASSUMPCÃO; FONSECA, 2018).

3.10.3 Tratamento dos dados

Esse terceiro passo tem como principal objetivo o levantamento de possíveis falhas e imperfeições ocorridas no segundo passo, no qual é realizada a coleta dos dados. É nesse momento que também se averigua possíveis imperfeições e problemas com relação ao tratamento de dados que foi realizado. É de extrema importância a criticidade, envolvida com relação a este terceiro passo, pois deve-se tomar cuidado para que não se incorra em erros que influenciem os resultados. A apuração dos dados pode ser compreendida como a soma e o processamento dos dados obtidos, juntamente com seu processo de triagem mediante os critérios de classificação determinados (SAMPAIO; ASSUMPCÃO; FONSECA, 2018).

3.10.4 Apresentação das variáveis

Os dados obtidos, tratados ou não, podem ser visualizados em ferramentas gráficas para que sejam mais bem compreendidos, no intuito de facilitar o exame. As ferramentas de análises em imagem mais comuns são tabelas e gráficos, podendo ser do tipo temporal, de dispersão, entre outros (SAMPAIO; ASSUMPCÃO; FONSECA, 2018).

3.10.5 Análise e interpretação dos resultados

Tem-se que a análise e interpretação dos resultados é a tarefa fundamental do profissional que trabalha com estatística. A análise e interpretação dos resultados podem começar com o exame de tabelas ou gráficos simples, ou podem empregar métodos de cálculos complexos e sofisticados de computação, além do emprego da matemática avançada. Por meio da análise, são obtidos dados importantes para conclusões como médias, tendências e dispersões. Por meio da análise de uma amostra significativa de uma população, é possível chegar a importantes conclusões sobre a população por meio do uso dos métodos da Inferência Estatística (SAMPAIO; ASSUMPCÃO; FONSECA, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Identificação do Problema

Como exposto no item 1.3 desse trabalho, durante o processo de rotina operacional, foi identificado que no moinho de bolas MB02 a polpa de minério estava infiltrando no moinho através de uma ruptura no revestimento interno próximo a sua descarga e causando comprometimento estrutural. Devido ao fato de o trommel ser um equipamento de elevado peso e por ser acoplado ao sistema de descarga do moinho, região na qual se situava a trinca no revestimento, este estava ajudando na propagação da trinca e comprometendo severamente a integridade estrutural de operação do moinho.

Levando-se em consideração o ocorrido, no dia 16/01/2021, houve uma parada de operação para a retirada do trommel do moinho de bolas MB02 a fim de se retardar a propagação da trinca. Contudo, a fabricação das peças necessárias, do reparo do revestimento interno e estrutural do moinho e a instalação do trommel não tinha prazo determinado.

Após avaliação técnica, a equipe de operação que controla a etapa de produção da moagem primária, retornou a operação do moinho de bolas da linha 2 (MB02) sem o trommel acoplado a sua descarga e com um consumo energético menor ($\cong 14100\text{kW/h}$) que o especificado para o equipamento ($\cong 14800\text{kW/h}$) para evitar-se o expurgo de bolas junto a descarga do moinho e, com isso, conseguir cumprir as metas de produção.

Conforme descrito, após alguns meses de operação do moinho de bolas MB02 sem o trommel acoplado ao seu sistema de descarga e por meio somente de observação empírica do produto granulométrico no qual não foram identificadas alteração, decidiu-se validar a interferência na operação de moagem primária para que, assim, toda a moagem primária fosse realizada utilizando um consumo energético menor que o idealizado até o momento.

Portanto, o objetivo definido para esse estudo foi identificar e validar estatisticamente se houve variação do produto granulométrico após a modificação do consumo energético da operação de moagem primária do moinho de bolas MB02 do sistema Minas-Rio.

4.2 Levantamento das Variáveis

Foram identificadas como variáveis necessárias para obtenção de dados para o estudo:

- i. Consumo energético do moinho de bolas MB02 – Potência (kW);
- ii. Taxa de alimentação do moinho de bolas MB02 – (tms);
- iii. Taxa de diluição da alimentação do moinho de bolas MB02 – (%);
- iv. Massa da alimentação da moagem retida em peneira com abertura de malha de 6,3mm (3#, Série Tylor);
- v. Massa da alimentação da moagem retida em peneira com abertura de malha de 2mm (9#, Série Tylor);
- vi. Massa da alimentação da moagem retida em peneira com abertura de malha de 1,18mm (14#, Série Tylor);
- vii. Massa da alimentação da moagem retida em peneira com abertura de malha de 0,710mm (24#, Série Tylor);
- viii. Massa da alimentação da moagem retida em peneira com abertura de malha de 0,15mm (100#, Série Tylor);
- ix. Massa do produto da moagem retida em peneira com abertura de malha de 0,15mm (100#, Série Taylor)
- x. Massa do produto da moagem retida em peneira com abertura de malha de 0,074mm (200#, Série Taylor);
- xi. Massa do produto da moagem passante em peneira com abertura de malha de 0,044mm (325#, Série Taylor);
- xii. Abertura de malha de peneira, em milímetros, na qual tem-se 80% do material da alimentação do moinho do bolas MB02 passante (A80).
- xiii. Abertura de malha de peneira, em milímetros, na qual tem-se 80% do material do produto do moinho de bolas MB02 passante (P80).

As variáveis identificadas como necessárias para o estudo foram nomeadas conforme exposto na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Nomeação das variáveis.

Nome da variável	Informação da variável	Nome da variável	Informação da variável
POTÊNCIA	Consumo específico horário médio do dia para o moinho MB02 (kW).	A80	Abertura de malha de peneira na qual tem-se 80% do material da alimentação do moinho MB02 passante (mm).
TX. ALIM.	Fluxo horário médio do dia da quantidade de minério na alimentação do moinho MB02 (tms).	> 0,15mm PROD.	Massa percentual de minério retida em peneira com abertura de 0,15mm em amostragem do produto do moinho MB02 (%).
> 6,3mm ALIM.	Massa percentual de minério retida em peneira com abertura de 6,3mm em amostragem da alimentação do moinho MB02 (%).	> 0,074mm PROD.	Massa percentual de minério passante em peneira com abertura de 0,15mm e retida em peneira com abertura de 0,074mm em amostragem do produto do moinho MB02 (%).
> 2mm ALIM.	Massa percentual de minério passante em peneira com abertura de 6,3mm e retida em peneira com abertura de 2mm em amostragem da alimentação do moinho MB02 (%).	< 0,044mm PROD.	Massa percentual de minério passante em peneira com abertura de 0,044mm em amostragem do produto do moinho MB02 (%).
> 1,18mm ALIM.	Massa percentual de minério passante em peneira com abertura de 2mm e retida em peneira com abertura de 1,18mm em amostragem da alimentação do moinho MB02 (%).	P80	Abertura de malha de peneira na qual tem-se 80% do material do produto do moinho MB02 passante (mm).
> 0,71mm ALIM.	Massa percentual de minério passante em peneira com abertura de 1,18mm e retida em peneira com abertura de 0,71mm em amostragem da alimentação do moinho MB02 (%).	GRAU DE REDUÇÃO	Valor adimensional no qual tem-se A80 (mm) dividido por P80 (mm)
> 0,15mm ALIM.	Massa percentual de minério passante em peneira com abertura de 0,71mm e retida em peneira com abertura de 0,15mm em amostragem da alimentação do moinho MB02 (%).	REQ. ENERGÉTICO	Valor no qual tem-se a POTÊNCIA (kW) dividido por TX. ALIM. (tms)

4.3 Determinação do Espaço Temporal

A parada na qual houve a alteração na operação do equipamento iniciou-se no dia 16/01/2021 e, para garantir uma grande quantidade de dados para coleta, foi determinado que o espaço temporal de coleta dos dados fosse aproximadamente de um ano antes e um ano após a alteração.

Portanto, o espaço temporal determinado foi das 0horas e 0minutos do dia 01/01/2020 até às 0horas e 0minutos do dia 01/01/2022.

4.4 Localização das Informações Necessárias

Com exceção dos dados para as variáveis *A80*, *P80*, *GRAU DE REDUÇÃO* e *REQ. ENERGÉTICO* que foram calculadas, os dados para as demais variáveis foram obtidos a partir amplo banco de dados de informações de acompanhamento de processos que a empresa possui. Os dados foram obtidos por meio do uso dos *softwares* MES® e PI DataLink®, que são *softwares* de uso para o acompanhamento operacional que foram disponibilizados pela empresa.

4.5 Coleta de Dados

Foram coletados dados horários para todas as variáveis informadas no item 4.1.2 desde trabalho com exceção para as variáveis granulométricas. Os dados granulométricos da alimentação da moagem são diários, obtidos a partir de amostragem automática horária e por meio do agrupamento das amostras é formado um composto diário. Os dados granulométricos do produto do moinho possuem amostragem e avaliação horária, em que os dados em horas ímpares são para o moinho de bolas MB01 e em horas pares para o moinho de bolas MB02.

A disponibilização dos dados de consumo energético e taxa de alimentação dos moinhos no banco de dados foram obtidos por medidores automáticos existentes, que são calibrados periodicamente conforme norma interna de controle de qualidade. Os dados de granulometria da alimentação e do produto da moagem foram obtidos a partir de amostragem automática do fluxo de alimentação e descarga do moinho de bolas MB02. Após serem recolhidas, as amostras passam por quarteamento, peneiramento via úmido, filtragem, secagem e pesagem conforme disposto no ANEXO A, no qual tem-se o procedimento de rotina operacional (PRO) da empresa.

4.6 Determinação de Limites e Tratamento de Dados

Para formação do banco de dados, determinação dos limites das variáveis e demais pontos excepcionais, foram realizadas as seguintes ações descritas a seguir:

- i. Todas as variáveis foram inseridas no banco de dados seguindo regime de média horária para seu respectivo dia. Para as variáveis granulométricas do produto da moagem, foram selecionados somente dados para as horas pares (dados para o moinho de bolas MB02) para compor a média horária do respectivo dia.
- ii. O banco de dados foi organizado seguindo regime diário. A partir dessa organização, dias nos quais qualquer variável coletada estivesse com o valor em branco ou nulo, foram retirados do banco de dados.
- iii. Por meio de interpolação linear das variáveis granulométricas da alimentação da moagem primária (MB02) foi calculada e criada a variável *A80*.
- iv. Por meio de interpolação linear das variáveis granulométricas do produto da moagem primária (MB02) foi calculada e criada a variável *P80*.
- v. Por meio do uso das Equação 5.1 e Equação 5.2 foram calculadas e criadas as variáveis *GRAU DE REDUÇÃO* e *REQ. ENERGÉTICO*, em que tem-se:

$$GRAU DE REDUÇÃO = \frac{A80}{P80} \quad (5.1)$$

$$REQUERIMENTO ENERGÉTICO = \frac{POTÊNCIA}{TX. ALIM.} \quad (5.2)$$

- vi. **O banco de dados foi dividido em dois agrupamentos**, sendo os dados anteriores às 0h e 00min do 16/01/2021, data da modificação no consumo energético do moinho de bolas MB02, dados pertencentes ao agrupamento de dados do **1º período**. Dados após às 0h e 00min do 16/01/2021 foram considerados pertencentes ao agrupamento de dados do **2º período**.
- vii. Foram verificados e determinados os valores limites para as variáveis *TX. ALIM.*, *POTÊNCIA* e *A80*.
- viii. Foi realizado o tratamento de dados por meio de exclusão de dados de modo adequado para os valores considerados fora dos limites e pontos excepcionais das variáveis determinados para as variáveis *TX. ALIM.*, *POTÊNCIA* e *A80*.

- ix. Utilizando o *software* Minitab® foi realizado o teste de *Anderson-Darling*, com o qual foi possível a verificação da possibilidade de existência de distribuição normal para todas as variáveis em ambos os agrupamentos de dados (1° e 2° período).
- x. Utilizando o *software* Minitab® foi realizado o teste de *t-Student* e o teste de *Mann-Whitney*, com o qual foi possível a comparação, em nível estatístico, entre as variáveis de interesse para o estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Determinação dos Limites e Pontos Excepcionais das Variáveis.

Conforme pode-se observar na Figura 5.1, na qual tem-se um gráfico temporal para a variável *POTÊNCIA* sem o devido tratamento de dados, os dados do processo de beneficiamento de minério de ferro avaliado possuem diversas interferências. Elas podem ser justificadas por diversos motivos como paradas para manutenção corretiva ou preventiva, falta da disponibilidade de minério, baixa disponibilização de água e outros insumos, etc.

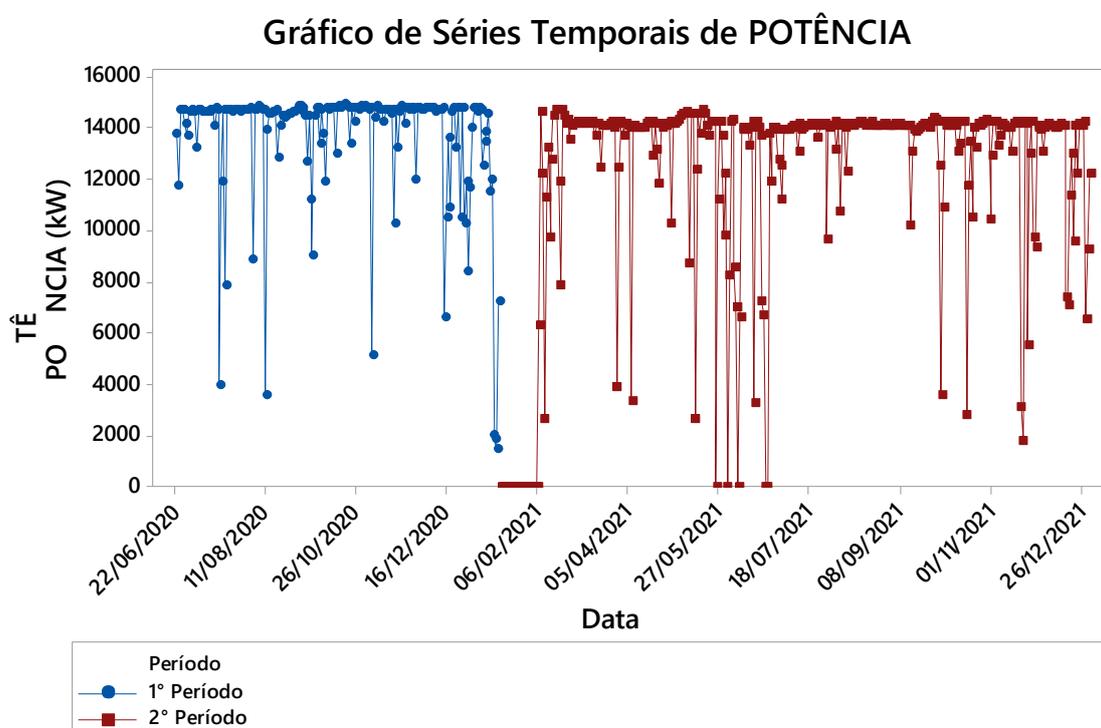


Figura 5.1: Gráfico de potência para o moinho de bolas MB02, por período, sem tratamento de dados.

Para o tratamento dos dados, conforme descrito nos itens de 5.1.1 à 5.1.3, foram tomadas ações para as variáveis *TX. ALIM*, *POTÊNCIA* e *A80*. Tais ações foram realizadas a fim de se obter homogeneidade e equivalência dos dados das variáveis de controle operacional para o moinho de bolas MB02 entre os dois períodos.

5.1.1 Taxa de alimentação dos moinhos

Para a variável *TX. ALIM.*, pode-se citar as seguintes informações importantes e/ou principais pontos que poderiam influenciar os resultados:

- i. A atual meta e taxa máxima de alimentação horária suportada para cada moinho sem influência de manobras de operação, é de 3300tms/h.
- ii. O erro de medição informado pelo fabricante do equipamento que mensura a taxa de alimentação dos moinhos, é de aproximadamente 2%.
- iii. Há dificuldades operacionais como a falta de disponibilidade de minério na moagem para atingir a meta de taxa operacional, pequenas paradas horárias para manutenções, ajuste operacionais e outras ações necessárias para garantir a integridade do processo de moagem.

Levando-se em consideração as informações citadas, foram excluídos do banco de dados os valores diários nos quais a variável *TX. ALIM.* foi superior ou a diferença era inferior a 10% (– 10%) com relação ao valor de 3300tms. A justificativa para essa ação é principalmente dada pela baixa oferta de minério para a moagem primária e, conseqüentemente, a dificuldade em se atingir a taxa meta de 3300tms/h.

5.1.2 Consumo específico – potência

Para a variável *POTÊNCIA*, pode-se citar as seguintes informações importantes e/ou principais pontos que poderiam influenciar os resultados:

- i. A meta especificada de consumo energético para operação do moinho de bolas no 1º período é de 14800kWh.
- ii. Para evitar o expurgo de bolas devido à falta do trommel, a meta especificada de consumo energético para operação do moinho de bolas MB02 no 2º período é de aproximadamente 14100kWh.
- iii. O erro de medição informado pelo fabricante do equipamento que mensura o consumo energético dos moinhos é de aproximadamente 1%.

Levando-se em consideração as informações citadas, foram excluídos do banco de dados os valores diários nos quais a variável *POTÊNCIA* foi superior ou inferior ao erro de medição informado pelo fabricante ($\pm 1\%$) com relação à meta especificada de consumo energético para cada período (14800kW e 14100kW, respectivamente).

5.1.3 A80

Para a variável *A80*, pode-se citar a seguinte informação importante e/ou principal ponto que poderiam influenciar os resultados:

- i. A partir de dados históricos de $A80$ do minério que alimenta a moagem primária, compreende-se que com maior frequência este possui valores entre 0,5mm e 0,8mm.

Para melhor compreensão da informação citada, a partir do banco de dados já tratado com as ações tomadas para as variáveis TX , $ALIM$, e $POTÊNCIA$, foi criado um histograma de frequência para a variável $A80$. Conforme pode-se observar na Figura 5.2, na qual tem-se o histograma de distribuição de frequência para a variável $A80$ para ambos os períodos, é possível perceber que o intervalo no qual há maior frequência é entre 0,6mm e 0,7mm.

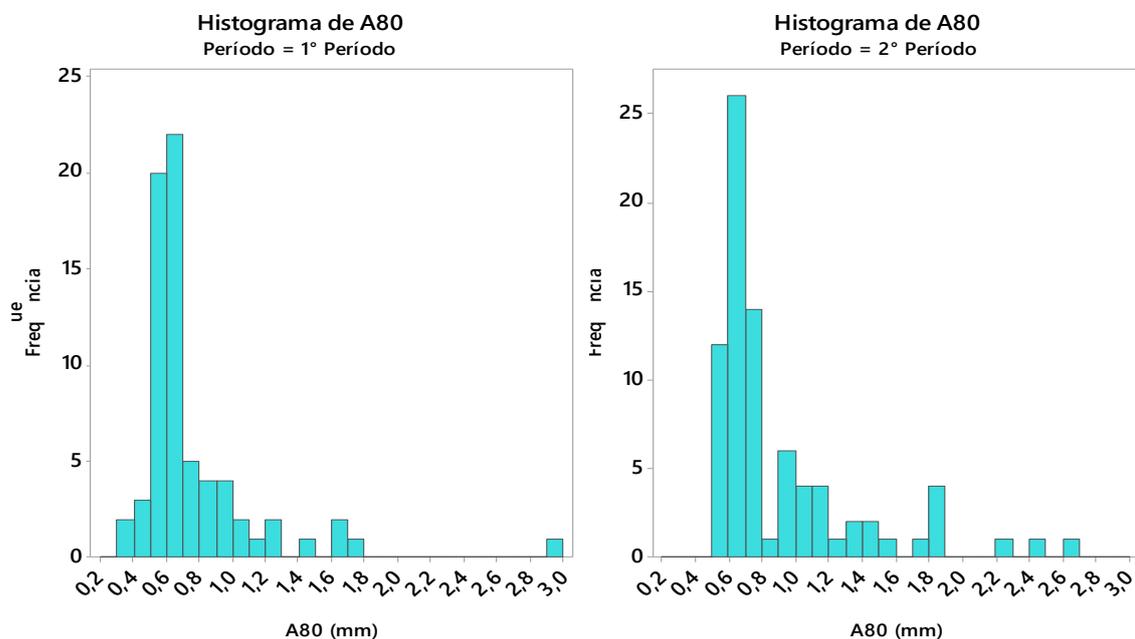


Figura 5.2: Histograma para variável $A80$ nos dois períodos.

Levando-se em consideração a informação citada e com o intuito de que se tenha os mesmos valores de $A80$ para a análise comparativa de ambos os períodos, foram excluídos do banco de dados os valores diários nos quais a variável $A80$ foi superior ou inferior ao seu intervalo de maior frequência (0,6mm ↔ 0,7mm).

5.2 Representação Gráfica e Verificação de Normalidade Distributiva dos Dados para os Parâmetros.

Após a exclusão dos dados do banco de dados, é possível observar, com mais clareza na Figura 5.3, a mudança de valor do consumo energético específico do moinho de bolas MB02.

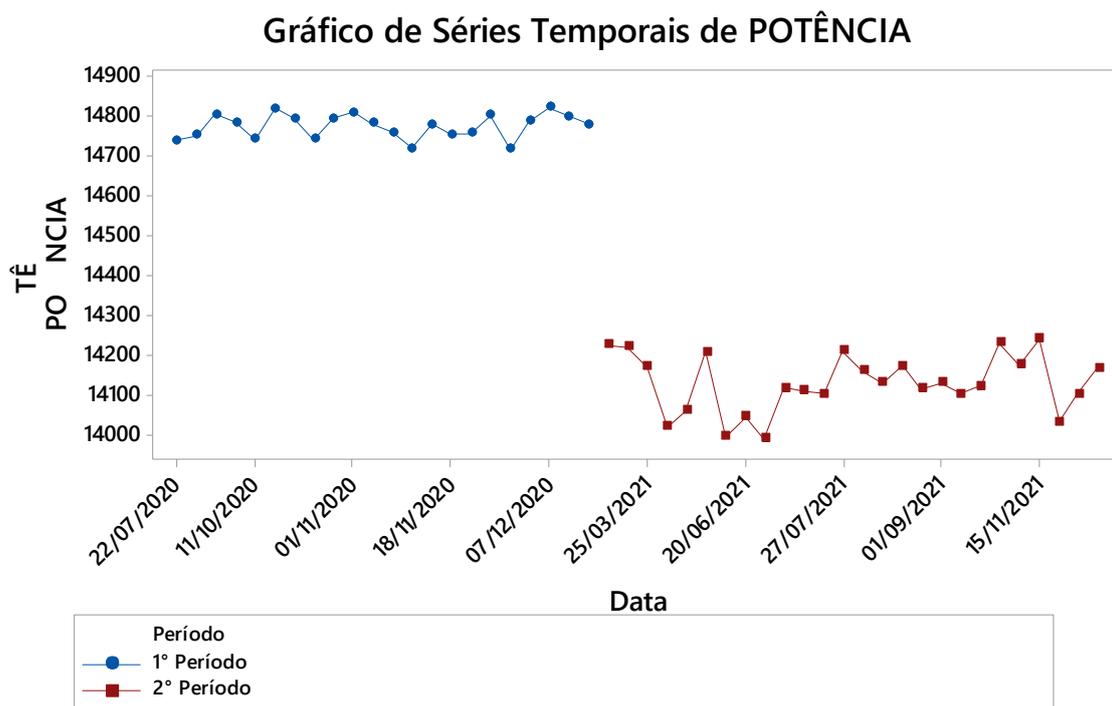


Figura 5.3: Gráfico de potência para o moinho de bolas MB02, por período, após tratamento de dados.

Para a aplicação de testes de comparação de amostras é necessário compreender primeiramente se os dados seguem uma distribuição normal. É possível observar na Figura 5.4, que os dados para a variável *POTÊNCIA* no 1º período e no 2º período seguem uma distribuição normal de acordo com os resultados para o teste de normalidade de *Anderson-Darling*, no qual tem-se o *Valor-p* > 0,05.

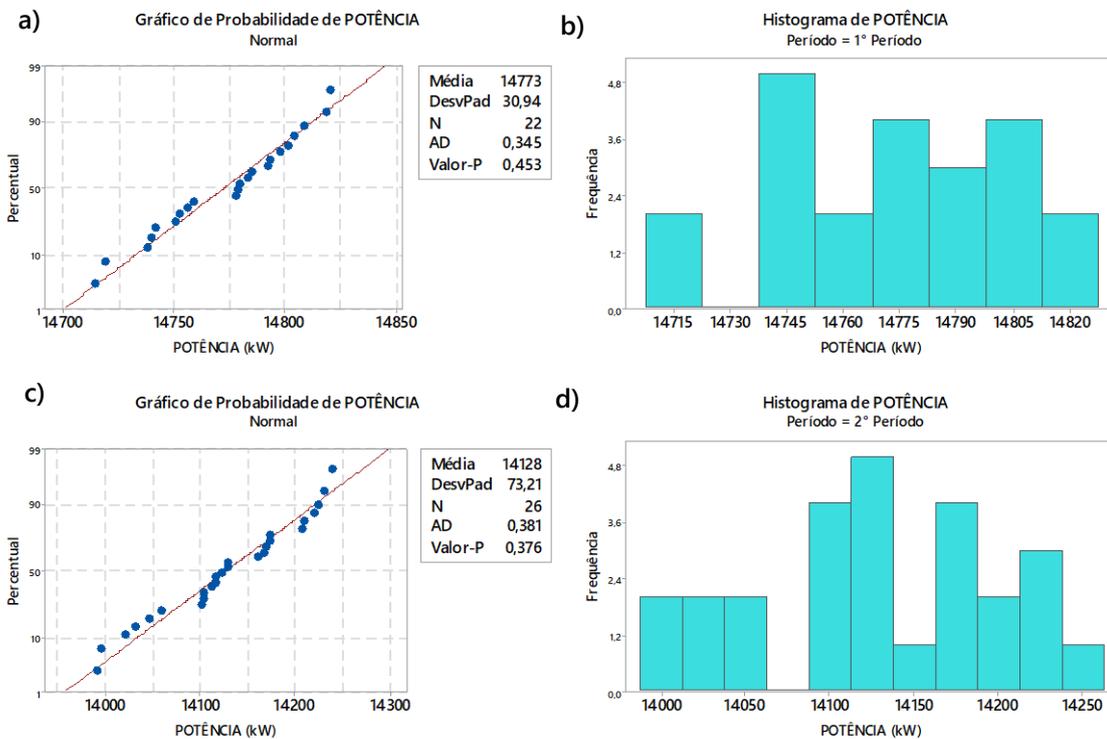


Figura 5.4: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para *POTÊNCIA* no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para *POTÊNCIA* no 2º período.

Para a variável *TX. ALIM.* é possível observar, na Figura 5.5, que os dados seguem uma distribuição normal de acordo com os resultados para o teste de normalidade de *Anderson-Darling* para o 1º período e para o 2º período, no qual tem-se o *Valor-p* > 0,05.

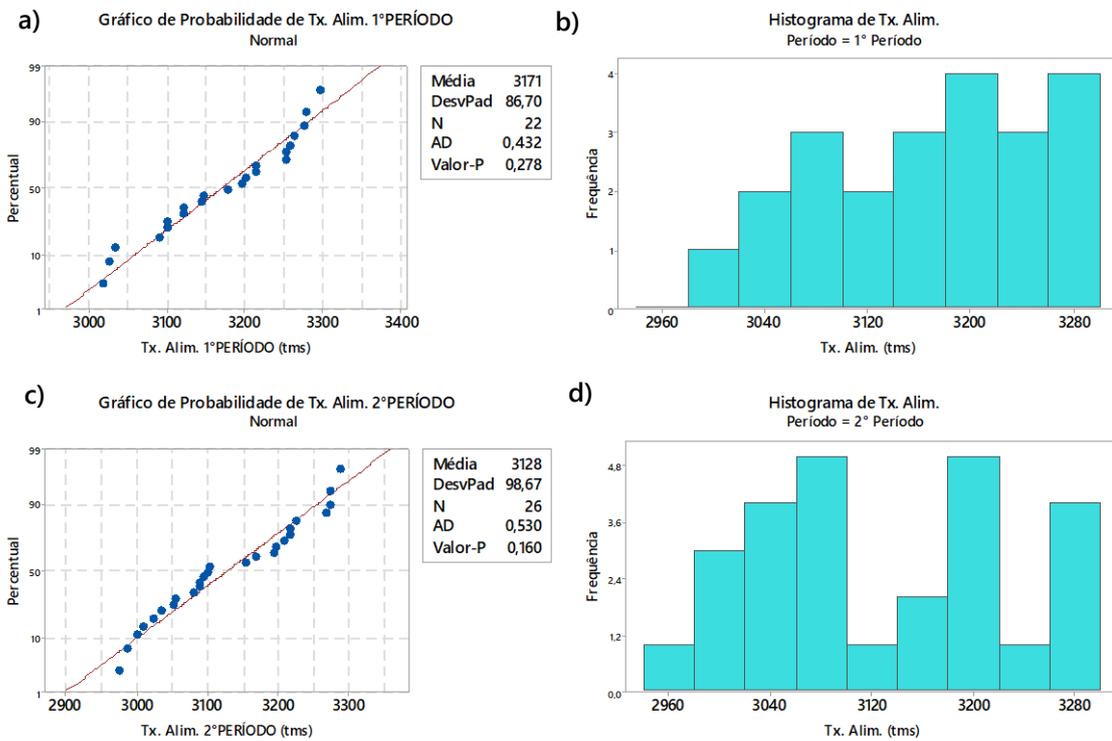


Figura 5.5: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para *TX. ALIM.* no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para *TX. ALIM.* no 2º período.

Para a variável *A80* é possível observar, na Figura 5.6, que os dados seguem uma distribuição normal de acordo com os resultados para o teste de normalidade de *Anderson-Darling* para o 1º período e para o 2º período, no qual tem-se o *Valor-p* > 0,05.

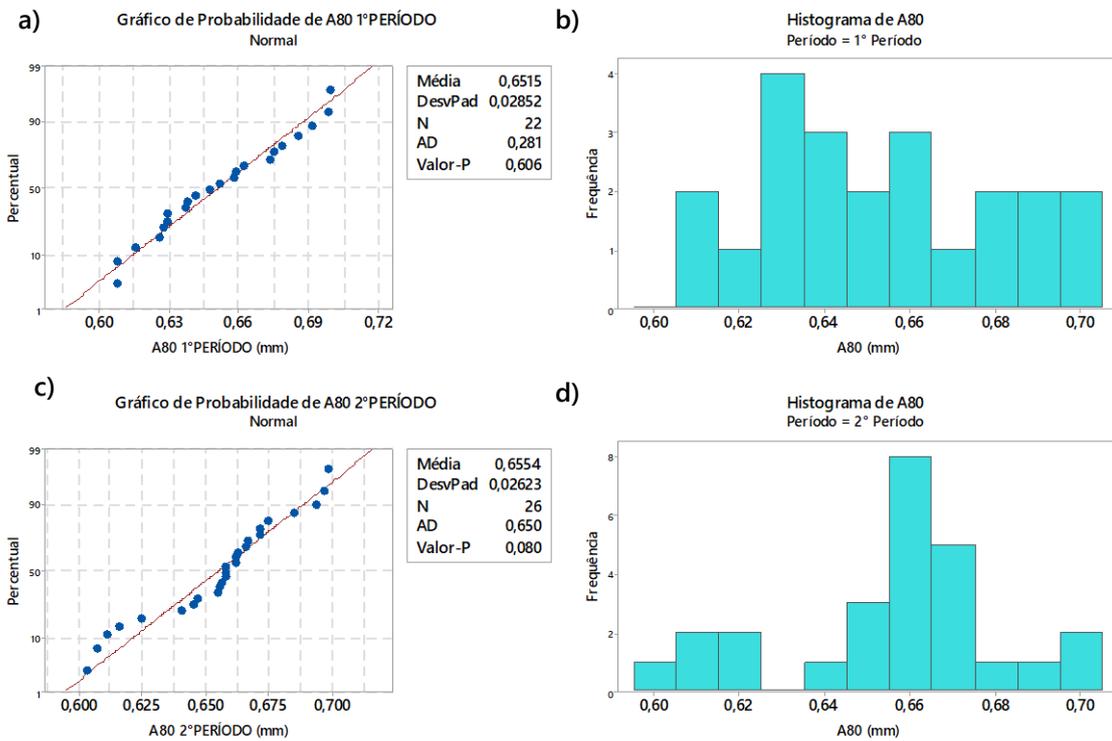


Figura 5.6: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para $A80$. no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para $A80$. no 2º período.

Para a variável $P80$ é possível observar, na Figura 5.7, que os dados seguem uma distribuição normal de acordo com os resultados para o teste de normalidade de *Anderson-Darling* para o 1º período e para o 2º período, no qual tem-se o $Valor-p > 0,05$.

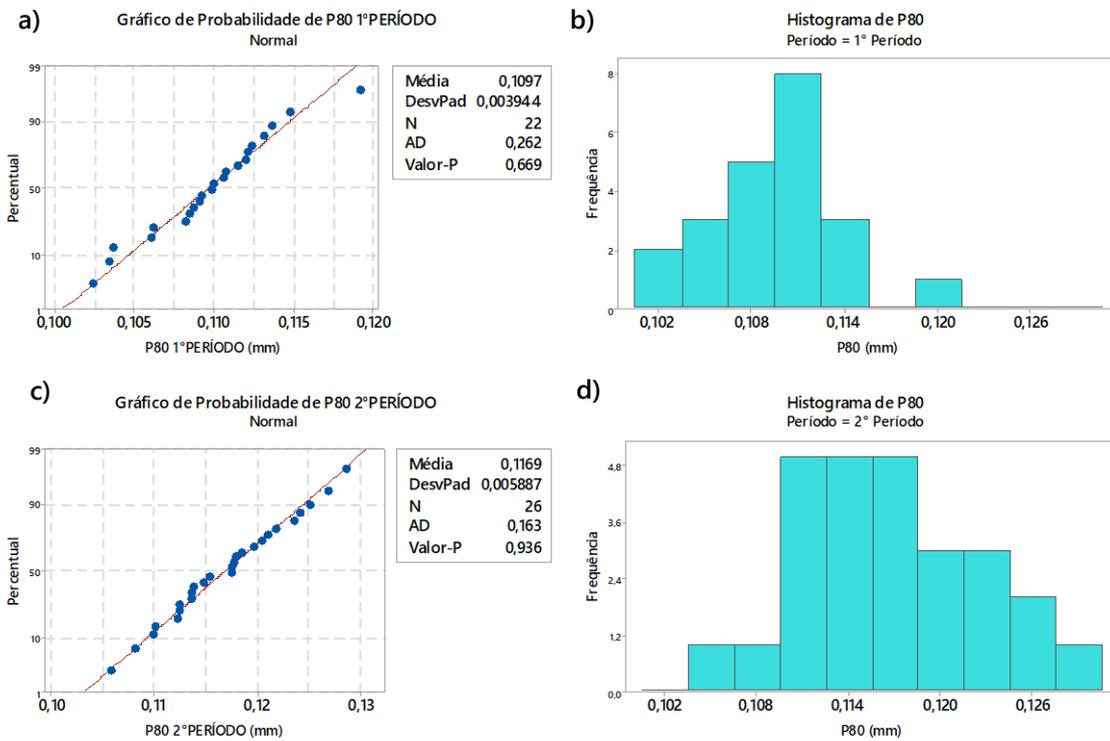


Figura 5.7: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para $P80$. no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para $P80$. no 2º período.

Para a variável *GRAU DE REDUÇÃO* é possível observar, na Figura 5.8. que os dados seguem uma distribuição normal de acordo com os resultados para o teste de normalidade de *Anderson-Darling* para o 1º período e para o 2º período, no qual tem-se o $Valor-p > 0,05$.

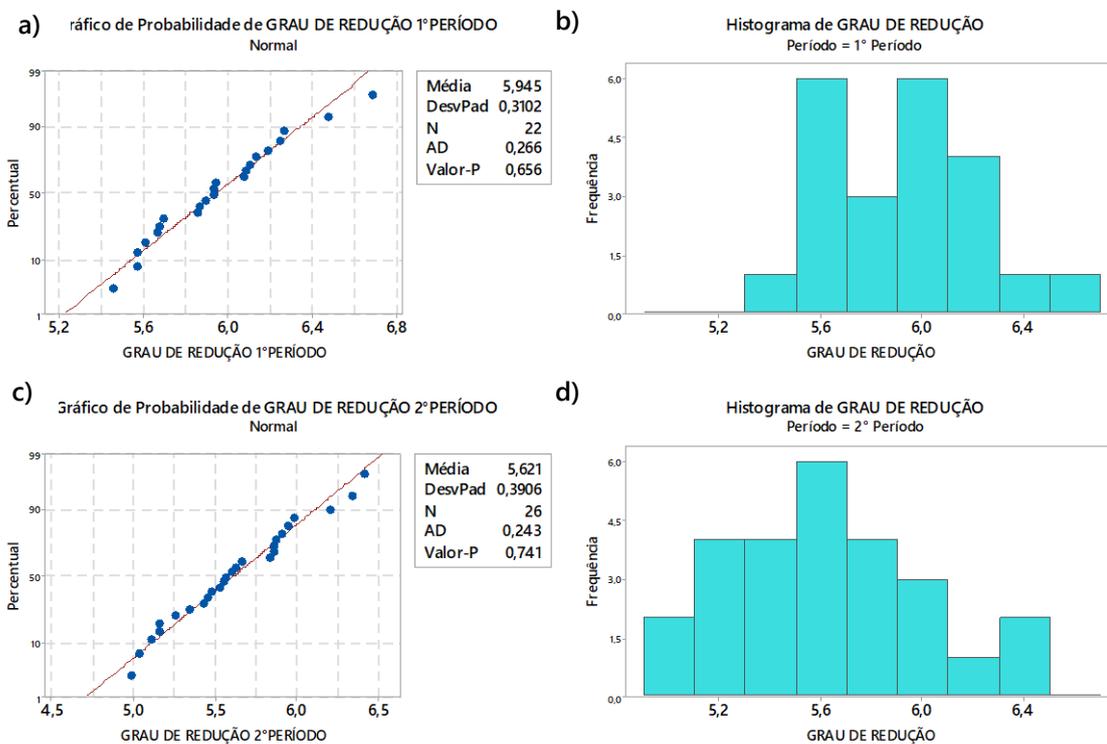


Figura 5.8: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para *GRAU DE REDUÇÃO* no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para *GRAU DE REDUÇÃO* no 2º período.

Para a variável *REQ. ENERGÉTICO* é possível observar, na Figura 5.9, que os dados seguem uma distribuição normal de acordo com os resultados para o teste de normalidade de *Anderson-Darling* para o 1º período e para o 2º período, no qual tem-se o *Valor-p* > 0,05.

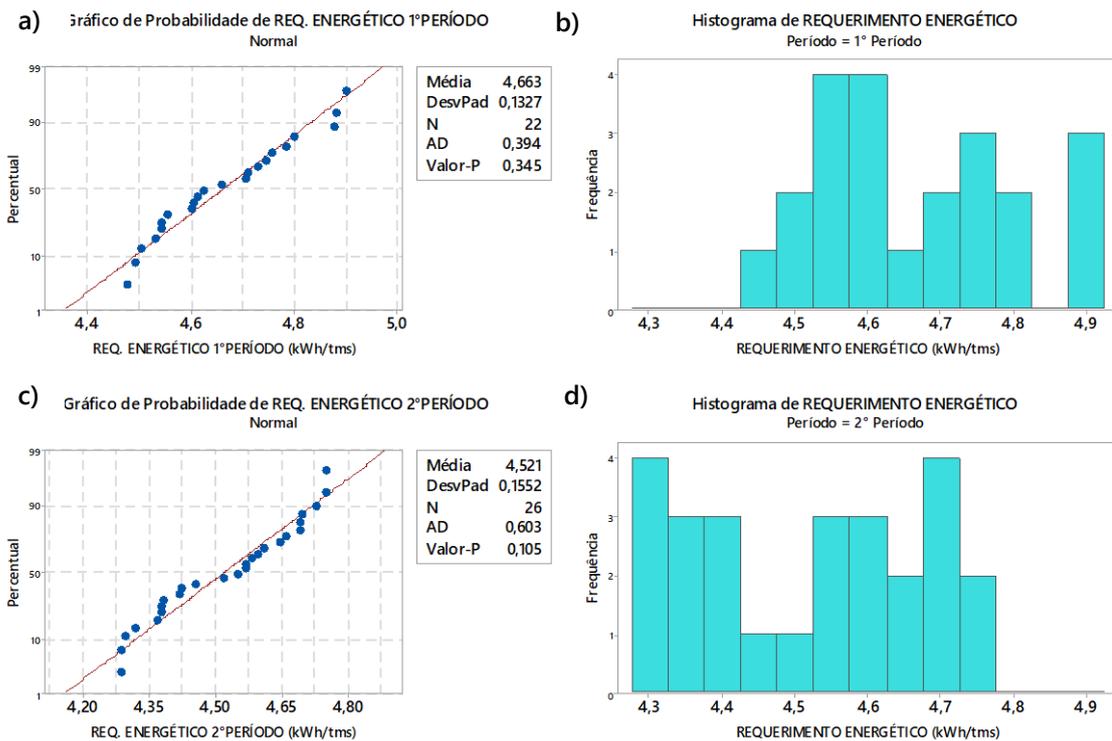


Figura 5.9: a) e b) gráfico de probabilidade e histograma para *REQ. ENERGÉTICO*. no 1º período; c) e d) gráfico de probabilidade e histograma para *REQ. ENERGÉTICO* no 2º período.

5.3 Análise Comparativa.

Após a verificação da normalidade distributiva apresentada no item 5.2 deste trabalho, foi escolhido o teste *t-Student* para as análises comparativas desejadas. Isso foi possível pois os agrupamentos de dados para as variáveis, após o tratamento de dados, apresentaram distribuição normal conforme verificado.

A partir do resultado do teste de *t-Student* (Figura 5.10) é possível inferir com 95% de confiança que a variável *POTÊNCIA* no 1º período e 2º período são estatisticamente diferentes em aproximadamente 645kW (*Valor-p* < 0,05).

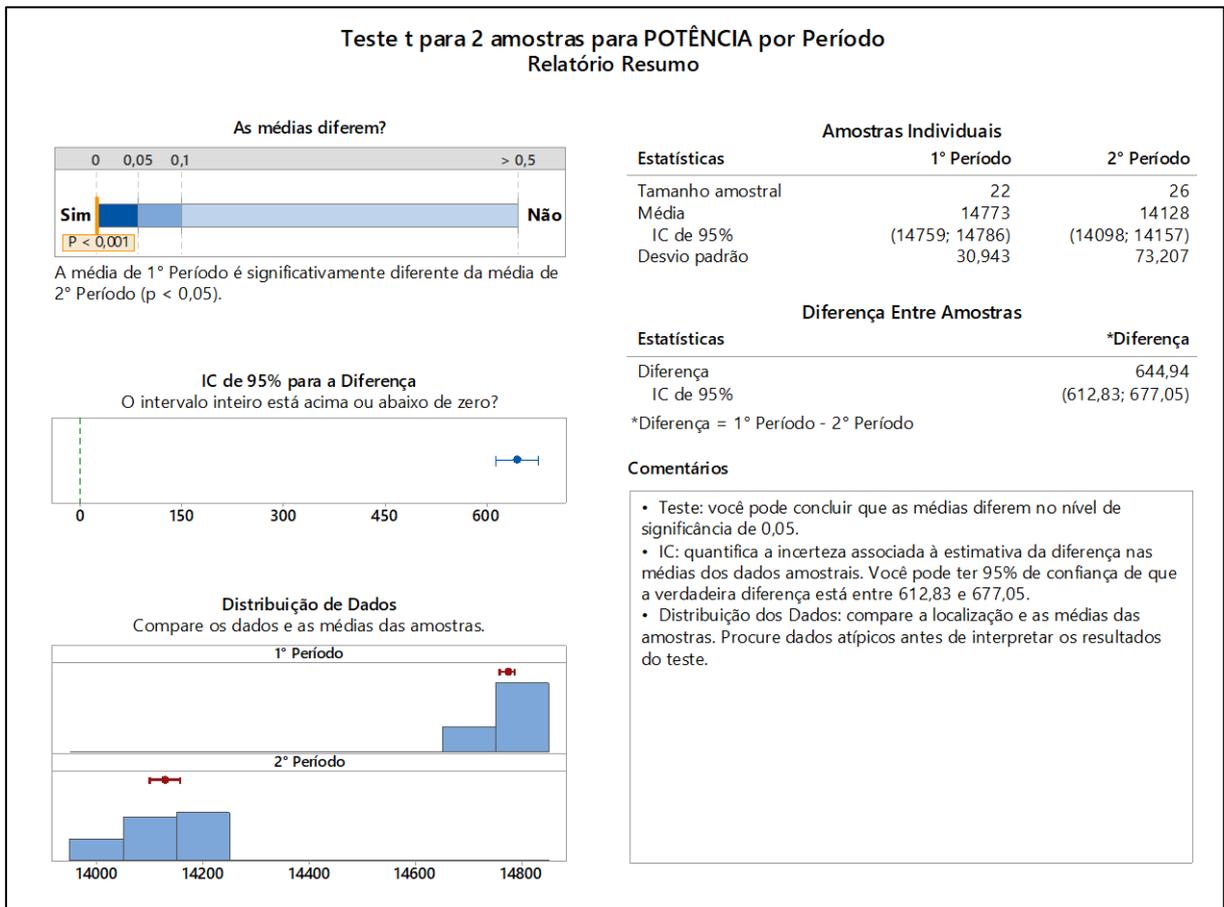


Figura 5.10: Relatório resumo para teste *t-Student* comparativo entre períodos para a variável *POTÊNCIA*.

Para a variável *TX. ALIM.*, é possível observar, na Figura 5.11, o resultado do teste *t-Student*, no qual pode-se inferir com 95% de confiança que as duas variáveis são estatisticamente iguais ($Valor-p > 0,05$). A partir desse resultado, é possível compreender que tem-se a mesma taxa de alimentação em ambos os períodos para os dados que terão os valores granulométricos da alimentação e do produto comparados.

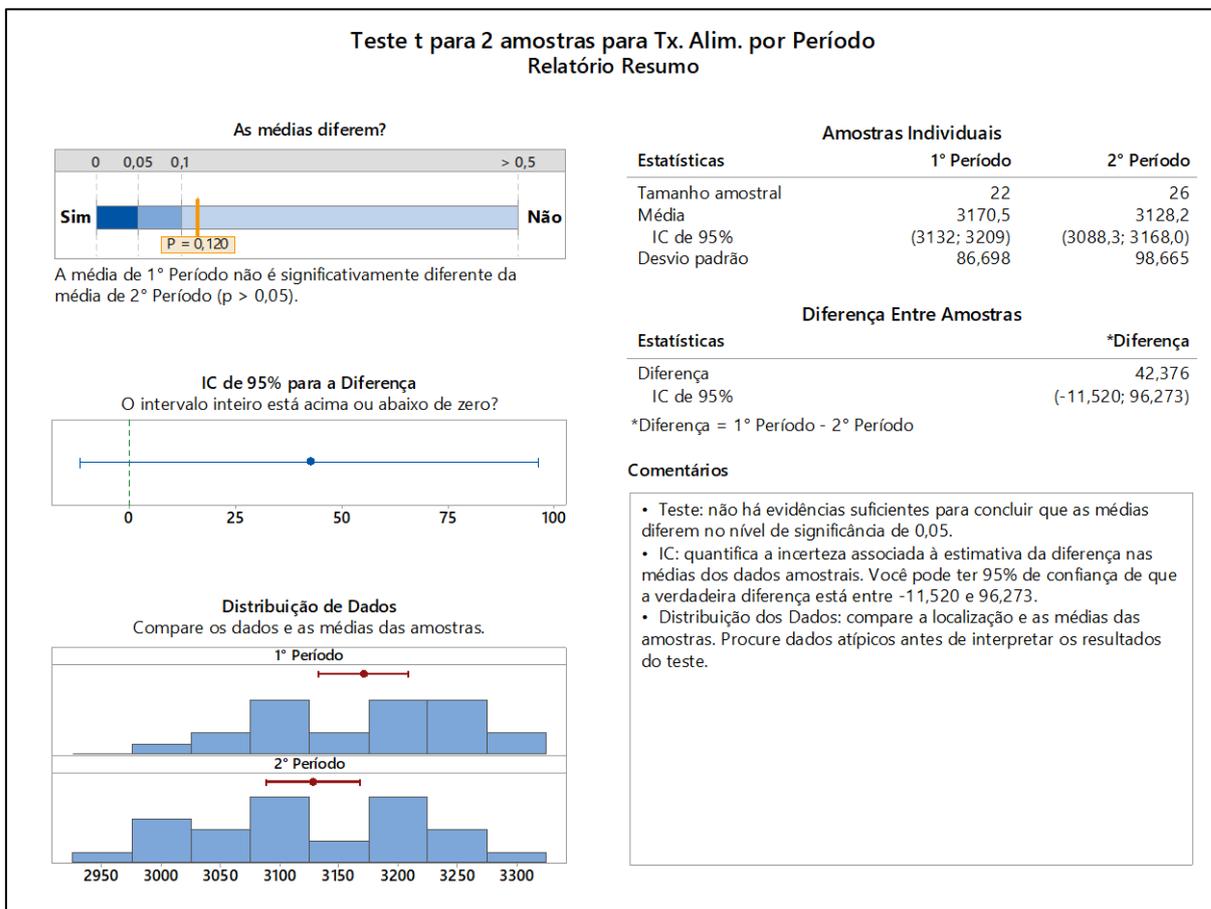


Figura 5.11: Relatório resumo para teste *t-Student* comparativo entre períodos para a variável *TX. ALIM.*

Para a variável *A80*, é possível observar, na Figura 5.12, o resultado do teste *t-Student*, no qual pode-se inferir com 95% de confiança que as duas variáveis são estatisticamente iguais ($Valor-p > 0,05$).

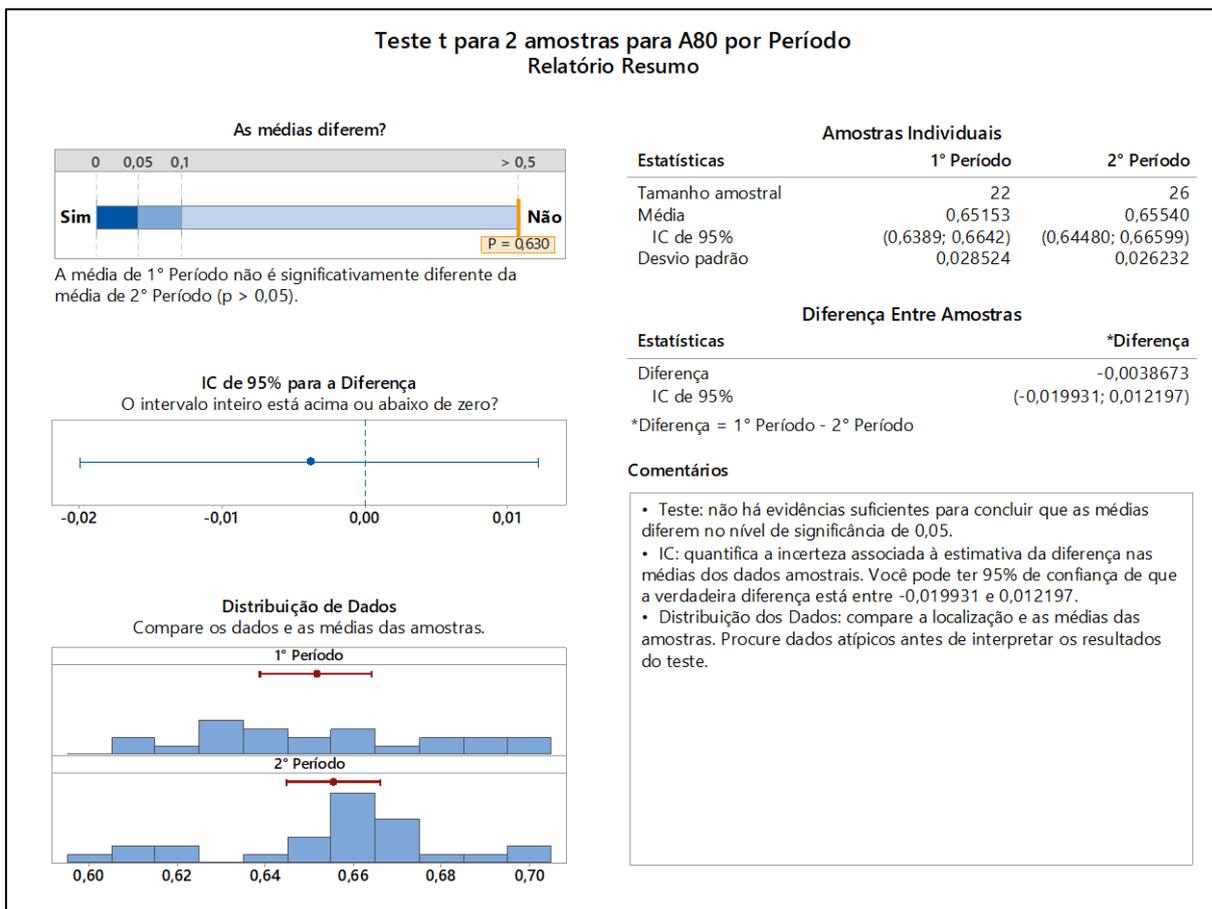


Figura 5.12: Relatório resumo para teste *t-Student* comparativo entre períodos para a variável A80.

A partir desse resultado, é possível inferir que o minério que foi alimentado no moinho de bolas MB02 possui 80% do material com granulometria passante em peneira de abertura de malha do mesmo tamanho em ambos os conjuntos de agrupamentos de dados analisados. Pode-se perceber também que o minério alimentado possui a curva de distribuição granulométrica bastante similar para ambos os agrupamentos de dados. Para melhor compreensão, pode-se observar na Figura 5.13 as curvas granulométricas de valores médios da alimentação e o A80 médio calculado para o moinho de bolas MB02 para os dados dos agrupamentos de dados avaliados.

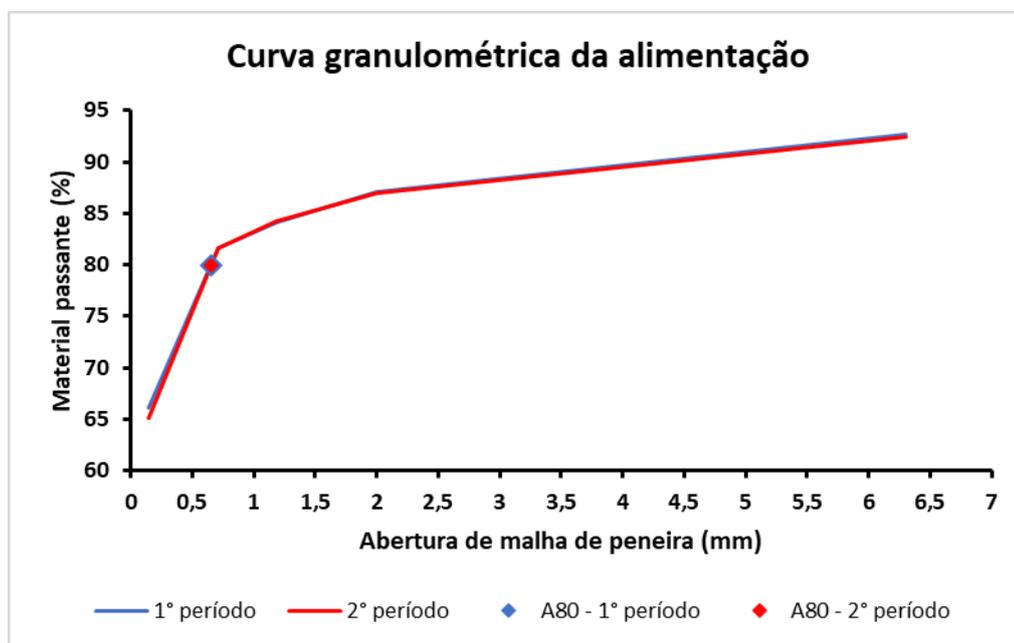


Figura 5.13: Curva granulométrica da alimentação do moinho MB02 em ambos os períodos agrupamento de dados.

Para a variável $P80$, é possível observar, na Figura 5.14, o resultado do teste t -Student, no qual pode-se inferir com 95% de confiança que as duas variáveis não são estatisticamente iguais ($\text{Valor-}p < 0,05$). Portanto, é possível aferir que o produto do moinho de bolas MB02 possui 80% do material passante em peneira com abertura de malha diferente entre os dois agrupamentos de dados analisados, sendo maior para o 2º período do que para o 1º período em aproximadamente 0,007mm ($7\mu\text{m}$).

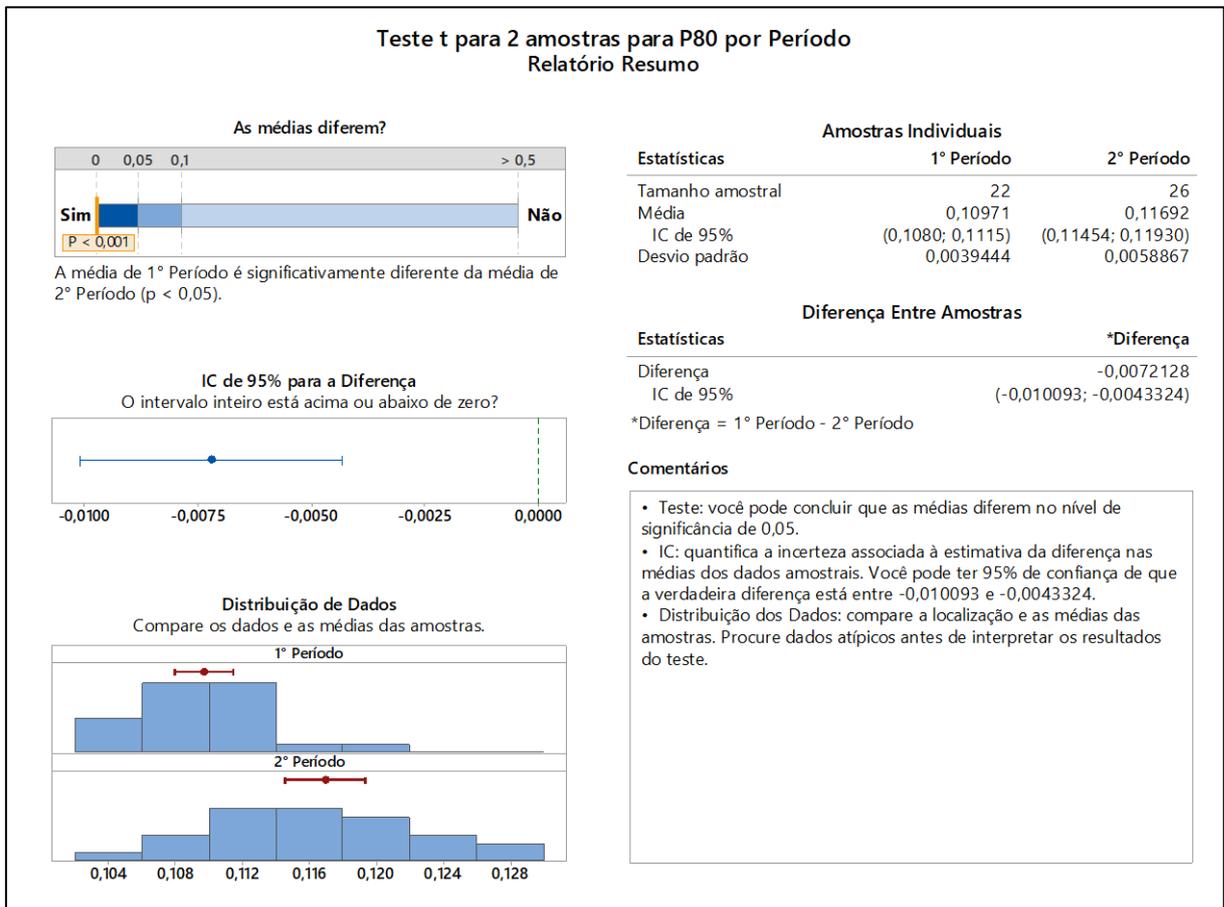


Figura 5.14: Relatório resumo para teste *t-Student* comparativo entre períodos para a variável *P80*.

A partir desse resultado, percebeu-se também que o produto do moinho de bolas MB02 possui curva de distribuição granulométrica bastante distinta entre os agrupamentos de dados. Para melhor compreensão, pode-se observar, na Figura 5.15, as curvas granulométricas de valores médios do produto e o P80 médio calculado para o moinho de bolas MB02 para os dados dos agrupamentos de dados avaliados.

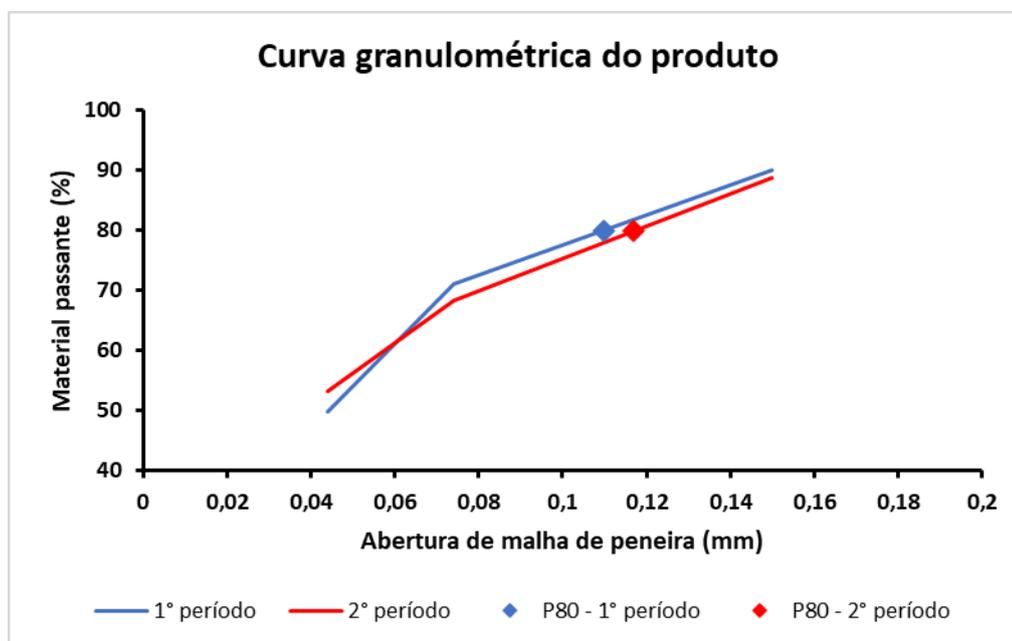


Figura 5.15: Curva granulométrica do produto do moinho MB02 em ambos os períodos do agrupamento de dados.

A partir da compreensão da Figura 5.14 e Figura 5.15 pode-se inferir que haverá também uma diferença do grau de redução entre os agrupamentos de dados avaliados. Essa diferença pode ser constatada com um índice de 95% de confiança a partir do resultado do teste *t-Student* (Figura 5.16), no qual tem-se o resultado comparativo para a variável *GRAU DE REDUÇÃO*.

Teste t para 2 amostras para GRAU DE REDUÇÃO por Período
Relatório Resumo

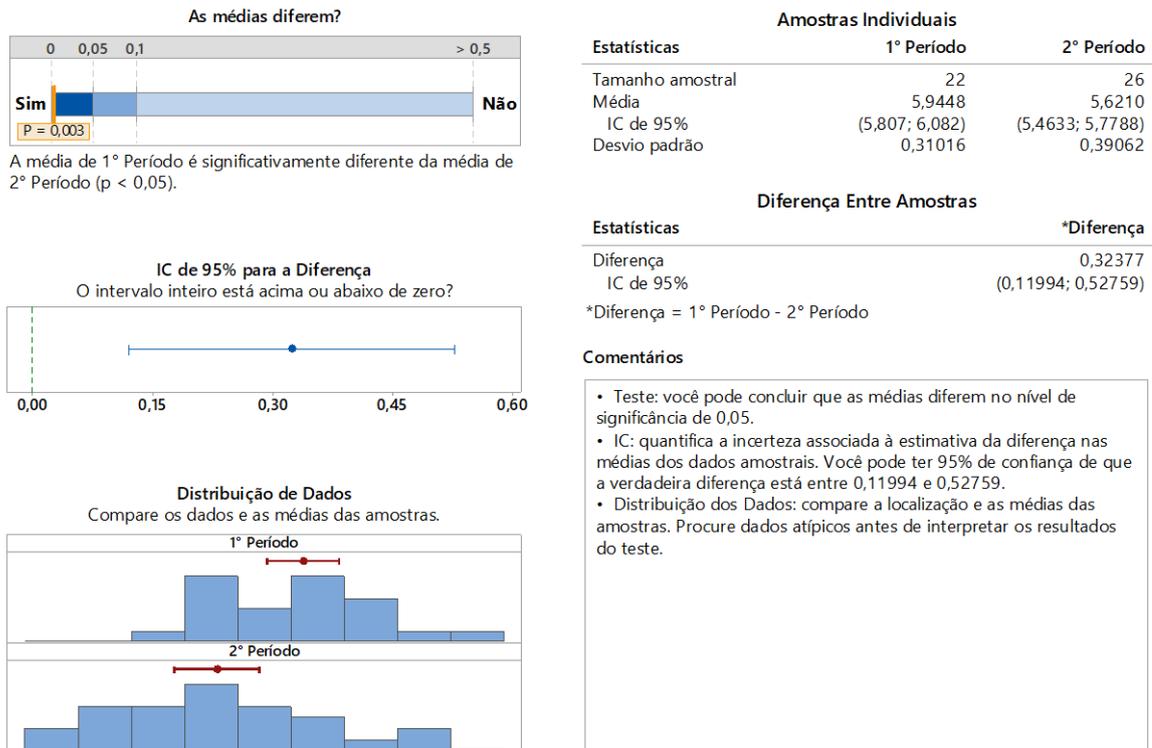


Figura 5.16: Relatório resumo para teste *t-Student* comparativo entre períodos para a variável *GRAU DE REDUÇÃO*.

A partir desse resultado, pode-se inferir que o grau de redução é diferente estatisticamente em aproximadamente 0,32 em seu valor, sendo maior no primeiro período ($\cong 5,94$) do que no 2º período do agrupamento de dados avaliado ($\cong 5,62$).

A variável calculada, *GRAU DE REDUÇÃO*, é uma variável adimensional de acompanhamento de performance do processo de moagem primária. Sem avaliar o consumo energético requerido e somente considerando critérios de avaliação de performance, a moagem é tão eficaz quanto maior for seu valor, indicando, assim, que há uma boa redução de granulometria do material com o qual o moinho é alimentado, reduzindo do *A80* até o *P80*.

Avaliando-se a disponibilização energética para cominuição, nota-se que há uma diferença significativa para a variável *REQ. ENERGÉTICO* no qual tem-se o *Valor-p* < 0,05 para o resultado do teste *t-Student* realizado (Figura 5.17).

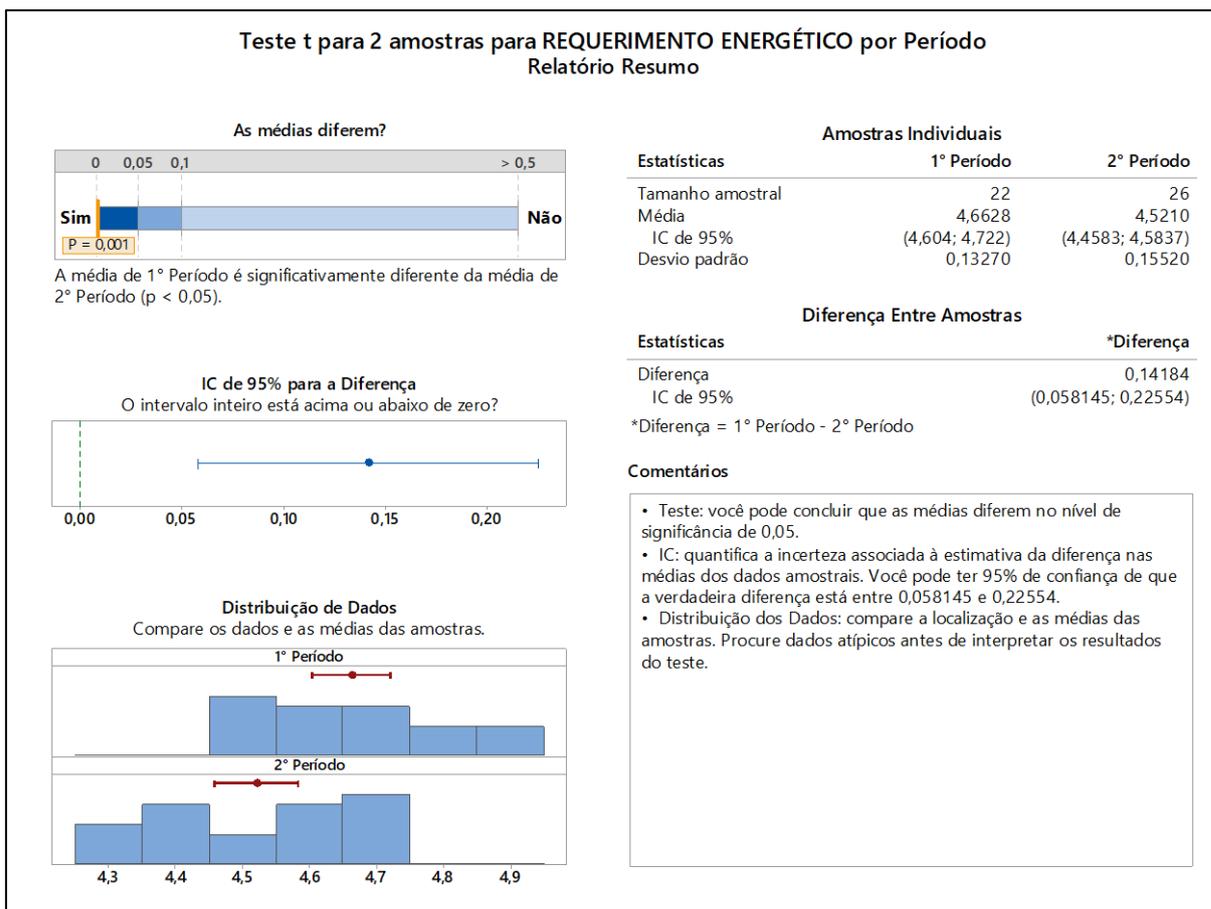


Figura 5.17: Relatório resumo para teste *t-Student* comparativo entre períodos para a variável *REQ. ENERGÉTICO*.

Pode-se perceber que há uma redução da disponibilização energética para cominuição de aproximadamente 0,142kWh/tms no segundo período no qual houve a alteração do consumo energético para aproximadamente 14100kWh.

A partir da compreensão da lei de Bond (1952), pode-se perceber que uma redução da quantidade energética disponível para cominuição no moinho de bolas MB02 resultou em um engrossamento granulométrico, no qual, a variável *P80* aumentou aproximadamente $7\mu\text{m}$ e a variável adimensional *GRAU DE REDUÇÃO* diminuiu cerca de 0,324 em seu valor para uma mesma taxa de alimentação e valor de *A80*. Portanto, é possível concluir que **deve-se refutar a observação empírica na qual não havia alteração do produto granulométrico da moagem do moinho de bolas MB02 após a modificação do valor de consumo energético para se evitar o expurgo de corpos moedores pela falta do trommel.**

Os dados do processo avaliados possuem diversos ruídos e, durante o processo de inferência estatística para a tratativa do problema, foi possível observar que tomando um

panorama geral dos dados, ou seja, **partindo dos dados “brutos” e sem o devido tratamento dos dados, tem-se a falsa conclusão que há um aumento no grau de redução com a diminuição da disponibilidade energética para a cominuição**, como pode ser observado na Figura 5.18 na qual tem-se o resultado para o teste de *Mann-Whitney* para a variável *GRAU DE REDUÇÃO*.

Mann-Whitney: GRAU DE REDUÇÃO 1° PERÍODO; GRAU DE REDUÇÃO 2° PERÍODO			
Método			
η_1 : mediana de GRAU DE REDUÇÃO 1° PERÍODO			
η_2 : mediana de GRAU DE REDUÇÃO 2° PERÍODO			
Diferença: $\eta_1 - \eta_2$			
Estadísticas Descritivas			
	Amostra	N	Mediana
GRAU DE REDUÇÃO 1° PERÍODO		178	5,82686
GRAU DE REDUÇÃO 2° PERÍODO		339	6,36026
Estimativa da diferença			
Diferença	IC para a diferença	Confiança	
-0,609053	(-0,970335; -0,285856)	Atingida 95,00%	
Teste			
Hipótese nula	$H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$		
Hipótese alternativa	$H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$		
Valor W	Valor-p		
40079,00	0,000		

Figura 5.18: Teste de *Mann-Whitney* para a variável *GRAU DE REDUÇÃO* no 1° e 2° período

O teste de *Mann-Whitney* foi realizado, pois verificou-se a existência de distribuição não normal para os agrupamentos de dados sem o devido tratamento de dados. Na Figura 5.18, é possível observar que, a partir do resultado do teste, utilizando o banco de dados sem o devido tratamento, infere-se que há uma diferença entre os dois períodos avaliados de aproximadamente 0,61 para a variável *GRAU DE REDUÇÃO* (*Valor-p* < 0,05), sendo maior para o 2° período no qual há o uso de uma potência inferior. Avaliando esse resultado, vale ressaltar a grande força indutiva que a análise dos dados de processo avaliados sem o devido tratamento de dados tem em se inferir erroneamente que não há alterações prejudiciais ao processo na granulometria do produto da moagem do moinho de bolas MB02. Contudo, a partir da inferência estatística realizada, na qual considerou-se as premissas necessárias para uma correta avaliação, é possível concluir o contrário, indicando que há alteração granulométrica do produto da moagem.

Possivelmente o engrossamento do produto trará impactos nas etapas subsequentes, necessitando de adequação e ajuste de operação, principalmente na etapa de flotação mecânica que possui uma “sensibilidade” operacional fortemente ligada a parâmetros como os de

granulometria do material de sua alimentação. Por isso, para que o processo de moagem continue sendo operado com o consumo energético inferior ($\cong 14100kW$) é necessário um estudo do impacto da modificação do consumo energético da moagem primária, enfatizando a variação granulométrica, nos parâmetros de avaliação de performance de etapas subsequentes como a flotação mecânica (Ex: recuperação mássica e recuperação metalúrgica).

Observa-se na Tabela 5.1 os resultados dos testes *t-Student* compilados.

Tabela 5.1: Resultados dos testes *t-Student* compilados.

VARIÁVEL	É ESTATISTICAMENTE DIFERENTE ENTRE OS PERÍODOS? (IC 95%; VALOR- $p > 0,05$)	1º PERÍODO	2º PERÍODO	DIFERENÇA
TX. ALIM.	NÃO	-	-	-
POTÊNCIA	SIM	14773kW/h	14128kW/h	644,94kW/h
A80	NÃO	-	-	-
P80	SIM	109 μm	116 μm	7 μm
GRAU DE REDUÇÃO	SIM	5,94	5,62	0,32
REQ. ENERGÉTICO	SIM	4,66kWh/tms	4,52kWh/tms	0,14kWh/tms

Fonte: (AUTOR, 2022).

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que houve estatisticamente, sob um índice de confiança de 95%, variação do produto granulométrico do moinho de bolas MB02 após a redução do consumo energético de operação do equipamento, conseqüentemente, deve-se descartar a hipótese da observação empírica em que esta informava que não havia variação do produto granulométrico.

Após a comparação do produto granulométrico entre os agrupamentos de dados avaliados, constatou-se que a redução do consumo energético de operação do moinho de bolas MB02 para aproximadamente 14100kW resultou em um aumento de cerca de $7\mu m$ na abertura de malha da peneira pela qual 80% do material do produto da moagem é passante.

Após a comparação do produto granulométrico entre os agrupamentos de dados avaliados, constatou-se que a redução a redução do consumo energético de operação do moinho de bolas MB02 para aproximadamente 14100kW resultou em uma diminuição do grau de redução da moagem, a qual era de aproximadamente 5,94 para o 1º período e passou para aproximadamente 5,62 no segundo período.

Para uma melhor avaliação dos impactos gerados pela variação do produto granulométrico do moinho de bolas MB02, deve-se realizar um estudo estatístico e operacional levando em consideração a influência desta variação granulométrica nos parâmetros de performance da flotação mecânica utilizada tais como a recuperação em massa, recuperação metalúrgica e qualidade química do concentrado da flotação.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Avaliar operacionalmente e estatisticamente a influência da variação granulométrica nos parâmetros de performance da flotação mecânica estudada nesse trabalho, tais como a recuperação em massa, recuperação metalúrgica e qualidade química do concentrado da flotação.

- Verificar a influência do desgaste do revestimento na granulometria do produto da moagem, buscando analisar a influência da vida útil do revestimento na operação de moagem.

- Para fins de otimização do processo de moagem primária, verificar se há a necessidade de disponibilização energética controlada/fracionada para cominuição considerando os parâmetros geometalúrgicos do minério, aferindo se há variação, sob avaliação estatística, geometalúrgica e operacional, do *Work Index* para o material que alimenta a moagem primária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, V. K. **Otimização de Carga Moedora Utilizando Ferramentas de Modelamento Matemático e Simulação de Moagem**. 2006. 122f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Instituto de Tecnologia Mineral. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A.; A test of goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p.765-769, 1954.
- ANGLO AMERICAN PLC. **Centenário Anglo American**. Disponível em: <<https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/imprensa/noticias/2017/11-10-2017>>. 2017. Acesso em: 22 dez. 2021.
- ANGLO AMERICAN PLC. **Cidades de atuação do Projeto Minas – Rio**. Disponível em: <<https://twitter.com/angloamericanbr/status/1023933981430108160?lang=hi>>. 2018. Acesso em: 22 dez. 2021.
- ANGLO AMERICAN PLC (a). **Nossos negócios - Minério de Ferro**. Disponível em: <<https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/nossos-negocios/minerio-de-ferro>>. 2020. Acesso em: 22 dez. 2021.
- ANGLO AMERICAN PLC (b). **Products - Iron Ore**. Disponível em: <<https://www.angloamerican.com/products/iron-ore?product=ironore>>. 2020. Acesso em: 22 dez. 2021.
- BOND, F.C.; The Third Theory of Comminution. **Mining Engineering**. v.4, p.484, 1952.
- CASADO, W. G.; **Uma aplicação do teste T de Student para grupo de alunos antes e depois do PIBID**. 2013. 47f. Monografia. (Licenciatura em Matemática) - Centro de Educação e Saúde. Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, 2013
- CHAGAS, T. T. R. Das. **A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química e microestrutura**. 2008. 74f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados: Estatística e Modelagem Multivariada com EXCEL®, SPSS® e Stata®**. 1º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 1187p.
- FERREIRA, A. I. R.; SOUZA, A. M. M.; SILVA, D. T.; Testes estatísticos para diagnóstico da normalidade de uma distribuição de dados. In: 13º Congresso Nacional de Iniciação Científica - CONIC SEMESP, 2013, Campinas. [**Anais do CONIC-SEMESP**].Campinas: CONIC-SEMESP, 2013.
- KICK, F.; Das Gesetz der proportionalen Widerstande und seine anwendung felix. Leipzig: **Kessinger Publishing**. 1885.
- LUCAMBIO, F. Diferentes testes para verificar normalidade de uma amostra aleatória. **Statistic Research of Paraná**. e.1, v.1, p.1-12, 2008. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~lucambio/CE225/2S2009/Normal_test.pdf>.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5º ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2010. 965p.
- METSO:OUTOTEC. **Especificações técnicas dos moinhos de bolas**. Disponível em: <<https://www.mogroup.com/pt/portfolio/moinhos-de-bolas/>>. 2022. Acesso em: 18 out. 2022.

- MORAES, C. F. de; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P.; Análise crítica da aplicação de métodos estatísticos em processos definidos por dados que não apresentam distribuição normal. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v.2, p.7-18, 2005.
- MORAIS, C. M. Escalas de medida, estatística descritiva e inferência estatística. In: **Biblioteca Digital Instituto Politécnico de Bragança**. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Educação, 2005. p. 1–30.
- RIBEIRO, M. R. **Investigação das características dos minérios de ferro da CVRD que influenciam seu comportamento na moagem**. 2004. 111f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ROLIM, V. K. **As Formações Ferríferas Da Região De Conceição Do Mato Dentro - MG: Posicionamento Estratigráfico, Evolução Tectônica, Geocronologia, Características Geoquímicas e Gênese Dos Minérios**. 2016. 215f. Tese. (Doutorado em Geologia Econômica e Aplicada) – Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- ROVERI, E.; CHAVES, A. P. Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 8, n. 4, p. 261–266, 2011.
- SAMPAIO, J. A.; DELBONI JUNIOR, H. Cominuição: Princípios da cominuição. In: **Tratamento de Minérios**. 6° ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2018. p. 107–131.
- SAMPAIO, N. A. de S.; ASSUMPCÃO, A. R. P. de; FONSECA, B. B. da. **Estatística Descritiva**. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2018. 70 p.
- SANTOS, S.B. dos; **Viabilidade da medida de elementos-traço em soro sanguíneo para diagnóstico de melanoma**. 2012. 106f. Tese. (Doutorado em Ciências) -Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- SANTOS, A.C.; FERREIRA, D.F.; Definição do tamanho amostral usando simulação Monte Carlo para o teste de normalidade baseado em assimetria e curtose: I. Abordagem univariada. **Ciência e Agrotecnologia**, v.27, n.2, p.432-437, 2003.
- SASSI, G. P. Introdução à Estatística Inferencial para pesquisas em Informática na Educação. In: **Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação: Abordagem Quantitativa de Pesquisa**. Porto Alegre: Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação, 2020. p. 1–40.
- SILVA, A. da; CAMPOS, J. da C.; SILVA, M. K. B. da.; Um estudo comparativo das estatísticas de teste de Anderson-Darling e de Vasicek para a distribuição Birnbaum-Saunders. In: 3° Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências - CONPESC, 2018, Campina Grande. [**Anais do Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências**].Campina Grande: CONPESC, 2018.
- SILVA, D. N. da; **Análise de Criticalidade de Defeitos em Munhões de Moinho de Bolas em Plantas de Mineração**. 2014. 96f. Dissertação. (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2014.
- SILVA, G. M. da.; ARAÚJO, A. dos R.; COSTA FILHO, G. G. da.; Análise de Séries Temporais de Pacientes com HIV/AIDS Internados no Hospital Universitário João de Barros Barreto (HUIBB), da Região Metropolitana de Belém, Estado do Pará. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 19., 2010, [**Anais**]. São Pedro: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2010.

SILVA, J. A. de O.; **Modelagem do Moinho de Bolas de Rocha Fosfática da empresa Anglo American Fosfatos Brasil utilizando a ferramenta Moly-CopTools**. 2014. 89f. Pós-graduação em Tratamento de Minérios. Pós-graduação - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SPERANDEI, S. L. M.; **Testes T de Student e Bayesianos aplicados a microarranjos de DNA: Impacto dos métodos de Transformação e do Tamanho da Amostra**. 2007. 95f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Biomédica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007

TORMAN, V. B. L.; COSTER. R.; RIBOLDI.; Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HPCA**, v.32, n.2, p.227-234, 2012.

TURRER, H. D. G.; MAZZINGHY, D. B.; NASCIMENTO, C. M; RUSSO, J. F. C.; DIAS, G. S.; Desempenho no processamento mineral de dois tipos de itabiritos da serra do sapo. In: 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, Associação brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2015. [**Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**]. São Paulo: Editora Blucher, 2017. Disponível em: <<http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/desempenho-no-processamento-mineral-de-dois-tipos-de-itabiritos-da-serra-do-sapo>> p. 376-384.

VON RITTINGER, P.R.; **Lehrbuch der Aufbereitungskunde**. Ernst Korn, Berlin, Reconhecimento Alemanha, 1867

ANEXO A

[OFFICIAL]

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
		INTERNO	

1 OBJETIVO

Estabelecer procedimentos para realização de análises granulométricas por peneiramento a úmido e a seco para amostras de minério de ferro.

2 APLICAÇÃO E ALCANCE

Este procedimento aplica-se a Gerência de Qualidade e Processo do Sistema Minas-Rio da Unidade de Negócio Minério de Ferro Brasil.

3 DEFINIÇÕES

PRC: Processo.

DDS: Diálogo Diário de Segurança;

MFB: Minério de Ferro Brasil.

APR-D: Análise Preliminar de Riscos – Diária;

AFRS: *Anglo Fatal Risk Standards* (padrões de riscos fatais da Anglo);

FALAAD (Frente, Atrás, Lados, Acima, Abaixo, Dentro): Processo de avaliação de risco individual, que instiga a observação de todo o cenário condizente com a operação;

PRO.MRJ.GQP.006- Procedimento para realização de filtragem de amostras em filtros de bancada - prc – Cmd

PRO.MRJ.GQP.024- Procedimento para realização de secagem de amostras em estufas e chapas aquecedoras - prc – Cmd;

Plano de Trabalho: plano de atividades disposto na área de trabalho, onde são relatadas todas as operações executadas durante o turno e que servirá de apoio operacional para as atividades no dia-a-dia do operador.

Documento Normativo: documento que estabelece regras (diretrizes, princípios, papéis e responsabilidades das áreas, processos e suas interfaces, procedimentos, limites de delegação de autoridade, etc) com o objetivo de orientar as atividades e processos da empresa. Na MFB, são denominados de documentos normativos todas as políticas, normas e procedimentos operacionais.

WRAC (Workplace Risk Assessment and Control): Ferramenta de análise preliminar, que tem por objetivo separar os riscos mais críticos dos menos críticos, com a hierarquização feita por meio de método semiquantitativo (tabela de priorização), Matriz 5x5.

Massa de alimentação: Porção de amostra utilizada no ensaio granulométrico.

Passante: Material que passa através da peneira, o passante final é recolhido no balde.

Peneirador: Equipamento capaz de produzir vibrações às peneiras.

Peneirar: Atividade de separar por meio de peneira uma amostra em frações de granulometria específica e definida.

4 RESPONSABILIDADES

4.1 GERENTE DA GERÊNCIA DE PROCESSO E QUALIDADE

- Responder por todas as atividades relativas a Gerência de Processos e Desenvolvimento;
- Designar as pessoas para a execução das tarefas e suas respectivas responsabilidades;

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 1 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
		INTERNO	

- Elaborar e gerenciar os custos e orçamentos dos recursos necessários para que sua equipe realize suas atividades em segurança, na qualidade e tempos pré-determinados sempre buscando os atendimentos das metas estabelecidas;
- Atuar como um apoio técnico à equipe, analisa os relatórios gerenciais de desempenho da sua gerência tendo em vista a viabilização e execução do teste, quando necessário;
- Desenvolver estratégia de desenvolvimento em conjunto com as áreas de interface.

4.2 COORDENADOR DA GERÊNCIA PROCESSOS E QUALIDADE

- Colaborar com o Gerente na definição das diretrizes;
- Auxiliar o gerente no tratamento dos desvios nas dimensões: segurança, qualidade, produção, custo e meio ambiente;
- Manter este documento normativo atualizado;
- Auditar esse documento, cobrar a revisão do mesmo quando necessário;
- Certificar se a atividade está sendo realizada conforme este procedimento.

4.3 ESPECIALISTAS, ENGENHEIROS DA GERENCIA DE PROCESSO E QUALIDADE

- Cumprir as regras deste documento normativo;
- Abrir plano de trabalho contemplado detalhamento dos testes;
- Certificar-se do cumprimento das normas utilizando a auditoria de padrões;
- Auxiliar o Coordenador na capacitação da equipe;
- Auxiliar o Coordenador na auditoria de execução das tarefas conforme os padrões;
- Definir as diretrizes destas atividades, manter este documento normativo atualizado;
- Garantir todos os recursos necessários para a realização da atividade;
- Garantir a capacitação dos colaboradores de forma a habilitá-los a executar tarefas constantes nesse padrão e/ou necessárias para realização das atividades demandadas;
- Certificar-se do cumprimento das normas utilizando a auditoria de padrões;
- Apoiar o coordenador para manutenção nas revisões desse documento.

4.4 TÉCNICOS DA GERÊNCIA DE PROCESSO E QUALIDADE

- Inspeccionar seu local de trabalho antes de iniciar suas atividades;
- Manter seu ambiente de trabalho sempre limpo e organizado;
- Evitar utilizar ferramentas com condições inadequadas de uso e ou improvisadas;
- Auxiliar o Coordenador e Especialista na auditoria de execução das tarefas conforme os padrões;
- Auxiliar o Coordenador e Especialista no tratamento dos desvios nas dimensões: segurança, qualidade, produção, custo e meio ambiente;
- Acompanhar as variáveis de processo junto aos Especialista e Engenheiro de Processos e Produtos;
- Cumprir as regras deste documento normativo.

4.5 LABORATORISTAS DA GERÊNCIA DE PROCESSOS E QUALIDADE

- Cumprir as regras deste documento normativo;
- Executar atividade conforme procedimento e plano de trabalho;
- Acompanhar as variáveis de processo junto aos Técnicos de Processos e Produtos;
- Não deixar nenhum resíduo em contato com o meio ambiente, livre ou jogado na área de trabalho, descartando-o em local apropriado;

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 2 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
		INTERNO	

- Auxiliar os técnicos nas auditorias de execução das tarefas conforme os padrões;
- Auxiliar os técnicos nos tratamentos dos desvios nas dimensões: segurança, qualidade, produção, custo e meio ambiente;
- Identificar cada fonte e origem dos resíduos gerados durante os trabalhos;
- Manter as áreas de trabalho limpas e organizadas dentro dos padrões do 7S.

5 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO

5.1 EVENTOS INDESEJÁVEIS

No ato do desenvolvimento do processo, alguns eventos indesejáveis podem ocorrer, tais como:

- Derramar pó ou polpa de minério no chão/piso ou na própria roupa;
- Prensamento de mãos ou dedos, atentar-se para o uso das luvas adequadas para atividade.

5.2 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL

Os Equipamentos de Proteção Individual (EPI) são de uso individual e destinados à proteção das pessoas contra riscos de acidentes e doenças ocupacionais durante o desenvolvimento de suas atividades de trabalho no Laboratório de Processo. Conforme o **PRO.BRA.SSO.001** - Manual do Sistema de Gestão de Segurança e Saúde Ocupacional.



5.3 ERGONOMIA

Praticar intervalos adequados entre atividades, pausas para recuperação, aos sinais de fadiga, revezamentos e não transportar carga acima de 23kg sozinho, manter postura correta durante toda atividade;

5.4 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS

Para iniciar a atividade, a área deve possuir:

- Peneirador suspenso ou quadrado;
- Balança analítica;
- Balança semi-analítica;
- Ultrassom;
- Peneiras redondas 8x2" abertura série Tyler;
- Peneiras quadradas;

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 3 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
		INTERNO	

- Estufa;
- Chapa de secagem;
- Baldes;
- Escova de nylon;
- Bandejas para pesagem;
- Mangueira com água;
- Filtros de bancada.

Atividade em equipamentos que contém partes móveis, garantir o treinamento de NR12 e se as proteções do equipamento estão dispostas no mesmo garantindo a eliminação da exposição ao risco.

5.5 DESENVOLVIMENTO DA ATIVIDADE PASSO A PASSO

NOTA: O ensaio é executado passando uma amostra de massa conhecida sucessivamente através de peneiras mais finas e determinando-se a quantidade coletada em cada peneiramento para calcular a percentagem em massa retida em cada fração de tamanho. Dá-se o nome de passante ou undersize a fração de material constituída por partículas de dimensões inferiores à malha (abertura de peneiramento) e que passou pelas aberturas da superfície perfurada. O retido dá-se o nome de oversize.

5.6 PENEIRAMENTO À ÚMIDO

1º Passo: Montar o jogo de peneiras sempre partindo da peneira de maior abertura (no topo), para a menor abertura (em baixo), conforme o plano de trabalho, (deixando a identificação das malhas voltada para frente), e posicionando o balde abaixo da última peneira;

2º Passo: Entre cada uma das peneiras, posicionar uma borracha, permitindo assim entrada de ar durante o processo. Em seguida, alimentar a primeira peneira com amostra, e posicionar o adaptador acima do conjunto;

3º Passo: Colocar a alíquota da amostra na primeira peneira de cima para baixo de peso definido no plano de trabalho ou pelo solicitante;

4º Passo: Travar os jogos de peneiras e acionar o ar comprimido na alavanca lateral;

5º Passo: Fechar a porta do compartimento do peneirador, visto que, o equipamento é provido de sensor impossibilitando a realização da atividade com a porta aberta;

6º Passo: Abrir a válvula de água atentando para não ocorrer transbordo nas peneiras e excesso de água no underflow, ligar o equipamento. O tempo deve ser ajustado conforme plano de trabalho ou a pedido do solicitante;

7º Passo: No início do peneiramento, observar se o líquido passante é recolhido de forma adequada no balde. Se necessário, ajuste a montagem de forma a evitar perda;

8º Passo: O fluxo de água pode ser ajustado durante o processo, de forma a permitir uma lavagem mais efetiva do material, caso seja necessário;

9º Passo: O Volume de água no balde que contém a menor fração conforme o plano de trabalho, deve estar próximo de 15 litros ao final do ensaio. O motivo desse volume mínimo é garantir que a água de lavagem seja suficiente para desagregar as partículas;

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 4 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
		INTERNO	

10° Passo: Não permitir transbordamento das peneiras durante a realização do ensaio, caso isso ocorra o peneiramento deve ser descartado e o ensaio realizado com nova alíquota quarteada da amostra global;

11° Passo: Deve ser realizada a verificação constante dos martelos, observando se esses estão ocasionando a vibração adequada das peneiras;

12° Passo: Após desligamento automático do peneirador, fechar o a água e retirar o adaptador;

13° Passo: Remover as peneiras. Recolher o material retido em cada uma, com o auxílio de uma mangueira com água, transferindo o material para recipientes apropriados (bandejas). Não forçar a malha da peneira com objetos pontiagudos ou metálicos;

14° Passo: Cuidar para não haver perda de massa durante essa transferência;

15° Passo: Aguardar alguns minutos até o material decantar. Em seguida, descartar o líquido sobrenadante, tomando cuidado para não escorrer o material sólido contido nas peneiras;

16° Passo: Após a remoção do líquido da amostra, leva-se o material retido para secagem na chapa aquecedora ou estufa, conforme o **PRO.MRJ.GQP.024- Procedimento para realização de secagem de amostras em estufas e chapas aquecedoras;**

17° Passo: Realizar a filtragem do passante, coletado no balde e filtrá-lo conforme o **PRO.MRJ.GQP.006- Procedimento para realização de filtragem de amostras em filtros de bancada;**

18° Passo: Após a realização da filtragem do passante, leva-se o material filtrado para secagem na chapa aquecedora ou estufa;

19° Passo: Após a secagem das frações, aguardar que as mesmas esfriem, realizar a pesagem e anotar no registro de análise granulométrica ou granulométrica as massas de cada fração obtida no ensaio, inclusive o material passante, conforme o plano de trabalho;

20° Passo: Após realizar o registro, é necessário analisar os resultados.

- Para testes com perda entre 0 e 2,5%, o teste é validado;
- Para testes com perda entre 2,5 e 4,5%, o teste deve ser analisado;
- Para testes com perda >4,5%, o teste deve ser descartado e refeito.

21° Passo: Lavar as peneiras, organizar a área e deixar outro jogo de peneiras montado no peneirador para receber a próxima amostra;

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 5 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
		INTERNO	



5.7 PENEIRAMENTO À SECO

1º Passo: Montar o jogo de peneiras sempre partindo da peneira de maior abertura (no topo), para a menor abertura (em baixo), conforme o plano de trabalho, (deixando a identificação das malhas voltada para frente), e posicionando o coletor abaixo da última peneira;

2º Passo: Colocar a alíquota da amostra na primeira peneira de cima para baixo de peso definido no plano de trabalho ou pelo solicitante;

3º Passo: Cuidar para não haver perda de massa durante essa transferência;

4º Passo: Remover as peneiras. Recolher o material retido em cada uma, com o auxílio de uma trincha, transferindo o material para recipientes apropriados (bandejas, Caixas coletoras ou sacos plásticos). Não forçar a malha da peneira com objetos pontiagudos ou metálicos;

5º Passo: Não se esquecer de tarar a (bandeja, saco plástico ou caixa) e pesar as massas retidas em cada peneira;

6º Passo: Limpar as peneiras, organizar a área e deixar outro jogo de peneiras montado para receber a próxima amostra;

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 6 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação	Gestor: Denilson Araújo	INTERNO	



5.8 LIMPEZA DAS PENEIRAS

- Em banho de ultrassom preenchido com água comum, colocar as peneiras e acionar o equipamento;
- O tempo de vibração varia de acordo com o estado das peneiras, e deve ser ajustado por inspeção visual. Normalmente leva-se 12 minutos para limpar uma peneira. Não acionar o aquecimento do aparelho;
- Após a limpeza em banho ultrassom, recolher as peneiras e lavar as malhas, removendo todo o material presente com auxílio de escova de nylon e mangueira com água;
- Observar o aspecto da peneira, se houver deformação ou ruptura da malha a peneira deve ser retirada de processo.

5.9 CÁLCULOS E VALIDAÇÃO DO TESTE

- Somar as massas retidas em cada peneira. A diferença entre esta massa e a massa inicial do teste não deve ser superior a 3%. Caso esta diferença seja maior, realizar outro ensaio.
- Calcular a massa máxima retida em cada peneira segundo a equação de Gaudin. Isso se deve ao fato de que uma quantidade excessiva de material retido na peneira prejudica o peneiramento, diminuindo a probabilidade de passagem das partículas menores, o que pode mascarar os resultados.

$$M_i = XA\rho \left(\frac{D_i + D_s}{2} \right)$$

Onde:

M_i = Massa que pode ficar retida na peneira de abertura i , quando cessado o peneiramento (em gramas)

Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 7 de 9
-------------	--	---------------

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	
INTERNO			

X = Número de camadas de partículas admitida, varia de 1 a 3 (no caso 3);

D_i = Abertura da peneira em análise em cm;

D_s = Abertura da peneira imediatamente acima e em cm;

A = Área da peneira em cm²;

ρ = Densidade do material a ser peneirado em g/cm³.

NOTA: Caso as condições acima não sejam atendidas, verificar com o solicitante do teste a necessidade de execução de um novo peneiramento.

6 ANEXOS

- **Anexo 1** – Planilha para registros das informações para granulometria.



Granulometria.xlsx

- **Anexo 2** – Planilha para registros das informações para granuloquímica.



Granuloquímica.xlsx

7 HISTÓRICO DO DOCUMENTO

Nº da Revisão	Data	Revisado por:	Descrição
01	18/09/2018	Anderson Silva	No item 5.1 foi adicionado o seguinte parágrafo: "Atenção: Após o final do expediente, favor verificar se os equipamentos elétricos citados acima foram desligados e retirados das tomadas, apenas para as Balanças."
02	10/10/2018	Anderson Silva	Foi alterado o nome da Diretoria para "Operação"
03	02/07/2019	Mariely Carvalho / Anderson José Silva	Foi feita uma revisão geral á partir do item 5.
04	08/03/2022	Lorena Barbosa	No item 5.4 foi adicionado o seguinte parágrafo: Atividade em equipamentos que contém partes móveis, atentar para o uso do EPI correto, treinamento de NR12 e se o equipamento oferece segurança ao realizar a tarefa. No item 5.2 houve revisão dos EPI's.
05	14/06/2022	Robson Silva	No item 5.3 foi adicionado o seguinte parágrafo: Praticar intervalos adequados entre atividades, pausas para recuperação, aos sinais de fadiga, revezamentos e não transportar carga acima de 23kg sozinho, manter postura correta durante toda atividade;
Uso Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.		Página 8 de 9

		Base Metals	
PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO A ÚMIDO E A SECO – PRC- CMD		PRO.MRJ.GPQ.033	Rev. Atual: 05
		Emissão Inicial 08/06/2018	Última Revisão 14/06/2022
Diretoria: Operação		Gestor: Denilson Araújo	INTERNO

Elaborado por:	Aprovador do Documento	Responsável Governança
Nome: Luís Cláudio de Rennó, Jose Antônio, Anderson silva	Nome: Denilson Rodrigues de Araújo	Nome: Leonardo Elisio Souza Andrade
Cargo: Engenheiro Especialista, Técnico de Processo, Técnico de Laboratório	Cargo: Gerente de Processo e Qualidade	Cargo: Analista de Governança e Compliance

Use Interno	Quando impresso, documento não controlado, certificar-se da versão vigente. Uso externo e reproduções somente permitidos mediante autorização expressa das Áreas de Governança ou SGI.	Página 9 de 9
-------------	--	---------------