



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI – CJUR
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS**

VITOR DA SILVA ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DA TROCA DO REVESTIMENTO DO MOINHO DE BOLAS SOBRE
A QUALIDADE FÍSICA DO PRODUTO EM UMA USINA DE BENEFICIAMENTO
DE BAUXITA NO NORDESTE DO PARÁ**

**JURUTI
2023**

VITOR DA SILVA ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DA TROCA DO REVESTIMENTO DO MOINHO DE BOLAS SOBRE
A QUALIDADE FÍSICA DO PRODUTO EM UMA USINA DE BENEFICIAMENTO
DE BAUXITA NO NORDESTE DO PARÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti – CJUR.

Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

Orientador: Me. Alan Anderson de Arruda Tino.

**JURUTI
2023**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

Araújo, Vitor da Silva.

Avaliação da troca do revestimento do moinho de bolas sobre a qualidade física do produto em uma usina de beneficiamento de bauxita no Nordeste do Pará / Vitor da Silva Araújo. – Juruti, 2023.

81fl.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA. Campus Universitário de Juruti, Curso de bacharelado em Engenharia de Minas.

Orientador: Alan Anderson de Arruda Tino.

1. Moagem. 2. Revestimento. 3. Eficiência. I. Tino, Alan Anderson de Arruda. II. Título.

UFOPA – Campus Juruti

CDD 551.10981 23.ed.

VITOR DA SILVA ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DA TROCA DO REVESTIMENTO DO MOINHO DE BOLAS SOBRE
A QUALIDADE FÍSICA DO PRODUTO EM UMA USINA DE BENEFICIAMENTO
DE BAUXITA NO NORDESTE DO PARÁ**

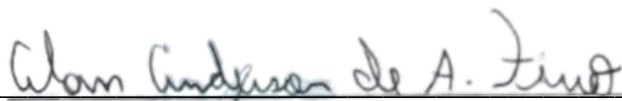
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti – CJUR.

Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

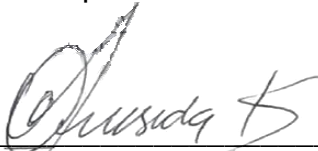
Orientador: Me. Alan Anderson de Arruda Tino.

Conceito: 9,63

Data de Aprovação: 14 / novembro / 2023



Me. Alan Anderson de Arruda Tino – Orientador
UFOPA – Campus Universitário de Juruti



Me. Regis Quesada Caşquet – Membro Titular
UFOPA – Campus Universitário de Juruti



Documento assinado digitalmente
GEOVAN OLAVO DAMASIO DE OLIVEIRA
Data: 15/11/2023 13:25:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Esp. Eng.º Geovan Olavo Damásio de Oliveira – Membro Titular
Vale S.A.

Dedico este trabalho ao meu pai, Pedro Araújo (*in memoriam*), pelos ensinamentos e dedicação. Dedico também à minha mãe, Lúcia Helena, pelo amor, por acreditar em mim e sempre me apoiar nos estudos.

AGRADECIMENTOS

Desde os primeiros momentos de nossa jornada na vida, nosso aprendizado se forma graças à generosidade daqueles que se empenham em compartilhar seu conhecimento e sabedoria. Início agradecendo a Deus, pela concretização deste sonho, pela força e coragem durante esta longa caminhada.

À minha família, por todo apoio, conselho e compreensão pela minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao meu filho, maior responsável pela minha força e para superar as dificuldades.

Agradeço ao meu orientador Alan Anderson de Arruda Tino, por todos os conselhos, ensinamentos transmitidos, pela ajuda e paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Quero agradecer a todos os professores da Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti, que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Meu muito obrigado ao Engenheiro Geovan Oliveira e Fagner Alves, pelos ensinamentos, conselhos, apoio, incentivo e contribuição para a realização deste trabalho.

Ao meu colega de curso, Frank Alano, pelo companheirismo, pelas trocas de ideias e ajuda mútua. Juntos conseguimos avançar e ultrapassar todos os obstáculos.

À equipe de processo da planta de beneficiamento da Mineração Paragominas S.A., pela parceria, convívio, cobrança, confiança e orientação transmitidos durante a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial à Mineração Paragominas S.A., por sempre ter acreditado em mim e me proporcionado inúmeras oportunidades de crescimento profissional e pessoal.

“Estude sempre. A renovação das ideias favorece a evolução do espírito.”

André Luiz

RESUMO

A cominuição é uma operação na indústria mineral, e destaca-se pelo alto consumo energético. Nesse sentido, a adequada operação dos equipamentos é fundamental para obtenção da granulometria desejada, sem desperdício de energia. Na usina, o moinho de bolas é muito utilizado para promover a redução granulométrica e consequentemente a liberação mineral-minério, para atender as etapas de concentração. Além dos parâmetros operacionais desse equipamento, a atenção deve ser dada ao desgaste do revestimento interno. Alguns aspectos do revestimento, como altura do *lifter*, a relação A/B, entre outros desempenham um papel significativo na eficiência do processo de moagem. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a granulometria da bauxita e a eficiência da operação, comparando o produto obtido antes e depois da substituição do revestimento do moinho de bolas. Os resultados obtidos mostraram um aumento de 16,84 % na eficiência da moagem quando comparado às análises anteriores, onde constatou-se também mudança significativa na granulometria da malha de 0,5 mm. Além disso, observou-se afinamento na curva granulométrica do produto da moagem, ocasionado pela troca do revestimento. Deste modo, após a mudança do revestimento, observou-se ganhos em relação ao processamento do mineral proporcionando resultados satisfatórios na planta de beneficiamento.

Palavras-chave: Moagem; Revestimento; Granulometria; Eficiência.

ABSTRACT

Comminution is an operation in the minerals industry, and is notable for its high energy consumption. In this sense, proper operation of the equipment is essential to obtain the desired particle size without wasting energy. In the plant, the ball mill is widely used to promote particle size reduction and consequently mineral-ore liberation, in order to meet the concentration stages. In addition to the operating parameters of this equipment, attention must be paid to the wear of the internal lining. Some aspects of the lining, such as the height of the lifter, the A/B ratio, among others, play a significant role in the efficiency of the grinding process. The aim of this study was to evaluate bauxite granulometry and the efficiency of the operation, comparing the product obtained before and after replacing the ball mill lining. The results obtained showed a 16,84 % increase in grinding efficiency when compared to previous analyses, which also showed a significant change in the grain size of the 0,5 mm mesh. In addition, there was a thinning of the grain size curve of the milling product, caused by the change of lining. Thus, after changing the lining, gains were seen in the processing of the mineral, providing satisfactory results in the beneficiation plant.

Keywords: Grinding; Lining; Particle size; Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismos de fragmentação e energia aplicada	20
Figura 2 – Distribuição de tamanhos resultante da quebra	21
Figura 3 – Aplicabilidade das leis de fragmentação	24
Figura 4 – Diagrama de blocos para um cenário genérico do procedimento de amostragem	26
Figura 5 – Séries de peneiras conhecidas	30
Figura 6 – Ilustração da estrutura de um moinho de bolas.....	33
Figura 7 – Razões de redução de diferentes moinhos	34
Figura 8 – Carga de corpos moedores em regime de cascata	36
Figura 9 – Carga de corpos moedores em regime de catarata	36
Figura 10 – Ilustração de determinados tipos de revestimentos.....	37
Figura 11 – Diferentes placas de revestimento utilizadas em moinho de barras.....	38
Figura 12 – Placas de revestimento frequentemente utilizadas no moinho de bolas.....	38
Figura 13 – Relação A/B de revestimento de cilindro do moinho	39
Figura 14 – Impacto da relação A/B na capacidade e no consumo de energia do moinho	40
Figura 15 – Localização da cidade de Paragominas e vista área da Mineração Paragominas S.A.	41
Figura 16 – Fluxograma da planta de beneficiamento na MPSA.....	44
Figura 17 – Fluxograma simplificado com os circuitos amostrados na fase 02.....	45
Figura 18 – Realização da amostragem: a) Coleta de material na correia transportadora; b) Amostra coletada no circuito de Hidrociclones	46
Figura 19 – Curva granulométrica do produto medido no moinho de bolas individual da fase 02.....	49
Figura 20 – Curva de eficiência da moagem bolas por faixa granulométrica	51
Figura 21 – Comparativo da eficiência de moagem bolas da fase 02 por faixa granulométrica.....	52
Figura 22 – Curva Granulométrica do <i>undersize</i> PAF antes e após troca do revestimento.....	53
Figura 23 – Curva granulométrica do produto final na usina 2 antes e depois à troca do revestimento.....	54

Figura 24 – Registro da condição visual dos revestimentos: a) Tampa de alimentação; b) Tampa de descarga; c) e d) Revestimento do cilindro	56
Figura 25 – Informações e medidas de espessura do revestimento do cilindro do moinho bolas	57
Figura 26 – Medições dos parâmetros geométricos de desgaste dos revestimentos do cilindro	59
Figura 27 – Comparativo entre antes e depois da taxa de alimentação na fase 02 após troca do revestimento	60
Figura 28 – Comportamento da taxa de pebbles na fase 02 antes e após mudança do revestimento.....	60
Figura 29 – Análise da carga circulante no moinho de bolas antes e posterior a substituição de revestimento	61
Figura 30 – Comportamento do produto da rebritagem anterior e após troca do revestimento.....	62
Figura 31 – Comparativo do aporte de massa no <i>underflow</i> de espessador concentrado entre antes e depois as mudanças realizadas no revestimento	63
Figura 32 – Curva granulométrica do <i>underflow</i> espessador de concentrado da usina 02 antes e depois à troca do revestimento.....	64
Figura 33 – Desempenho da porcentagem de sólidos no moinho de bolas na mudança de revestimento.....	65
Figura 34 – Comportamento da potência do moinho de bolas na troca do revestimento.....	66
Figura 35 – Curva granulométrica do <i>overflow</i> (produto da moagem) na ciclonagem de classificação da fase 01.....	65
Figura 36 – Curva granulométrica do produto final da fase 01 entre dois períodos distintos à mudança no revestimento.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria do produto medido do moinho bolas da fase 02.....	50
Tabela 2 – Resultado das análises granulométricas do <i>undersize</i> do PAF referente ao período entre antes e após a troca do revestimento.	53
Tabela 3 – Exemplo da relação A/B, ângulo de ataque e área de transporte estimados para o revestimento do moinho bolas da usina 02	57

LISTA DE SIGLAS

AG – Moinho Autógeno

DSM – Dutch State Mine

ISO – International Standard Opening

MPSA – Mineração Paragominas S.A.

PAF – Peneiras de Alta Frequência

RI – Região de Integração

ROM – Run of Mine

SAG – Moinho Semiautógeno

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo Geral	18
2.2. Objetivo Específico	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1. Cominuição	19
3.1.1. Mecanismos de Fragmentação.....	19
3.1.2. Leis da Fragmentação	21
3.2. Amostragem	25
3.2.1. Teoria de Pierre Gy e possíveis erros na amostragem.....	27
3.3. Distribuição Granulométrica	29
3.3.1. Modelo de distribuição de Rosin, Rammler e Bennett (RRB)	31
3.3.2. Modelo de distribuição Gates, Gaudin e Schuhmann (GGS).....	31
3.4. Moagem	33
3.4.1. Comportamento dos corpos moedores.....	34
3.5. Revestimento de moinhos	37
3.5.1. Relação A/B.....	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1. Área de Estudo	41
4.1.1. Descrição detalhada da usina de beneficiamento (fase 02).....	42
4.2. Coleta e caracterização das amostras	45
4.3. Premissas adotadas	47
4.4. Levantamento de dados históricos	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1. Eficiência da Moagem	49
5.2. Análise da qualidade física do produto da moagem	52
5.3. Análise da vida útil dos revestimentos no moinho bolas	55
5.4. Análise dos indicadores na fase 02 da planta de beneficiamento	59
5.5. Influência dos parâmetros operacionais do moinho de bolas	64
6 CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	70

APÊNDICE A – EFICIÊNCIA POR FAIXA GRANULOMÉTRICA DO MOINHO DE BOLAS DA FASE 02 COM DADOS DE ROTINA E AMOSTRAGEM.....	75
APÊNDICE B – COMPARATIVO DE EFICIÊNCIA POR FAIXA GRANULOMÉTRICA DO MOINHO DE BOLAS DA FASE 02	76
APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO <i>UNDERSIZE DO PAF DA FASE 02</i>.....	77
APÊNDICE D – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO FINAL DA FASE 02.....	78
APÊNDICE E – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO <i>UNDERFLOW</i> DO ESPESADOR DE CONCENTRADO DA FASE 02.....	79
APÊNDICE F – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO DA MOAGEM DO CICLONE DE CLASSIFICAÇÃO NA FASE 01	80
APÊNDICE G – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO FINAL DA FASE 01.....	81

1 INTRODUÇÃO

A cominuição é um processo fundamental em diversas áreas da indústria. Ela se refere à redução do tamanho das partículas de sólidos, geralmente por meio da quebra, moagem ou trituração, a fim de melhorar a manipulação, o processamento e o uso desses materiais. Na indústria mineral, a etapa de cominuição é uma das operações cruciais para a liberação dos minerais valiosos, uma vez que é responsável por reduzir o tamanho de uma partícula (Sampaio; Júnior, 2018).

A fragmentação do minério inicia-se no desmonte da rocha, a qual encontra-se *in-situ*, e continua através das operações de britagem e moagem. A britagem por sua vez, é compreendida como a etapa inicial do beneficiamento mineral e pode ser realizada através dos mais diversos tipos de britadores (Machado, 2020). A moagem representa a etapa final da fragmentação do minério em uma usina de processamento mineral e envolve a redução das partículas em tamanhos ainda menores. O produto resultante determina diretamente a eficiência das etapas de concentração baseando-se por sua distribuição granulométrica. Entre os diversos equipamentos, destaca-se o moinho de bolas e vários são os fatores que influenciam sua operação. A correta determinação e controle de cada um deles é fundamental para o alcance de um produto que atenda às especificações desejadas.

Quando o circuito de moinho de bolas é realizado de maneira inadequada, ocorrem problemas de sobremoagem ou submoagem. Na sobremoagem, ocorre a produção de um material com granulometria excessivamente fina, resultando em um consumo desnecessário de energia. Já na submoagem, o produto apresenta uma granulometria mais grosseira e pode não alcançar o grau de liberação desejado. Em ambos os casos, a eficiência é consideravelmente reduzida. Dentro desse contexto, após a ocorrência de distúrbios ocasionados pelo excesso de material fora da especificação em um moinho de bolas, esse trabalho justifica-se pela avaliação da eficiência e granulometria da moagem entre dois períodos distintos após substituição do revestimento (HYDRO, 2022).

O presente estudo tem como foco principal abordar a influência da qualidade física do produto de uma usina de beneficiamento após a substituição do revestimento em um moinho de bolas. No beneficiamento mineral, a granulometria

controlada é crucial para a qualidade do produto, por isso, o desgaste de um revestimento pode prejudicar a eficiência de moagem do moinho de bolas e conseqüentemente comprometendo a qualidade física. Assim, a operação adequada do moinho é essencial para potencializar a eficiência e diminuir os custos operacionais do processo de moagem.

Esse fato motivou o desenvolvimento deste trabalho, que teve como objetivo verificar a influência na curva granulométrica sobre a qualidade física do produto resultante da moagem, através de análises comparativas entre dois períodos, antes e depois, bem como avaliar a eficiência do moinho de bolas após a troca de revestimento.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por finalidade verificar a influência na curva granulométrica do produto, após substituição do revestimento no moinho de bolas.

2.2. Objetivo Específico

- a) Avaliar o impacto da troca do revestimento de um moinho de bolas sobre:
 - i. Granulometria – foram examinados alguns elementos como por exemplo, o *undersize* do PAF, produto final da usina, produto da rebitagem, aporte de massa e a granulometria do *underflow* do espessador de concentrado;
 - ii. Carga circulante, porcentagem de sólidos e potência envolvida no processo da moagem de bolas;
 - iii. Taxa de alimentação da usina de beneficiamento;
 - iv. Taxa de *pebbles*, também conhecida como alimentação da rebitagem.

- b) Avaliar a eficiência do moinho de bolas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Cominuição

Define-se cominuição como o processo pelo qual partículas sólidas são progressivamente reduzidas por diferentes mecanismos até que atinjam uma granulometria adequada para continuidade do processo. A redução de tamanho é uma etapa importante em muitos processos pelos quais as matérias-primas são convertidas em produtos finais. As indústrias de pedreiras, metais e de cimento fazem uso extensivo de processos de redução de tamanho em larga escala. Segundo (Lynch, 1985, p. 03), reduzir o tamanho das partículas podem ter três objetivos:

- 1) Liberar o mineral-minério de interesse da ganga antes de seguir para a etapa de concentração;
- 2) Aumentar a área de superfície disponível dos minerais de determinado minério para a realização da reação química;
- 3) Produzir partículas ou rochas ornamentais com tamanho e formas específicas como produção de agregados destinados à construção civil.

Na indústria mineral, o processo de cominuição tem início desde à extração do minério, seja por meio da utilização de explosivos, escavações ou outras técnicas disponíveis. No beneficiamento de minérios, este procedimento ocorre principalmente nas etapas de britagem e moagem, com objetivo de produzir materiais que atendam as especificações necessárias (Sampaio; Júnior, 2018).

3.1.1. Mecanismos de Fragmentação

A fragmentação é um método de extrema relevância no processamento mineral. A maioria dos minerais são materiais cristalinos nos quais os átomos estão regularmente organizados em arranjos tridimensionais. A configuração dos átomos é determinada pelo tamanho e pelos tipos de ligações físicas e químicas que os mantêm unidos (Wills; Napier-Munn, 2006, p. 109).

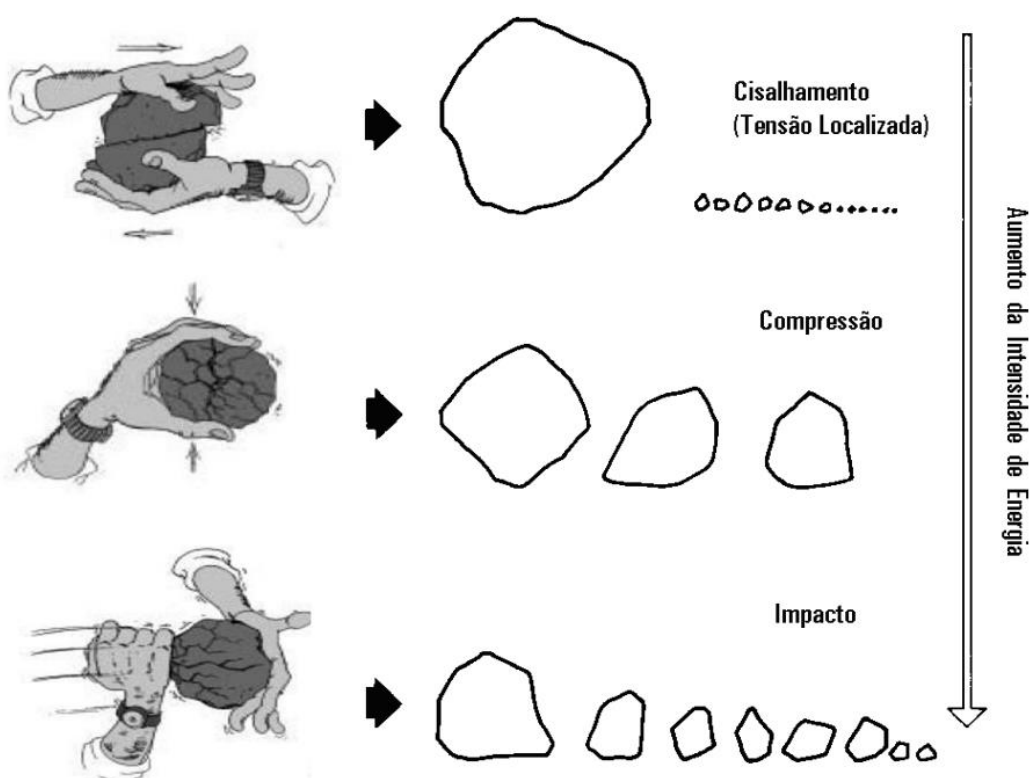
Kelly e Spottiswood (1982) consideram que existem três mecanismos principais de quebra explorados nos processos de cominuição: impacto, compressão e atrito. Sendo este último também classificado como de cisalhamento ou abrasão, variando de acordo com a literatura (Júnior, 2018).

A fragmentação por impacto ocorre quando esforços são rapidamente aplicados e com intensidade superior à resistência da partícula. Como resultado, o produto da quebra possui tamanho e forma semelhantes, predominando uma granulometria fina, como por exemplo britadores de impacto e moinhos. (Beraldo, 1987).

Quanto à compressão, Araújo *et al.* (2007) abordam que as partículas são submetidas a forças vagarosas entre duas superfícies. Os fragmentos resultantes desse mecanismo tendem a ser pequenos, e o tamanho das partículas permanece mais grosso.

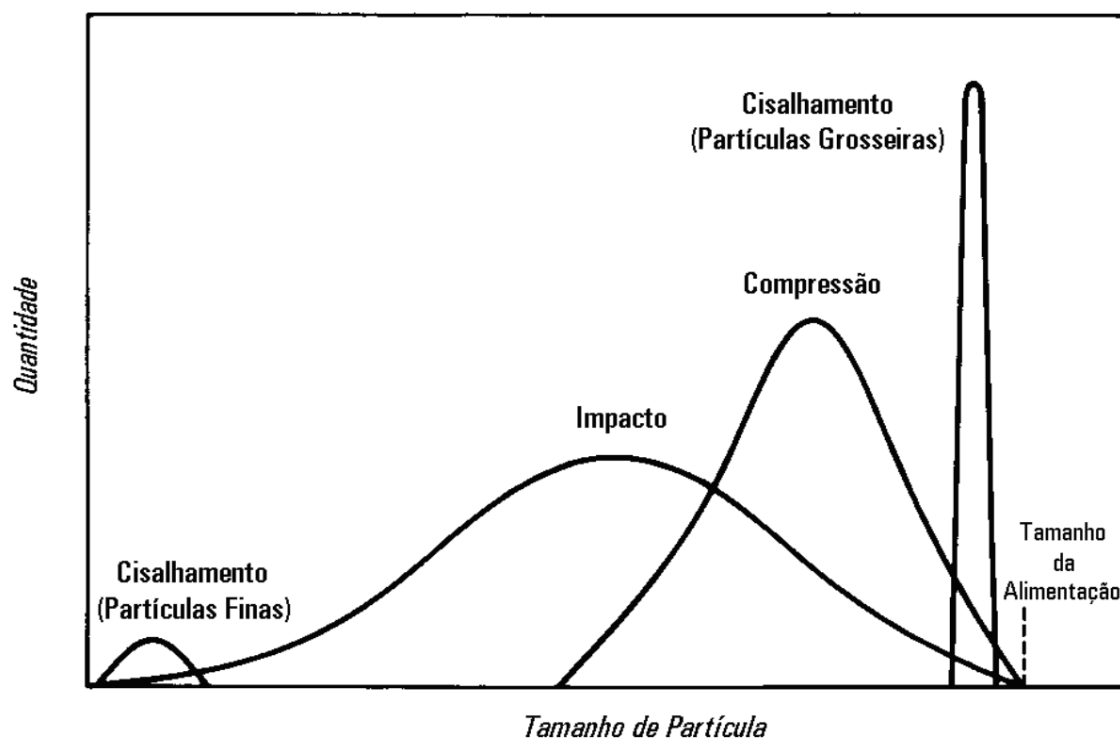
O cisalhamento acontece quando a força é inadequada para causar a fratura completa de toda a partícula. O atrito ocorre principalmente devido à interação entre partícula-partícula, aumentando desta forma o grau de tensão, compressão e, portanto, ruptura por cisalhamento. (Wills; Napier-Munn, 2006, p. 110). Ainda, as partículas são inseridas entre superfícies com movimentos contrários, ao qual observa-se a grande produção de finos. A Figura 1 mostra o comportamento das partículas de acordo com os diferentes mecanismos de fratura, já a Figura 2 ilustra de maneira esquemática a distribuição dos fragmentos resultantes da fragmentação.

Figura 1– Mecanismos de fragmentação e energia aplicada



Fonte: Adaptado de Kelly e Spottiswood (1982).

Figura 2 – Distribuição de tamanhos resultante da quebra



Fonte: Kelly e Spottiswood (1982).

3.1.2. Leis da Fragmentação

A teoria da cominuição preocupa-se com a relação entre a energia aplicada e o tamanho das partículas do produto produzido, a partir de um determinado tamanho de alimentação. Várias teorias foram expostas, mas nenhuma das quais é inteiramente satisfatória (Wills e Atkinson, 1993).

Com o passar dos anos, houve uma extensa investigação sobre a relação entre a energia consumida no processo de cominuição e a granulometria dos produtos, uma vez que essa energia constitui uma parte significativa dos custos operacionais. As primeiras pesquisas realizadas revelaram as complexidades de estabelecer uma relação prática e satisfatória entre a energia associada à etapa de fragmentação (Lynch, 1977).

A teoria mais antiga é a de Peter Ritter Von Rittinger (1867), ao qual estabelece que a energia consumida na redução de tamanho é proporcional a área da nova superfície produzida. Por outro lado, a área superficial de um material

conhecido de partículas de diâmetro uniforme é inversamente proporcional ao diâmetro, portanto, resulta na seguinte expressão:

$$E = K \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (3.1)$$

Sendo:

E= energia específica total fornecida ao sistema;

X₁= diâmetro da partícula inicial;

X₂= diâmetro da partícula final;

K= constante de Rittinger.

A segunda lei da cominuição proposta por Kick (1883), define que “o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas”. Neste caso, aplica-se preferencialmente à fragmentação de matacões. Essa relação matemática pode ser interpretada a partir da seguinte equação:

$$E = K \cdot \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (3.2)$$

Sendo:

E= energia específica dissipada na quebra da partícula;

X₁= diâmetro da partícula inicial;

X₂= diâmetro da partícula final;

K= constante de Kick.

Diversos debates surgiram anos após as publicações das teorias de Kick e Rittinger, ao passo que outros pesquisadores elaborassem resultados para apoiar uma ou outra. Em 1952 essa discussão se intensificou quando Bond apresentou sua ideia, a terceira lei da cominuição, no qual descreve que a energia necessária para quebrar partículas é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho do fragmento, multiplicado por índice chamado Work Index (WI). Para fins de cálculo prático, Bond definiu a dimensão como a abertura da peneira que passa 80 % do material desejado. Esta teoria é expressa pela seguinte Equação 3.3:

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{A_{80}}} \right) \quad (3.3)$$

Sendo:

W= energia requerida para moagem (kWh/t);

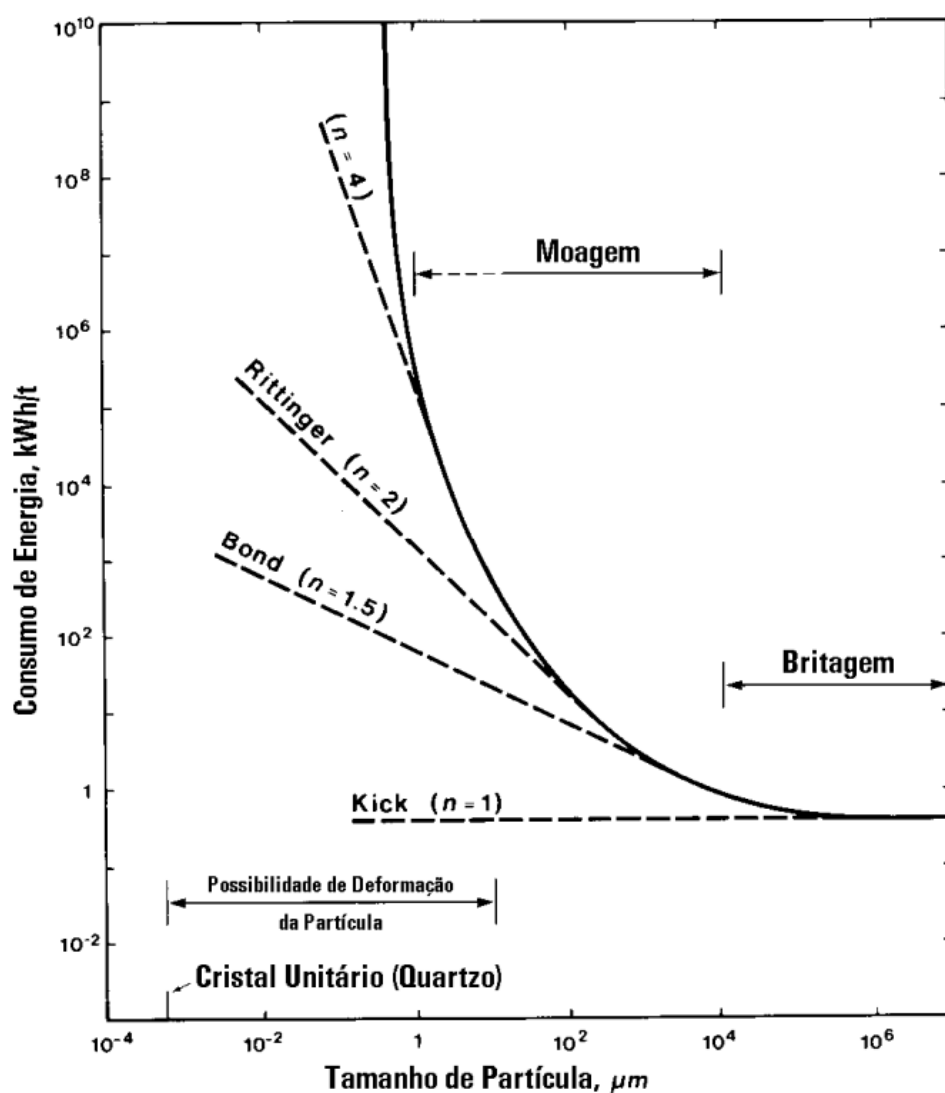
WI= índice de trabalho (*Work Index*), calculado por meio de ensaio padronizado de laboratório;

P₈₀= abertura de malha da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80 % da massa do produto;

A₈₀= abertura de malha da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80 % da massa da alimentação.

Com o passar do anos, Hukki (1981) por meio de seus estudos verificou que as três teorias apresentavam aplicabilidades a determinadas faixas granulométricas. Apesar disso, a lei de Bond seria aplicável no intervalo granulométrico em que normalmente se desenvolve a operação de moagem de minério (Beraldo, 1987). A Figura 3 ilustra a aplicação das diferentes relações entre energia e fragmentação estabelecida por Hukki.

Figura 3 – Aplicabilidade das leis de fragmentação



Fonte: Adaptado de Hukki (2009).

Adicionalmente, outros autores têm buscado aprimorar e propor novas teorias, Donda e Rosa (2014) propuseram uma nova teoria aplicada para moagem fina de concentrado de minério de ferro no processo de pelotização a partir do próprio estudo de Donda (2003), contribuindo neste caso para a definição de uma constante K, conforme expressa a Equação 3.4, assim definida para o material a ser cominuído.

$$E = \frac{1}{K_{\text{Donda}}} \cdot \ln\left(\frac{\% F}{\% P}\right) \quad (3.4)$$

Sendo:

E= consumo específico líquido de energia específica (kWh/t);

% F= massa retida de partículas na malha de interesse na alimentação do circuito;

% P= massa retida de partículas na malha de interesse no produto do circuito;

K_{Donda} = parâmetro característico do minério para a malha de interesse, em dada condição de moagem.

Para Vianna (2021), o autor empregou uma metodologia empírica em moinhos de bancada em escala piloto, utilizando a potência calculada para moinhos industriais, a fim de realizar a correta adaptação de escala e calcular a energia necessária para um período específico de moagem. Além do mais, Donda (2003) examinou múltiplas variáveis que poderiam influenciar os desfechos da metodologia proposta para prever o consumo preciso de energia a fim de alcançar uma superfície específica e a distribuição granulométrica desejada, como por exemplo, porcentagem de sólidos ao qual é submetida a moagem, revestimento do moinho, velocidade crítica, diâmetro do moinho e relação volume da polpa/volume de vazios da carga de corpo moedores.

3.2. Amostragem

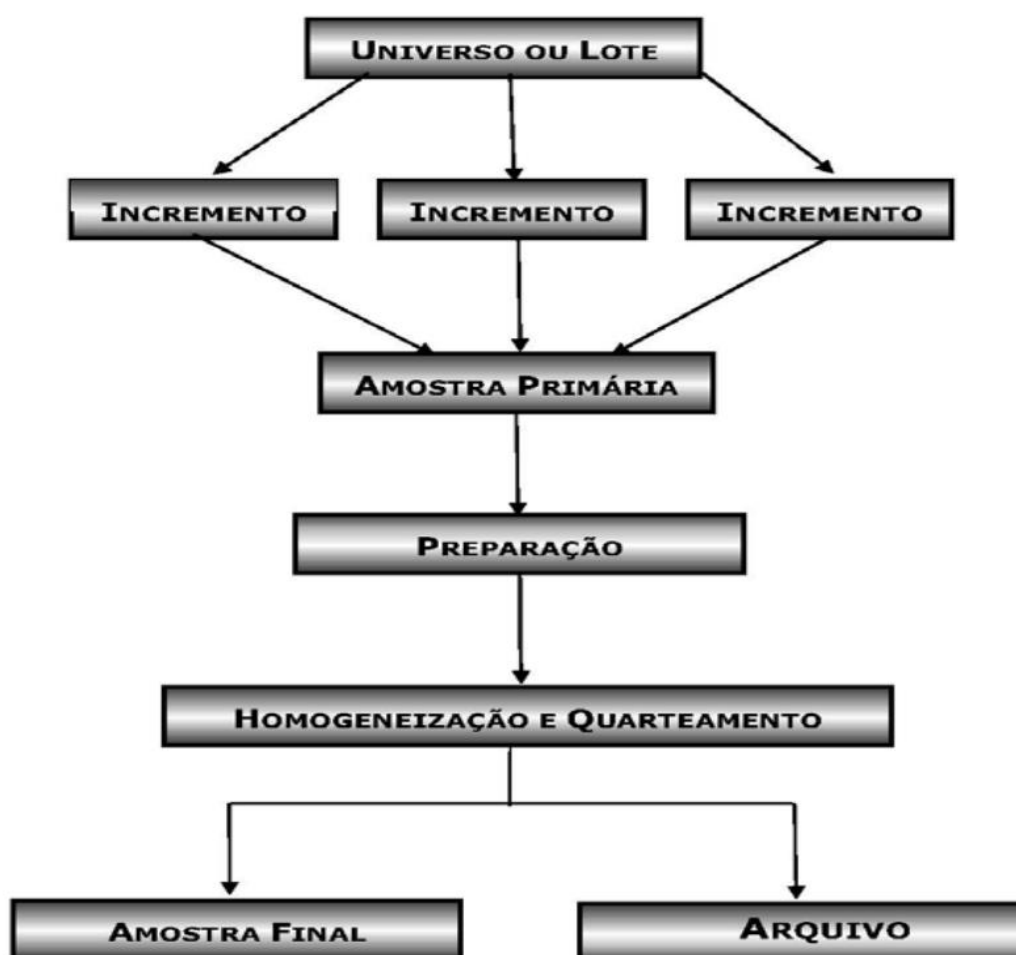
Para a determinação do desempenho de um processo de tratamento de minérios é extremamente importante que se tenha o conhecimento sobre a concentração de elementos nos diferentes fluxos circulantes na planta (Marques, 2016). Por definição, Goés, Luz e Possa (2010, p. 23) descrevem que o procedimento de amostragem envolve a coleta de quantidades selecionadas de material (incrementos) de um conjunto que se pretende amostrar, com o objetivo de compor a amostra primária ou global, de modo que esta seja representativa do todo amostrado.

A amostragem é um importante processo no que diz respeito a obter informações detalhadas sobre a área de interesse, no âmbito da pesquisa mineral por exemplo, a operação é amplamente necessária com o intuito de compreender o corpo mineral presente, definindo parâmetros a serem utilizados, aperfeiçoar o modelo geológico, quantificar teores. No beneficiamento mineral, outra etapa em que a

amostragem é de suma importância, sua aplicação consiste no acompanhamento da qualidade (física e química) nos circuitos da planta de beneficiamento, além de entender o comportamento do produto final. Ou seja, relaciona-se ao controle de processo ao qual o fornecimento de informações precisas quanto à qualidade do minério processado são fundamentais para entender as variabilidades existentes Goés, Luz e Possa (2010).

O diagrama ilustrado na Figura 4 apresenta de maneira genérica o procedimento de amostragem, desde a definição do conjunto inicial até a obtenção da amostra definitiva.

Figura 4 – Diagrama de blocos para um cenário genérico do procedimento de amostragem



Fonte: Sampaio, França e Braga (2007).

3.2.1. Teoria de Pierre Gy e possíveis erros na amostragem

A amostragem não se trata de uma simples técnica mecânica. É um processo aleatório, possível de introduzir erros. O lote a ser amostrado deve ser o mais homogêneo possível, tornando exequível a amostragem como um processo exato de seleção (Fortes *et al.*, 2011). A teoria de amostragem mais comumente empregada atualmente para caracterização da qualidade de materiais trata-se daquela introduzida por Pierre Gy, ao qual parte do pressuposto que o material ou lote a ser amostrado seja totalmente homogêneo, e que os erros característicos em detrimento da forma de como foi amostrado seja nula, além do qual todas as partículas constituintes do lote tenham uma probabilidade de seleção igual.

Conforme Gy (1982) estabelece, o erro total de amostragem é o resultado da combinação do erro de amostragem propriamente dita (E_{ap}) e do erro associado à preparação da amostra primária (E_p), que juntos contribuem para a obtenção da amostra final, de acordo com a Equação 3.5 demonstra.

$$E_a = E_{ap} + E_p \quad (3.5)$$

Levando em consideração a equação anterior, ainda segundo o autor, no âmbito dessa teoria, o E_{ap} é resultado da soma de outros sete erros, conforme expõe Equação 3.6, dentre o qual ocorrem em diferentes fases do processo de amostragem, e pode ser subdividido em sete componentes estatisticamente independentes:

- 1) Erro de ponderação – ocasionado não uniformidade da densidade ou da vazão do material.
- 2) Erro de integração – refere-se aos erros a longo prazo ocasionados pela variabilidade de distribuição das partículas.
- 3) Erro de periodicidade – ocasionado pelas variações em que as características do material são submetidas.
- 4) Erro fundamental – a eliminação completa desse viés só é possível quando a amostra representa de forma abrangente todo o universo amostrado, do contrário, sempre haverá discrepâncias entre os parâmetros da amostra selecionada e os parâmetros correspondentes do conjunto total estudado (Neves, 2021, p. 6, apud Gy, 1998).

- 5) Erro de segregação – de acordo com Esbensen e Wagner (2014), essa fonte de erro decorre da heterogeneidade na distribuição das partículas, ou seja, está relacionada à irregularidade espacial na disposição dessas partículas dentro do lote. Ainda, mesmo que o processo de amostragem seja realizado de forma estruturalmente correta, esses dois tipos de erro podem persistir em certa medida, apesar de ser possível reduzir.
- 6) Erro de delimitação – provocado pela eventual configuração inadequada na determinação da extensão do incremento.
- 7) Erro de extração – resultado da tomada de decisão ao extrair o incremento.

$$E_{ap} = E_{a_1} + E_{a_2} + E_{a_3} + E_{a_4} + E_{a_5} + E_{a_6} + E_{a_7} \quad (3.6)$$

Sendo:

E_{a_1} = erro de ponderação;

E_{a_2} = erro de integração;

E_{a_3} = erro de periodicidade;

E_{a_4} = erro fundamental;

E_{a_5} = erro de segregação;

E_{a_6} = erro de delimitação;

E_{a_7} = erro de extração.

Por fim, o erro de preparação (E_p) pode estar associado a alguns fatores, conforme Equação 3.7 ilustra.

$$E_p = E_{p_1} + E_{p_2} + E_{p_3} + E_{p_4} + E_{p_5} \quad (3.7)$$

Sendo:

E_{p_1} = contaminação da amostra ou incorporação de partículas estranhas do ambiente de amostragem, ou da própria amostra;

E_{p_2} = perda ou remoção de uma porção da amostra, levando à prejuízos na representatividade;

E_{p_3} = mudanças nas características físicas e químicas da amostra;

E_{p_4} = erros não intencionais;

E_{p_5} = alterações intencionais.

3.3. Distribuição Granulométrica

Qualquer que seja o método de medição do tamanho das partículas, a caracterização de uma amostra de acordo com o tamanho é referida como uma análise de tamanho. Uma análise de tamanho no processamento mineral é usada principalmente para obter dados quantitativos sobre o tamanho individual e distribuição de tamanho de partículas nos fluxos do processo (Gupta; Yan, 2006).

A análise granulométrica é um dos métodos mais antigos por análise de tamanho, se é realizada passando um peso conhecido de material de amostra sucessivamente através de peneiras mais finas e pesando a quantidade recolhida em cada peneira para determinar a percentagem de peso em cada fração granulométrica (Wills; Napier-Munn, 2006).

No beneficiamento mineral isto é importante quando nos referimos a avaliar a qualidade física dos circuitos, principalmente no que diz respeito à moagem, pois o equipamento é usado para diminuir o tamanho das partículas de minério, e a depender do minério de interesse, a necessidade de material mais fino é indesejável. Desse modo, é fundamental assegurar a precisão e a confiabilidade dos métodos de análise granulométrica, visto que com base nos resultados dos ensaios laboratoriais, pode-se influenciar diretamente no desempenho das operações (Peçanha, 2014).

Para a determinação de análises granulométricas, é comum a utilização de uma série de peneiras com aberturas padronizadas, mantendo uma relação constante entre seus tamanhos. De acordo com Sampaio e Silva (2007), os primeiros avanços tecnológicos referente às peneiras surgiram no século XV, ao qual os alemães introduziram as primeiras telas de arame, desta forma iniciando operações mecanizadas. Isso possibilitou uma maior assertividade no processo da distribuição granulométrica. Mais tarde, a U.S. Tyler Company com o avanço do processo adotou um novo padrão de abertura, ao qual se tornou de uso geral, contribuindo não somente para o controle da operação, mas na compreensão das análises.

A escala ISO (International Standard Opening) adotou como abertura de referência igual a 1 mm, que corresponde a dezoito malhas (mesh) na escala U.S. Bureau of Standards, e como razão de escala igual a $\sqrt{2}$ (Mazzinghy, 2009). Na Figura 5 é apresentada algumas das escalas granulométricas utilizadas e suas associações com o número de malhas (mesh).

Figura 5 – Séries de peneiras conhecidas

TYLER STANDARD SCREEN 1910				U.S. BUREAU OF STANDARDS A.S.T.M. E 11-87		INTERNACIONAL ISO 565		
Básico	MESH Secundário	ABERTURA polegadas	ABERTURA mm	ABERTURA polegadas mm		ABERTURA mm	ARAME mm	
				polegadas				
				5	5,0000	127,0000	128,00	8,000
				4 1/4	4,2500	107,9500		6,400
				4	4,0000	101,6000	107,63	6,300
				3 1/2	3,5000	88,9000	90,51	6,080
				3	3,0000	76,2000	76,11	5,800
				2 1/2	2,5000	63,5000	64,00	5,500
				2 1/4	2,2500	57,1500	53,82	5,150
				2	2,0000	50,8000		5,050
				1 3/4	1,7500	44,4500	45,25	4,850
				1 1/2	1,5000	38,1000	38,05	4,590
				1 1/4	1,2500	31,7500	32,00	4,230
					1,0600	26,9240	26,91	3,900
				1	1,0000	25,4000		3,800
				7/8	0,8750	22,2250	22,63	3,500
				3/4	0,7500	19,0500	19,03	3,300
				5/8	0,6250	15,8750	16,00	3,000
					0,5300	13,4620	13,45	2,750
				1/2	0,5000	12,7000		2,670
				7/16	0,4375	11,1125	11,31	2,450
				3/8	0,3750	9,5250	9,51	2,270
				5/16	0,3125	7,9375	8,00	2,070
					0,2650	6,7310	6,73	1,870
				1/4	0,2500	6,3500	6,30	1,820
				Mesh				
	2 1/2	0,3121	7,9284	2 1/2	0,3150	8,0000	8,00	2,070
3		0,2625	6,6669	3	0,2648	6,7272	6,73	1,870
	3 1/2	0,2207	5,6062	3 1/2	0,2227	5,6569	5,66	1,680
4		0,1856	4,7142	4	0,1873	4,7568	4,76	1,540
	5	0,1561	3,9642	5	0,1575	4,0000	4,00	1,370
6		0,1312	3,3335	6	0,1324	3,3636	3,36	1,230
	7	0,1104	2,8031	7	0,1114	2,8284	2,83	1,100
8		0,0928	2,3571	8	0,0936	2,3784	2,38	1,000
	9	0,0780	1,9821	10	0,0787	2,0000	2,00	0,900
10		0,0656	1,6667	12	0,0662	1,6818	1,68	0,810
	12	0,0552	1,4016	14	0,0557	1,4142	1,41	0,725
14		0,0464	1,1786	16	0,0468	1,1892	1,19	0,650
	16	0,0390	991	18 **	0,0394	1000	1000	0,580
20		0,0328	833	20	0,0331	841	841	0,510
	24	0,0276	701	25	0,0278	707	707	0,450
28		0,0232	589	30	0,0234	595	595	0,390
	32	0,0195	496	35	0,0197	500	500	0,340
35		0,0164	417	40	0,0166	420	420	0,290
	42	0,0138	350	45	0,0139	354	354	0,247
48		0,0116	295	50	0,0117	297	297	0,215
	60	0,0098	248	60	0,0098	250	250	0,180
65		0,0082	208	70	0,0083	210	210	0,152
	80	0,0069	175	80	0,0070	177	177	0,131
100		0,0058	147	100	0,0059	149	149	0,110
	115	0,0049	124	120	0,0049	125	125	0,091
150		0,0041	104	140	0,0041	105	105	0,076
	170	0,0034	88	170	0,0035	88	88	0,064
200 *		0,0029	74	200	0,0029	74	74	0,053
	250	0,0024	62	230	0,0025	63	63	0,044
270		0,0021	52	270	0,0021	53	53	0,037
	325	0,0017	44	325	0,0017	44	44	0,030
400		0,0015	37	400	0,0015	37	37	0,025
				450	0,0013	32	31	0,028
				500	0,0010	25	26	0,025
				635	0,0008	20	22	0,020

* Peneira de referência: 200 malhas. Série básica 2^{0,5}; Série secundária 2^{0,25}

** Peneira de referência: 18 malhas. Série básica 2^{0,25}

Fonte: Mazzinghy (2009).

3.3.1. Modelo de distribuição de Rosin, Rammler e Bennett (RRB)

O modelo RRB foi desenvolvido a partir de estudos da distribuição de tamanhos de carvão mineral pulverizado em moinhos de bolas. Neles, bolas de aço em permanente movimento chocam-se umas com as outras, e com a carcaça do moinho, ocorrendo a moagem quando partículas se interpõem entre as superfícies que se chocam (Peçanha, 2014). O método é particularmente apropriado para partículas finamente moídas, como os estudo de carvão mineral ao qual são preferíveis, e envolve a representação de $\log [\log 100/(100-y)]$ ou $\log [\log 100/R]$ em função do log da dimensão da peneira, onde "y" representa a porcentagem acumulada que passa, e "R" é a porcentagem acumulada retida.

A representação gráfica em escala logarítmica aumenta as extremidades finas e grossas da faixa de tamanho (< 25 % e > 75 %) e reduz a faixa média (30-60 %). Em condições ideais, as aproximações usadas no cálculo e na estimativa do tamanho das partículas são adequadas para a maioria dos propósitos.

A distribuição de Rosin, Rammler e Bennett é expressa conforme Equação 3.8:

$$R = 100 \exp \left[- \left(\frac{X}{X^1} \right)^b \right] \quad (3.8)$$

Sendo:

R= porcentagem de massa acumulada retida no tamanho determinado;

X^1 = parâmetro do tamanho médio da partícula;

X= tamanho da partícula;

b= parâmetro de distribuição do modelo.

3.3.2. Modelo de distribuição Gates, Gaudin e Schuhmann (GGS)

De acordo com Peçanha (2014), o modelo de Gates, Gaudin e Schuhmann foi elaborado com base em análises da distribuição de tamanhos de partículas resultantes da moagem de minérios, tornando-o adequado para descrever esta distribuição de diversos produtos. No método GGS, os dados cumulativos de

tamanhos inferiores são representados em relação à abertura da peneira a partir de um gráfico logarítmico.

Em comparação ao modelo anterior, o GGS é preferível e regularmente utilizado no processamento mineral, apesar de que o RRB é utilizado em estudo de carvão mineral, o qual originalmente foi desenvolvido. Uma vantagem no método GGS na elaboração dos gráficos é a possibilidade de utilizar apenas um número limitado de peneiras para mensurar o tamanho das partículas que se encontram entre quaisquer duas delas, além do qual indica a distribuição dos tamanhos das partículas que existem numa amostra (Peçanha, 2014).

A distribuição de Gates, Gaudin e Schuhmann pode ser definida conforme a Equação 3.9 expõem.

$$y = \left(\frac{x}{K} \right)^n \quad (3.9)$$

Sendo:

y= fração passante acumulada;

X= diâmetro médio da partícula para o referido tamanho Y;

K= parâmetro de tamanho de ajuste do modelo;

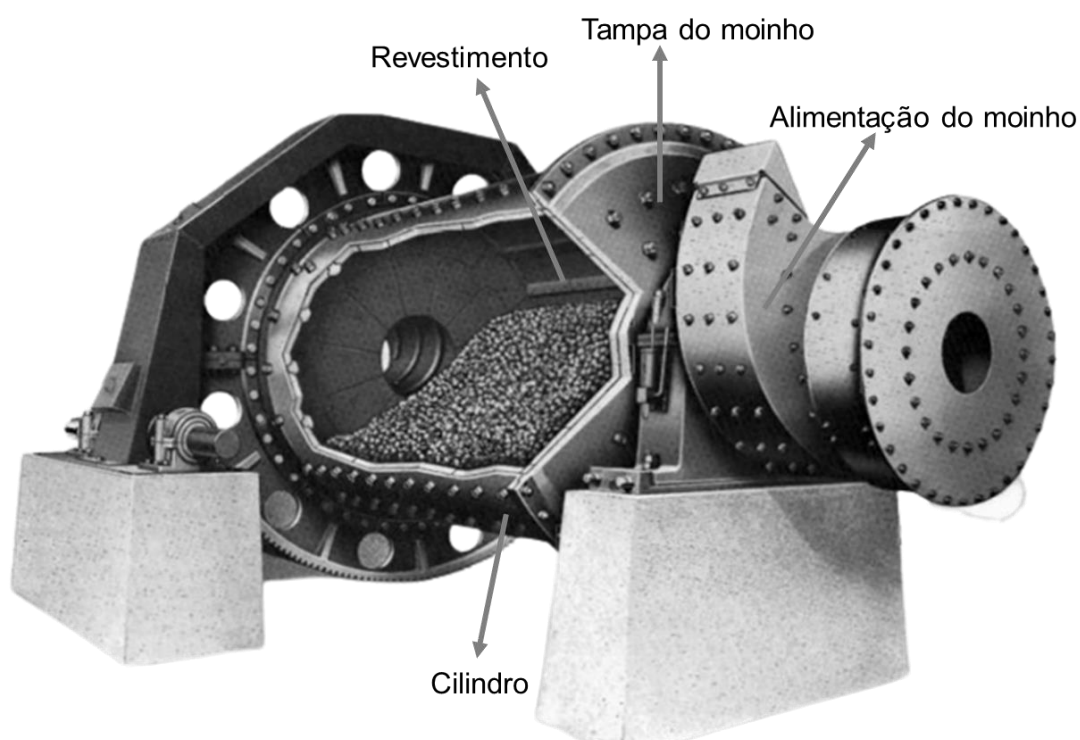
n= parâmetro de distribuição de ajuste do modelo.

Por fim, ambos os métodos surgem da tentativa de representar curvas de distribuição granulométrica usando equações, resultando em escalas que se ampliam em algumas regiões e se reduzem em outras, em relação à escala linear.

3.4. Moagem

O processo de beneficiamento mineral se inicia com a cominuição do minério, normalmente realizada em etapas de britagem e moagem. Essas etapas reduzem progressivamente e de maneira controlada o tamanho das partículas, liberando o mineral de interesse para as concentrações subsequentes (Vargas, 2019). Dentro desse contexto, a moagem é a última etapa de fragmentação do minério em uma usina de tratamento mineral e compreende a desagregação de partículas mais finas. Geralmente os equipamentos mais empregados na moagem são moinhos cilíndricos (barras e bolas), autógenos e semi-autógenos, a Figura 6 representa a estrutura de um moinho de bolas identificando algumas características construtivas.

Figura 6 – Ilustração da estrutura de um moinho de bolas

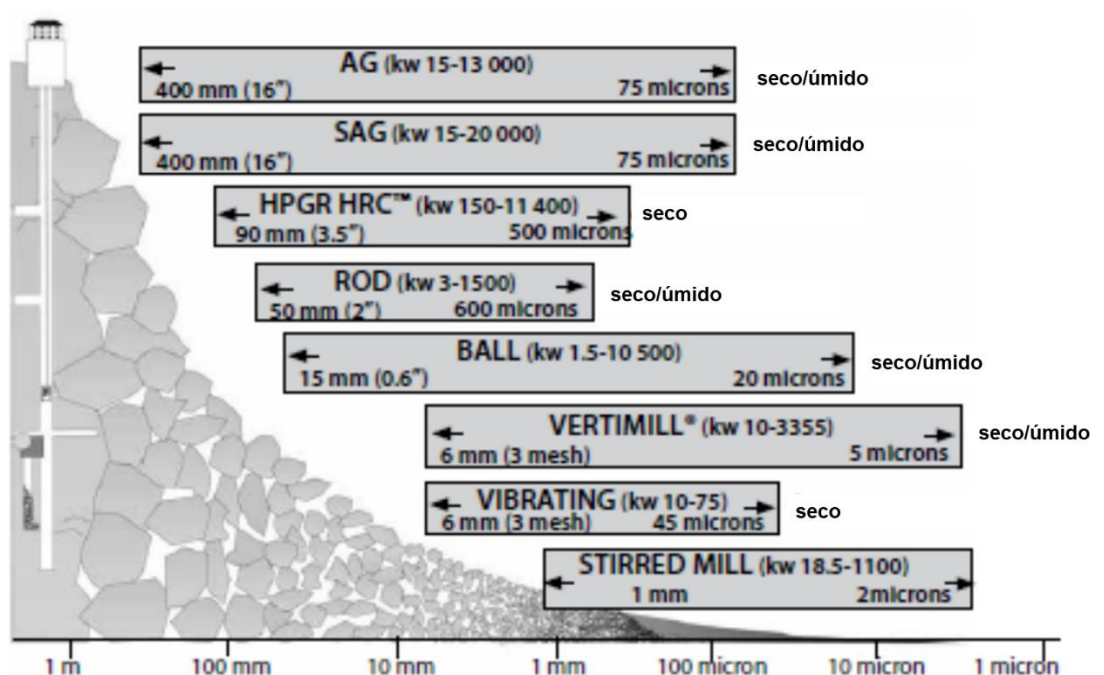


Fonte: Adaptado de Metso (2005).

Os moinhos são fabricados com relações de comprimento/diâmetro de acordo com a granulometria do produto final, taxa de alimentação e parâmetros de quebra (Rodrigues, 2020).

É válido ponderar que o procedimento de moagem em uma usina de beneficiamento exige investimentos substanciais, isso se deve ao fato de por ser uma etapa crucial para a continuidade do processo e a necessidade de uma boa eficiência, ocorre maior consumo de energia. Este gasto de energia é resultado da ação motivada pela quebra das partículas combinada as ações dos corpos moedores dentro do moinho. A Figura 7 ilustra as razões de redução em diferentes tipos de moinhos.

Figura 7 – Razões de redução de diferentes moinhos



Fonte: Adaptado de Metso (2018).

3.4.1. Comportamento dos corpos moedores

Conforme Figueira, Luz e Almeida (2010) esclarecem, os corpos moedores são impulsionados pelo movimento rotacional do moinho até determinado ponto, ao qual começam a cair, seguindo uma trajetória parabólica, sobre as bolas que estão na parte inferior do cilindro e sobre o minério que preenche os espaços entre os corpos moedores. A velocidade do moinho é um fator fundamental para o entendimento desta carga, ao qual em grande maioria relaciona-se à porcentagem de sua velocidade crítica.

Beraldo (1987) estabelece velocidade crítica como aquela na qual a bola atinge o ponto mais alto do moinho sem se desprender da parede. Ainda, define que

esta é calculada igualando naquele exato ponto a força centrífuga ao peso da bola naquele exato ponto, podendo ser determinado pela Equação 3.9:

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (3.9)$$

Onde:

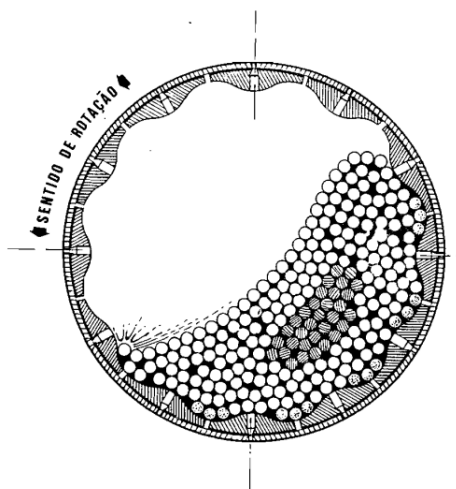
N_c = velocidade crítica, em rpm;

D = diâmetro do moinho, em metros.

Os moinhos podem funcionar a velocidades que variam de 40 % a 80 % da sua velocidade crítica, sendo a escolha influenciada pelas considerações econômicas, pois funcionando dentro dessa faixa, resulta em menor consumo de energia, redução do desgaste no revestimento interno e maior vida útil dos corpos moedores (Rodrigues, 2020).

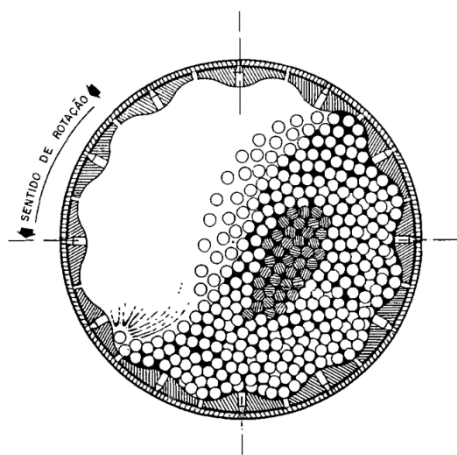
Durante o funcionamento do moinho podem ser identificados dois fenômenos em relação ao movimento dos corpos moedores: o regime de cascata e o de catarata. Esses regimes são diretamente influenciados pela velocidade do moinho, capacidade de enchimento e padrões dos revestimentos (Chagas, 2008).

O regime de cascata acontece com maior regularidade em moinhos que operam com revestimentos lisos e baixa velocidade, pois esta velocidade aliada a alta razão de enchimento faz que as esferas ao atingirem certa altura, percorrem uma sobre as outras, ocorrendo poucos impactos, predominando os mecanismos de abrasão e atrito. Além disso, para esse regime é comum a adequação para um produto com granulometria mais fina (Beraldo, 1987). A Figura 8 mostra o comportamento da carga moedora no regime de cascata, observando o arraste das bolas sobre as outras.

Figura 8 – Carga de corpos moedores em regime de cascata

Fonte: Beraldo (1987).

No regime de catarata entende-se que ocorre no momento em que há uma elevação da velocidade de rotação do moinho, aliada a presença de revestimentos que possuem certa elevação, os corpos moedores possuem maior elevação favorecendo o impacto entre os corpos moedores e também com a carcaça, essa área pode ser chamada de “região do pé” (Vargas, 2019). Vale ressaltar que não somente o tipo de revestimento influencia no levantamento da carga, mas também uma maior carga e o tamanho das bolas. A Figura 9 exemplifica o comportamento da carga moedora no regime de catarata, observando a queda das bolas no meio do cilindro.

Figura 9 – Carga de corpos moedores em regime de catarata

Fonte: Beraldo (1987).

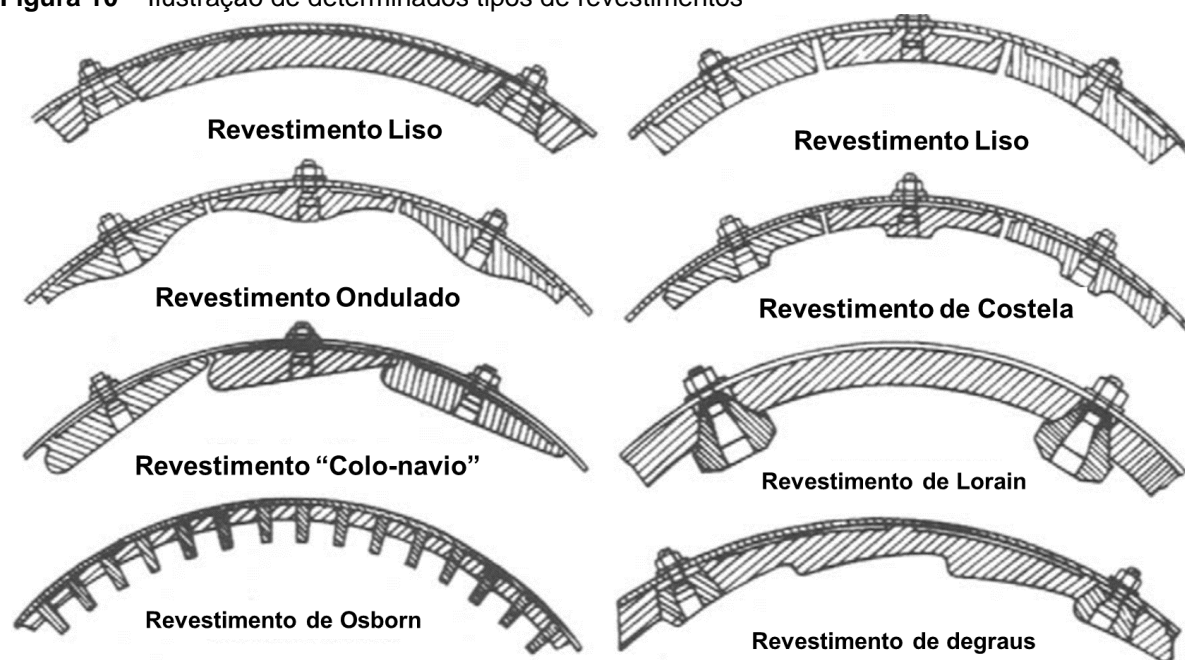
Para Vargas (2019), o regime de movimentação da carga no interior do moinho é determinado pela interação entre a velocidade de rotação, o perfil de revestimento e o volume de bolas.

3.5. Revestimento de moinhos

O uso do revestimento tem como principal objetivo preservar o cilindro evitando o desgaste, e minimizando o deslizamento da carga de moagem dentro da carcaça, além disso, pode-se destacar a eficiência do processo. Sua produção depende de diferentes fatores, como por exemplo, o tipo de moinho, minério a ser processado, tamanho do cilindro, velocidade de operação (Silva, 2013).

Dentre as opções de revestimento metálico, destacam-se as placas feitas de ferro fundido especial e ligas de aço (manganês, cromo-molibdênio), ao qual são produzidas em módulos e podem ser encomendadas de acordo com as necessidades específicas de cada moinho (Chaves, et al., 2003). A Figura 10 apresenta alguns tipos de revestimentos produzidos em diferentes formas.

Figura 10 – Ilustração de determinados tipos de revestimentos



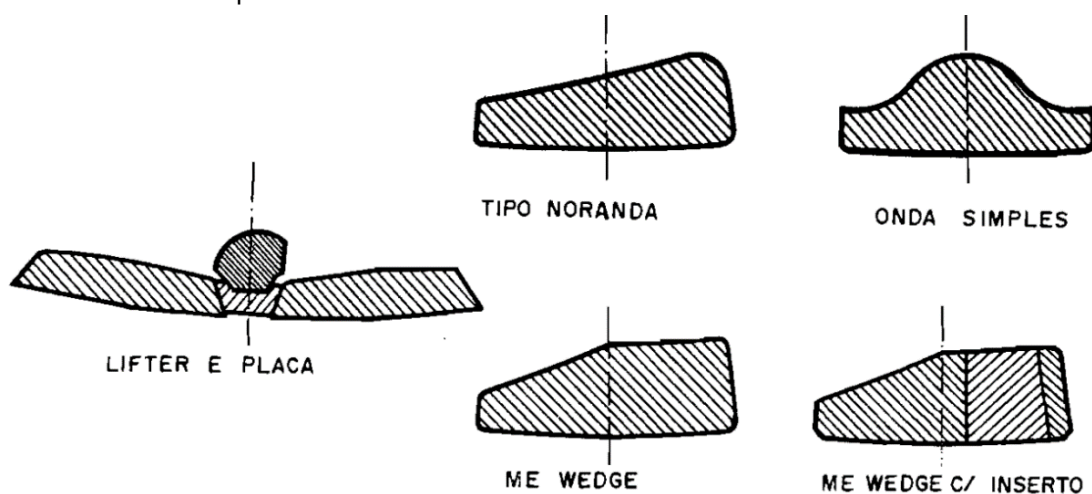
Fonte: Adaptado de Wills e Napier-Munn (2006).

A característica do revestimento tem um impacto significativo na trajetória dos corpos moedores. Conforme enfatizado por Taggart (1945), a configuração do revestimento combinada com as propriedades da polpa, influencia o movimento da

carga de bolas. Portanto, a concepção do revestimento, abrangendo fatores como material, geometria, quantidade de suspensores e o espaço entre eles, deve ser cuidadosamente elaborada para garantir um desempenho eficiente na operação de moagem.

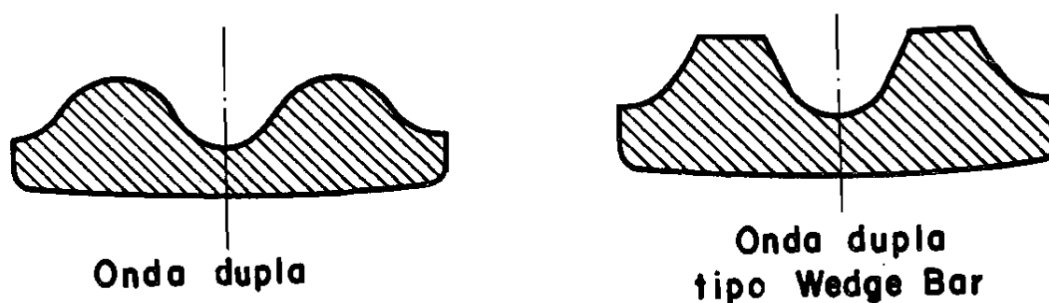
Os revestimentos usados em moinho de barras são geralmente de liga de aço ou ferro fundido, além de serem do tipo ondulado, embora possam ser utilizados revestimentos em degraus. Por outro lado, os moinhos de bolas usam ligas de aço, como manganês e cromo, aço cromado, ferro fundido ou Ni-hard (um tipo de ferro fundido branco com liga de níquel e cromo, adequado para abrasão de baixo impacto para aplicações úmidas e secas) (Durman, 1988). A Figura 11 apresenta a configuração de algumas placas comuns em moinhos de barras, enquanto a Figura 12 mostra as diferentes configurações de revestimento empregados em moinhos de bolas.

Figura 11 – Diferentes placas de revestimento utilizadas em moinho de barras



Fonte: Beraldo (1987).

Figura 12 – Placas de revestimento frequentemente utilizadas no moinho de bolas



Fonte: Beraldo (1987).

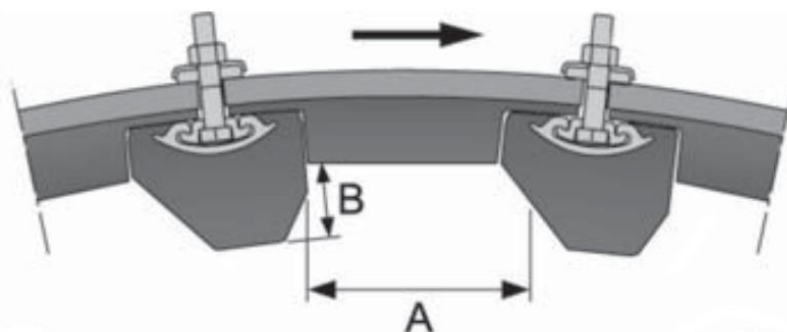
Embora os moinhos sejam usualmente revestidos com materiais metálicos, também há revestimentos de borracha que substituem em algumas operações. Nesse caso, este tipo oferece vantagem em termos de durabilidade, rapidez e facilidade de instalação, além de reduzir significativamente o ruído gerado. Entretanto, apresenta alto custo de investimento e há um elevado consumo de borracha, sendo prejudicial ao desempenho da moagem. Além disso, o uso de borracha no interior dos cilindros é limitado a processos que envolvam reagentes químicos, bem como a processos de moagem em que as temperaturas ultrapassem 80 °C, como a moagem a seco por exemplo (Moller; Brough, 1989).

3.5.1. Relação A/B

O sistema de revestimento busca promover um melhor lançamento dos corpos moedores sobre a carga de material e, quando são empregados com esta finalidade, são chamados de suspensores ou “*lifters*” (Machado, 2020). Levando em consideração que a geometria do revestimento nos moinhos influencia na movimentação da carga de corpos moedores, e, se inadequada reduz a vida útil dos revestimentos e outras características da moagem, Meaders e MacPherson (apud Machado, 2020, p. 8) realizaram uma pesquisa pioneira que realçou a importância da altura e do espaçamento dos suspensores no desempenho de um moinho de bolas.

Através da medição do espaço entre “*lifters*” e da altura deles, obtemos um quociente denominado relação A/B. Esta teoria elaborada por Meaders e MacPherson (apud Machado, 2020, p. 9) é influenciada pela velocidade do moinho, sendo que à medida que opera com velocidade elevada, menor terá que ser os suspensores, para assegurar um desempenho adequado na moagem. A Figura 13 enfatiza essa razão, onde (A) representa o espaçamento entre as barras e (B) indica a altura das mesmas.

Figura 13 – Relação A/B de revestimento de cilindro do moinho

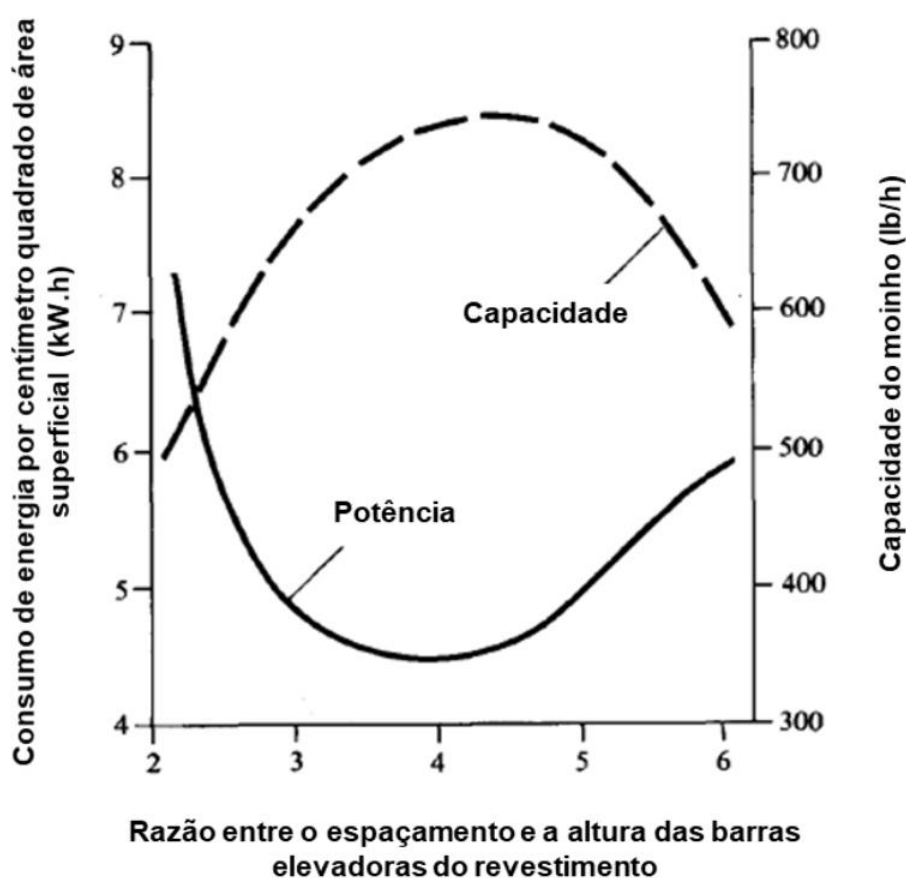


Fonte: Metso (2005).

Powell et al. (2006, apud Vargas, 2019) julgam que o quociente obtido pela divisão do espaçamento entre as barras pela altura das barras é aplicável a moinhos SAG/AG e moinhos de bolas primários, mas é menos significativo em moinhos secundários, e não se aplica a perfis de revestimento ondulados. Ressalta-se ainda a forte influência da velocidade do moinho, como mencionado anteriormente. Ainda, vale ressaltar que naturalmente a relação A/B tende a aumentar ao longo da vida útil dos suspensores, uma vez que eles gradualmente diminuem de tamanho devido ao desgaste.

Com base em outras pesquisas conduzidas por Meaders (1964), dentre o qual avaliou-se a influência da capacidade de moagem e consumo energético do moinho com base na relação A/B, observou-se que valores entre 4 e 4,5 são considerados ideais para a razão, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Impacto da relação A/B na capacidade e no consumo de energia do moinho



Fonte: Modificado de Meaders (1964) apud Howat (1986).

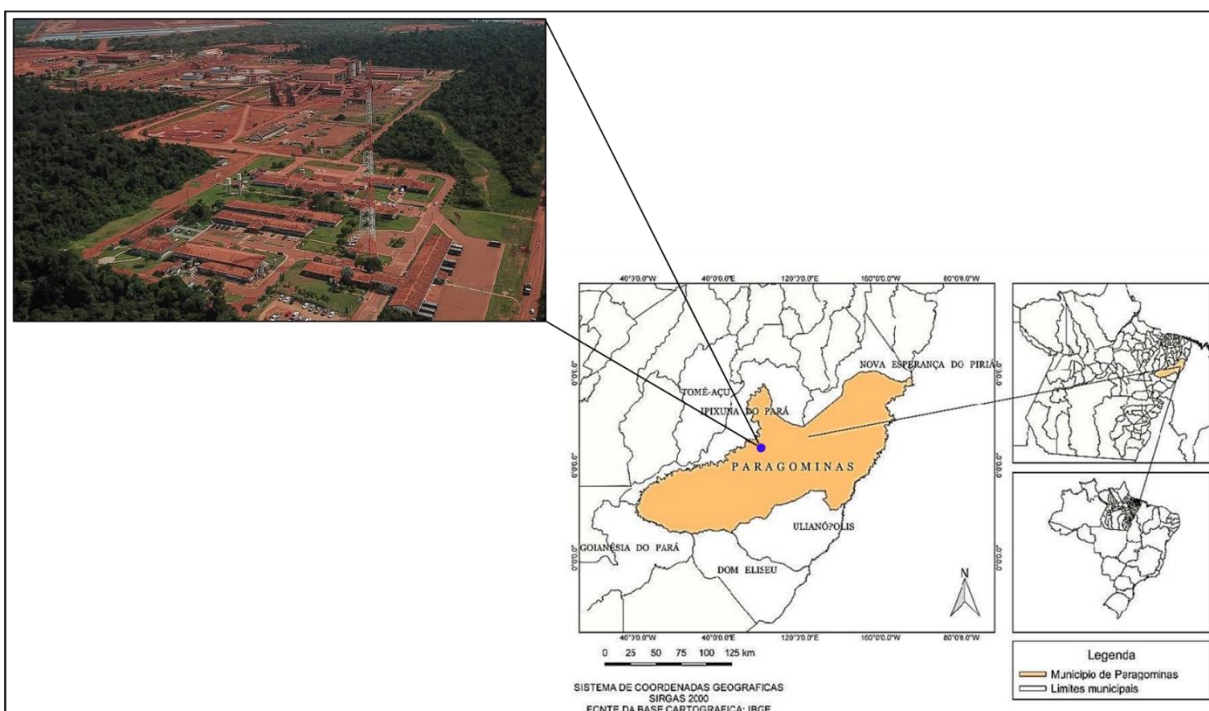
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

O município de Paragominas está localizado na região norte do país, a sudeste do estado do Pará, região de integração (RI) Rio Capim a uma latitude $02^{\circ} 59' 45''$ S e longitude $47^{\circ} 21' 10''$ O. Está situado a aproximadamente 311 quilômetros a sudoeste da capital do estado, Belém, a localidade possui uma área territorial de 19.342,565 km² com uma população estimada de 105.538 pessoas de acordo com o censo 2022, o que corresponde a uma densidade de 5,46 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2022).

A Mineração Paragominas S.A (MPSA) localiza-se a aproximadamente 70 km do município, no Platô Miltônia 3, foi implantada e operada inicialmente pela então empresa Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), sendo incorporada a partir de 2011 pelo grupo Hydro. A operação de mineração teve início em março de 2007 e atualmente movimenta cerca de 16 milhões de toneladas de minério por ano, produzindo anualmente 11,4 milhões de toneladas de bauxita, que é transportada por um mineroduto (HYDRO, 2023). A Figura 15 apresenta a localização de Paragominas e evidencia uma foto área do empreendimento.

Figura 15 – Localização da cidade de Paragominas e vista área da Mineração Paragominas S.A.



Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2019).

O minério de bauxita lavrado da jazida de Miltônia 3 é encontrado na forma de platôs, ou seja, em terrenos planos e elevados, cuja camada que está sobre a bauxita apresenta espessura de aproximadamente 12 metros. Atualmente, as principais etapas do processo produtivo são: lavra, beneficiamento e transporte de polpa por mineroduto através de 244 km até as instalações da refinaria Alunorte, em Barcarena/Pa.

Do ponto de vista cronológico, a planta de beneficiamento é constituída de duas etapas. A primeira para uma capacidade de produção anual de 4,5 milhões de toneladas, a segunda, permitiu expandir para uma produção de 9,9 milhões de toneladas por ano (HYDRO, 2008).

Apesar da planta de beneficiamento contar com duas linhas de produção, o foco de estudo deste trabalho será tratado apenas no circuito da fase 02.

4.1.1. Descrição detalhada da usina de beneficiamento estudada (fase 02)

O processo de beneficiamento da MPSA inicia-se com a britagem e a moagem da bauxita. Depois dos caminhões provenientes das frentes de lavra ou pilhas intermediárias descarregam o ROM (*Run of Mine*) diretamente sobre uma moega, o circuito de britagem do minério é realizado em dois estágios sequenciais (primário e secundário) em britadores de rolos, onde o minério é reduzido abaixo de 152,4 mm (6 polegadas). Este material por sua vez é carregado por correias transportadoras e estocados em um pátio de homogeneização por empilhadeiras de lança basculável e giratória objetivando a formação de pilhas do tipo Windows Chevron, com qualidade e quantidades conhecidas para manter a estabilidade do processo.

Depois de retomado da pilha de homogeneização, o minério é levado por transportadores de correia ao silo de alimentação, ao qual dois conjuntos distintos de correia alimentam as usinas. Na linha 2, a primeira etapa unitária é a moagem SAG (semiautógena), que representa o estágio inicial de desagregação de contaminantes e a moagem inicial grosseira. O produto oriundo da descarga do moinho SAG é descarregado em peneira vibratória de dois decks, da qual o material passante (*undersize*) segue para duas etapas de classificação em hidrociclones de 26 polegadas, onde ocorre a separação do material grosseiro do fino, e este por sua vez é sujeito à deslamagem em dois estágios com ciclones de 10 polegadas, assim, o

overflow segue por gravidade para o espessador de rejeito. A outra parte mais grosseira (> 12,5 mm) passa por uma rebritagem (britador de impacto), e soma com o *underflow* das duas etapas iniciais de classificação para alimentar o processo de moagem (moinho de bolas).

O circuito com moinho de bolas opera em configuração fechada com peneiras de alta frequência – PAF (Stack Sizer – Derrick). A descarga do moinho é por *overflow*, aonde distribuidores alimentam por gravidade um conjunto de 16 de peneiras. O *oversize* retorna para a moagem de bolas como carga circulante, enquanto o *undersize* sendo produto da moagem, segue para a etapa de adensamento (cujo objetivo é produzir *underflow* em uma concentração de sólido adequada e remover do espessador frações mais grosseiras), e espessamento de concentrado, onde será gerado parte do produto final da usina fase 02.

Além do mais, existem ainda peneiras de segurança do tipo DSM, que executam o processo de peneiramento final, ou seja, operam como proteção do mineroduto, garantindo que partículas grosseiras acima das especificações de bombeamento e outros contaminantes não possam ser transportadas até os tanques de armazenamento de polpa do mineroduto.

A partir da Figura 16 podemos observar o fluxograma atual da usina de beneficiamento.

Figura 18 – Realização da amostragem: a) Coleta de material na correia transportadora; b) Amostra coletada no circuito de Hidrociclones



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Após a amostragem mencionada anteriormente, os materiais foram devidamente identificados e encaminhados ao laboratório físico da MPSA, onde foram conduzidos os procedimentos experimentais. Para avaliar a granulometria da polpa, foram empregadas análises por peneiramento conforme as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2018). Além disso, a granulometria em microns foi determinada utilizando o analisador de partículas Mastersizer 3000 da marca Malvern.

Posteriormente a conclusão dessas etapas, os resultados da amostragem foram processados no software Excel, empregando o modelo de Gaudin Schuhmann para linearização dos dados. Isso possibilitou a compreensão da distribuição granulométrica em cada circuito.

4.3. Premissas adotadas

Uma das formas de observar o comportamento da moagem na fase 02 foi a realização de uma análise estatística entre o período anterior à troca de revestimento, e depois à troca.

O período de coleta desses valores foi planejado para abranger 60 dias, compreendendo dois intervalos distintos. O primeiro deles diz respeito aos resultados obtidos antes da substituição do revestimento no moinho de bolas, começando em 30/12/2022 às 19:00 horas e encerrando-se em 26/01/2023 às 14:00 horas. Em um segundo momento, referente ao período após a troca do revestimento, os dados foram analisados entre 04 de fevereiro de 2023, às 08:00 horas, a 27 de fevereiro de 2023, às 23:00 horas.

Diante disso, neste trabalho foram avaliados os seguintes itens da usina 02 para compreensão da qualidade física, tanto produto final da usina quanto produto da moagem:

- i. Granulometria – foram examinados alguns elementos como por exemplo, o *undersize* do PAF, produto final da usina, produto da rebitagem, aporte de massa e a granulometria do *underflow* do espessador de concentrado;
- ii. Moagem de bolas – carga circulante, porcentagem de sólidos e potência envolvida no processo;
- iii. Taxa de alimentação da usina;
- iv. Taxa de *pebbles* – também conhecida como alimentação da rebitagem.

Além do mais, outros indicadores foram considerados, como, a granulometria do *overflow* dos ciclones de classificação e produto final da fase 01.

É importante ressaltar que os dados analisados foram submetidos a um critério de seleção com base no coeficiente de variação da taxa de alimentação de cada usina, indicador este calculado a cada 1 hora. Em outras palavras, a média do coeficiente de variação da alimentação ao longo do ano de 2022 foi de 7,48. Conseqüentemente, todos os dados coletados durante o período anterior e posterior que não atenderam a um valor preestabelecido ($> 7,48$) foram excluídos, devido à conclusão de que a planta não estava operando com estabilidade.

4.4. Levantamento de dados históricos

Como um componente deste trabalho, realizou-se a coleta de dados históricos, aderindo às premissas estabelecidas. Para esta análise, utilizou-se duas fontes de informações fundamentais: o Sistema Nautilus, um banco de dados interno que abrange todos os resultados diários de amostragem, e o PI Datalink, uma ferramenta de software empregada para o gerenciamento de dados de processo em tempo real.

Com base nas informações disponíveis no banco de dados interno da empresa, obteve-se os resultados de rotina. Isso, por sua vez, possibilitou a realização de análises estatísticas, utilizando o software Minitab 20 como ferramenta auxiliar.

Uma outra maneira de compreender os principais elementos que impactavam na eficiência do moinho de bolas, foi através da análise de amostragens realizadas no ano de 2022, confrontando-os com os valores de projeto e adotando uma abordagem crítica em relação ao equipamento. Além disso, foram analisados documentos técnicos que continham medições detalhadas ao longo da vida útil do moinho de bolas. Isso possibilitou avaliações significativas relativas ao desempenho do revestimento, fato este contribuinte principalmente na mudança da curva granulométrica.

Vale destacar que, considerando a análise inicial para calcular a eficiência da moagem antes e depois à substituição do revestimento, e a curva granulométrica, na falta de informações específicas, recorreu-se aos dados do balanço de massa da planta de beneficiamento elaborados pela MinPro Solutions como uma constante de referência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

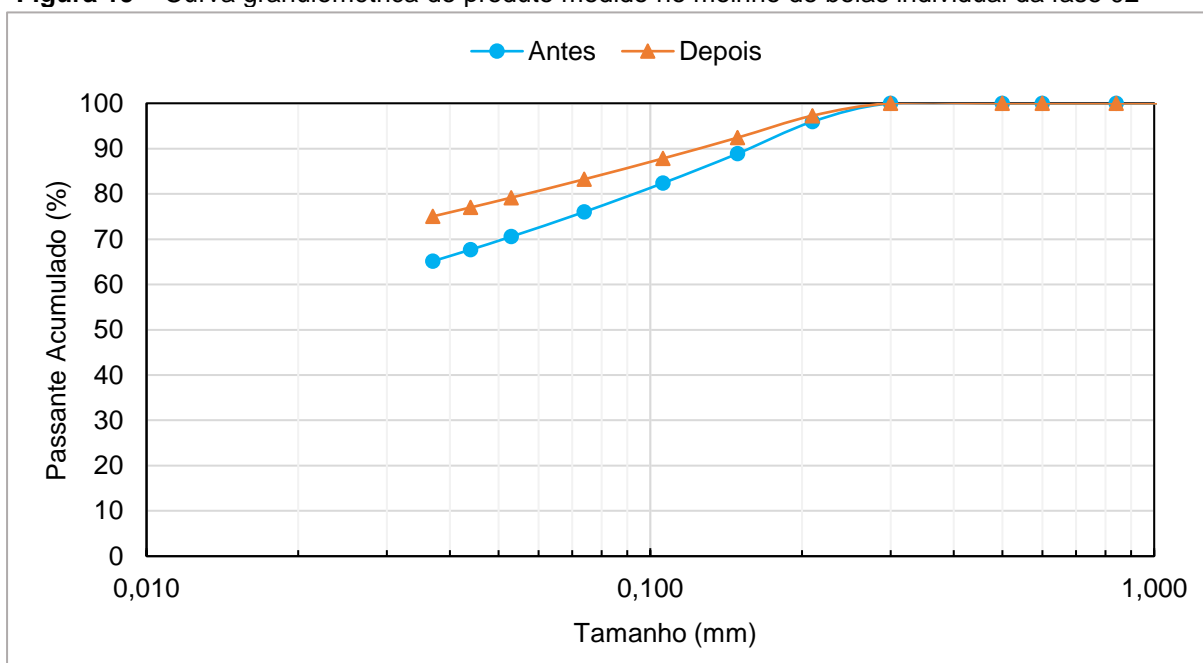
Nesta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos no trabalho.

5.1. Eficiência da Moagem

Considerando as mudanças realizadas no revestimento do moinho de bolas da fase 02, os resultados obtidos por meio das campanhas de amostragem foram confrontados entre si observando se haveria variabilidades no produto individual da moagem. Isso quer dizer, calculou-se considerando apenas os finos gerados no moinho de bolas e descartando o material fino oriundo de outros circuitos que abrangem, como o *underflow* da ciclonagem secundária de finos, *oversize* das peneiras de alta frequência e *oversize* das peneiras DSM.

A Figura 19 abaixo mostra o gráfico da curva granulométrica do produto individual medido no moinho de bolas da fase 02 na planta de beneficiamento. Com base nos estudos, é perceptível na distribuição granulométrica um afinamento na malha de 0,21 mm – ou 65 mesh na série Tyler, cerca de 1,4 % diferem entre o material passante no período que concerne à antes e depois, entendendo desta maneira oportunidades de ganho quanto à realização da mudança.

Figura 19 – Curva granulométrica do produto medido no moinho de bolas individual da fase 02



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

A partir da Tabela 1 observamos os resultados de granulometria do produto medido do moinho bolas fase 02, calculados a partir da massa descarregada no moinho, ao qual considera apenas o circuito de PAF e peneiras DSM.

Tabela 1 – Granulometria do produto medido do moinho bolas da fase 02

Abertura de malha (mesh)	Tamanho (mm)	Passante Acumulado "Antes" (%)	Passante Acumulado "Depois" (%)	Diferença entre amostras (%)
3 pol.	76,2	100	100	0
2 pol.	50,8	100	100	0
1 pol.	25,4	100	100	0
3/4 pol.	19,5	100	100	0
1/2 pol.	12,5	100	100	0
20#	0,841	56,13	67,18	16,45
28#	0,60	50,24	62,48	19,59
32#	0,50	47,32	60,08	21,24
48#	0,30	40,01	53,83	25,67
65#	0,21	35,59	49,85	28,61
100#	0,149	31,79	46,29	31,32
150#	0,106	28,43	43,02	33,91
200#	0,074	25,26	39,81	36,54
270#	0,053	22,64	37,04	38,88
325#	0,044	21,29	35,58	40,15
400#	0,037	20,11	34,27	41,31

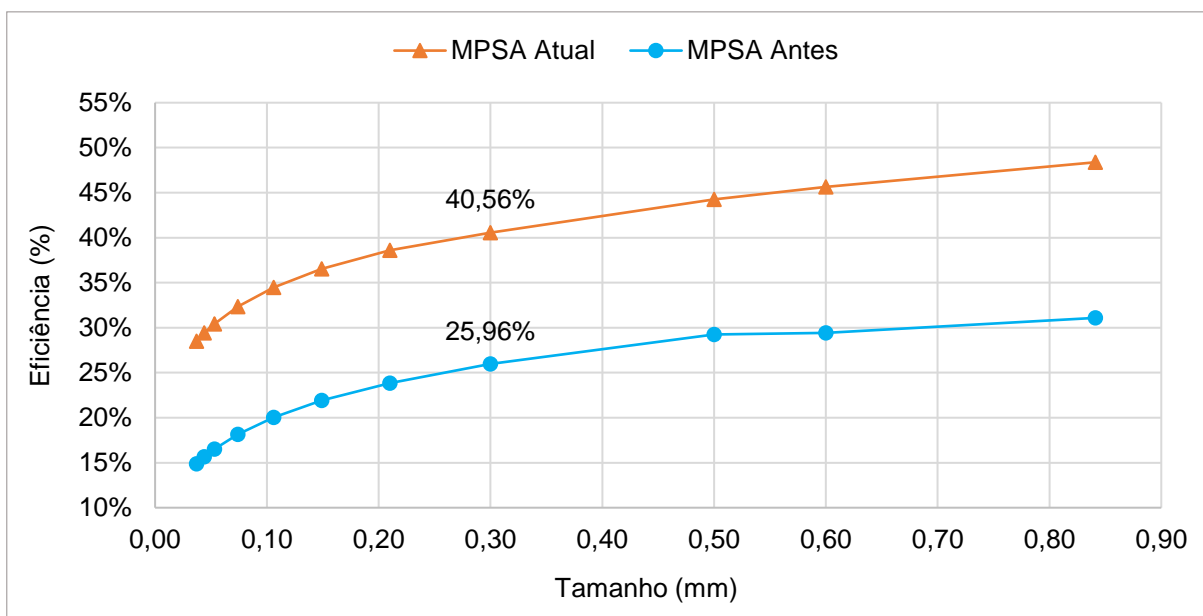
Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Ao realizarmos uma comparação entre o passante acumulado de antes e depois, observamos diferenças significativas entre as malhas. Portanto, diante desta investigação, conclui-se que ocorreram alterações na curva de distribuição granulométrica. Para compreender melhor essas melhorias, realizou-se uma análise mais abrangente, comparando as amostragens de 2022 com os dados das amostragens de rotina.

Levando em conta as ações de engenharia implementadas para aumentar a eficiência do processo, o gráfico da Figura 20 exibe a curva da eficiência de moagem na fase 02 por faixas granulométricas. A granulometria observada no gráfico partiu-se por meio de cálculos realizados considerando o passante acumulado medido no

produto moinho, na alimentação nova e o retido acumulado medido na alimentação nova do moinho de bolas.

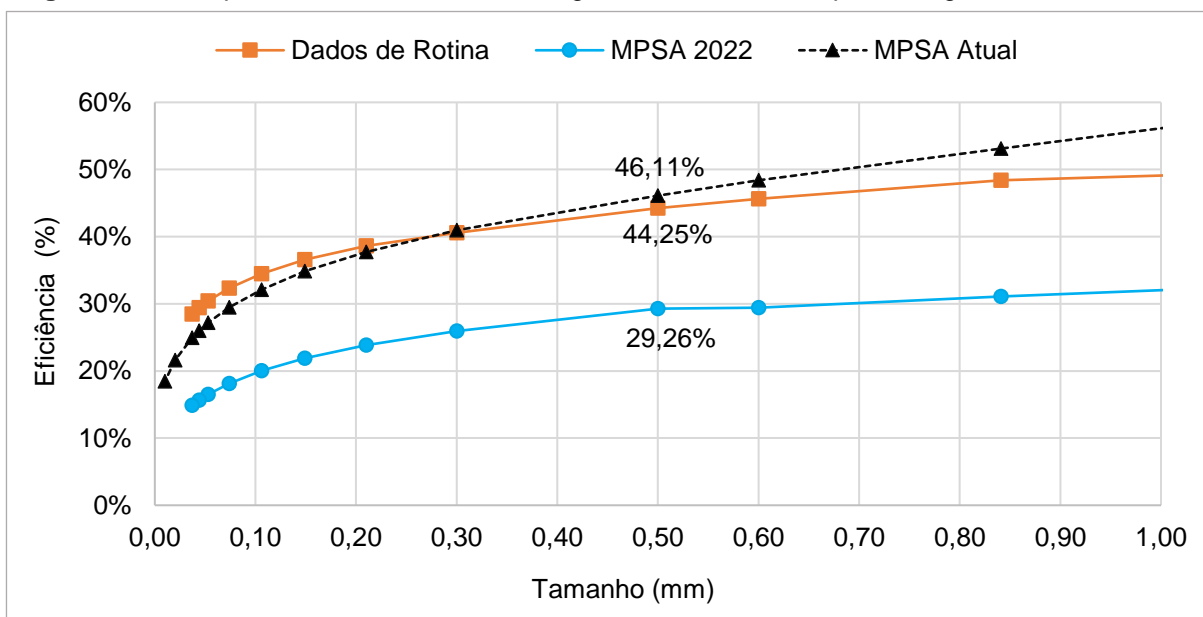
Figura 20 – Curva de eficiência da moagem bolas por faixa granulométrica



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Os resultados apresentados indicam um ganho da eficiência de moagem na ordem de 14,60 % na malha de 48 mesh – série Tyler. Nesta alternativa, considerou-se o que recomendava os documentos de projeto, no qual limita-se a porcentagem rigorosa passante em 0,3 mm, observando o dimensionamento do mineroduto. Os resultados granulométricos da curva de eficiência são demonstrados no Apêndice A.

Para confirmar ou contestar as alterações observadas, a campanha de amostragem conduzida em abril de 2023 revelou ganhos substanciais. Nessa ocasião, houve uma análise crítica do top size do mineroduto (0,5 mm). A Figura 21 mostra o gráfico de eficiência por faixa granulométrica, ao qual foram comparados às amostragens realizadas anteriormente, além do qual confrontados com os valores de projeto.

Figura 21 – Comparativo da eficiência de moagem bolas da fase 02 por faixa granulométrica

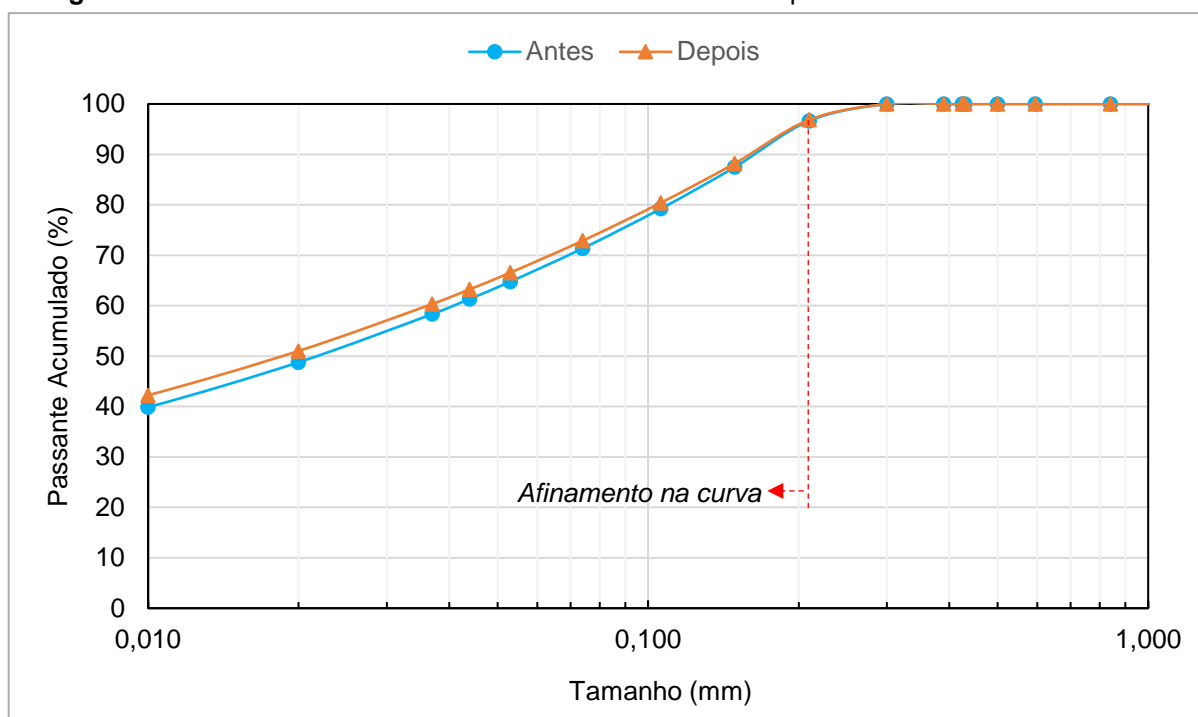
Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Analisando os resultados, podemos constatar que a comparação revela uma melhoria substancial, confirmando um ganho de eficiência de 16,84 % quando comparamos os anos de 2022 e 2023. Isso significa que, considerando os desafios propostos, houve uma mudança significativa na malha de 0,5 mm (32 mesh), fração crítica do mineroduto. Os resultados das malhas granulométricas podem ser consultados no Apêndice B.

5.2. Análise da qualidade física do produto da moagem

No que diz respeito aos potenciais impactos na qualidade física decorrentes da substituição do revestimento, um dos indicadores observados foi a curva granulométrica do produto da moagem, ou seja, o *undersize* do peneiramento de alta frequência.

Com base nas amostras obtidas através dos resultados de rotina do plano de amostragem diário do laboratório físico, o gráfico da Figura 22 abaixo apresenta a curva de distribuição granulométrica do produto da moagem antes e depois da troca do revestimento. Deste modo, ao analisarmos a curva, é evidente um afinamento a partir da malha 65 mesh (0,21 mm) na série Tyler. As informações referentes aos dados granulométricos da curva podem ser consultadas no Apêndice C.

Figura 22 – Curva Granulométrica do *undersize* PAF antes e após troca do revestimento

Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Para constatar esse afinamento, executou-se um teste estatístico dos resultados das malhas granulométricas observadas no produto da moagem entre os dois períodos. A Tabela 2 evidencia o comportamento desta análise considerando o material passante acumulado das malhas granulométricas no *undersize* PAF antes e após troca do revestimento.

Tabela 2 – Resultado das análises granulométricas do *undersize* do PAF referente ao período entre antes e após a troca do revestimento.

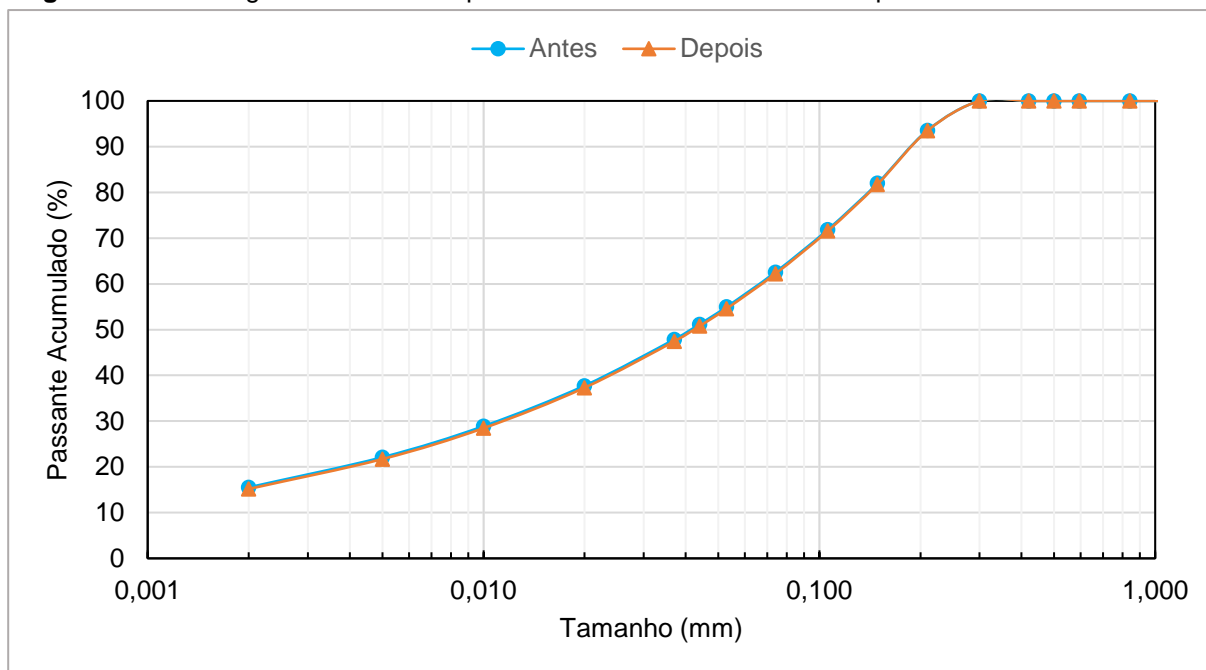
Abertura de malha (mesh)	Média da Amostra – “antes” (%)	Média da Amostra – “depois” (%)	Diferença entre amostras	Desvio Padrão (antes)	Desvio Padrão (depois)
32#	99,82	99,86	- 0,046	0,09	0,06
48#	99,30	99,68	- 0,38	0,51	0,14
65#	95,39	98,04	- 2,69	1,83	1,34
100#	88,44	92,28	- 3,84	6,12	4,57
150#	79,10	84,40	- 5,30	8,52	6,41
200#	71,39	76,09	- 4,70	7,01	7,67
270#	62,84	67,68	- 4,84	6,98	7,34
325#	58,61	63,73	- 5,12	8,16	7,14
400#	57,11	60,84	- 3,73	7,68	6,89
10 µm	38,04	41,37	- 3,33	5,04	4,38

Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 2, fica evidente que a média das amostras anterior é significativamente menor que a média do período subsequente. Com base nas análises realizadas, foi obtido um valor-p inferior a 0,05, indicando que os dados apresentaram 95 % de confiança. Assim, a partir dessas análises, foi estatisticamente confirmado que ocorreu um afinamento na curva granulométrica do produto da moagem.

Com base na análise anterior conduzida, também foi avaliado se houve algum efeito na curva granulométrica do produto final da usina 02. A Figura 23 apresentada a seguir exibe o gráfico da curva de distribuição granulométrica do produto da fase 02, comparando os dois momentos à troca de revestimento. Os dados granulométricos em ambos os períodos são derivados das amostras coletadas rotineiramente. Portanto, ao observarmos a curva verifica-se que não houve significativa variação de tamanho das partículas quando comparamos os dois períodos à troca do revestimento.

Figura 23 – Curva granulométrica do produto final na usina 2 antes e depois à troca do revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

O fato anterior mencionado, levantou a questão de o porquê desse efeito não ter sido evidenciado. Através de uma investigação minuciosa, identificou-se que o processo de peneiramento Derrick estava sobrecarregado, uma vez que cada peneira possuía uma capacidade média projetada de 64,8 t/h (base seca), enquanto estava recebendo atualmente cerca de 131,17 t/h. Ao analisarmos anteriormente à

troca do revestimento constatou-se que o mesmo circuito possuía alimentação com uma capacidade de 134,79 t/h, uma diferença de aproximadamente 3,62 t/h quando há um comparativo entre os dois momentos, ou seja, antes e depois à troca do revestimento.

Ainda dentro deste cenário, mesmo notando uma redução na quantidade de massa alimentada, o que pode ser explicado pelas modificações realizadas durante a substituição do revestimento da moagem, é evidente que, apesar das alterações, as peneiras ainda estavam operando com sobrecarga.

Portanto, chegou-se à conclusão de que o efeito de afinamento no produto da moagem não é evidenciado no produto final da usina devido à ineficiência no processo de peneiramento de alta frequência, que estava operando com sobrecarga. Se o circuito de classificação da fase 02 fosse baseado em ciclones, esse efeito seria mais perceptível. No entanto, uma vez que se utiliza a classificação por peneiramento, que é mais eficiente, esse efeito é menos notável.

Além disso, foram analisados os três formadores de produto da fase 02, ou seja, o *underflow* do espessador de concentrado, o *underflow* do ciclone de adensamento e o *underflow* da ciclonagem secundária de finos. Foi notável o aumento da granulometria na curva desses dois últimos, possivelmente devido aos ajustes realizados na planta de beneficiamento, com o objetivo de melhorar a qualidade química e maior concentração de sólidos no produto final da fase 02.

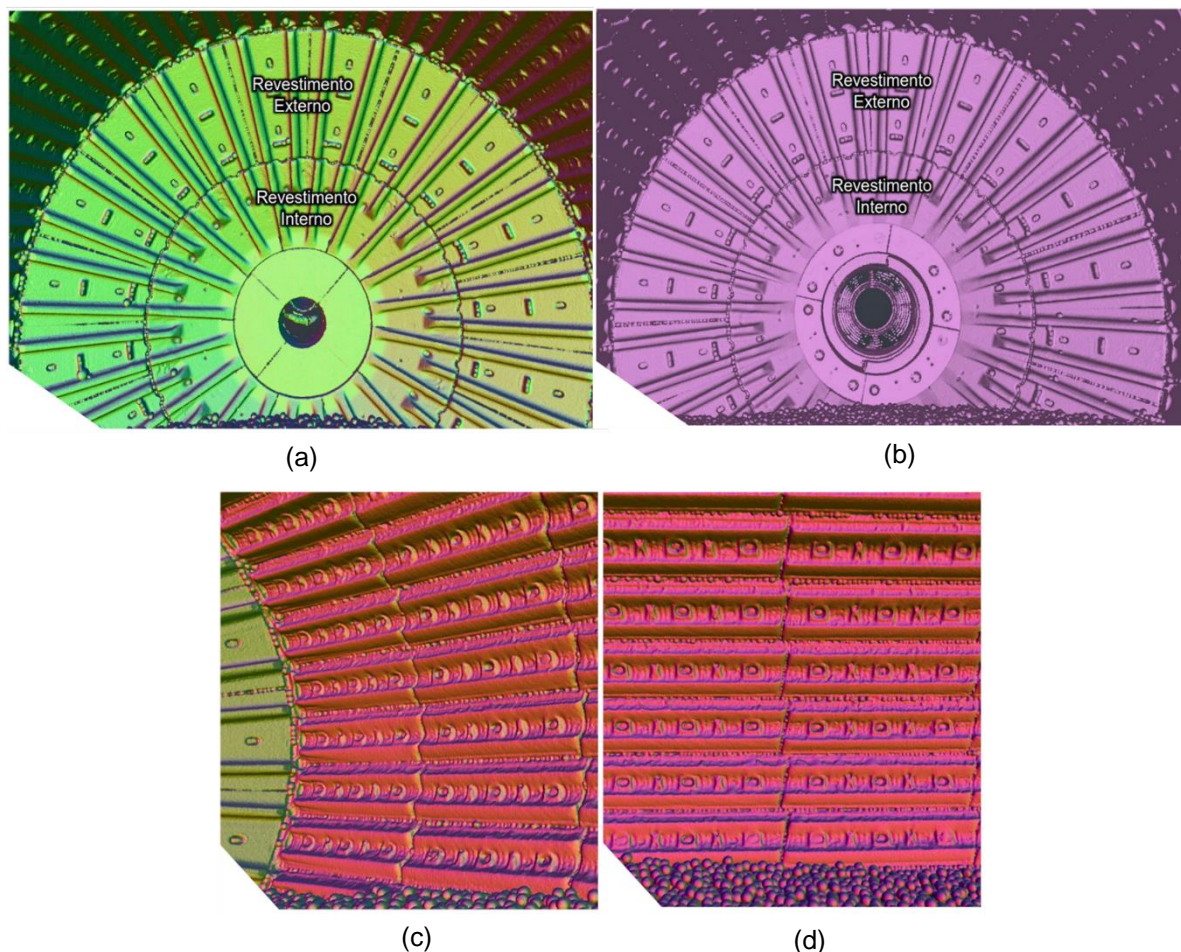
Os dados sobre a distribuição granulométrica podem ser encontrados no Apêndice D.

5.3. Análise da vida útil dos revestimentos no moinho bolas

Durante a inspeção de rotina anual realizada pela empresa Metso Outotec em maio de 2022, verificou-se que o perfil de revestimento do moinho de bolas da fase 02 tinha uma vida útil total de 101.889 horas, com 93.149 horas de operação. Conforme podemos observar na Figura 24 ao qual exibe a condição visual dos revestimentos no moinho bolas, os dados referentes ao ano de 2021 indicavam que o conjunto composto pela tampa de alimentação, cilindro e tampa de descarga se encontrava em ótimo estado, sem evidências visíveis de desgaste anormal. Além disso, o grau de enchimento calculado para as condições observadas nesta inspeção

foi de 29,7 %. Vale destacar que os registros dos perfis foram obtidos por meio da realização de scanner 3D, garantindo maior confiabilidade para análise do moinho de bolas da fase 02.

Figura 24 – Registro da condição visual dos revestimentos: a) Tampa de alimentação; b) Tampa de descarga; c) e d) Revestimento do cilindro



Fonte: Adaptado de MPSA (2023).

Conforme demonstrado no quadro da Figura 25, onde fornece os dados sobre o revestimento do cilindro do moinho bolas, as inspeções realizadas no ano de 2022 apontaram que apesar da alta vida útil dos revestimentos, houve um desgaste preferencial nos pontos 4º, 5º e 6º anel, ou seja, no meio do moinho bolas para a descarga. Considera-se ainda, que o “desgaste pt 1” entende-se como altura máxima do *lifter* no ponto 1, enquanto “desgaste pt 2” refere-se a altura do vale no ponto 2.

Figura 25 – Informações e medidas de espessura do revestimento do cilindro do moinho bolas

Cilindro		Resumo do Status				Previsão	
		Data de Instalação	Taxa de Desgaste (mm/Mton)	Vida Restante (%)	Horas de Operação	Vida Útil total (horas)	Data estimada de Relineamento
Anel 01	Desgaste pt 1	01 Jul, 2008	0.18	30	86 174	121 640	27 Out, 2026
	Desgaste pt 2	01 Jul, 2008	0.54	33	86 174	128 241	25 Out, 2027
Anel 02	Desgaste pt 1	01 Jul, 2008	2.52	22	86 174	103 620	08 Fev, 2024
	Desgaste pt 2	01 Jul, 2008	3.06	28	86 174	106 269	03 Jul, 2024
Anel 03	Desgaste pt 1	01 Jul, 2008	0.72	25	86 174	101 638	22 Out, 2023
	Desgaste pt 2	01 Jul, 2008	0.54	42	86 174	142 468	16 Dez, 2029
Anel 04	Desgaste pt 1	01 Jul, 2008	1.08	35	86 174	108 706	14 Nov, 2024
	Desgaste pt 2	01 Jul, 2008	3.24	17	86 174	98 713	14 Mai, 2023
Anel 05	Desgaste pt 1	01 Jul, 2008	0.90	33	86 174	105 722	02 Jun, 2024
	Desgaste pt 2	01 Jul, 2008	1.26	21	86 174	97 691	18 Mar, 2023
Anel 06	Desgaste pt 1	01 Jul, 2008	2.16	22	86 174	102 267	25 Nov, 2023
	Desgaste pt 2	01 Jul, 2008	1.62	24	86 174	99 242	12 Jun, 2023

Fonte: Dados internos da MPSA (2022).

A partir dos dados de projeto, o moinho de bolas da fase 02 apresenta dimensões com 21 pés de diâmetro (*in side shell*) por 32 pés de comprimento (*in side shell*), possuindo uma relação A/B de novos revestimentos de 3,0, com um ângulo de ataque equivalente a 31° graus e uma área de transporte de massa com 15.874 milímetros quadrados (HYDRO, 2008). Levando em consideração estas informações, a Tabela 3 abaixo exhibe os resultados das medições dos parâmetros geométricos executados pela Metso Outotec.

Tabela 3 – Exemplo da relação A/B, ângulo de ataque e área de transporte estimados para o revestimento do moinho bolas da usina 02

Anel	Relação A/B	Ângulo de Ataque (°)	Área de Transporte (mm ²)
1	2,66	48	16.692
2	3,50	63	11.986
3	3,04	59	14.857
4	2,32	63	15.350
5	3,42	68	13.425
6	3,30	68	12.508

Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

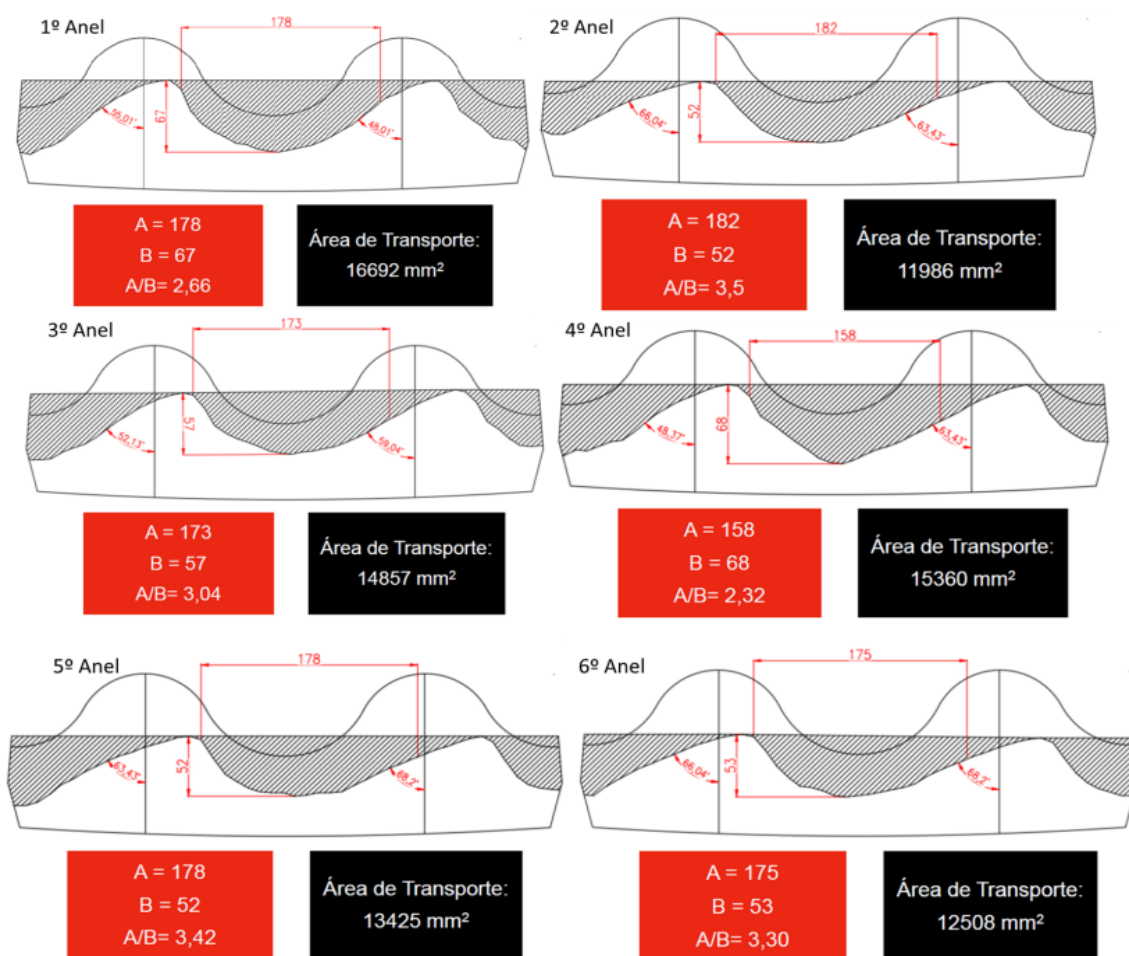
Com base nos três indicadores apresentados na Tabela 3, verificou-se que o primeiro anel não apenas contribui no aumento da potência no moinho, mas também é responsável por movimentar uma carga de massa superior à capacidade nominal, ao mesmo tempo em que demonstra desempenho positivo no lançamento de bolas. Ao analisarmos o segundo anel, é perceptível que ele influencia menos a potência, ergue menos carga, com uma área de transporte equivalente a 11.986 mm², e possui baixa aptidão de lançamento de bolas. Por outro lado, o terceiro anel exibe um perfil geométrico equilibrado em relação a esses dois últimos. No entanto, o quarto anel apesar de demonstrar eficiência no levantamento da carga, aumenta a potência do moinho e apresenta baixa capacidade no levantamento de corpos moedores.

Observando o perfil do 5º e 6º anéis, nota-se que esses anéis exerceram menos potência, com baixíssimas competências para elevar corpos moedores, assim como cargas, com um ângulo de ataque de 68º graus. Além disso, constata-se que o 5º anel apresenta um desgaste mais acentuado, influenciando negativamente no tempo de vida útil.

Desse modo, considerando as taxas de desgaste e de processamento das análises, verificou-se que para assegurar a garantia da integridade do corpo do moinho, era necessário realizar a troca dos revestimentos até setembro do ano de 2023.

Diante do exposto, a Figura 26 evidencia as medições realizadas no cilindro do moinho de bolas, permitindo-nos avaliar tanto o padrão de desgaste no revestimento do cilindro como a área de transporte do material, identificada pelas hachuras. Adicionalmente, a dimensão A representa a distância entre as costas do *lifter* até o centro da face do *lifter* subsequente no revestimento, enquanto B indica a altura do vale até o pico do revestimento no moinho de bolas.

Figura 26 – Medições dos parâmetros geométricos de desgaste dos revestimentos do cilindro

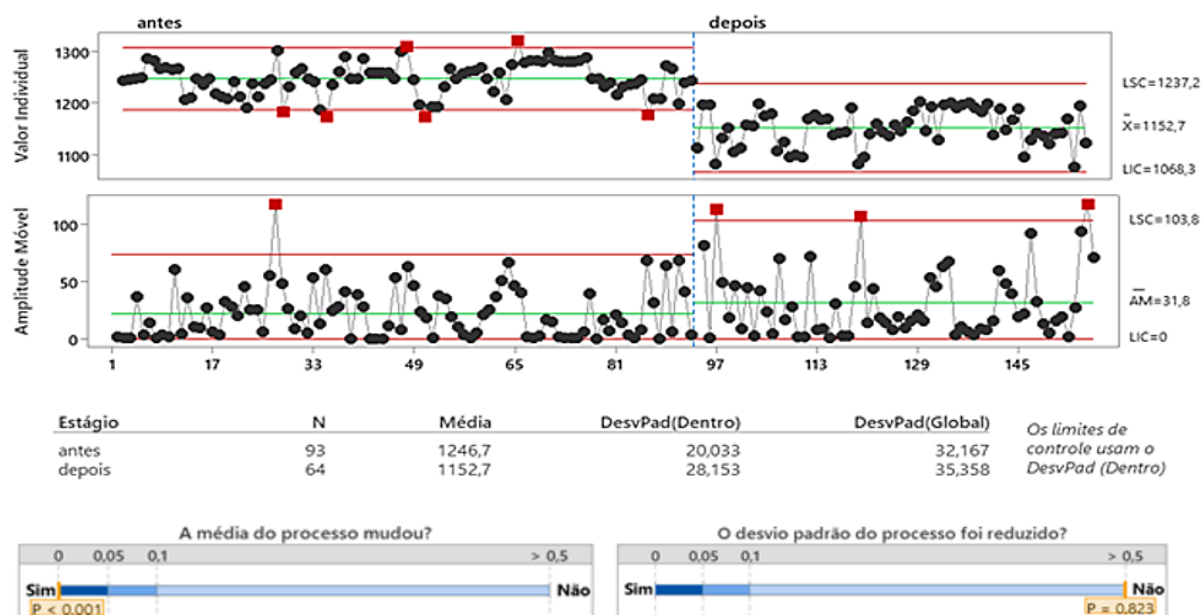


Fonte: Dados internos da MPSA (2022).

5.4. Análise dos indicadores na fase 02 da planta de beneficiamento

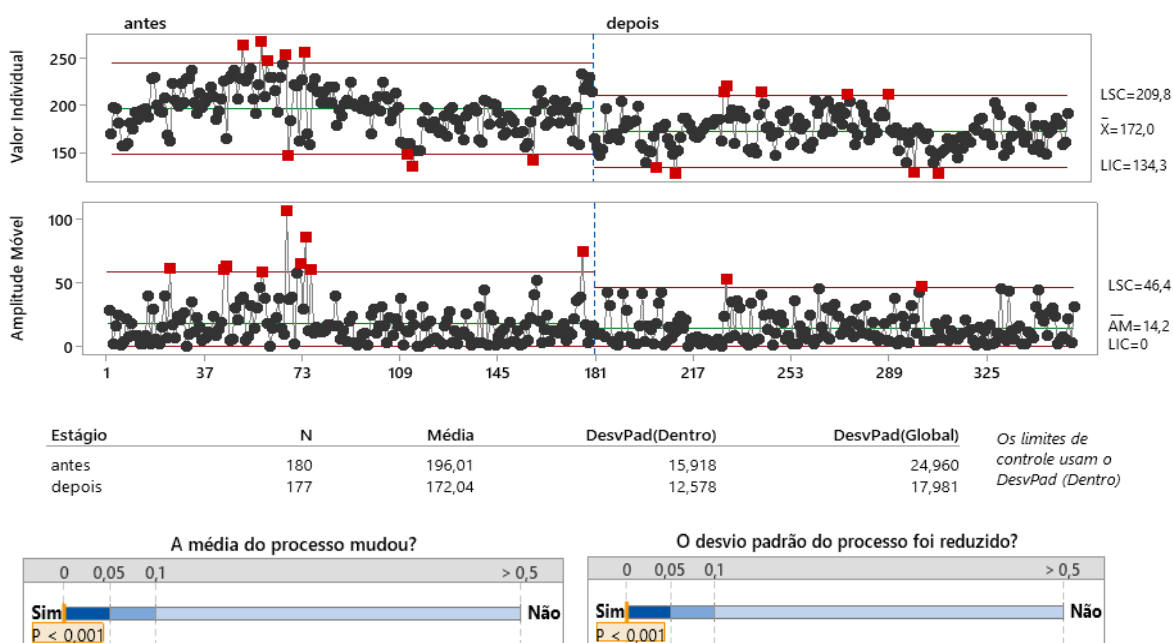
Como parte de uma análise adicional neste estudo, examinou-se alguns indicadores que poderiam influenciar o afinamento da curva granulométrica na moagem. O gráfico exibido na Figura 27 representa o desempenho da taxa de alimentação na usina 02, enquanto a Figura 28 ilustra a taxa de pebbles (alimentação da rebitagem), permitindo a comparação entre os dois momentos, ou seja, antes e depois da substituição do revestimento no moinho.

Figura 27 – Comparativo entre antes e depois da taxa de alimentação na fase 02 após troca do revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Figura 28 – Comportamento da taxa de pebbles na fase 02 antes e após mudança do revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

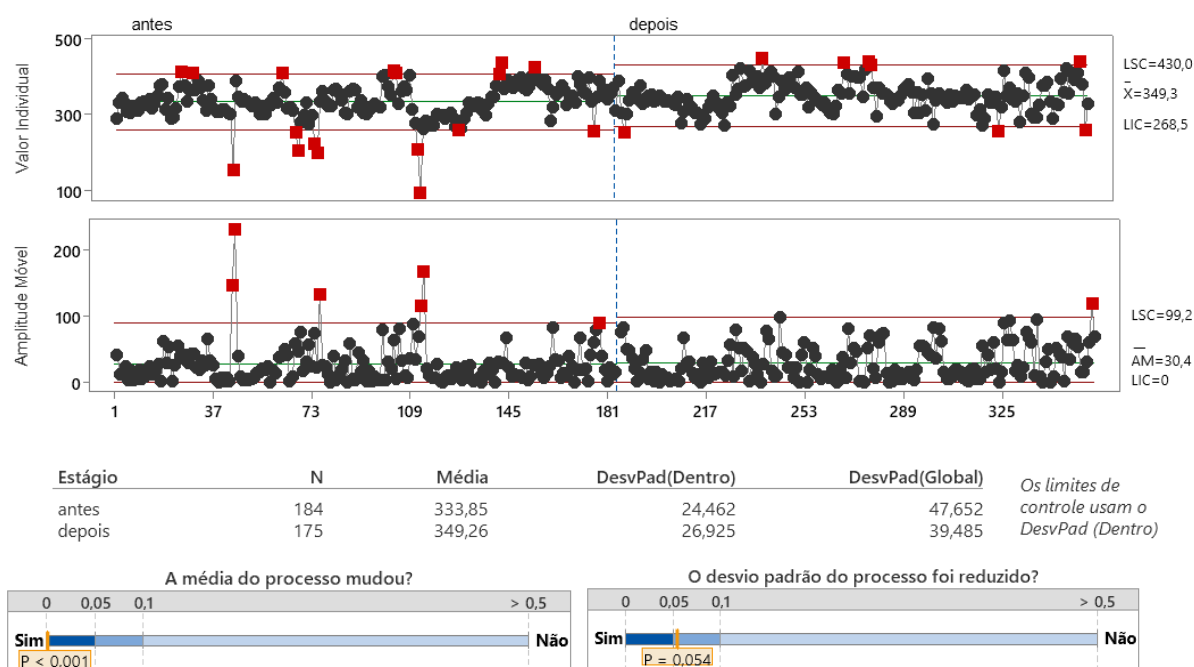
A partir da análise gráfica apresentado na Figura 27, é evidente uma mudança estatisticamente relevante no processo. Houve uma redução média considerável, indicando uma redução na taxa de alimentação da fase 02 após a

substituição do revestimento. Anteriormente, a média da taxa era de 1.246,7 t/h, entretanto, após a substituição, a média reduziu para 1.152,7 t/h, o que representa uma diferença de 94 toneladas por hora. Além disso, os resultados também refletem uma redução de cerca de 22,1 % no desvio padrão após a alteração.

Observando a Figura 28, é notável uma significativa redução na média da taxa de pebbles. Considerando o período anterior, ao qual a média era de 196,01 t/h, houve uma redução estatisticamente relevante em comparação com os valores atuais, demonstrando uma média de 172,04 t/h, ao qual registra-se também uma redução de 21,05 % no desvio padrão.

Comparando as informações apresentadas, podemos concluir que esta mudança é resultado do aumento da carga circulante no moinho de bolas, visto que a ineficiência da moagem e do trommel (peneira rotativa que atua na separação por tamanho de partículas) estava elevando a carga circulante para patamares acima do ideal. Com isso, mediante o gráfico apresentado na Figura 29, podemos observar o comportamento da carga circulante da moagem após as mudanças realizadas.

Figura 29 – Análise da carga circulante no moinho de bolas antes e posterior a substituição de revestimento



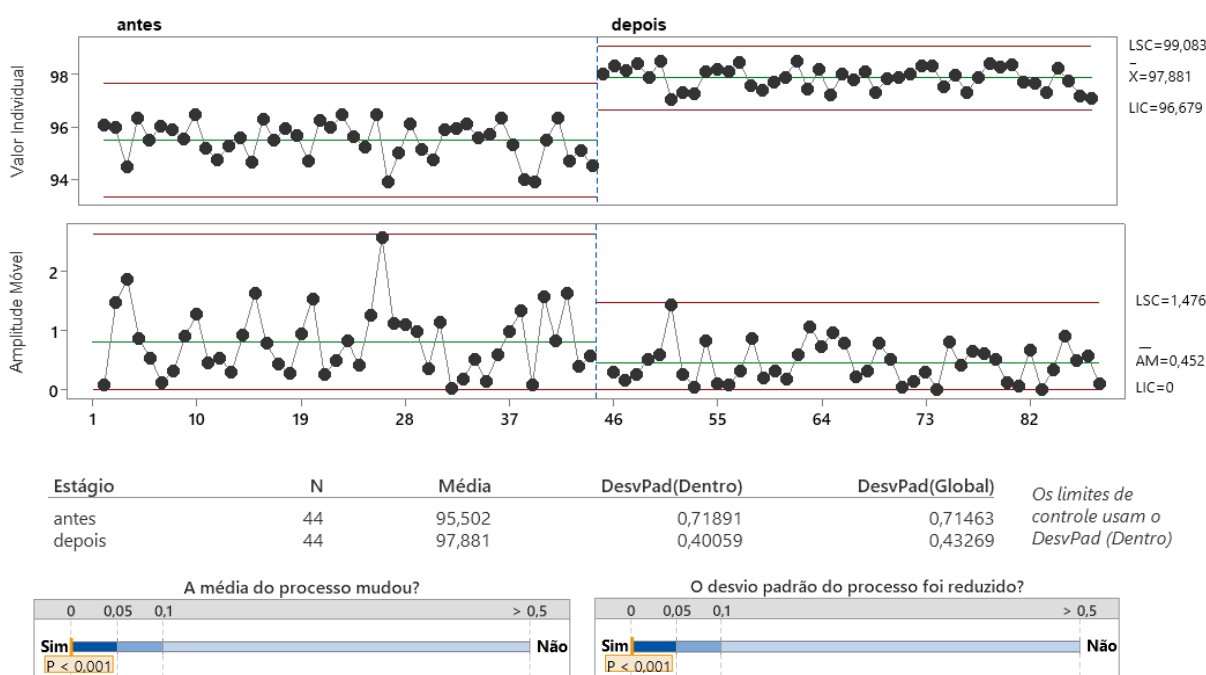
Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Ao analisarmos os dados considerados, observa-se que após a mudança na moagem, a média é significativamente maior, mostrando que houve um aumento de 15,41 % de carga circulante. Isso pode ser explicado pelo afinamento da curva

granulométrica do *undersize* do PAF, ao qual com base no comportamento estatístico de processo realizados anteriormente, em aproximadamente 96 % do tempo a moagem trabalha com a carga circulante acima do ideal, com valores médios de 340 %, diferentemente do que preconizava o projeto, com uma capacidade de 215 %. Assim, este comportamento influencia diretamente na diminuição das taxas e, conseqüentemente, na redução da produção.

Em uma outra abordagem, analisou-se estatisticamente o desempenho da granulometria do produto gerado da rebitagem, visto que as partículas influenciam diretamente no processo de moagem. A Figura 30 a seguir, apresenta o gráfico do comportamento do produto da rebitagem nos diferentes períodos de substituição do revestimento.

Figura 30 – Comportamento do produto da rebitagem anterior e após troca do revestimento



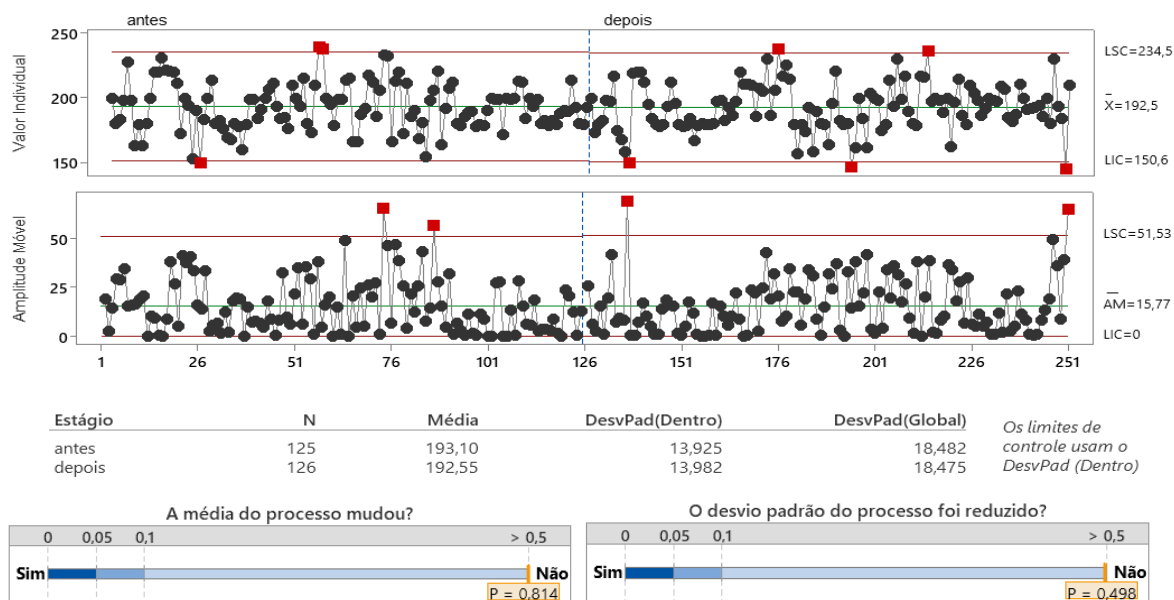
Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Com base nas análises realizadas, foi evidenciado que, após as modificações no processo, houve mudanças substanciais na média e no desvio padrão. Ou seja, isso indica que após as alterações mencionadas anteriormente, houve aumento na eficiência da rebitagem do material com tamanho superior a 12,7 mm (1/2 polegada). Aproximadamente 97 % do material é passante acumulado, o que representa um aumento de 2,38 % em relação ao valor anterior.

Considerando estatisticamente que o valor-p é menor que 0,05, dessa forma, sofreu um deslocamento. Esta consequência diz respeito à redução da taxa de pebbles, resultando em um impacto positivo em uma maior eficiência para o equipamento trabalhar.

Tendo em vista o impacto de afinamento da curva granulométrica do produto final na usina 02, realizou-se uma avaliação onde a Figura 31 a seguir mostra o gráfico comparativo entre o antes e depois do aporte de massa do *underflow* do espessador de concentrado, ao quais analisou-se as eventuais mudanças no circuito.

Figura 31 – Comparativo do aporte de massa no *underflow* de espessador concentrado entre antes e depois as mudanças realizadas no revestimento

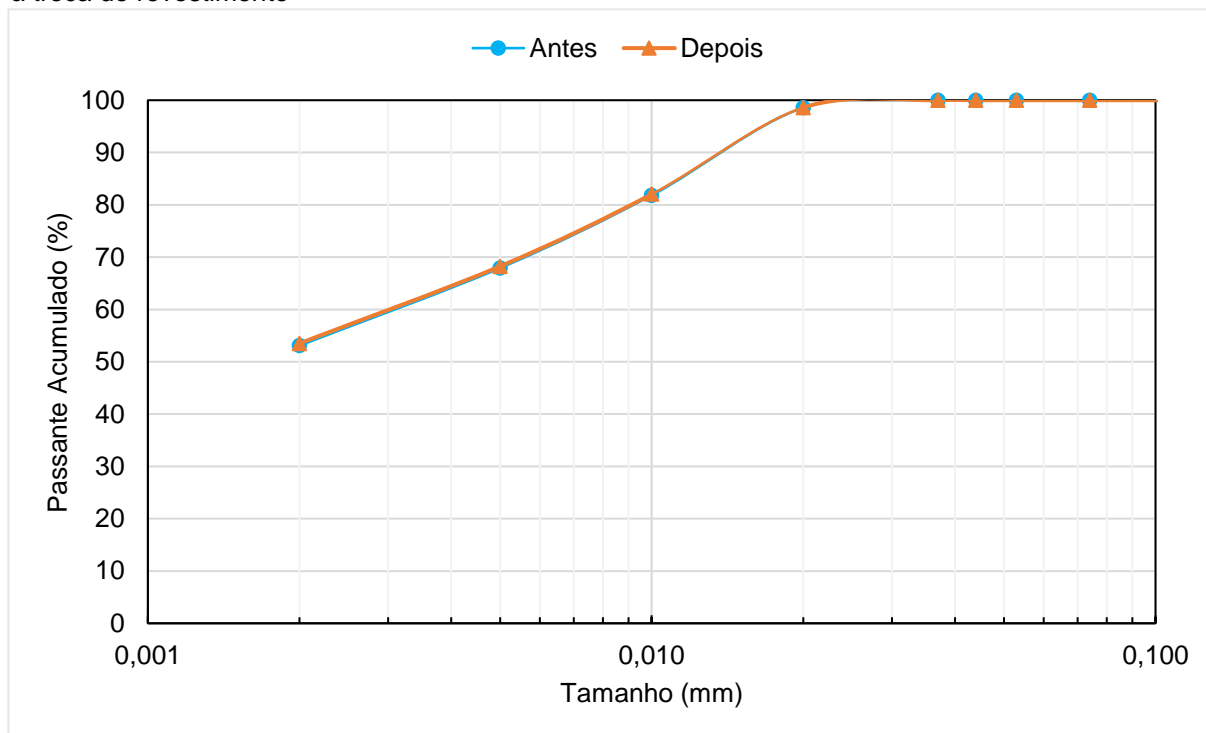


Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

A partir dos dados apresentados acima, pode-se observar um comportamento estável, sugerindo que a média do processo não sofreu mudanças significativas. Em outras palavras, o processo anterior permaneceu em níveis superiores aos registrados no período posterior à substituição do revestimento. Portanto, não houve alteração substancial neste processo, o que pode ser atribuído à granulometria do produto da usina. É importante notar que, se houvesse um afinamento na curva granulométrica do produto final da fase 02, isso se refletiria em um aumento no aporte de massa, uma vez que o espessador de concentrado desempenha um papel significativo na composição do produto da usina.

Aliado ao fato levantado anteriormente, observou-se a granulometria do espessador de concentrado, entendendo se haveria alguma influência com as possíveis mudanças no aporte de massa do *underflow*. A Figura 32 abaixo mostra a curva granulométrica do *underflow* de espessamento concentrado de acordo com os dados obtidos.

Figura 32 – Curva granulométrica do *underflow* espessador de concentrado da usina 02 antes e depois à troca do revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

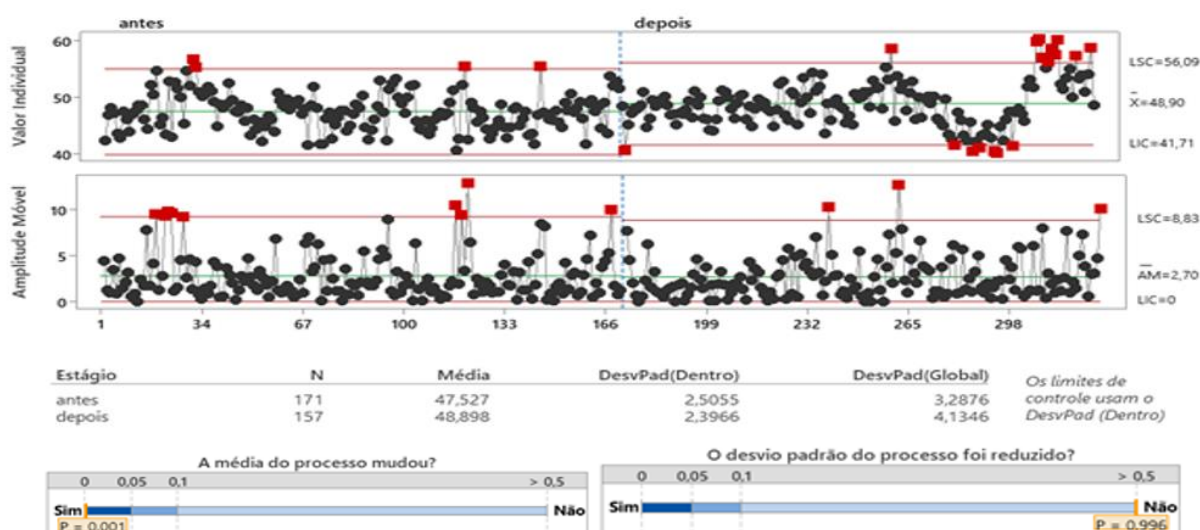
Considerando que um maior aporte de massa para composição do produto final da usina poderia refletir no *underflow* de concentrado, e conseqüentemente na mudança significativa da qualidade física, avaliando o gráfico da Figura 32 notamos que não houve mudança na curva granulométrica, sendo o circuito estável. Entendendo que não houve mudanças rígidas, concluiu-se que a granulometria do material do *underflow* permaneceu inalterada. As informações relacionadas à distribuição granulométrica estão disponíveis no Apêndice E.

5.5. Influência dos parâmetros operacionais do moinho de bolas

Analisando alguns indicadores cruciais no contexto do circuito do moinho de bolas, investigou-se possíveis efeitos na porcentagem de sólidos durante a

moagem. A Figura 33 representa o gráfico do comportamento da porcentagem de sólidos no moinho de bolas, permitindo a análise de como esse indicador varia ao comparar os períodos que precedem e sucedem as mudanças.

Figura 33 – Desempenho da porcentagem de sólidos no moinho de bolas na mudança de revestimento

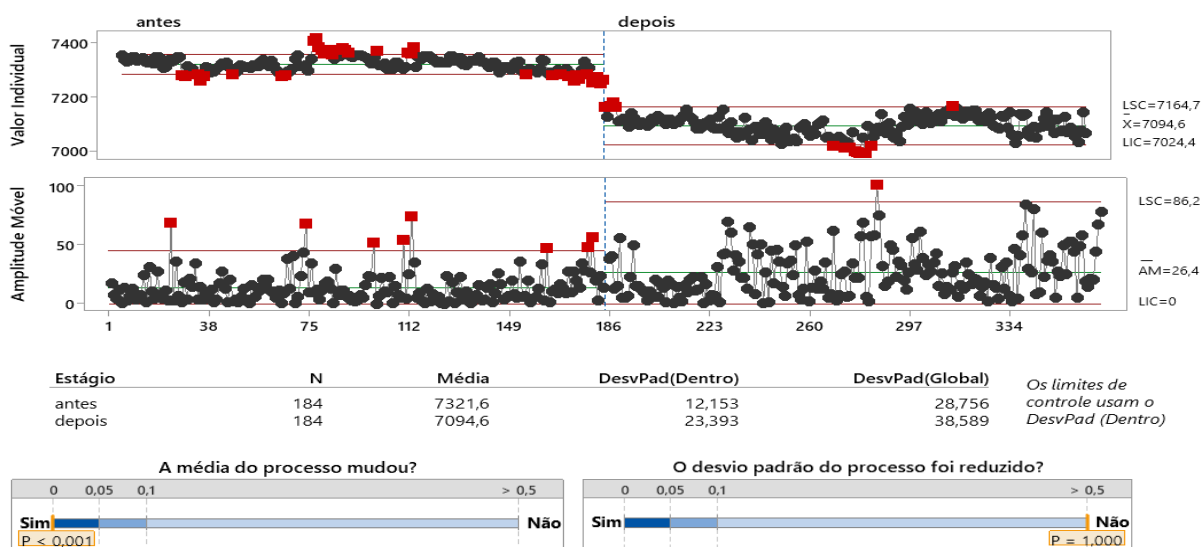


Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Os resultados obtidos com os procedimentos adotados para a análise indicam um aumento na porcentagem de sólidos no moinho de bolas. Com a substituição do revestimento, a média subiu para cerca de 49 %, o que indica um aumento de 1,37 % em comparação com o período anterior. Embora essa média se diferencie do valor ideal de 70 % preconizado pelo projeto, as análises estatísticas revelam uma melhoria nesse indicador, visto que aumentar a porcentagem de sólidos demonstra uma melhora na eficiência de moagem e uma considerável redução no consumo de bolas. O fato mencionado pode ser compreendido pelo ajuste da planta de beneficiamento priorizando a qualidade química do produto, e também elevando a porcentagem de sólidos no circuito da ciclonação secundária de finos, reduzindo o diâmetro do ápex para um menor diâmetro, ou seja, substituindo de 6 polegadas para 5 polegadas.

Seguindo a linha de abrangência, avaliou-se também como a potência deste equipamento se comportaria após as mudanças ocasionadas pela troca do revestimento. Na Figura 34 a seguir é ilustrado o gráfico estatístico da potência do moinho de bolas, pelo que mostra o comportamento da potência de operação do moinho em períodos distintos à troca.

Figura 34 – Comportamento da potência do moinho de bolas na troca do revestimento

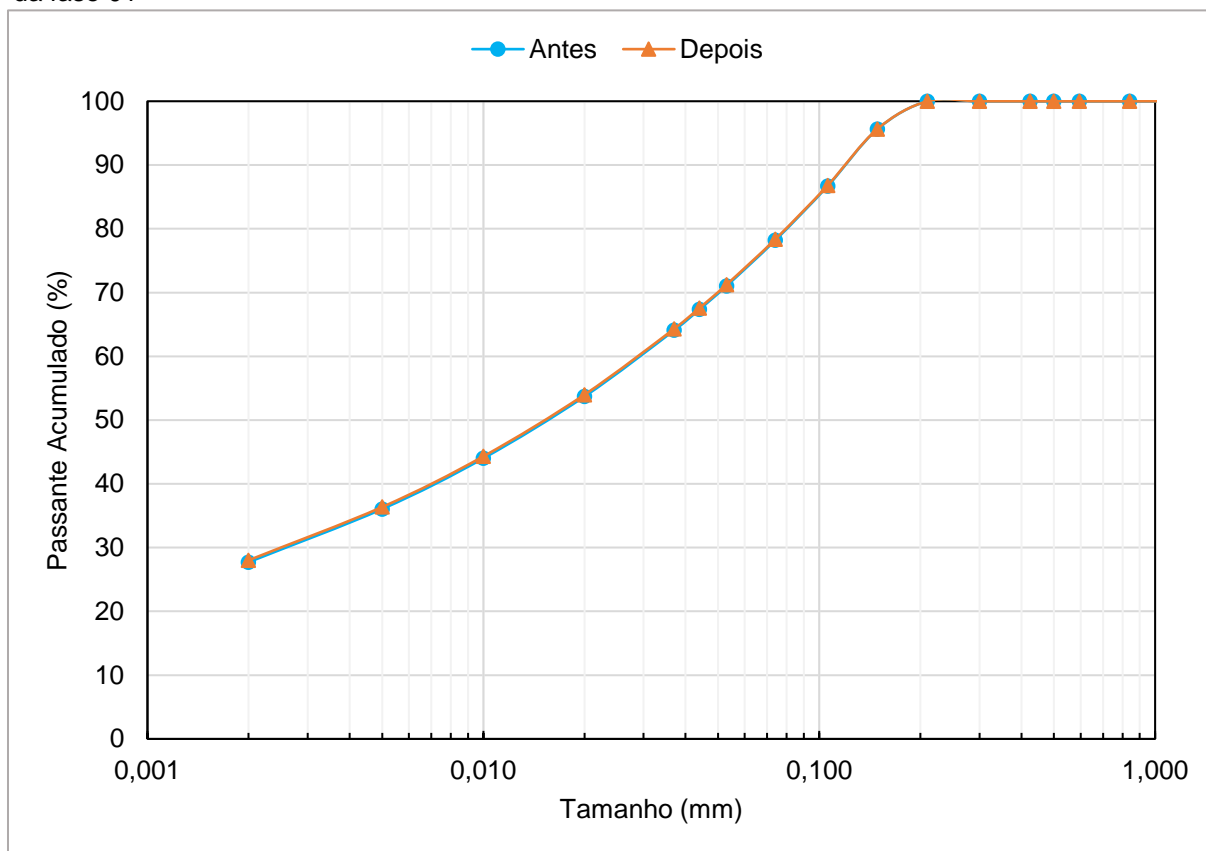


Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

A partir das análises observadas, fica evidente uma significativa diminuição na média da potência de operação no período posterior à substituição. Nesse contexto, a diferença registrada entre os dois momentos avaliados foi de 227 kW. Essa discrepância entre os dois intervalos de tempo está relacionada ao aumento da capacidade de levantamento do material após a troca do revestimento. Com essa mudança, possibilitou a desagregação de material no revestimento, uma vez que o revestimento desgastado estava dificultando a liberação de forma eficaz no processo, visto que o revestimento estava desgastado. Isso proporcionou em um maior efeito no regime de cascadeamento de polpa e corpos moedores, contribuindo para o menor consumo de energia no moinho de bolas, cumprindo deste modo o objetivo de melhorar essa situação.

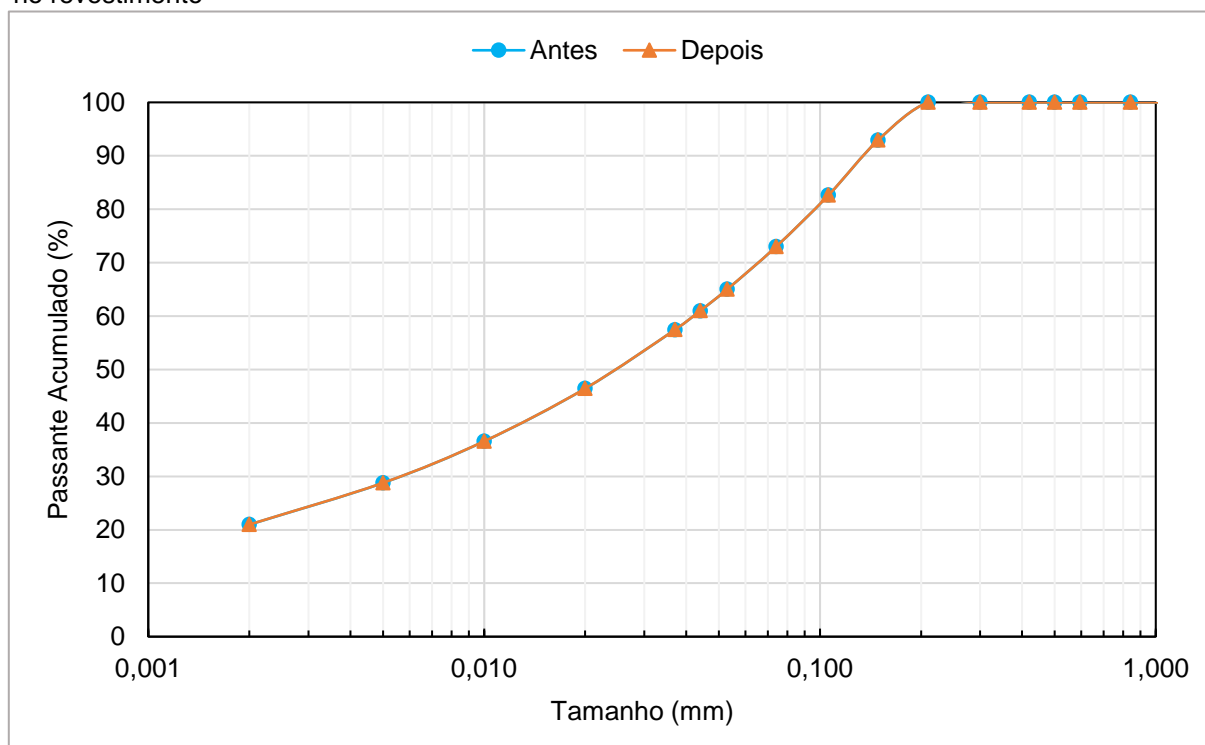
Como estudo complementar desta observação, conduziu-se uma análise estatística abrangente dos produtos da moagem e final da usina, ambos pertencentes à fase 1 do processo de beneficiamento. O objetivo deste foi avaliar se as características do minério ROM proveniente da mina exerciam influência sobre a curva granulométrica do processo. Nesse sentido, a Figura 35 ilustra o gráfico da curva granulométrica analisada no *overflow* da ciclonação de classificação, e a Figura 36 expõe o gráfico de distribuição granulométrica do produto final da fase 01, comparando os dois gráficos em função do antes e depois à substituição do revestimento no moinho de bolas.

Figura 35 – Curva granulométrica do *overflow* (produto da moagem) na ciclonação de classificação da fase 01



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Figura 36 – Curva granulométrica do produto final da fase 01 entre dois períodos distintos à mudança no revestimento



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2023).

Como resultado das análises apresentadas nos gráficos, é evidente que as curvas granulométricas mencionadas anteriormente não sofreram alterações significativas.

Isso indica que as granulometrias entre os dois momentos a troca do revestimento são semelhantes. Mesmo que houvesse uma modificação química na alimentação da planta de beneficiamento, isso não afetaria diretamente o desempenho do moinho de bolas, uma vez que o equipamento recebe o minério "lavado", ou seja, processado e enriquecido, proveniente das etapas operacionais anteriores.

Desta maneira, levando em considerações os eventuais efeitos, rejeitou-se a hipótese que o material alimentado nas duas fases do beneficiamento tenha contribuído para o afinamento da curva granulométrica do produto.

As informações referentes à distribuição granulométrica da Figura 35 podem ser consultadas no Apêndice F e distribuição de tamanho de partículas da Figura 36 no Apêndice G, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

Após a conclusão deste trabalho, podemos afirmar que ocorreu um afinamento substancial na curva de distribuição granulométrica do produto resultante da moagem (*undersize* do peneiramento de alta frequência) após a troca do revestimento. Análises adicionais revelaram que a redução tanto na taxa de alimentação da usina quanto na taxa de alimentação da rebitagem é evidenciada pelo aumento da carga circulante.

Foram obtidos benefícios significativos devido à redução de potência, que passou de 7.321,6 kW para 7.094,6 kW, visto que o desgaste dos revestimentos do cilindro contribui com o consumo de energia. Para eliminar a influência da qualidade da alimentação proveniente das pilhas, examinou-se a qualidade física do produto da fase 01 (produto final e produto da moagem). No entanto, essa hipótese foi descartada, pois não se percebeu nenhum efeito. Adicionalmente, a configuração de dosagem de bolas não favorecia a moagem de materiais grosseiros. Ao analisar o desgaste do revestimento ao longo da vida útil do moinho de bolas, notou-se que o anel 05, em particular, apresentava maior desgaste, o que contribui para a antecipação da sua troca.

Por último, ao levar em conta a substituição dos revestimentos ocorrida na transição dos meses de janeiro e fevereiro de 2023, em relação à eficiência do processo de moagem, observou-se uma melhoria significativa, resultando em um aumento de 16,84 % na eficiência na malha de 0,5 mm (32 mesh). Após a conclusão deste estudo, é possível afirmar que seu objetivo foi plenamente alcançado, proporcionando resultados satisfatórios dentro da planta de beneficiamento da Mineração Paragominas S.A.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**:informação e documentação: citações em documentos. Rio de Janeiro. 2018.

BERALDO, José Luiz. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blucher, 1987. 143 p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/371580749/Moagem-de-Minerios-Em-Moinhos-Tubulares-Beraldo-1987>. Acesso em: 27 set. 2023.

BOND, F. C. **The Third Theory of Comminution**. [S. l.]: AIME Trans., 1952. v. 193,484 p. Também em Mining Engineering, Mayo.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antonio Eduardo C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**: Britagem, Peneiramento e Moagem. São Paulo: Oficina do Texto, 2012. v. 3.

CHAVES, A. P. *et al.* **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 2. ed. [S. l.]: SIGNUS, 2002. v. 1.

CHAGAS, Tays Torres Ribeiro das. **A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química e microestrutura**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Ouro Preto, 2008. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/>. Acesso em: 5 out. 2023.

DONDA, J. D.; ROSA, A. C. **A Lei da Moagem**: comprovação para minério de Ferro. 1. ed. Ouro Preto: Ed L&E Graphar, 2014. v. 1.

DONDA, J. D. **Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas**. 2003. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

DURMAN, R. W. Progress in abrasion-resistant materials for use in comminution processes. In: DURMAN, R. W. **International Journal of Mineral Processing**. [S. l.: s. n.], 1988. v. 22, p. 381-399. ISBN 0301-7516. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(88\)90074-9](https://doi.org/10.1016/0301-7516(88)90074-9). Acesso em: 24 out. 2023.

FIGUEIRA, Hedda Vargas O.; LUZ, Adão B. da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. Britagem e Moagem. *In*: LUZ, Adão B. da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143-211.

FORTES, F. F.; GONÇALVES, D. R.; DA SILVA, B. C. R.; PEREIRA, C. A. Representatividade estatística de uma amostra de minério de ferro para ensaios de bancada. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 24., 2011, Salvador. **Artigo** [...] Ouro Preto: [s. n.], 2011. p. 649-655. Disponível em: [2130 - Fortes, F. F.- REPRESENTATIVIDADE ESTATÍSTICA DE UMA AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO PARA ENSAIOS DE BANCADA.pdf \(entmme.org\)](#). Acesso em: 18 out. 2023.

GOÉS, Maria Alice C. de; LUZ, Adão Benvindo da; POSSA, Mario Valente. AMOSTRAGEM. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 2, p. 23-44.

GUPTA, Ashok; YAN, Denis S. **Mineral Processing Design and Operations: An Introduction**. 2. ed. Australia: Elsevier B.V., 2016. 882 p. ISBN 978-0-444-63589-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01236-1>. Acesso em: 10 out. 2023.

GY, Pierre M. **Sampling of particulate materials, theory and practice**. Amsterdam: Developments in Geomathematics 4, Elsevier, 431p. 1982.

GY, Pierre. **Sampling for analytical purposes**. [S. l.]: John Wiley & Sons, West Sussex, England, 1998.

HUKKI, R. T. **Minerals beneficiation: proposal for a solomonic settlement between the theories of Von Rittinger, Kick, and Bond**. New York: AIME Transactions, 1961. v. 220, p. 403-408.

HYDRO. Hydro, 2023. **Mineração Paragominas**. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/>. Acesso em: 11 set. 2023.

HYDRO. História & Perfil. Não Publicado.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/paragominas/panorama>. Acesso em: 11 set. 2023.

JÚNIOR, Leno Charles de F. **Avaliação do Desempenho de Moinhos de Bolas no Processo de Beneficiamento de Grafita**. 2018. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas.) - Departamento De Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://demin.ufmg.br/tcc_listagem.php. Acesso em: 18 set. 2023.

KELLY, Errol G.; SPOTTISWOOD, David J. **Introduction to Mineral Processing**. 1. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons Inc., 1982. 516 p. ISBN 0471033790.

KICK, F. [S. l.]: Dinglers Polytechnisches Journal, 1883. p. 247

LYNCH, A.J. **Mineral Crushing and Grinding Circuits: Their Simulation, Optimisation, Design, and Control**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V, 1985. v. 1, 354 p.

MACHADO, Marcela Vieira Caixeta. **Estudo experimental e numérico da operação de moagem em um moinho de bolas com suspensores**. 2020. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29590>. Acesso em: 21 set. 2023.

MARQUES, Renato da Silva. **METODOLOGIA PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE MINÉRIO E DESTINAÇÃO DE BLOCOS DE LAVRA USANDO RAIOS-X**. 2016. 150 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral.) - Universidade Federal do Pampa, Campus de Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, 2016. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/ppgem/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

MAZZINGHY, Douglas Batista. **Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral.) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: https://ppgem.eng.ufmg.br/diss_listagem.php. Acesso em: 1 nov. 2023.

MEADERS, R. C.; MCPHERSON, A. R. **Technical design of autogenous mills**. *Min. Eng.* New York: [s. n.], 1964. p. 81-84. v. 16.

METSO MINERALS, M. **Basics in mineral processing**. 11. ed. [S. l.]: Metso Minerals, 2018. 334 p. Disponível em: <https://www.metso.com/>. Acesso em: 31 out. 2023.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. 6. ed. Sorocaba: Metso Minerals, 2005.

MOLLER, Thorsten K.; BROUGH, R. **Optimizing the performance of a rubber-lined mill**. *Mining Engineering*, [S. l.], v. 41, p. 849-853, 1989. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/>. Acesso em: 19 out. 2023.

NAPIER-MUNN, T. J.; MORREL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation**. Australia: JRM/University of Queensland, 1999. Disponível em: [Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation \(911metallurgist.com\)](http://www.911metallurgist.com). Acesso em: 15 set. 2023.

OLIVEIRA, Maria Lúcia M. de; AQUINO, José Aury de (ed.). **INTRODUÇÃO**. In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A.; BRAGA, Paulo Fernando A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 1, p. 3-34. ISBN 978-85-61121-02-0.

PEÇANHA, Ricardo Pires. **Sistemas particulados**: Operações unitárias envolvendo partículas. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 424 p. ISBN 978-8535277210. Disponível em: https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000814302&local_base=UFR01. Acesso em: 18 set. 2023.

RODRIGUES, Cecília da Conceição. **Dimensionamento de moinho de bolas utilizando o método do balanço populacional**. 2020. 57 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas.) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/>. Acesso em: 24 out. 2023.

SAMPAIO, João Alves; JÚNIOR, Homero Delboni. Cominuição: Princípios da cominuição. In: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina A.; BRAGA, Paulo Fernando A. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 4, p. 107-131. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt-br>. Acesso em: 18 out. 2023.

SAMPAIO, João Alves; DA SILVA, Fernanda Arruda N. G. Análise Granulométrica por peneiramento. In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A.; BRAGA, Paulo Fernando A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 3, p. 55-72. ISBN 978-85-61121-02-0.

SILVA, Tulyo Maia. **Desgaste do revestimento do moinho de bolas da empresa Vale Fertilizantes S.A. unidade Catalão - GO**. 2013. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás - Campus Catalão, Catalão, 2013. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/>. Acesso em: 28 set. 2023.

SOUZA, Gabriela Brito de *et al.* **PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE O CRESCIMENTO POPULACIONAL, FROTA VEICULAR E O APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE PNEU TRITURADO NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO - CIMENTO**. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 10., 2019, João Pessoa. Anais [...]. Paragominas: Instituto Venture Para Estudos Ambientais, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339433327_PESQUISA_BIBLIOGRAFICA_SOBRE_O_CRESCIMENTO_POPULACIONAL_FROTA_VEICULAR_E_O_APROVEITAMENTO_DO_RESIDUO_DE_PNEU_TRITURADO_NA_PRODUCAO_DE_TIJOS_DE_SOLO_-CIMENTO. Acesso em: 11 set. 2023.

TAGGART, Arthur F. **Handbook of Mineral Dressing**: Ores and Industrial Minerals. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1945.

THEORY of sampling (TOS) versus measurement uncertainty (MU) – A call for integration. In: ESBENSEN, Kim H.; WAGNER, Claas. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**. [S. l.]: Elsevier Science, 2014. v. 57, p. 93-106. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.02.007>. Acesso em: 28 out. 2023.

VARGAS, Flávia Guimarães R. G. C. **Avaliação do desempenho de diferentes perfis de revestimento e seu impacto na moagem W de Vazante**. 2019. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-02022021-170532/publico/>. Acesso em: 27 fev. 2023.

VIANNA, Igor Quaresma. **Inovação Tecnológica no Processo de Cominuição da Pelotização**: Substituição da moagem a úmido por multiprensagem a umidade natural. 2021. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2021.

VON RITTINGER, R. P. **Text Book of Mineral Dressing**. Berlin: Ernst and Korn, 1867.

WILLS, Barry A.; NAPIER-MUNN, Tim J. **Mineral Processing Technology**: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 7. ed. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2006. 450 p. ISBN 0750644508.

WILLS, B. A.; ATKINSON, K. Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. *In*: WILLS, B. A.; ATKINSON, K. **Minerals Engineering**. 7. ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V, 1993. v. 6, p. 697-706. ISBN 0892-6875.

APÊNDICE A – EFICIÊNCIA POR FAIXA GRANULOMÉTRICA DO MOINHO DE BOLAS DA FASE 02 COM DADOS DE ROTINA E AMOSTRAGEM

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	MPSA Antes Eficiência por faixa (%)	MPSA Depois Eficiência por faixa (%)
1/4 pol.	6,35	100	100
1/2 pol.	12,50	100	100
20#	0,841	31,09	48,38
28#	0,600	29,42	45,63
32#	0,500	29,26	44,25
48#	0,300	25,96	40,56
65#	0,210	23,83	38,61
100#	0,149	21,91	36,55
150#	0,106	20,03	34,47
200#	0,074	18,13	32,33
270#	0,053	16,51	30,43
325#	0,044	15,65	29,41
400#	0,037	14,88	28,49

APÊNDICE B – COMPARATIVO DE EFICIÊNCIA POR FAIXA GRANULOMÉTRICA DO MOINHO DE BOLAS DA FASE 02

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	Dados Rotina Eficiência por faixa (%)	MPSA 2022 Eficiência por faixa (%)	MPSA ATUAL Eficiência por faixa (%)
1/2 pol.	12,50	100	100	100
1/4 pol.	6,25	-	-	100
10#	2,00	-	-	75,14
20#	0,841	48,38	31,09	53,10
28#	0,595	45,63	29,42	48,40
32#	0,500	44,25	29,26	46,11
48#	0,300	40,56	25,96	40,98
65#	0,210	38,61	23,83	37,74
100#	0,149	36,55	21,91	34,86
150#	0,106	34,47	20,03	32,11
200#	0,074	32,33	18,13	29,49
270#	0,053	30,43	16,51	27,20
325#	0,044	29,41	15,65	26,01
400#	0,037	28,49	14,88	24,96
20 µm	0,02	-	-	21,62
10 µm	0,01	-	-	18,44

APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO *UNDERSIZE* DA PENEIRA DE ALTA FREQUÊNCIA DA FASE 02

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	Passante “Antes” (%)	Passante “Depois” (%)	Diferença entre malhas (%)	Desvio Padrão
1/4 pol.	6,35	100	100	0	0
4#	4,76	100	100	0	0
6#	3,36	100	100	0	0
8#	2,36	100	100	0	0
10#	2,00	100	100	0	0
14#	1,41	100	100	0	0
20#	0,841	100	100	0	0
28#	0,595	100	100	0	0
32#	0,50	100	100	0	0
39#	0,43	99,84	99,87	0,03	0,02
40#	0,425	99,83	99,86	0,03	0,02
42#	0,39	99,53	99,81	0,29	0,20
48#	0,30	98,73	99,68	0,95	0,67
65#	0,21	93,98	98,08	4,2	2,90
100#	0,14	87,27	92,22	5,4	3,50
150#	0,106	78,91	84,29	6,4	3,80
200#	0,074	70,89	76,09	6,8	3,67
270#	0,053	62,52	67,68	7,6	3,65
325#	0,044	58,47	63,61	8,1	3,64
400#	0,037	56,40	60,73	7,1	3,06
20 µm	0,02	49,07	53,29	7,9	2,98
10 µm	0,01	37,90	41,28	8,2	2,39
5 µm	0,005	25,32	27,62	8,3	1,62
2 µm	0,002	9,25	10,08	8,2	0,58

APÊNDICE D – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO FINAL DA FASE 02

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	Passante “Antes” (%)	Passante “Depois” (%)	Diferença entre malhas (%)	Desvio Padrão
1/4 pol.	6,35	100	100	0	0
4#	4,76	100	100	0	0
6#	3,36	100	100	0	0
8#	2,36	100	100	0	0
10#	2,00	100	100	0	0
14#	1,41	100	100	0	0
20#	0,841	100	100	0	0
28#	0,595	99,80	99,82	0	0,02
32#	0,50	98,92	98,96	0	0,02
40#	0,42	95,95	96,12	0,2	0,12
48#	0,30	84,56	85,09	0,6	0,37
65#	0,21	72,65	73,07	0,6	0,30
100#	0,149	63,18	63,34	0,3	0,11
150#	0,106	54,01	53,92	-0,2	0,06
200#	0,074	46,94	46,79	-0,3	0,11
270#	0,053	40,21	39,91	-0,8	0,21
325#	0,044	37,29	36,91	-1,0	0,27
400#	0,037	35,19	34,76	-1,2	0,30
20 µm	0,02	28,56	28,12	-1,5	0,31
10 µm	0,01	22,09	21,82	-1,3	0,20
5 µm	0,005	15,16	14,95	-1,4	0,15
2 µm	0,002	6,19	5,96	-4,0	0,17

APÊNDICE E – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO *UNDERFLOW* DO ESPESSADOR DE CONCENTRADO DA FASE 02

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	Passante “Antes” (%)	Passante “Depois” (%)	Diferença entre malhas (%)	Desvio Padrão
1/4 pol.	6,35	100	100	0	0
4#	4,76	100	100	0	0
6#	3,36	100	100	0	0
8#	2,36	100	100	0	0
10#	2,00	100	100	0	0
14#	1,41	100	100	0	0
20#	0,841	99,99	99,99	0	0,
28#	0,595	99,57	99,66	0,1	0,06
32#	0,50	99,07	99,22	0,2	0,11
48#	0,30	97,11	97,35	0,2	0,17
65#	0,21	95,91	96,16	0,3	0,18
100#	0,149	94,82	95,08	0,3	0,18
150#	0,106	93,60	93,92	0,3	0,23
200#	0,074	92,21	92,63	0,5	0,30
270#	0,053	90,48	91,01	0,6	0,37
325#	0,044	89,40	89,97	0,6	0,40
400#	0,037	87,95	88,58	0,7	0,45
20 µm	0,02	78,47	79,32	1,1	0,60
10 µm	0,01	61,47	62,39	1,5	0,65
5 µm	0,005	41,20	41,97	1,8	0,54
2 µm	0,002	16,04	16,30	1,6	0,18

APÊNDICE F – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO DA MOAGEM DO CICLONE DE CLASSIFICAÇÃO NA FASE 01

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	Passante “Antes” (%)	Passante “Depois” (%)	Diferença entre malhas (%)	Desvio Padrão
1/4 pol.	6,35	100	100	0	0
4#	4,76	100	100	0	0
6#	3,36	100	100	0	0
8#	2,36	100	100	0	0
10#	2,00	100	100	0	0
14#	1,41	100	100	0	0
20#	0,841	100	100	0,	0
28#	0,595	99,91	99,97	0,1	0,04
32#	0,50	99,92	99,91	0,0	0,01
40#	0,425	99,58	99,77	0,2	0,13
48#	0,30	97,85	98,62	0,8	0,54
65#	0,21	92,91	94,58	1,8	1,18
100#	0,149	85,65	87,66	2,3	1,42
150#	0,106	76,22	78,37	2,7	1,52
200#	0,074	67,85	70,00	3,1	1,52
270#	0,053	59,55	61,64	3,4	1,48
325#	0,044	56,00	58,04	3,5	1,44
400#	0,037	54,49	55,55	1,9	0,75
20 µm	0,02	47,45	47,37	-0,2	0,06
10 µm	0,01	36,93	36,89	-0,1	0,03
5 µm	0,005	25,27	25,36	0,4	0,06
2 µm	0,002	10,11	10,35	2,3	0,17

APÊNDICE G – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PRODUTO FINAL DA FASE 01

Abertura de Malha	Tamanho (mm)	Passante “Antes” (%)	Passante “Depois” (%)	Diferença entre malhas (%)	Desvio Padrão
1/4 pol.	6,35	100	100	0	0
4#	4,76	100	100	0	0
6#	3,36	100	100	0	0
8#	2,36	100	100	0	0
10#	2,00	100	100	0	0
14#	1,41	100	100	0	0
20#	0,841	100	100	0	0
28#	0,595	99,24	99,37	0,1	0,09
32#	0,50	98,62	98,85	0,2	0,16
40#	0,42	97,47	97,92	0,5	0,32
48#	0,30	92,78	93,86	1,2	0,76
65#	0,21	84,70	85,85	1,3	0,81
100#	0,149	75,48	76,34	1,1	0,61
150#	0,106	65,13	65,67	0,8	0,38
200#	0,074	56,62	56,94	0,6	0,23
270#	0,053	48,51	48,58	0,1	0,05
325#	0,044	45,14	45,07	-0,2	0,05
400#	0,037	42,59	42,44	-0,4	0,11
20 µm	0,02	34,57	34,27	-0,9	0,21
10 µm	0,01	26,86	26,67	-0,7	0,13
5 µm	0,005	18,57	18,59	0,1	0,01
2 µm	0,002	7,76	7,91	1,9	0,11