

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

Mauro Lúcio Teixeira Júnior

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E DA UMIDADE NA
PERFORMANCE DAS PRENSAS DE ROLOS DA FERRO+ MINERAÇÃO**

Belo Horizonte
2025

Mauro Lúcio Teixeira Júnior

**EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E DA UMIDADE NA
PERFORMANCE DAS PRENSAS DE ROLOS DA FERRO+ MINERAÇÃO**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia Mineral e Meio Ambiente da Escola de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Linha de pesquisa: Tecnologia Mineral e Meio Ambiente

Orientação: Dr. Roberto Galéry

Belo Horizonte
2025

T266e

Teixeira Júnior, Mauro Lúcio.

Efeito da distribuição granulométrica e da umidade na performance das prensas de rolos da Ferro+ Mineração [recurso eletrônico] / Mauro Lúcio Teixeira Júnior. – 2025.

1 recurso online (79 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Galéry.

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de minas – Teses. 2. Tecnologia mineral – Teses. 3. Umidade – Minérios – Teses. 4. Materiais granulados – Teses. 5. Prensas mecânicas – Teses. 6. Cominuição (Beneficiamento de minérios) – Teses. I. Galéry, Roberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E DA UMIDADE NA PERFORMANCE DAS PRENSAS DE ROLOS DA FERRO+ MINERAÇÃO

MAURO LÚCIO TEIXEIRA JÚNIOR

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 28 de agosto de 2024.


Por:

 Documento assinado digitalmente
ROBERTO GALERY
Data: 29/08/2025 11:29:34-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Galery (UFMG) Orientador

 Documento assinado digitalmente
LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 29/08/2025 09:01:39-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Claudio Monteiro Montenegro (UFMG)

 Documento assinado digitalmente
LEONARDO JUNIOR FERNANDES CAMPOS
Data: 28/08/2025 11:10:20-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Junior Fernandes Campos (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de minha força e provedor das incontáveis bênçãos que tornaram possível a realização deste sonho. Esta etapa, muitas vezes considerada inalcançável, foi concretizada pela infinita graça divina. Para Deus, nada é impossível, e aqui estou eu, com o coração transbordando de gratidão por esta conquista.

A minha amada esposa, Hélia Márcia, e às nossas preciosas filhas, Maria Fernanda e Alice Cecília, meu mais profundo agradecimento pelo amor, compreensão e suporte incondicional durante os vários momentos em que minha presença foi limitada. Vocês foram minha maior motivação e inspiração para continuar.

Aos meus queridos pais, Mauro Lúcio Teixeira (*in memoriam*) e Lêda Maria Teixeira, e aos meus amados irmãos, Marcineia Lúcia Teixeira (*in memoriam*), Marcela Lúcia Teixeira e Marlon Lúcio José Teixeira, agradeço pelos valores que me ensinaram e pelo constante incentivo para perseguir meus objetivos sem perder o foco. Vocês são o alicerce de minha formação e resiliência.

Ao meu estimado mestre, Sr. José Eustáquio Vieira, é uma honra inenarrável poder aprender com você diariamente. Sua orientação e colaboração foram cruciais para o meu crescimento pessoal e profissional, permitindo que eu contribuísse para importantes entregas na mineração.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), minha eterna gratidão pela oportunidade e pelo apoio fundamental. Esta instituição foi um pilar essencial na minha jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Sr. Roberto Galéry, e a todos os professores que contribuíram de forma significativa ao longo desta jornada. Em especial, ao professor Luiz Cláudio, mestre que, além de transmitir uma sólida base de conhecimento, foi um verdadeiro mentor na construção e organização desta tese. Expresso minha sincera gratidão, reconhecimento e agradecimento por suas valiosas contribuições, pelas experiências compartilhadas e pela dedicação, que foram essenciais para a realização deste projeto.

RESUMO

A otimização da cominuição por prensas de rolos de alta pressão (HPGR) é essencial para a eficiência operacional na adequação granulométrica dos minérios de itabiritos. O uso de HPGR tem se mostrado uma alternativa promissora para redução granulométrica, porém desafios como a umidade do material e a presença de finos impactam o desempenho dos equipamentos. Nesse contexto, a avaliação e o aprimoramento do circuito de cominuição são fundamentais para garantir a continuidade operacional e maximizar a eficiência das prensas e da planta de tratamento. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho dos HPGR no circuito industrial e propor melhorias no processamento dos minérios atuais e futuros, identificando fatores que afetam a eficiência das prensas e propondo ajustes operacionais que aumentem a geração de frações finas ($<1,00$ mm), otimizando o desempenho do circuito de concentração subsequente. A metodologia envolveu mapeamento detalhado do processo industrial, identificação de etapas críticas, amostragens e análises granulométricas, além da caracterização do material processado. Também foram avaliados os efeitos da umidade, com registros fotográficos e documentação visual. Testes industriais, formação de *blends* e experimentos *in loco* permitiram propor alterações na rota de beneficiamento visando maior eficiência das prensas. Os resultados mostraram que a presença de finos ($<2,00$ mm) na alimentação e a umidade elevada reduzem a eficiência da cominuição. Em parceria com a equipe de P&D, um brainstorming identificou gargalos operacionais e estratégias de otimização. Verificou-se necessidade de aprimorar o peneiramento que antecede as prensas (PNs-08), pois o retorno de finos como carga circulante compromete o desempenho do circuito. Além disso, o aumento previsto da granulometria do ROM a partir de 2027 exigirá melhorias adicionais para evitar sobrecarga. A umidade excessiva foi confirmada como fator crítico, reduzindo a aderência do material aos rolos e a eficiência da moagem. Em síntese, o estudo amplia o entendimento sobre o uso de HPGR em escala industrial e fornece subsídios técnicos para decisões operacionais e estratégicas, reforçando a importância da integração entre pesquisa aplicada e prática industrial como fator essencial à sustentabilidade e competitividade do setor mineral.

Palavras-chave: tratamento de minérios; minério de ferro; processamento mineral; cominuição; prensa de rolos; HPGR; umidade; distribuição granulométrica.

ABSTRACT

The optimization of comminution through High Pressure Grinding Rolls (HPGR) is essential for operational efficiency in the particle size adjustment of itabirite ores. The use of HPGR has proven to be a promising alternative for particle size reduction; however, challenges such as material moisture and the presence of fines affect equipment performance. In this context, the evaluation and improvement of the comminution circuit are fundamental to ensuring operational continuity and maximizing the efficiency of both the presses and the processing plant. The objective of this study was to evaluate the performance of HPGR units in the industrial circuit and propose improvements in the processing of current and future ores, identifying factors that affect the efficiency of the presses and proposing operational adjustments that increase the generation of fine fractions (<1.00 mm), thereby optimizing the performance of the subsequent concentration circuit. The methodology involved detailed mapping of the industrial process, identification of critical stages, sampling and particle size analyses, as well as characterization of the processed material. The effects of moisture were also evaluated through photographic records and visual documentation. Industrial tests, blend formation, and in situ experiments made it possible to propose changes in the beneficiation route aimed at improving the efficiency of the presses. The results showed that the presence of fines (<2.00 mm) in the feed and high moisture content reduce comminution efficiency. In collaboration with the R&D team, a brainstorming session identified operational bottlenecks and optimization strategies. It was found that the screening stage preceding the presses (PNs-08) requires improvement, as the recirculation of fines as circulating load compromises the circuit's performance. Moreover, the expected increase in ROM particle size from 2027 onwards will require additional improvements to prevent circuit overload. Excessive moisture was confirmed as a critical factor, reducing material adhesion to the rolls and the grinding efficiency. In summary, the study broadens the understanding of HPGR application on an industrial scale and provides technical support for operational and strategic decision-making, reinforcing the importance of integrating applied research and industrial practice as a key factor for the sustainability and competitiveness of the mining sector.

Keywords: mineral treatment; iron ore; mineral processing; comminution; high pressure grinding rollers; HPGR; moisture; particle size distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação dos mecanismos de fratura de partículas e as distribuições de tamanho do produto resultante	16
Figura 2 - Mecanismo de fragmentação por abrasão.....	16
Figura 3- Mecanismo de fragmentação por compressão	17
Figura 4 - Mecanismo de fragmentação por impacto	18
Figura 5 - Relação entre energia e tamanho da partícula na cominuição	21
Figura 6 - Esquema de prensa de rolos atualmente	23
Figura 7 - Proteções utilizadas nas bandagens em geral: (a) <i>studs</i> ; (b) <i>edgeblocks</i>	24
Figura 8 - Ilustração do princípio básico do processo de cominuição em prensas de rolos, com a formação de um leito na zona de compressão com quebra autógena pelo princípio Inter partícula, ou seja, partícula-partícula.....	25
Figura 9 - <i>Cheekplate</i> com revestimento novo instalado	27
Figura 10 - Visão superior e lateral das bandagens com o <i>cheekplate</i> instalado.....	27
Figura 11 - Princípio de funcionamento de uma HGPR e compressão do leito de partículas..	28
Figura 12 - Comparação de operação de britadores de rolos e prensa de rolos	30
Figura 13- Fluxograma de processo	36
Figura 14- Fluxograma de amostragem.....	38
Figura 15 - Fluxograma para os testes com o granulado e misturas (<i>blends</i>) na prensa de rolos	40
Figura 16- Fluxograma de amostragem.....	48
Figura 17 - Origem: TC- 11.....	49
Figura 18 - Origem: Silo Sínter	49
Figura 19 - Umidade 4,04%	50
Figura 20 - Descarga da amostra TC-11.....	51
Figura 21- Umidade 12,79%	51
Figura 22- Descarga da amostra Silo Sínter	52
Figura 23 - TC-11 umidade 4,04%.....	52
Figura 24- Silo Sínter - umidade 12,79%.....	53
Figura 25- Origem: TC- 11.....	55
Figura 26- Origem: Silo Sínter	55
Figura 27- TC-11 – Umidade 6,0%.....	56

Figura 28- Silo Sínter - umidade 12,03%.....	56
Figura 29 - TC-11 – Umidade 5,03%.....	58
Figura 30 - Silo Sínter – Umidade tal qual 13,53%.....	58
Figura 31- Silo Sínter – após perda de umidade 9,0%	59
Figura 32 - TC-11 – Umidade 5,03%.....	59
Figura 33 - Silo Sínter – Umidade tal qual 13,53%.....	60
Figura 34 - Silo Sínter – após perda de umidade 9,0%	60
Figura 35- Granulado - Umidade 3,12%	62
Figura 36 - Sínter Feed + Granulado	62
Figura 37- Granulado - Umidade 3,12%	63
Figura 38 – <i>Blend</i> Sínter Feed + Granulado Umidade 4,65%.....	63
Figura 39- Origens: Silo de Granulado e SF grosso da TC-11.....	65
Figura 40- 100% Granulado- Umidade 3,75%.....	65
Figura 41- <i>Blend</i> 80/20% - Umidade 4,26%	66
Figura 42- <i>Blend</i> 70/30% - Umidade 4,52%	66
Figura 43 - <i>Blend</i> 60/40% - Umidade 4,77%	66
Figura 44 - 100% Granulado - Umidade 3,75%.....	67
Figura 45- <i>Blend</i> 80/20% - Umidade 4,26%	67
Figura 46- <i>Blend</i> 70/30% - Umidade 4,52%	68
Figura 47- <i>Blend</i> 60/40% - Umidade 4,77%	68
Figura 48 - Origens: Silo de Granulado e SF grosso da TC-11.....	70
Figura 49 - 100% Granulado- Umidade 3,53	71
Figura 50 - <i>Blend</i> 60/40% - Umidade 4,43%	71
Figura 51- 100% Granulado – Umidade 3,53%	72
Figura 52- <i>Blend</i> 60/40% - Umidade 4,43%	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica da 1ª campanha de testes	54
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica da 2ª campanha de testes	57
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica da 3ª campanha de testes	61
Gráfico 4 - Distribuição granulométrica da 3ª campanha de testes com granulado e <i>blend</i> sinter feed + granulado	64
Gráfico 5- Distribuição granulométrica da 4ª campanha de testes	69
Gráfico 6 - Distribuição granulométrica da 5ª campanha de testes	73
Gráfico 7 - Visão geral da eficiência de moagem da prensa de rolos HPGR considerando todas as condições de testes	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Cominuição e Fragmentação	15
3.2	Abrasão, Compressão e Impacto	15
3.2.1	Abrasão.....	16
3.2.2	Compressão	17
3.2.3	Impacto.....	17
3.3	Processos de Cominuição	18
3.4	Leis da Cominuição	19
3.5	Histórico da Prensa de Rolos de Alta Pressão	22
3.6	Princípios de funcionamento das prensas de rolos - HPGR	28
3.7	Parâmetros Operacionais e Características Técnicas do HPGR	30
4	METODOLOGIA	35
4.1	Fluxograma do Processo da Planta atual – Ferro+	35
4.2	Fluxograma para amostragem no circuito industrial – Ferro+	37
4.3	Fluxograma para os testes com Granulado na Pressas de Rolos	39
4.4	Desenvolvimento dos testes	41
4.4.1	1° e 2° Campanha - Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11 e silo de Sínter feed.....	42
4.4.2	3° Campanha - Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11, Silo de Sínter Feed e Silo de Granulado	43
4.4.3	Testes na Prensa de Rolos com 100% Granulado e Mistura 80% SínterFeed +20% Granulado	43
4.4.4	4° Campanha - Testes na prensa de rolos com Granulado e Composição de misturas (<i>blend</i>) com Granulado + Sínter Feed	43
4.4.5	5° Campanha - Testes na prensa de rolos com 100% Granulado e Mistura <i>blend</i> 60% Granulado + 40% Sinter Feed	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	Fluxograma para amostragem no circuito industrial – Ferro+	47

5.2	Desenvolvimento dos testes – 1º e 2º campanha	49
5.2.1	Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11 e silo de Sínter feed.....	49
5.2.2	Análise Granulométrica.....	53
5.2.3	Análise Granulométrica.....	56
5.3	Desenvolvimento dos testes – 3º campanha	57
5.3.1	Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11, Silo de Sínter Feed e Silo de Granulado	57
5.3.2	Análise Granulométrica.....	60
5.3.3	Testes na Prensa de Rolos com 100% Granulado e Mistura 80% SínterFeed +20% Granulado	61
5.3.4	Granulometria.....	63
5.4	Desenvolvimento dos testes – 4º campanha	64
5.4.1	Testes na prensa de rolos com Granulado e Composição de misturas (<i>blend</i>) com Granulado + Sínter Feed.....	64
5.4.2	Análise Granulométrica.....	68
5.5	Desenvolvimento dos testes – 5º campanha	70
5.5.1	Testes na prensa de rolos com 100% Granulado e Mistura <i>blend</i> 60% Granulado + 40% Sínter Feed.....	70
5.5.2	Análise Granulométrica.....	72
6	CONCLUSÃO	75
7	TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A busca pela eficiência no processo de cominuição é essencial para a competitividade e a sustentabilidade da indústria mineral. Nesse contexto, a utilização das prensas de rolos de alta pressão (High Pressure Grinding Rolls – HPGR) tem se consolidado como uma tecnologia eficaz para a redução granulométrica, oferecendo benefícios relevantes, como maior geração de frações finas, menor consumo energético e redução de custos operacionais.

Segundo Gomes (2010, p. 09), as prensas de rolos de alta pressão representam um equipamento relativamente novo e eficiente do ponto de vista energético. Existem diversas configurações de circuitos de cominuição que incluem esse tipo de prensa, sendo que, no Brasil, as aplicações mais recorrentes envolvem a substituição da moagem AG/SAG, a substituição de etapas de britagem ou pré-moagem e a geração de superfície em etapas que antecedem a pelotização.

Apesar das vantagens já reconhecidas, a operação de HPGR ainda apresenta desafios significativos, como o controle da umidade e a elevada presença de finos na alimentação, fatores que, se não forem devidamente gerenciados, comprometem o desempenho dos equipamentos e a eficiência global do circuito de beneficiamento.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho dos equipamentos HPGR modelo HRC800 da mineradora Ferro+, que vêm apresentando baixa eficiência na redução dos minérios itabiríticos. A demanda da empresa motivou a realização de estudos para compreender as causas desse desempenho, aquém do esperado e propor alternativas para a melhoria do processo de cominuição, considerando tanto as reservas atuais quanto as condições operacionais previstas para o futuro.

Para atingir esse objetivo, foi adotado como estratégia um mapeamento detalhado do processo industrial, na identificação de etapas críticas, realização de amostragens, análises granulométricas e na caracterização física dos minérios processados.

A mineradora dispõe de uma planta piloto equipada com um HPGR modelo HRC800 dedicado a estudos, onde foram conduzidos os testes em escala industrial, incluindo a formação de *blends*, a análise dos efeitos da umidade e a avaliação de resultados, culminando em proposições de ajustes operacionais ao circuito de cominuição.

O foco central da pesquisa esteve em identificar os fatores que afetam negativamente a eficiência dos HPGR da mineradora e desenvolver soluções práticas para maximizar a geração de frações finas, reduzir a carga circulante e preparar o circuito para as novas condições previstas de alimentação. As recomendações visam não apenas o aprimoramento

imediate do desempenho dos equipamentos, mas também a garantia da continuidade operacional e da sustentabilidade do processo de beneficiamento mineral.

Além disso, este estudo busca contribuir para o avanço técnico e científico no campo da cominuição ao realizar uma análise detalhada das condições operacionais que maximizem o desempenho das prensas de rolos. A abordagem utilizada considera três aspectos fundamentais:

- **Otimização dos parâmetros operacionais:** identificação e controle das variáveis críticas para garantir maior eficiência energética e produtividade.
- **Qualidade do material alimentado:** avaliação da influência da granulometria e da umidade nos rendimentos operacionais, com foco em ajustes que minimizem perdas e aumentem a recuperação de massa.
- **Integração com o circuito de beneficiamento:** investigação sobre como as condições operacionais das prensas impactam a etapa subsequente de separação magnética, buscando maximizar a recuperação e a qualidade do produto final.

Ao abordar esses aspectos, a pesquisa não apenas identifica lacunas de conhecimento sobre o funcionamento das prensas de rolos em escala industrial, mas também oferece recomendações práticas para a otimização de processos em plantas de beneficiamento mineral. Assim, os resultados esperados contribuem tanto para o aprimoramento das operações industriais quanto para o fortalecimento do conhecimento acadêmico sobre a aplicação e os desafios dessa tecnologia na mineração.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é promover a otimização de eficiência da moagem das prensas de rolos da Ferro+ Mineração, focando na melhoria da performance do equipamento responsável pela cominuição dos minérios. Busca-se garantir que as prensas operem com granulometrias adequadas, maximizando a eficiência na redução granulométrica e o rendimento do processo. A pesquisa busca propor alternativas que minimizem interferências e impactos no circuito, com o intuito de aprimorar a eficiência do peneiramento e reduzir o retorno de finos. O estudo visa, ainda, contribuir para um processo de beneficiamento mais eficiente e sustentável, baseando-se em análises e testes conduzidos pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento.

2.2 Objetivos Específicos

O objetivo específico deste estudo é avaliar minuciosamente as condições operacionais do circuito das prensas de rolos industrial existente, com o intuito de identificar os fatores causadores da baixa eficiência e propor melhorias no sistema de cominuição. O estudo busca realizar análises detalhadas das características granulométricas e do minério alimentado nas prensas, bem como os efeitos da umidade dos minérios processados compreendendo como esses fatores influenciam diretamente o desempenho dos HPGR. Além disso, pretende identificar os gargalos operacionais, propondo soluções práticas que possam ser implementadas para otimizar o funcionamento do equipamento. A pesquisa também visa desenvolver propostas de melhorias alinhadas aos princípios de sustentabilidade, contribuindo para um processo mais eficiente na planta de tratamento de minérios. Por fim, o trabalho pretende apresentar estratégias para a implementação de melhorias, levando em consideração a complexidade e os desafios específicos inerentes ao tratamento de minérios, com o objetivo de promover a otimização contínua das operações industriais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura relacionada aos temas que sustentam esta pesquisa. Inicialmente, são abordados a importância dos processos de cominuição e fragmentação, com ênfase nos principais mecanismos de redução de tamanho: abrasão, compressão e impacto. Na sequência, são abordados, de forma mais aprofundada, os conceitos ligados à operacionalidade das prensas de rolos de alta pressão (HPGR), que constituem a principal referência técnica deste estudo.

3.1 Cominuição e Fragmentação

A cominuição, palavra derivada do latim *comminuere*, é o conjunto de redução de tamanhos. A fragmentação de partículas em tamanhos menores se dá em função da aplicação de força que exceda o seu limite de ruptura (Beraldo, 1987 *apud* Ferro, 2018).

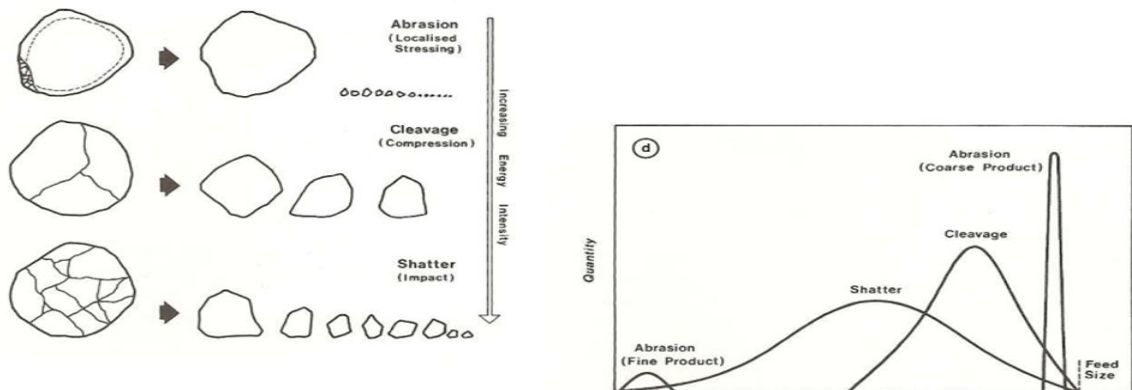
Diversos fatores contribuem para a fragmentação de uma partícula e, portanto, o resultado nunca é previsto com exatidão. Entretanto, a probabilidade de quebra está relacionada à quantidade de energia que é absorvida durante a solitação. Após certo valor, conhecido como energia de quebra da partícula, ela se rompe. Esse limite é intrínseco ao material, além de depender do tamanho, da morfologia, da estrutura e da intensidade/direção da força.

Mesmo para partículas do mesmo material e com as mesmas propriedades, energias de quebra diferentes são observadas. Essa característica comprova a teoria descrita por Griffith, de que a quebra ocorre, preferencialmente, pela presença de falhas, que foram geradas durante a gênese mineral (King, 2001 *apud* Ferro, 2018, p. 18).

3.2 Abrasão, Compressão e Impacto

A cominuição consiste de métodos específicos para redução de tamanho de partículas através de atrito da superfície de partículas do minério com a superfície dos corpos moedores (abrasão), da aplicação de pressão (compressão), ou criação de impacto cinético entre minério e corpo moedor (impacto), (OUTOKUMPU, 2002 *apud* Ferro, 2018, p.18). A Figura 1 representa os mecanismos de fratura de partículas e as distribuições de tamanho do produto resultantes.

Figura 1- Representação dos mecanismos de fratura de partículas e as distribuições de tamanho do produto resultante

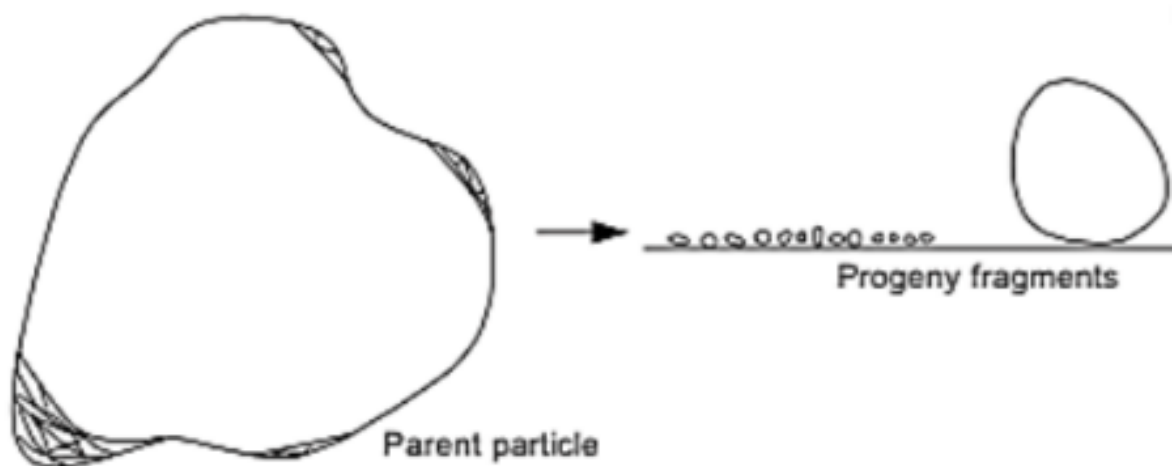


Fonte: Kelly e Spottswood (1982) *apud* Bergerman (2012)

3.2.1 Abrasão

A abrasão é o resultado de esforços de cisalhamento na superfície e de uma força normal na superfície da partícula insuficiente para que haja ruptura. Como consequência, há apenas a fragmentação superficial da partícula. A distribuição granulométrica típica apresenta dois picos (excesso de finos e de partículas com tamanhos próximos aos da original) bem separados por faixas granulométricas que não apresentam partículas (KING, 2001). É um processo com alto consumo de energia, (PEREIRA, 1989). A Figura 2 apresenta a fragmentação obtida para esse mecanismo de abrasão (Ferro, 2018, p. 19).

Figura 2 - Mecanismo de fragmentação por abrasão



Fonte: Modified de King (2001) *apud* Ferro (2018, p. 19)

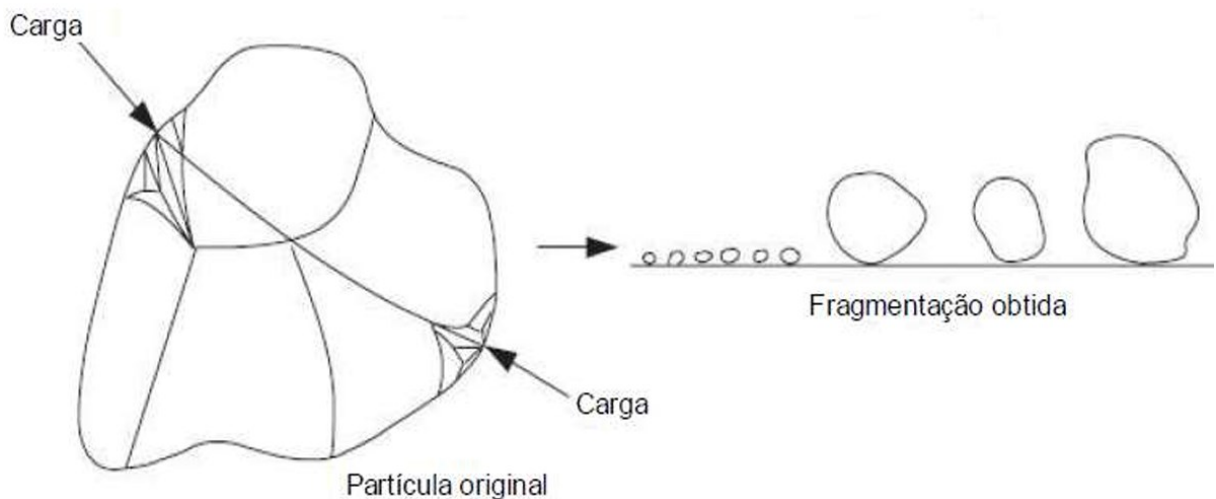
3.2.2 Compressão

A principal característica da fragmentação obtida por meio da compressão é uma distribuição granulométrica bimodal (KING, 2001 e WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006), com quantidade significativa de finos gerada na zona de compressão e com partículas maiores resultantes da quebra por tração indireta (em função da compressão diametral).

No mecanismo de compressão, a aplicação da força é normal à superfície da partícula e lenta (em comparação à quebra por impacto), o que permite que, com o surgimento da primeira fratura, o esforço seja aliviado (BERALDO, 1987).

Esse tipo de fratura é o que ocorre em britadores e produz poucos fragmentos de grande diâmetro. Nos moinhos, está associado à compressão das partículas entre corpos moedores ou à compressão entre as partículas em HPGR (Ferro, 2018, p. 19-20).

Figura 3- Mecanismo de fragmentação por compressão



Fonte: Modified de King (2001) *apud* Ferro (2018, p. 20)

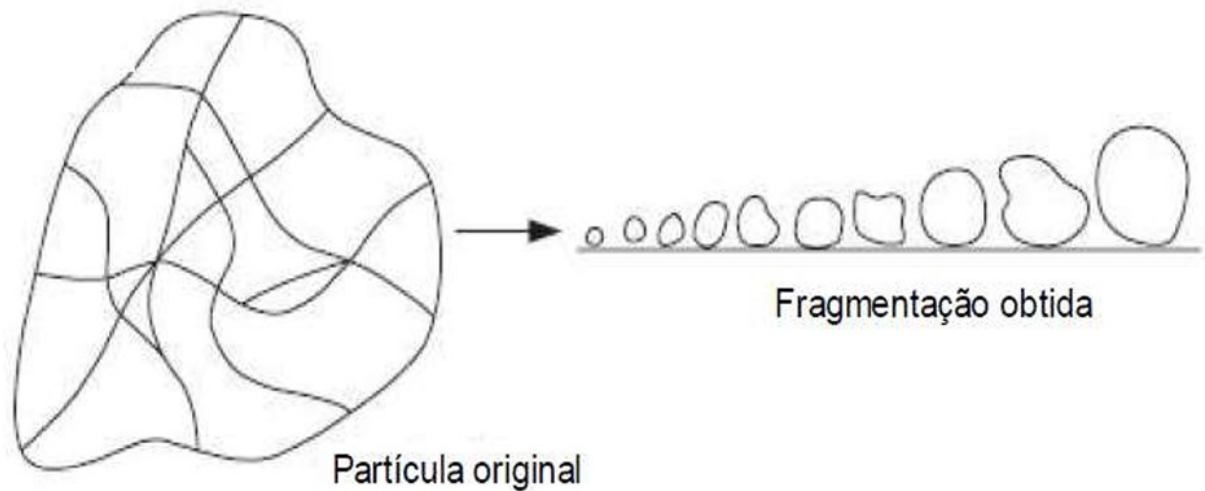
3.2.3 Impacto

A fragmentação por impacto é obtida por meio da rápida aplicação de uma força de compressão, cuja intensidade é muito superior à resistência da partícula (BERALDO, 1987). Diversos tamanhos de partícula são obtidos por esse mecanismo e, uma vez que uma alta energia é aplicada, o processo de quebra não é seletivo.

É o tipo de fratura que acontece nos britadores de impacto e moinhos na zona de queda das bolas, e gera distribuição granulométrica fina.

A Figura 4 ilustra fragmentação obtida para esse mecanismo (Ferro, 2018 p. 20).

Figura 4 - Mecanismo de fragmentação por impacto



Fonte: Modified de King (2001) *apud* Ferro (2018, p. 20)

3.3 Processos de Cominuição

Conforme Ferro (2018, p. 21): Segundo Pereira (1989), os processos de cominuição visam, no tratamento de minérios, gerar uma granulometria adequada para processos subsequentes, sejam eles processos de classificação ou moagem posterior ou produzir uma liberação física adequada do minério valioso ou produtos finais acabados.

Os processos de cominuição podem ser feitos a seco ou via úmida, dependendo de alguns fatores técnicos e econômicos. Por exemplo, um minério com umidade alta deve ser moído a úmido, pois o custo para secagem seria proibitivo. Já um minério extraído de uma região desértica ou muito seca, moído a seco, poderá apresentar vantagens econômicas substanciais.

O desafio para desenvolver um circuito de cominuição é selecionar condições para aumentar a probabilidade de quebra de partículas de determinado tamanho para gerar produtos no tamanho desejado, com o menor consumo energético possível. A seleção de um circuito de cominuição correto depende da distribuição granulométrica da alimentação do produto e de outras propriedades físicas que definem a dureza, competência e abrasividade do minério. Estas propriedades variam muito de minério para minério e podem ter variações dentro de diferentes partes da mesma reserva mineral.

Os custos são um fator muito importante. Custos de investimento e custos operacionais, junto com a disponibilidade esperada de produção e a vida útil do equipamento, definem o custo específico da redução de tamanho. O método de redução ótimo irá variar

significativamente de um minério para outro. Consequentemente, para um balanceamento efetivo dos custos de investimento e operacionais, é necessário um entendimento prático de como utilizar eficientemente a energia disponível e desta forma dimensionar o melhor circuito de cominuição para sua utilização eficiente durante a vida da mina (Outokumpu II, 2002).

3.4 Leis da Cominuição

Segundo Ferro (2018, p. 21-22): As chamadas “leis” da cominuição relacionam o consumo específico de energia com a granulometria da alimentação e do produto do circuito (WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006). O interesse nesta associação se deu em função dos elevados custos nos processos de cominuição (BERALDO, 1987). Entretanto, nenhuma delas é completamente satisfatória, pois a ineficiência dos processos cominutivos é elevada, ou seja, apenas uma pequena parcela da energia total é disponível para a quebra das partículas, enquanto o restante é absorvido pelos próprios equipamentos (WILLS e ATKINSON, 1993).

[...]

Uma relação que permita calcular a energia necessária à cominuição de um material até certo tamanho é uma aspiração antiga de cientistas e técnicos, pois, sendo o gasto de energia na cominuição o que mais onera uma instalação industrial, é de grande valia a sua determinação.

Segundo Sampaio e Delboni Júnior (2007), em função do impacto em aspectos econômicos e ambientais, o desempenho de processos de cominuição é objeto de estudos sistemáticos há cerca de 150 anos.

O estabelecimento das assim chamadas “leis” de cominuição é praticamente contemporâneo às primeiras patentes de equipamentos de britagem. Os debates acalorados entre Rittinger e Kick demonstravam, sobretudo, as dificuldades de se parametrizar, de maneira abrangente e relativamente simples, a energia associada a eventos de cominuição. A equação empírica (Equação 1) relaciona a energia consumida ao inverso da variação de diâmetro dos produtos elevado a uma função-potência (BERALDO, 1987).

Equação 1:

$$dE = -K \frac{dx}{x^n}$$

Onde:

E = Energia aplicada (kWh/t)

x = Diâmetro da partícula (mm)

K = Constantes dependentes do material (kWh/t)

n = Constantes dependentes do processo cominutivo (adimensional)

As tentativas de quantificação da energia gasta nos processos de redução de tamanho resultaram no desenvolvimento de diferentes formulações conhecidas como “leis de cominuição”.

De acordo com Ferro (2018, p. 22) “diversos pesquisadores realizaram diferentes interpretações dessa relação, que integrada dá origem a outras equações (BERALDO, 1987).

As formulações que segue, representadas pelas leis clássicas de Rittinger (1857), Kick (1883), Bond (1952) e Charles (1957), buscam expressar, por meio de funções matemáticas, a dependência entre a energia consumida no processo e as dimensões iniciais e finais das partículas, cada qual com pressupostos e faixas de aplicabilidade próprias, consolidando-se como referenciais teóricos para o estudo e o dimensionamento de circuitos de britagem e moagem. As diferentes interpretações deram origem às formulações apresentadas a seguir:

Para $n = 2$, tem-se a Lei de Rittinger (1857):

Equação 2:

$$E = K_2 \left(\frac{1}{x_f} - \frac{1}{x_i} \right)$$

Para $n = 1$, tem-se a Lei de Kick (1883):

Equação 3:

$$E = K_3 \ln \left(\frac{x_i}{x_f} \right)$$

Para $n = 1,5$, tem-se a Lei de Bond (1952):

Equação 4:

$$E = K_4 \left(\frac{1}{x_f^{0,5}} - \frac{1}{x_i^{0,5}} \right)$$

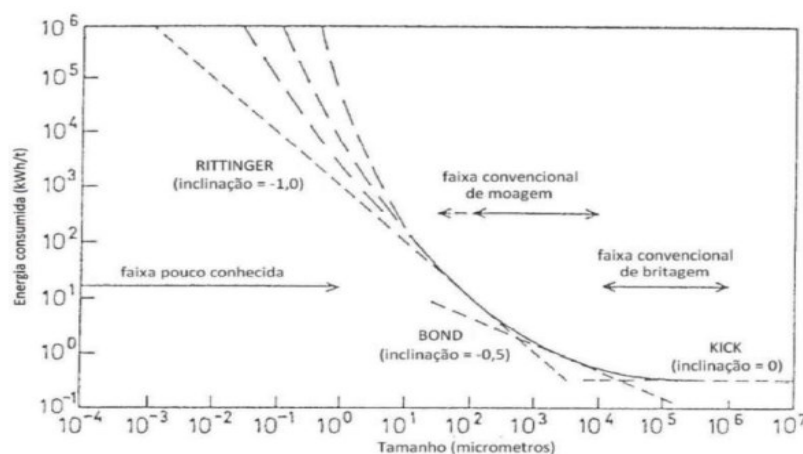
Para $n \neq 1$, tem-se a equação de Charles (1957):

Equação 5:

$$E = K_1 [x_f^{-n+1} - x_i^{-n+1}]$$

Segundo Ferro (2018, p. 23-24): A primeira lei da cominuição, proposta por P. Ritter Von Rittinger (Equação 3), estabelece que a energia consumida é proporcional à área nova gerada na fragmentação, que é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula. A segunda lei (Equação 4), proposta por Kick, determina que a energia consumida é proporcional à redução do volume da partícula. Durante muito tempo, o estudo da relação entre a energia consumida e a redução de tamanhos resultou em controvérsias entre os dois cientistas e seus diversos seguidores. Os pesquisadores colocavam-se ao lado de um ou outro, de acordo com os resultados obtidos nos seus próprios trabalhos experimentais. Esta controvérsia estava associada ao seguinte paradoxo: teoricamente os materiais deveriam ser mais duros do que são na prática, entretanto, na prática se utiliza muito mais energia para a fragmentação do que a calculada teoricamente. Na realidade, os diversos pesquisadores interpretaram os postulados de Rittinger e de Kick de formas diferentes. Como os postulados de Rittinger e Kick não satisfaziam a todos os casos encontrados na prática e como se necessitava, na indústria, de algumas regras para classificar os materiais segundo as respostas à cominuição, F.C. Bond propôs a terceira lei da cominuição (Equação 5) com base em uma intensa campanha de comparação entre ensaios laboratoriais e consumo energético em escala industrial e piloto. A Figura 6 apresenta a relação entre o consumo de energia e a granulometria do produto, proposta em 1961 por Hukki (HUKKI, 1961). A partir disso, foi possível verificar que as três leis seriam aplicáveis em intervalos granulométricos específicos. Assim, a lei de Kick se aplicaria à britagem, a de Bond à moagem e a de Rittinger à de moagem superfina.

Figura 5 - Relação entre energia e tamanho da partícula na cominuição



Fonte: Modificado de Hukki (1961) *apud* Ferro (2018, p. 24)

Ainda hoje, as leis de Kick, Rittinger e Bond fornecem boas estimativas preliminares para cálculo de energia necessária às etapas de britagem, moagem e moagem fina, respectivamente. Os três pesquisadores criaram assim modelos empíricos, no melhor sentido do termo, ou seja, resultam de criterioso aprendizado tendo por base a extensiva observação de eventos individuais e coletivos de cominuição de minérios (Ferro, 2018, p. 24).

3.5 Histórico da Prensa de Rolos de Alta Pressão

Conforme Bueno (2020): comparada aos modelos tradicionais de tecnologia em britagem e moagem, muitas delas em uso por mais de um século, as prensas de rolos, podem ser consideradas uma tecnologia recente, com a sua patente, datada da década de 1980, pelo Professor Klaus Schönert (SCHÖNERT, 1988).

Segundo Schönert (1988), em seu estudo fundamental sobre processos de cominuição, em qualquer processo dessa natureza, as partículas são quebradas por forças de contato que deformam a partícula e criam um campo de tensão, uma vez que o nível de estresse a que são submetidas resulta em deformação inelástica ou a quebra da partícula. Segundo ele, o número de pontos de contato depende se o estresse será aplicado em uma partícula por vez ou simultaneamente em um leito de partículas. Schönert (1988) também afirmou que os equipamentos britadores, moinhos e prensas de rolos estressavam os materiais por tensão de compressão ou tensão de tração, concluindo que a quebra Inter partículas ocorria em leitos de partículas com uma eficiência inferior à quebra de uma partícula isolada.

Por fim, concluiu que, quando um leito de partículas é comprimido e cominuído, os resultados são melhores em prensas de rolos do que em moinhos de bolas, porque na prensa tem-se o transporte controlado, o que resulta em grande quantidade de energia dispendida, única e exclusivamente, para estressar o material. Já em moinhos de bolas, o transporte de material dentro do moinho, entre os corpos moedores e as diversas zonas de compressão, ocorre aleatoriamente, resultando em colisões improdutivas e grande quantidade de energia dispersa devido à sua natureza probabilística.

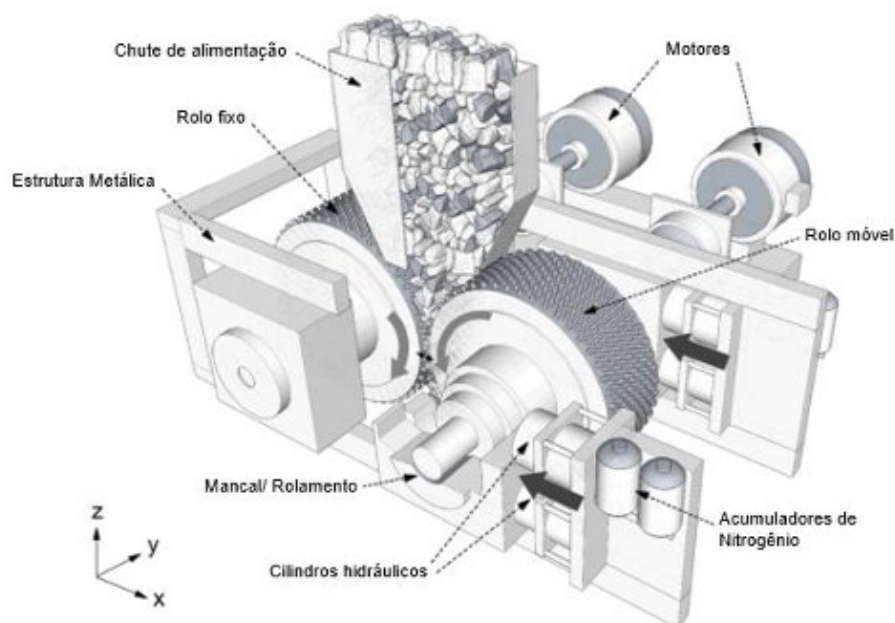
Após concluir os estudos sobre processos de cominuição, Schönert (1988) sugeriu que as prensas de rolos tivessem duas bandagens montadas sobre uma estrutura rígida e alimentadas de forma que um leito de partículas se formasse entre eles, sob alta pressão (> 50 MPa). Sabendo que as prensas de rolos são equipamentos de cominuição que consistem em um par de bandagens girando em sentidos opostos, montadas em um quadro rígido. Uma

bandagem gira sobre o eixo fixo no quadro, enquanto o outro eixo se desloca sobre guias deslizantes, sendo posicionado por cilindros hidráulicos.

A alimentação do minério a ser processado na prensa de rolos é feita através de um chute ou calha usualmente montado diretamente na abertura entre as bandagens, onde a diminuição de tamanho ocorre pelo efeito da cominuição interparticular (RIBEIRO *et al.*, 2010).

Na Figura 6, é possível ter uma visão detalhada da prensa de rolos em operação, ressaltando que os fabricantes KHD, Polysius e Köppern obtiveram os direitos de patente de Schönert e desenvolveram a ideia baseados em tecnologias existentes para máquinas de briquetagem (ALVES, 2012) que resultou na versão atual e demonstrada abaixo (Bueno, 2020, p. 16-17).

Figura 6 - Esquema de prensa de rolos atualmente



Fonte: Barrios e Tavares (2016) *apud* Bueno (2020, p. 17)

Bueno (2020) ainda ressalta: Desde a sua aplicação na cominuição de cimento, no início dos anos 1980, onde ainda se tem o maior número de equipamentos em operação, as prensas de rolos ganharam atenção na indústria de minérios e passaram a ser utilizadas na cominuição de minérios mais resistentes e abrasivos.

A sua aplicação na indústria de minérios tem aumentado nos últimos 10 a 15 anos, começando, inicialmente, na preparação de minério de ferro e, mais recentemente, com o

desenvolvimento de rolos de desgaste mais resistentes, na cominuição de platina e cobre (MORLEY, 2010).

A principal inovação para aplicação das prensas de rolos na cominuição de minérios mais resistentes e abrasivos, foi a adição de studs, nome comum nas mineradoras, na superfície das bandagens, ante a camada de solda dura que é usada na indústria cimenteira até os dias atuais. Segundo Schumacher e Theisen (1997), essa solução permite que uma camada autógena (isto é, formada pelo próprio material) proteja as bandagens e que os custos de manutenção sejam reduzidos. No entanto, essa aplicação de studs tem sido constantemente modificada para empregar o conceito de quebra autógena na moagem contínua e também para equalizar os custos, já que aproximadamente 60% do custo de uma bandagem nova está no revestimento.

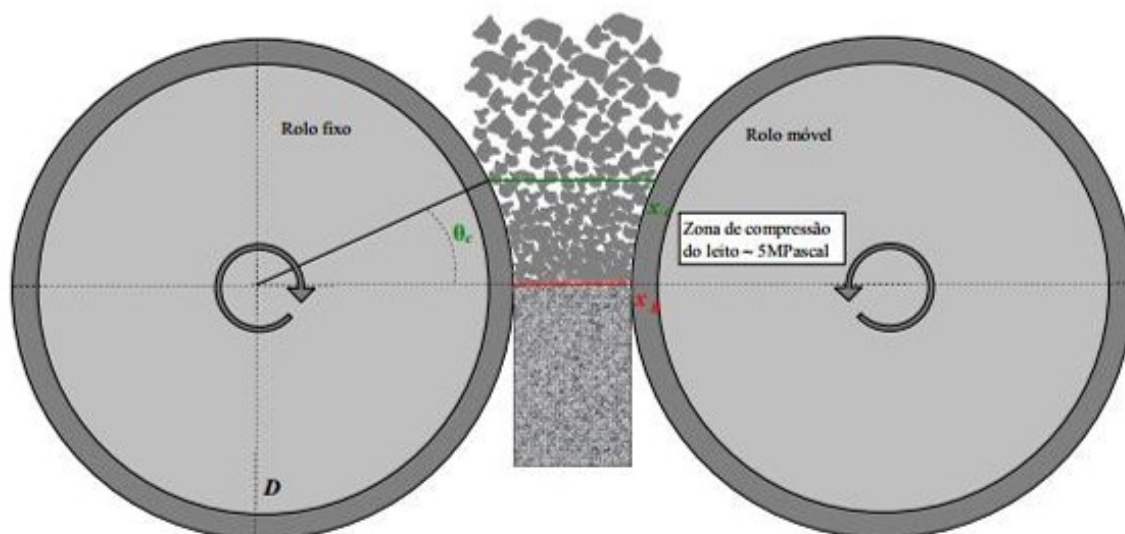
A Figura 7a apresenta uma superfície preenchida com os *studs* e a Figura 7b apresenta os chamados *edgeblocks*, que são literalmente blocos de canto utilizados na borda das bandagens para evitar desgaste acelerado, e conseqüentemente, queda dos studs a partir das bordas (Bueno, 2020, p. 18).

Figura 7 - Proteções utilizadas nas bandagens em geral: (a) *studs*; (b) *edgeblocks*



Fonte: Bueno (2020, p. 18)

Figura 8 - Ilustração do princípio básico do processo de cominuição em prensas de rolos, com a formação de um leito na zona de compressão com quebra autógena pelo princípio Inter partícula, ou seja, partícula-partícula.



Fonte: Adaptado de Alves (2012) *apud* Bueno (2020, p. 20)

Ainda na obra de Bueno (2020) observando-se a Figura 8, é interessante pontuar que, no caso de partículas grandes, comparadas ao diâmetro das bandagens, o ângulo crítico é um parâmetro importante, e é definido como o ângulo de contato máximo entre as superfícies da bandagem e da partícula, a partir do qual ocorre atrito estático entre as superfícies (ALVES, 2012). Isto é, quando o ângulo de contato for maior do que o ângulo crítico, as partículas estarão sobre efeito do atrito cinético e irão apenas escorregar sobre as bandagens, sem a ocorrência de quebra. Por outro lado, quando o ângulo de contato é menor do que o ângulo crítico, as partículas sofrerão a ação do atrito estático entre as superfícies, e serão submetidas à compressão resultante das forças envolvidas.

Segundo Alves (2012), no caso de partículas pequenas, comparadas ao diâmetro das bandagens, a fricção interna do leito de partículas deve ser suficientemente grande para que o mesmo seja puxado para a zona de compressão como um corpo único.

Na zona de compressão, a prensa de rolos quebra as partículas predominantemente pela natureza autógena, através do mecanismo de quebra Inter partículas, o que difere as prensas de rolos de outros equipamentos de cominuição, por exemplo, os moinhos de bolas. Em outras palavras, a força de compressão é transferida de uma partícula para a outra, com apenas uma pequena proporção de partículas em contato direto com a superfície das bandagens (ALVES, 2012).

Todavia, Alves (2012) também informa que isso não significa que o tamanho máximo de alimentação deva ser menor do que o gap entre bandagens, porque à medida que avançam para a zona de compressão, essas partículas tendem a quebrar sucessivamente. Por fim, salienta que o único requerimento é que o tamanho máximo da alimentação seja suficientemente pequeno, de forma que o ângulo de contato formado entre a partícula e as bandagens seja inferior ao ângulo crítico de fricção de britagem de rolos para aquele material. Salienta, ainda, que a performance de cominuição é amplamente determinada pela pressão na zona de compressão, com pressões de operação variando no intervalo de 50-150 bar e atingindo valores tão elevados quanto 180 bar (MORLEY, 2010).

Durante a moagem, o leito de partículas é comprimido para uma densidade maior do que 70% de sólidos em volume o que permite afirmar, que a porosidade do leito na zona de compressão será menor do que 30% em volume (ALVES, 2012).

De acordo com Schönert (1988), em alguns casos há formação de um aglomerado na saída da zona de compressão e, neste caso, um processo de desaglomeração poderá ser requerido após a moagem e, esse processo poderá ser feito de diversas maneiras ou processos, por exemplo, imersão em água, imersão em banho de ultrassom, moinhos de bolas, entre outros.

Durante a moagem, é sabido que o sistema hidráulico da prensa exerce pressões na abertura das bandagens que variam entre 80 e 400 MPa. Todavia, a distribuição de pressão sobre o material ao longo da bandagem não é homogênea, por conta da geometria do equipamento (OLIVEIRA, 2016).

Com a queda do material por gravidade a partir do chute de alimentação e a compressão dele entre as bandagens, há fuga de uma parcela desse material pelas bordas e, conseqüentemente, queda de pressão sobre o material nas laterais.

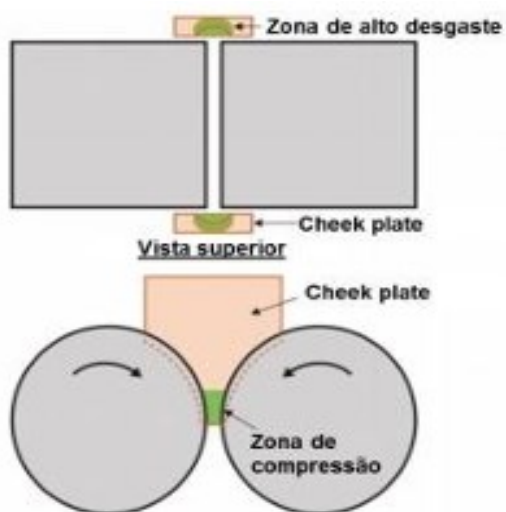
Para reduzir essa perda de pressão e o desgaste acelerado das bandagens nas bordas, são instalados ao final do chute de alimentação equipamentos chamados *cheekplate* ou placas laterais de proteção e desgaste, que tem a função de evitar a fuga do material pela lateral da bandagem, conforme Figuras 9 e 10. Todavia, nem mesmo os *cheekplates* conseguem assegurar que nenhum material será perdido e, isso implica ineficiência no processo de cominuição, conhecido como efeito de borda (MORLEY, 2010).

Figura 9 - *Cheekplate* com revestimento novo instalado



Fonte: Bueno (2020, p. 22)

Figura 10 - Visão superior e lateral das bandagens com o *cheekplate* instalado



Fonte: Bueno (2020, p. 23)

Os impactos do efeito borda na produção de uma prensa de rolos pode se dar:

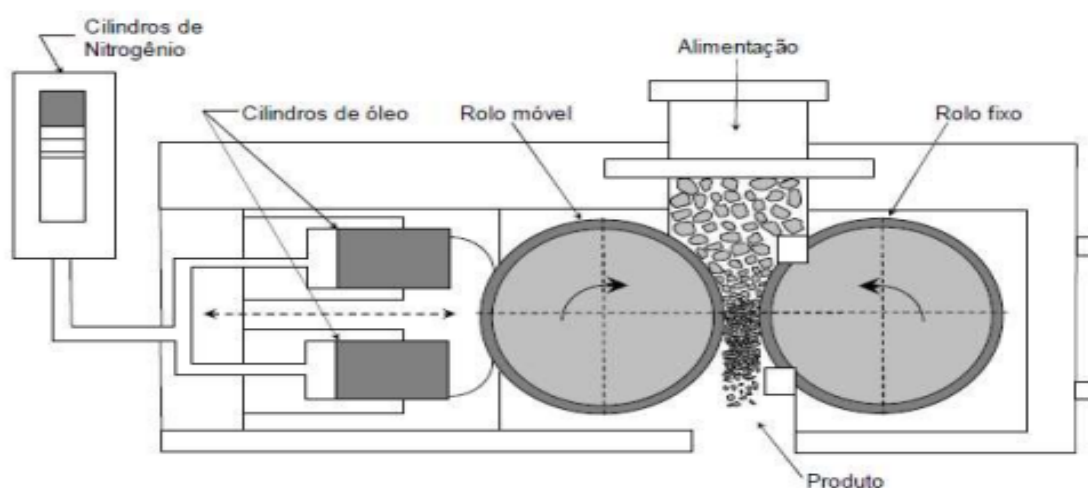
- 1) aumentando o by-pass (produto que retorna para a prensa) porque na borda tem se produto mais grosso,
- 2) menor vida útil das bandagens por apresentar desgaste não uniforme, já que as bordas desgastam menos “efeito banheira”
- 3) redução da eficiência energética do processo produtivo, já que no centro da bandagem tem-se uma força aplicada muito superior àquela necessária para quebrar as partículas (HERMAN, KNORR e WHALEN, 2013).

Para reduzir o efeito borda e os custos com material, os fabricantes de prensas de rolos utilizam studs mais flexíveis nas bordas da bandagem e recomendam que os *cheekplates* estejam instalados corretamente e a 5 mm das bandagens. Também orientam que o revestimento dos *cheekplates* sejam trocados com frequência, de acordo com a abrasividade do material que está sendo cominuído, porque o efeito borda aumenta à medida que essa peça sofre desgaste ao longo da operação (Bueno, 2020, p. 20-23).

3.6 Princípios de funcionamento das prensas de rolos - HPGR

A Prensa de Rolos de Alta Pressão, *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR), é um equipamento utilizado para cominuir materiais. O seu princípio de funcionamento, apresentado na Figura abaixo, ocorre através da aplicação de pressão a um leito de material por um par de rolos que giram em sentido contrário, montados em um quadro rígido. Um rolo é fixo e o outro se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos (Ferro, 2018, p.16).

Figura 11 - Princípio de funcionamento de uma HGPR e compressão do leito de partículas



Fonte: Valery and Jankovic (2013) *apud* Ferro (2018, p. 16)

De acordo com Morley (2006b), os circuitos de cominuição nos quais a HPGR pode ser utilizada são agrupados em quatro principais grupos, cujos objetivos são:

Aumentar a eficiência energética;

Elevar a capacidade do circuito;

Melhorar o desempenho metalúrgico;

Atingir uma cominuição seletiva (Ferro, 2018, p. 17).

Campos (2018, p. 01) indica que, a Prensa de Rolos (*High Pressure Grinding Rolls* – HPGR) constituiu em um importante avanço dentro da área de cominuição e de processamento mineral nas últimas décadas (BARRIOS, 2015). Sendo uma recente tecnologia, patenteada em meados de 1980 na Alemanha, tal equipamento opera hoje em uma série de usinas de processamento mineral em todo o mundo.

A patente de 1979 e sua ampla aplicação atual foram resultado de uma extensa pesquisa realizada pelo Professor Klaus Schönert e seu grupo na Universidade de Clausthal na Alemanha. Schönert (1988a) realizou estudos a respeito da quebra em leito de partículas, avaliando sua eficiência energética e sua razão de redução quando comparada com equipamentos mais tradicionais na cominuição. Dessa maneira, os estudos culminaram com o desenvolvimento da prensa de rolos, o qual é um equipamento de cominuição interparticular sob condições contínuas.

[...]

Com a crescente aplicação da prensa, diferentes empresas que operam com processamento de minério de ferro no Brasil passaram a utilizar estes equipamentos em seus circuitos de cominuição. A Anglo American, no Projeto Minas Rio, utiliza três prensas de rolos na britagem terciária de minério de ferro itabiríticos. Essa aplicação proporcionou uma redução no consumo específico de energia, simplificação do circuito e estabilidade de operação (BARRIOS, 2015). Outra aplicação é a prensagem de pellet feed durante a remoagem pré pelotização nas usinas do Complexo de Tubarão da Vale S.A (Vitória – ES) e nas usinas da Samarco S.A (Ponta Ubu – ES).

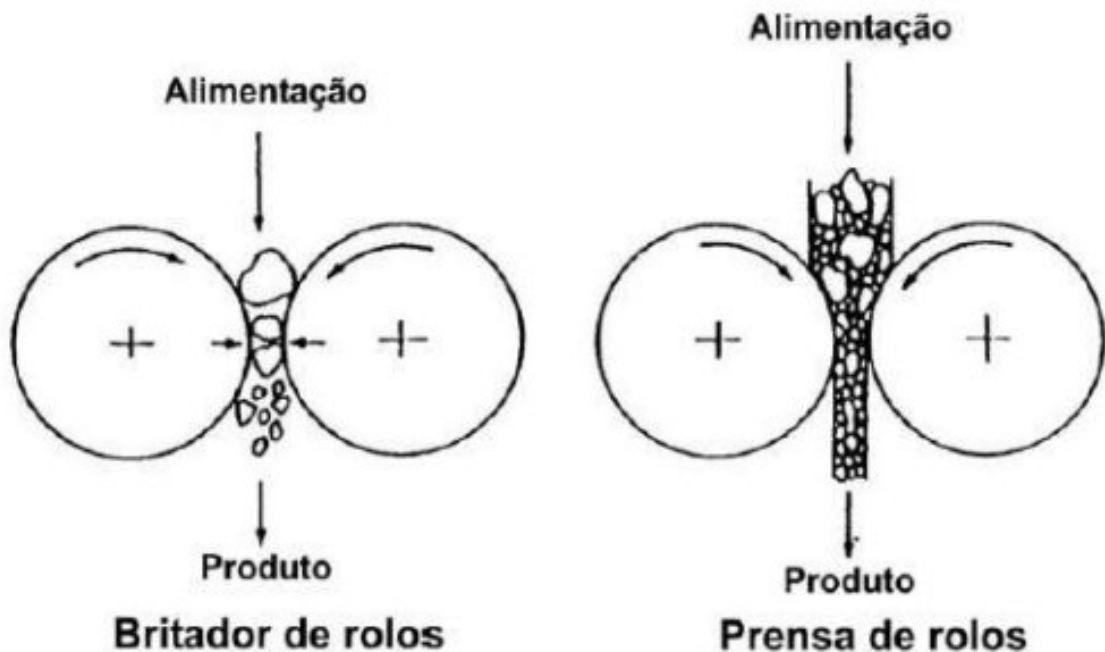
No entanto, a rápida aplicação trouxe consigo as dificuldades apontadas por Rashidi *et al* (2017) *apud* Campos (2018, p. 02): Segundo Rashidi *et al.* (2017), a rápida ascensão da aplicação da prensa de rolos dificultou o desenvolvimento de modelos matemáticos e estudos detalhados para melhorar a sua aplicação em escala industrial. De fato, o curto tempo desde o surgimento da patente até a primeira aplicação nas indústrias de cimento, dificultou um estudo de escalonamento e de maior eficiência de processamento a nível industrial.

Conforme Campos (2018, p. 05): Britadores de rolos convencionais são muito utilizados na indústria mineral, apesar de serem de aplicação limitada a materiais argilosos e pouco competentes (BARRIOS, 2015). Entretanto, o desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos fez com que parte da aplicação nos britadores de rolos convencionais fosse substituída por britadores giratórios, britadores de mandíbulas e cônicos. Por outro lado, a prensa de rolos surgiu como uma unidade especializada de moagem que tem o potencial de

substituir moinhos de bolas, moinhos semi-autógenos e moinhos de barras dentro dos circuitos de cominuição (OTTE, 1988).

A principal inovação proposta pela prensa de rolos é o seu sistema hidráulico de pressão acoplado a um dos rolos que permite uma variação da força específica de compressão exercida sobre o leito de partículas. O sistema hidráulico da prensa permite realizar pequenas variações da abertura de trabalho durante a operação de compressão, enquanto que no britador de rolos convencional a abertura de trabalho é pré-determinada e fixada antes do início da operação conforme é apresentado na Figura 12. Tal característica é de grande relevância nos sistemas operacionais, visto que há uma influência significativa na transmissão de energia de cominuição até as partículas e conseqüentemente na razão de redução imposta pelos equipamentos.

Figura 12 - Comparação de operação de britadores de rolos e prensa de rolos



Fonte: Campos (2018, p. 05)

3.7 Parâmetros Operacionais e Características Técnicas do HPGR

O conhecimento dos parâmetros operacionais e das características do equipamento é fundamental para assegurar uma operação ideal e maximizar sua eficiência. Para isso, são imprescindíveis a observação e o controle rigoroso dos parâmetros operacionais descritos a seguir:

1. Pressão de Moagem

A pressão específica aplicada entre os rolos é um fator determinante na eficiência da cominuição. O aumento da pressão tende a produzir uma granulometria mais fina; no entanto, deve-se buscar o equilíbrio para evitar desgaste excessivo dos componentes e aumento do consumo energético.

2. Teor de Umidade da Alimentação

A umidade é uma das variáveis mais difíceis de ser controlada, especialmente, nas operações industriais que sofre variações no processo operacional. A taxa de umidade ideal para as prensas de rolos aplicadas em usinas de tratamento de minérios fica em torno de 7 a 11% um índice maior de umidade do minério dificulta a alimentação e reduz a performance do HPGR, propicia a ocorrência de escorregamento do material na superfície das bandagens, aumentando-se o nível de material no chute, podendo ocorrer transbordos ou interrupções no processo.

3. Granulometria da Alimentação

A distribuição granulométrica do material alimentado deve atender rigorosamente às especificações técnicas do equipamento, uma vez que se trata de um fator determinante para a qualidade do produto final e a eficiência do processo de cominuição. O controle preciso da granulometria é essencial para garantir a operação eficiente do equipamento e para reduzir o desgaste dos seus componentes.

4. Taxa de Alimentação

A alimentação, medida em toneladas por hora (t/h), deve ser constante e adequada para assegurar a formação de um leito estável entre os rolos. Alimentação irregular pode resultar em vibrações, falhas mecânicas e baixa eficiência operacional.

5. Velocidade dos Rolos

A velocidade dos rolos, controlada em rotações por minuto (rpm) ou velocidade periférica (m/s), influencia o tempo de retenção do material no "gap" de moagem. Velocidades excessivamente altas reduzem a eficiência da moagem, enquanto velocidades muito baixas podem causar acúmulo de material.

6. Espessura do Leito de Partículas

A espessura do leito, definida como a camada de material na zona de compressão, deve ser mantida espessa e estável. Leitos muito finos resultam em contato direto entre os rolos, aumentando o desgaste dos componentes.

7. Distribuição da Pressão no Leito

Manter a pressão uniformemente distribuída ao longo da largura dos rolos é essencial para reduzir o desgaste desigual dos revestimentos e maximizar a eficiência do processo.

8. Temperatura de Operação

A temperatura de operação dos rolos e do material moído deve ser monitorada. Temperaturas elevadas podem comprometer a lubrificação dos rolamentos e acelerar o desgaste dos componentes.

9. Relação de Recirculação

A recirculação refere-se à quantidade de material que retorna para nova passagem no HPGR. O controle da carga circulante é crucial para manter a eficiência do processo, tanto em termos de quantidade quanto de granulometria.

10. Consumo Específico de Energia

O consumo específico de energia (kWh/t) refere-se à quantidade de energia consumida por tonelada de material processado, é um indicador fundamental de eficiência operacional e de custos. Reduzir este indicador está diretamente associado à otimização do desempenho do equipamento.

Além das restrições de granulometria recomendadas pelos fabricantes e pesquisadores, a Krupp Polysius também recomenda que, para muitos materiais, a necessidade de energia específica ótima deve ficar entre 2 e 5 kWh/t.

Em prensas de rolos de alta pressão (HPGR), **quanto maior a pressão específica aplicada entre os rolos, menor tende a ser o consumo específico de energia (kWh/t)**. Isso acontece porque:

- Ao aplicar uma **pressão maior** sobre o leito de partículas, você **melhora a eficiência da fragmentação**.
- Com a fragmentação mais eficiente, **menos energia** é necessária para atingir a granulometria desejada.

- Logo, o consumo de energia por tonelada de material processado diminui.

11. Desgaste dos Revestimentos dos Rolos

Os revestimentos dos rolos, compostos por pinos de tungstênio ou metais especiais, estão sujeitos a desgaste contínuo. A taxa de desgaste impacta diretamente nos custos de manutenção e no tempo de indisponibilidade do equipamento.

Uma operação eficiente do HPGR está diretamente ligada aos controles e ajustes contínuos destes parâmetros. O equilíbrio entre pressão, velocidade, taxa de alimentação, controle de umidade e monitoramento do desgaste dos componentes é essencial para maximizar a eficiência energética, a qualidade do produto final e a vida útil da prensa de rolos.

De forma geral as prensas de rolos (HPGR, *High Pressure Grinding Rolls*) são equipamentos de cominuição que consistem em um par de rolos girando em sentidos opostos, montados em um quadro rígido. Um rolo gira sobre eixo fixo no quadro, enquanto o outro eixo se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos. A alimentação é introduzida na abertura entre rolos, onde a diminuição de tamanho ocorre pelo efeito da cominuição interparticular. Em geral, a motivação para a utilização de prensas de rolos está relacionada à sua maior eficiência energética, se comparada com a eficiência dos britadores e dos moinhos convencionais, pois, nas prensas de rolos ocorre lenta aplicação de carga sobre as partículas, causando colapso estrutural dos grãos, de modo que a energia perdida em calor e ruído é minimizada.

Campos (2018, p. 08-10) indica que: No início da década de 1990 uma série de usinas passaram a implementar a Prensa de Rolos em circuitos industriais para prensagem de minério de ferro e pellet feed. Grande parte do sucesso da aplicação se deve ao fato do equipamento ser extremamente eficiente no processo de quebra, além de ser capaz de suprir a capacidade dos circuitos e até mesmo garantir maior estabilidade e dinamismo para as usinas.

Apesar do registro histórico de prensagem de minério de ferro nas etapas de britagem terciária e quaternária ter sido feito na mina de Los Colorados (Chile), em 1990, a Vale, então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) implementou a prensagem de minério de ferro em prensa de rolos combinada com a moagem em moinhos de bolas para produzir pellet feed fines em várias das usinas integradas de moagem e pelletização do Complexo de Tubarão, seja na pré-moagem (Usinas I e II) ou na remoagem (Usina IV) da descarga do moinho de bolas (VAN DER MEER, 1997).

[...]

Van der Meer (1997) também relata que ainda na década de 1990 outras empresas adotaram o uso da prensa de rolos em seus circuitos de prensagem de pellet feed, como a LKAB Kiruna e LKAB Mamberget na Suécia, IDI nos EUA e Kudremukh na Índia. De fato, a aplicação da Prensa de Rolos traz uma série de benefícios à prensagem de pellet feed, dentre eles:

- Redução do consumo de energético através da introdução de microfissuras, que ajudam a aumentar a taxa de produção e reduzir a granulometria do produto (SHU & YONGQING, 2008).
- Geração de uma grande proporção de ultrafinos, principalmente pela atrição e cisalhamento das superfícies das partículas no leito de material úmido, resultando em aumento da área superficial específica da ordem de 300 a 600 cm² /g (Blaine) (VAN DER MEER, 2015).
- Capacidade de lidar com níveis de umidade entre 8 e 12 % (produto filtrado após moagem) (VAN DER MEER, 2015).
- Geração de formato de partícula mais angular em comparação com produtos de moinho de bolas, o que permite que o produto seja adequado para pelotização com um valor menor de Blaine, presumindo um melhor empacotamento e densidade das pelotas (ABAZARPOR et al., 2017).
- Vantagens no processo de pelotamento em termos de uniformidade no tamanho das pelotas verdes, maior resistência, menor consumo de aditivos e menor taxa de recirculação na grelha (VAN DER MEER, 1997).

Por outro lado, em etapas de britagem terciária e quaternária de minério de ferro também foram registradas recentes aplicações de sucesso. A mais recente foi realizada no Projeto Minas – Rio da Anglo American em Conceição do Mato Dentro, MG. Neste caso, três unidades de prensa de rolos foram utilizadas no lugar de equipamentos tradicionais de britagem terciária e quaternária do minério de ferro itabiríticos. O principal motivo do uso das prensas foi a redução do consumo de energia específica, a simplificação do circuito, a maior estabilidade de operação e a melhoria na qualidade do produto final produzido.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada com o objetivo de avaliar e aprimorar a performance das prensas de rolos na planta de tratamento de minérios, em resposta à baixa eficiência observada no processo de cominuição. Durante o desenvolvimento dos testes, novas composições de misturas (*blends*) foram incorporadas ao planejamento experimental, incluindo materiais com granulometrias mais elevadas, como o *Lamp Ore* (granulado).

Esse tipo de material no site da mineradora apresenta teores químicos fora das especificações exigidas pelo mercado, o que proporciona condições para o processo de cominuição em prensa de rolos e sabendo que este minério é benéfico nesta etapa do processo. Isso se deve, principalmente, à sua baixa umidade global, composta predominantemente por umidade superficial, o que favorece o desempenho do equipamento e a eficiência do processo de fragmentação.

A operação eficiente das prensas de rolos de alta pressão (HPGR) requer o controle rigoroso de diversos parâmetros operacionais, que impactam diretamente no desempenho do equipamento e na qualidade do produto final. Cada variável deve ser mantida dentro de faixas ideais para garantir a estabilidade do processo, a otimização do consumo de energia e a redução de custos operacionais.

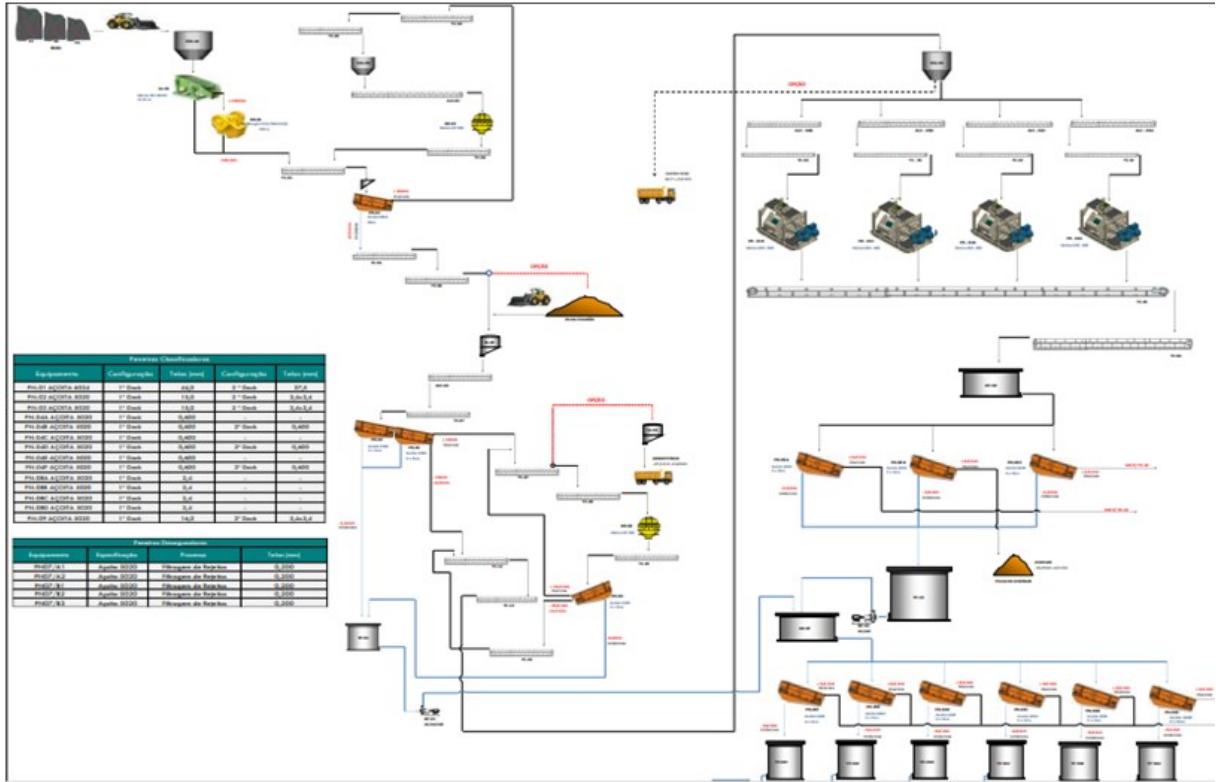
O HPGR é reconhecido como um dos equipamentos mais eficientes para a cominuição de minérios, apresenta vantagens significativas, como a redução no consumo de energia e a diminuição da geração de partículas ultrafinas, que podem impactar negativamente as etapas subsequentes do beneficiamento. No entanto, o desempenho ideal desse equipamento depende de uma combinação precisa de variáveis operacionais, como umidade, granulometria do material alimentado, pressão aplicada e características do minério processado.

4.1 Fluxograma do Processo da Planta atual – Ferro +

Com base na configuração operacional da planta industrial da Ferro+, o fluxograma oficial da empresa foi utilizado como referência inicial para a condução dos estudos iniciais de pesquisa, servindo de guia para o planejamento das coletas de dados e das intervenções técnicas necessárias. Esse documento, oriundo dos registros internos da mineradora, foi fundamental para o entendimento do processo e para o direcionamento das ações do setor de

Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), subsidiando as análises realizadas durante a etapa de *Brainstorming* e originando os fluxogramas complementares construídos ao longo do trabalho.

Figura 13- Fluxograma de processo



Fonte: Arquivo Ferro+

As etapas metodológicas permitiram à equipe de P&D identificar, com maior precisão, os pontos críticos do processo, o que resultou na construção de estratégias operacionais e fluxogramas evolutivos que contribuíram para a sustentabilidade e o aprimoramento contínuo da planta industrial.

A fim de viabilizar a obtenção de amostras representativas e isentas da influência da carga circulante do processo, foi implementada uma derivação específica no fluxo de material, possibilitando a coleta diretamente na correia transportadora TC-11. As coletas foram realizadas de forma simultânea, garantindo a confiabilidade estatística e a representatividade dos dados experimentais.

As amostras obtidas foram destinadas aos ensaios na prensa de rolos modelo HRC-800, instalada na planta piloto de Pesquisa e Desenvolvimento da Ferro+. Para a execução dos testes, contou-se com o suporte da equipe de manutenção mecânica, responsável pelos ajustes operacionais necessários no equipamento, incluindo a definição da pressão de operação em $2,9 \text{ N/mm}^2$ e a redução do espaçamento entre os rolos (gap), de $9,38 \text{ mm}$ para $6,34 \text{ mm}$. Tais

ajustes tiveram como objetivo otimizar a eficiência do processo de cominuição e ampliar a compreensão das variáveis operacionais envolvidas.

4.2 Fluxograma para amostragem no circuito industrial – Ferro+

Após a realização dos estudos preliminares que confirmaram o baixo desempenho das prensas de rolos de alta pressão (HPGR) no processo de cominuição de minério na planta industrial da Ferro+, deu-se início a uma investigação técnica aprofundada, com o objetivo de identificar as causas da ineficiência observada e propor melhorias no circuito de beneficiamento.

Como desdobramento dessa análise inicial, foi elaborado um fluxograma técnico detalhado, representando o circuito industrial em questão. Tal fluxograma foi estruturado para orientar de forma sistemática a execução das coletas de amostras, incorporando as intervenções planejadas e evidenciando os pontos estratégicos de amostragem ao longo do processo.

A adoção desse modelo contribuiu significativamente para o direcionamento das atividades em campo, permitindo a coleta de dados representativos e alinhados às variáveis críticas do sistema. Além disso, a representação gráfica do circuito proporcionou uma compreensão integrada do processo que proporcionou maior eficiência da equipe com atuação em campo, facilitando a identificação de gargalos operacionais e subsidiando decisões técnicas ao longo do estudo.

Todos os testes foram realizados considerando uma velocidade constante dos rolos, variação da pressão de moagem, variação do teor de umidade, Granulometria na alimentação, composição de *blends* e como informação suplementar todos os testes foram realizados em uma única passagem na prensa de rolos. As amostragens foram realizadas nos pontos previamente identificados. Em seguida, composição de *Blends* para realização de testes na prensa de rolos instalada no site da planta piloto da mineradora. Este equipamento HRC800 opera com rolos lisos, e os experimentos foram conduzidos sob as seguintes condições:

1. Teste na prensa de rolos com material proveniente do silo de sinter TC-12 (**fluxo 4**) contendo finos e com material da TC-11 sem os finos (**fluxo 2**);
2. Teste com a mistura (*blend*) do material do silo de sinter contendo finos TC-12 (**fluxo4**) e material da TC-11 sem os finos (**fluxo 2**);
3. Testes a umidade natural e após a perda de umidade durante 23 horas com os seguintes minérios: silo de sinter contendo finos TC-12 (**fluxo 4**), minério da TC-11 sem finos (**fluxo 2**) e a mistura do granulado (**fluxo 1**) com sinter grosso da TC-11(**fluxo 2**);
4. Teste na prensa de rolos com 100% de granulado (**fluxo 1**) e com proporções variadas da mistura entre o granulado (**fluxo 1**) e o sinter feed grosso da TC-11 (**fluxo 2**);
5. Testes na prensa de rolos com 100% de granulado (**fluxo 1**) e com a mistura entre granulado (**fluxo 1**) e sinter feed grosso da TC-11 (**fluxo 2**) na proporção de 60/40%, respectivamente, para a validação dos resultados obtidos.

4.3 Fluxograma para os testes com Granulado na Pressas de Rolos

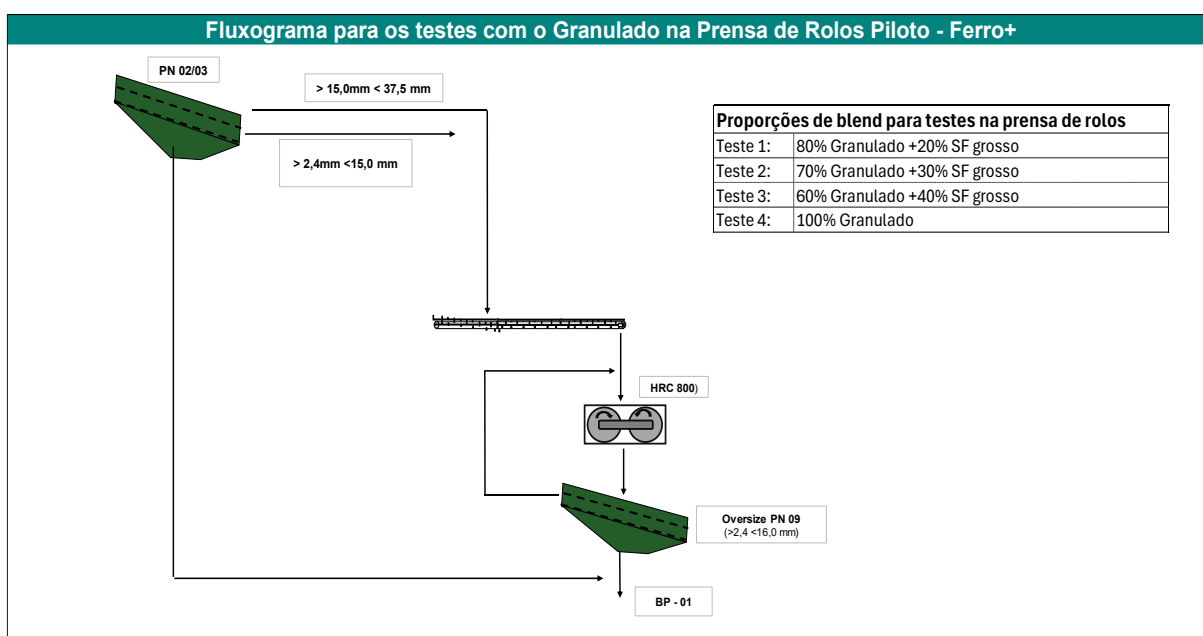
Como continuidade à metodologia adotada, elaborou-se um fluxograma específico para representar a configuração dos testes experimentais conduzidos a partir deste momento com minério granulado (*lump ore*) e suas respectivas misturas com sinter feed grosso no circuito industrial da prensa de rolos. Esta representação gráfica foi construída com o objetivo de orientar, de forma estruturada, a condução dos ensaios, indicando os principais *blends* definidos para avaliação e o monitoramento sistemático do desempenho operacional ao longo do processo de cominuição.

O planejamento experimental contemplou o percurso do material desde a alimentação até a etapa de prensagem, com foco na investigação dos efeitos da compressão sobre diferentes composições de alimentação. A inserção do minério granulado, tanto de forma isolada quanto combinado com outras frações mais finas, visa analisar seu comportamento

sob as condições típicas de operação da prensa de rolos, considerando-se variáveis críticas como granulometria mais grossa e baixos teores de umidade superficial.

Tais propriedades físicas dos materiais podem exercer influência direta sobre a eficiência do processo de compactação e fragmentação, sendo, portanto, objeto de análise detalhada nos testes conduzidos. A utilização do fluxograma como ferramenta metodológica contribui para a rastreabilidade dos ensaios, assegura a coerência na condução dos experimentos e possibilita uma avaliação comparativa dos resultados obtidos para cada *blend* estudado.

Figura 15 - Fluxograma para os testes com o granulado e misturas (*blends*) na prensa de rolos



Fonte: elaboração própria (2024)

A equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da mineradora conduziu diversas análises abrangentes para identificar os fatores que comprometem a eficiência dos equipamentos, explorando essas novas combinações e materiais para maximizar as oportunidades de melhoria do processo.

O processo metodológico incluiu as seguintes etapas:

1. **Diagnóstico inicial:** Realização de um *brainstorming* para levantamento preliminar de hipóteses sobre as possíveis causas da baixa eficiência no circuito de prensas de rolos.
2. **Mapeamento do processo:** Identificação e análise detalhada das etapas críticas no fluxo de operação, com o objetivo de entender os pontos de interferência no desempenho do equipamento.

3. **Amostragens e análises granulométricas:** Coleta de amostras representativas e caracterização detalhada do material processado, com foco na identificação das distribuições de tamanho que impactam a eficiência da cominuição.
4. **Análise de umidade:** Avaliação da influência da umidade do material sobre o desempenho das prensas de rolos, considerando suas implicações no processo produtivo e nos resultados operacionais.
5. **Registros fotográficos:** Documentação visual das condições operacionais e dos materiais processados, servindo como base para suporte às análises técnicas realizadas.
6. **Pesquisas e desenvolvimento de rotas de processo:** Proposição de alternativas de rota de processo, com o objetivo de definir um fluxo ideal para o beneficiamento dos minérios, garantindo maior eficiência e rendimento operacional.

Com base nos dados e evidências coletados ao longo dessas etapas, foi possível compreender os fatores limitantes que contribuem para a baixa eficiência na cominuição e propor adequações no processo produtivo da planta de beneficiamento.

Os esforços culminaram na identificação de soluções práticas e eficazes, focadas em eliminar gargalos operacionais, otimizar a performance das prensas de rolos e promover maior sustentabilidade no tratamento de minérios. O objetivo final das adequações propostas é garantir a continuidade operacional da empresa, promovendo a longevidade do processo produtivo e otimizando a cominuição e concentrabilidade dos minérios, tanto os atualmente explorados quanto os planejados para o futuro.

4.4 Desenvolvimento dos testes

No desenvolvimento dos testes apresentados a seguir, foram preparados diferentes *blends* de minérios provenientes da planta de beneficiamento, com o objetivo de representar as condições reais de alimentação do processo industrial e avaliar a influência da composição do material sobre o desempenho do HPGR modelo HRC-800.

As misturas foram elaboradas a partir da combinação controlada de frações previamente caracterizadas, assegurando tanto a representatividade quanto a repetibilidade dos ensaios.

Durante a execução dos testes, foram realizadas coletas sistemáticas de amostras na alimentação e na descarga do equipamento, de acordo com procedimentos padronizados de amostragem, a fim de evitar segregação de partículas e preservar a qualidade das análises

subsequentes. A coleta ocorreu em pontos estratégicos do circuito, considerando o fluxo contínuo do material e garantindo volumes adequados para as etapas de preparação laboratorial.

No laboratório da mineradora, as amostras passaram por processos de homogeneização e quarteamento, conduzidos conforme os procedimentos internos da empresa. Posteriormente, foram submetidas à análise granulométrica por peneiramento a úmido, utilizando peneiras da série Tyler/Mesh, até a estabilização da massa retida em cada fração. A partir da pesagem das frações, foi possível determinar a distribuição granulométrica, elaborar curvas de representação e obter parâmetros fundamentais para a avaliação da eficiência do HPGR.

Dessa forma, o método empregado garantiu a representatividade das amostras e a confiabilidade dos resultados, fornecendo bases consistentes para a análise do desempenho do equipamento. Com esse procedimento, foram estruturadas diferentes campanhas de testes, organizadas segundo os *blends* preparados e as condições operacionais aplicadas, cujos resultados e discussões são apresentados nos itens subsequentes deste trabalho.

4.4.1 1º e 2º Campanha - Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11 e silo de Sínter feed

Foram realizadas duas campanhas de testes, ambas utilizando a mesma proporção de *blend*, ou seja, uma mistura uniforme dos minérios. Cada campanha incluiu dois experimentos com a prensa de rolos HPGR modelo HRC 800, avaliando diferentes condições de alimentação em momentos distintos. Essas campanhas foram conduzidas seguindo a mesma metodologia, com o objetivo de confirmar e amadurecer os resultados, garantindo um sequenciamento assertivo dos próximos passos a serem tomados. Os testes envolveram material proveniente de duas fontes: o silo de sínter, contendo frações finas oriundas da carga circulante do processo, e a TC-11, um peneiramento natural considerado sem a presença de frações finas. As duas campanhas foram posteriormente unificadas em uma única análise, consolidando os resultados obtidos para uma avaliação mais robusta e consistente. As amostras foram coletadas pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da mineração e encaminhadas para os testes experimentais na prensa de rolos de superfície lisa.

4.4.2 3º Campanha - Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11, Silo de Sínter Feed e Silo de Granulado

Na terceira campanha experimental, foram conduzidos cinco ensaios utilizando a prensa de rolos. Os testes envolveram diferentes materiais:

- 1º - Material proveniente do silo de sínter, contendo finos em sua umidade tal qual;
- 2º - Material proveniente do silo de sinter, contendo finos, porém, após a perda de umidade ao longo de 23 horas;
- 3º - Material proveniente da TC-11, desprovido de finos;
- 4º - Material proveniente do silo de granulado;
- 5º - Material composto por blend granulado e sínterfeed grosso da TC-11.

As coletas de amostras foram realizadas pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e destinadas aos ensaios na prensa de rolos de superfície lisa (modelo HRC 800).

4.4.3 Testes na Prensa de Rolos com 100% Granulado e Mistura 80% Sínter Feed +20% Granulado

Após a realização dos testes informados acima com as amostras do TC-11 e do silo de sínter, tanto na condição de umidade tal qual quanto após a perda de umidade, partimos para explorarmos novos ensaios na prensa de rolos. Para esses testes, utilizaram-se amostras do silo de granulado, um material sem especificação química destinada ao mercado com umidade de 3,12%, e uma mistura contendo 80% de sínter feed e 20% de granulado com umidade de 4,65%. O objetivo principal foi avaliar o desempenho do equipamento ao processar materiais com frações mais grosseiras, visando compreender a influência dessas características na eficiência dos processos de compactação e moagem.

Conforme o protocolo estabelecido, todas as amostragens realizadas pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foram conduzidas de forma consistente e direcionadas para os testes na prensa de rolos (modelo HRC 800).

4.4.4 4º Campanha - Testes na prensa de rolos com Granulado e Composição de misturas (*blend*) com Granulado + Sínter Feed

O estudo foi estruturado de forma a permitir a comparação da eficiência de cominuição entre duas condições distintas de alimentação: uma composta por 100% de

minério granulado, material sem especificação química destinado ao mercado, e outra formada por diferentes proporções de misturas entre granulado e sinter feed grosso. Essa abordagem metodológica visou avaliar o comportamento do material sob compressão, considerando as variações nas características físico-químicas e granulométricas das composições testadas.

O objetivo desta investigação é identificar a melhor configuração operacional das prensas de rolos, visando otimizar a eficiência do processo de moagem e, conseqüentemente, melhorar a produtividade e qualidade operacional do equipamento.

Na quarta campanha experimental, foram conduzidos quatro testes utilizando a prensa de rolos lisos (HRC 800), com o objetivo de avaliar a eficiência da moagem em diferentes combinações de materiais. Os testes incluíram uma alimentação com 100% de granulado e misturas de granulado com sinter feed grosso da TC-11 nas seguintes proporções:

80% granulado + 20% SF grosso;

70% granulado + 30% SF grosso;

60% granulado + 40% SF grosso.

Essa campanha foi projetada para investigar o impacto das diferentes proporções de mistura na performance da prensa de rolos, visando identificar a configuração mais eficiente para o processo de moagem.

Após estudos e alinhamento das necessidades com foco na qualidade dos trabalhos sempre buscando excelência para assegurar a representatividade das amostras e representatividade do processo, todas as coletas foram realizadas simultaneamente, e posteriormente direcionadas à prensa de rolos.

Durante os testes, foi necessário o suporte da equipe de Mecânica para ajustes operacionais. Especificamente, a pressão entre os rolos foi ajustada para 2,9 N/mm² e o *gap* foi reduzido de 9,38 mm para 6,34 mm, com o objetivo de otimizar as condições de compactação e melhorar a eficiência do processo.

4.4.5 5° Campanha - Testes na prensa de rolos com 100% Granulado e Mistura *blend* 60% Granulado + 40% Sinter Feed

Na quinta campanha, foram realizados dois testes na prensa de rolos, utilizando 100% de granulado um material sem especificação química destinada ao mercado e a mistura de 60% de granulado com 40% de sinter feed grosso da TC-11, com o objetivo de confirmar os resultados obtidos nas campanhas anteriores.

As amostras foram coletadas pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), em conformidade com o protocolo previamente estabelecido, e posteriormente encaminhadas à praça de alimentação da prensa de rolos (HRC 800), equipamento destinado à realização de testes no setor de P&D da mineradora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a eficiência operacional das prensas de rolos de alta pressão (HPGR) pode ser significativamente aprimorada por meio da redução ou eliminação da fração de finos (<2,00 mm) e da diminuição do teor de umidade na alimentação do equipamento. Com base nas análises realizadas, propõe-se uma rota de processo otimizada, voltada à melhoria do desempenho das prensas e, conseqüentemente, à elevação da eficiência global do sistema de cominuição e do circuito produtivo da mineradora.

A análise conduzida pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento resultou na identificação de falhas operacionais relevantes no circuito de cominuição da planta de beneficiamento. O levantamento colaborativo permitiu mapear com precisão os principais gargalos do processo, ampliar a compreensão das etapas críticas do circuito e definir estratégias técnicas voltadas à otimização do desempenho das prensas de rolos e à melhoria da eficiência global do sistema.

Na planta de beneficiamento da Ferro+ Mineração, as prensas de rolos desempenham um papel fundamental na adequação granulométrica do material, especialmente do *oversize* da linha de peneiramento PNs-08 e do material retido acima de 0,6 mm da linha de peneiramento PNs-04, que posteriormente alimenta o circuito de concentração magnética de alta intensidade. Para evitar problemas na etapa de separação magnética, é crucial que as peneiras de proteção, como as PNs-04, operem em condições ideais.

Foi identificado que o processo de lavagem nas peneiras PNs-08 necessita de intensificação para melhorar a eficiência do peneiramento, evitando o retorno de finos às prensas de rolos. Atualmente, o *oversize* das PNs-08 apresenta entre 12% e 15% de material <2,0 mm, que retorna ao circuito, comprometendo a eficiência da cominuição e aumentando a carga circulante.

De acordo com o planejamento de lavra, a partir de 2027, prevê-se um aumento na granulometria mais grosseira do ROM. Esse material, com granulometria acima de 1,0 mm, tende a migrar para o circuito das prensas de rolos. No entanto, as limitações técnicas das prensas, em função do baixo fator de redução para partículas menores que 1,0 mm, podem gerar um aumento significativo na carga circulante.

Diante desse cenário, torna-se indispensável melhorar a performance de cominuição das prensas de rolos para aumentar a recuperação de massa destinada à separação magnética. Assim, este estudo avaliou detalhadamente o desempenho das prensas de rolos industriais,

considerando os impactos da umidade e das características granulométricas dos materiais alimentados.

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de intervenções no circuito para garantir a continuidade operacional, melhorar a eficiência global do sistema produtivo e atender às demandas futuras do beneficiamento de minérios.

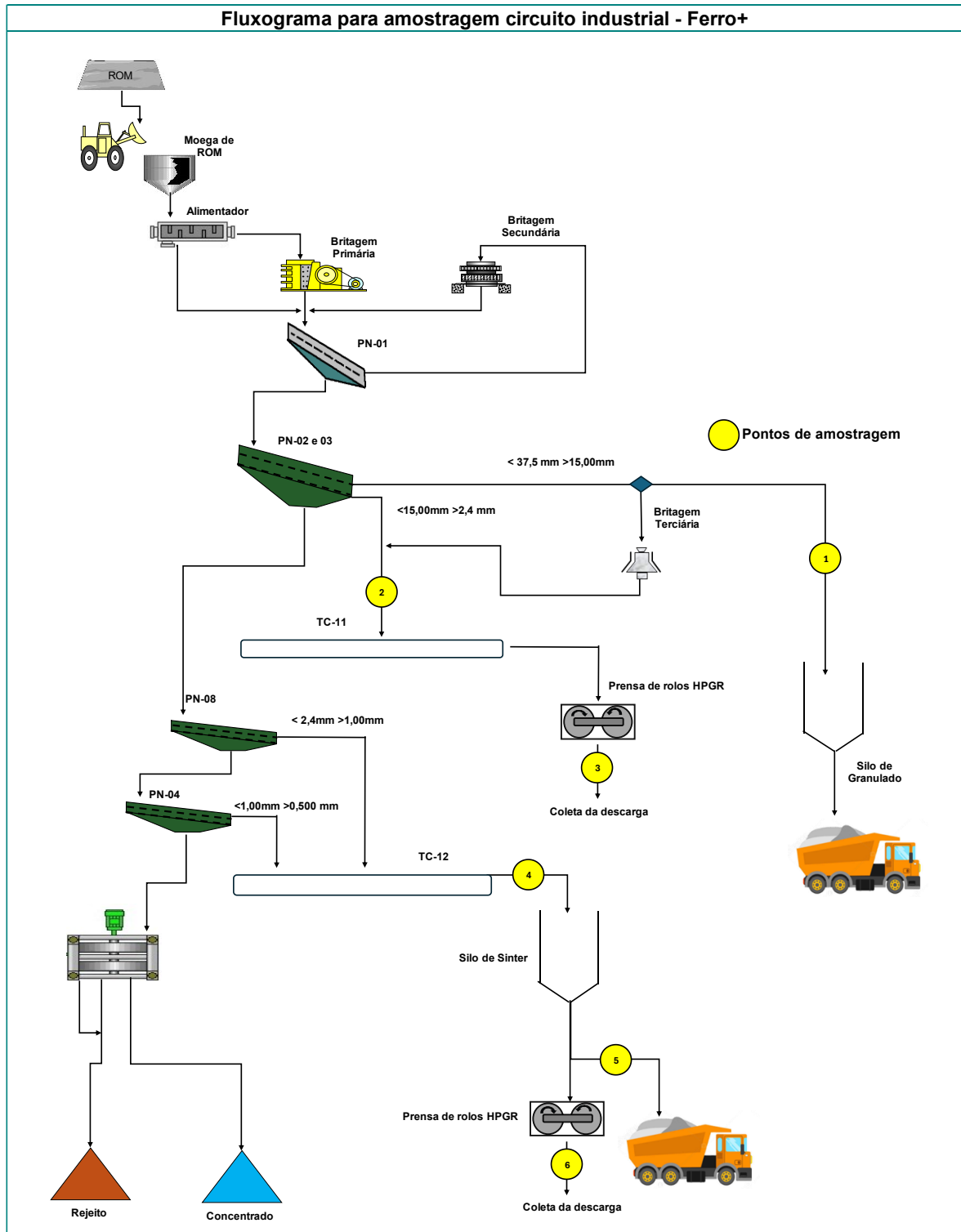
5.1 Fluxograma para amostragem no circuito industrial – Ferro +

Para embasar a análise dos resultados, retoma-se o fluxograma de amostragem do circuito industrial, previamente apresentado, como base para a identificação dos pontos de coleta e compreensão do trajeto percorrido pelo material ao longo do processo. Essa representação orientou a definição da estratégia de amostragem adotada e possibilitou a correlação direta dos dados obtidos com as etapas específicas de cominuição, conforme detalhado nos resultados a seguir.

O fluxograma também permite uma interpretação mais precisa dos impactos provocados pelas características granulométricas e pelo teor de umidade presentes na alimentação dos equipamentos fatores que comprometem diretamente o desempenho das prensas de rolos e favorecem o aumento da carga circulante no circuito.

Essas condições operacionais reduzem a eficiência do processo de cominuição, limitando a geração de partículas finas adequadas à separação magnética e, conseqüentemente, diminuindo a massa aproveitável no processo. Com isso, ocorre o acúmulo de material mais grosso, reflexo da baixa taxa de fragmentação das prensas, e um aumento na produção de finos com elevada umidade, que retornam à alimentação das prensas, agravando ainda mais a recirculação no sistema.

Figura 16- Fluxograma de amostragem



Fonte: elaboração própria (2024)

5.2 Desenvolvimento dos testes – 1º e 2º campanha

5.2.1 Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11 e silo de Sínter feed

As Figuras 17 e 18 ilustram as características dos materiais de alimentação utilizados nos experimentos. O material coletado na correia transportadora TC-11 apresentou um teor de umidade de 4,04%, enquanto o material proveniente do silo de sínter apresentou umidade significativamente maior, de 12,79%. Esses dados são fundamentais para compreender as diferenças no comportamento dos materiais durante os testes de cominuição.

Figura 17 - Origem: TC- 11



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 18 - Origem: Silo Sínter



Fonte: O próprio autor (2024)

Inicialmente, foram realizados testes com a amostra coletada na TC-11, caracterizada por uma maior granulometria. Posteriormente, foi utilizada uma segunda amostra, proveniente do silo de sinter, a qual, devido à presença de carga circulante, apresentou maior proporção de frações finas e maior teor de umidade. A taxa de alimentação utilizada nos testes foi de 70 t/h, conforme aferida durante a execução experimental.

Após a conclusão dos testes com a amostra da TC-11, realizou-se a preparação da área de estocagem para o recebimento da nova amostra oriunda do silo de Sinter Feed. Com a nova amostra devidamente armazenada, foram conduzidos os testes subsequentes.

Durante os experimentos, foi constatado que, além da granulometria, o teor de umidade desempenhou um papel significativo na performance da prensa de rolos. Em condições de baixa umidade, o material foi eficientemente capturado pelos rolos e conduzido ao interior do equipamento para a realização da cominuição. No entanto, com teores elevados de umidade, observou-se um comportamento distinto: o material apresentou tendência a escorregar sobre a superfície dos rolos, dificultando o processo de cominuição efetiva. Esse fenômeno é ilustrado nas figuras apresentadas a seguir.

Figura 19 - Umidade 4,04%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 20 - Descarga da amostra TC-11



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 21- Umidade 12,79%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 22- Descarga da amostra Silo Sínter



Fonte: O próprio autor (2024)

As amostragens das descargas foram realizadas em diversos pontos estratégicos da pilha, utilizando um coletor especialmente projetado para alcançar camadas em maior profundidade. Esse procedimento teve como objetivo garantir a obtenção de uma amostra mais representativa da heterogeneidade do material presente na pilha. As amostras coletadas foram, então, encaminhadas para análise de granulometria, visando caracterizar as propriedades físicas do material de forma abrangente e confiável.

Figura 23 - TC-11 umidade 4,04%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 24- Silo Sínter - umidade 12,79%

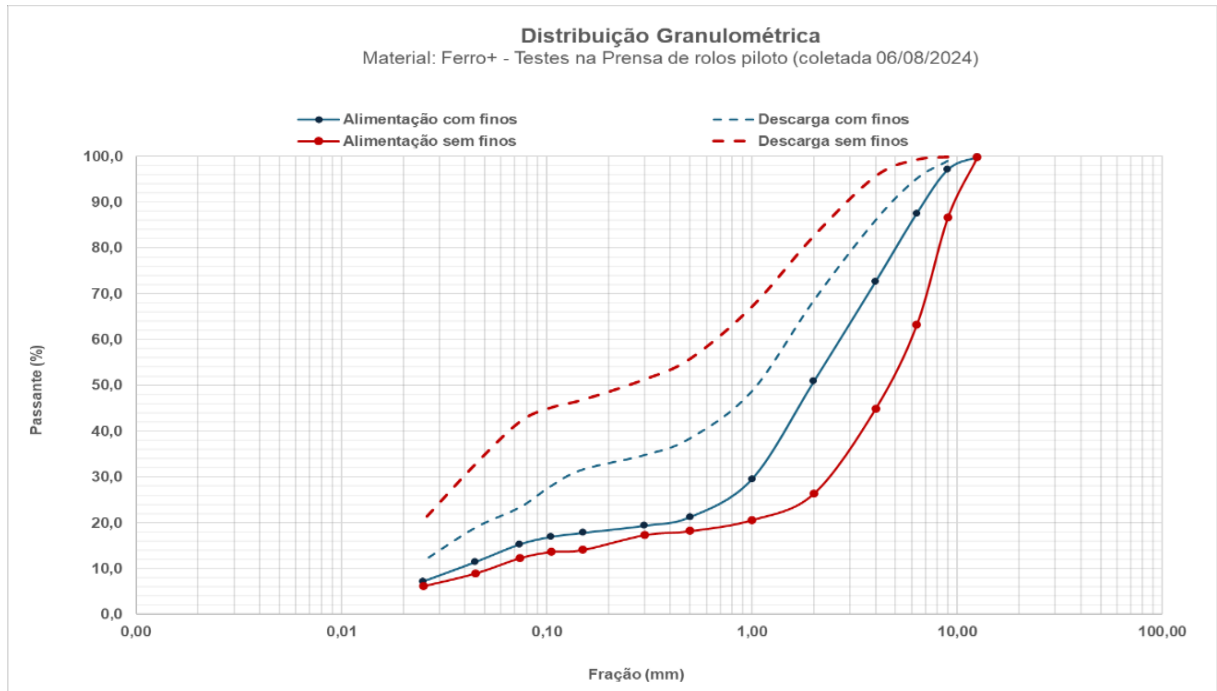


Fonte: O próprio autor (2024)

5.2.2 Análise Granulométrica

As curvas granulométricas das amostras de alimentação e dos produtos obtidos nos testes são apresentadas no Gráfico 1, evidenciando as diferenças entre duas condições operacionais distintas. A primeira condição refere-se a material coletado na correia transportadora TC-11, caracterizado pela ausência da fração fina, enquanto a segunda representa o material na condição "tal qual", coletado no silo de sinter, contendo a fração fina naturalmente presente no processo. A comparação dessas curvas permite avaliar as variações no perfil granulométrico decorrentes da presença ou ausência dos finos e seu efeito sobre a eficiência da cominuição realizada pela prensa de rolos.

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica da 1ª campanha de testes



Fonte: O próprio autor (2024)

Observou-se uma maior eficiência de moagem na amostra isenta de finos, evidenciada pelo distanciamento significativo entre as curvas de alimentação e descarga da prensa de rolos lisos. Contudo, não é possível, neste momento, determinar com precisão qual condição operacional predominou na melhoria da eficiência: se a granulometria ou a umidade da amostra.

Na segunda campanha, foi mantida a mesma metodologia, realizando dois ensaios na prensa de rolos com materiais de características distintas: o primeiro, obtido do silo de sinter, contendo frações finas oriundas da carga circulante, e o segundo, proveniente da TC-11, isento de frações finas.

As amostragens foram realizadas pela equipe de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e destinadas aos testes na prensa de rolos de alta pressão (HPGR), modelo HRC 800, equipada com rolos lisos.

As Figuras 25 e 26 ilustram a alimentação das prensas de rolos, com o material proveniente da TC-11 apresentando umidade de 6,0% e o material oriundo do silo de sinter feed com umidade de 12,03%.

Figura 25- Origem: TC- 11



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 26- Origem: Silo Sínter



Fonte: O próprio autor (2024)

Seguindo os mesmos padrões adotados no teste anterior, foi realizada a preparação da área para o recebimento da amostra. Em seguida, os ensaios foram conduzidos com a amostra isenta de finos, coletada na TC-11, com o objetivo de evitar possíveis contaminações no processo, considerando que o material do silo de sinter feed contém frações de finos. Para os testes, foi estabelecida uma taxa operacional de 70 t/h, aferida ao longo da execução dos experimentos.

Após a finalização dos testes com a amostra referentes a TC-11, foram iniciados os ensaios com a amostra "tal qual", contendo frações de finos, coletada no silo de sinter feed.

As amostragens das descargas foram realizadas em diversos pontos, utilizando um coletor que permitiu acessar a pilha em maior profundidade. Essa metodologia buscou

garantir a obtenção de uma população da amostra mais representativa para posterior análise granulométrica, mitigando os efeitos de segregação natural do material.

Figura 27- TC-11 – Umidade 6,0%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 28- Silo Sínter - umidade 12,03%



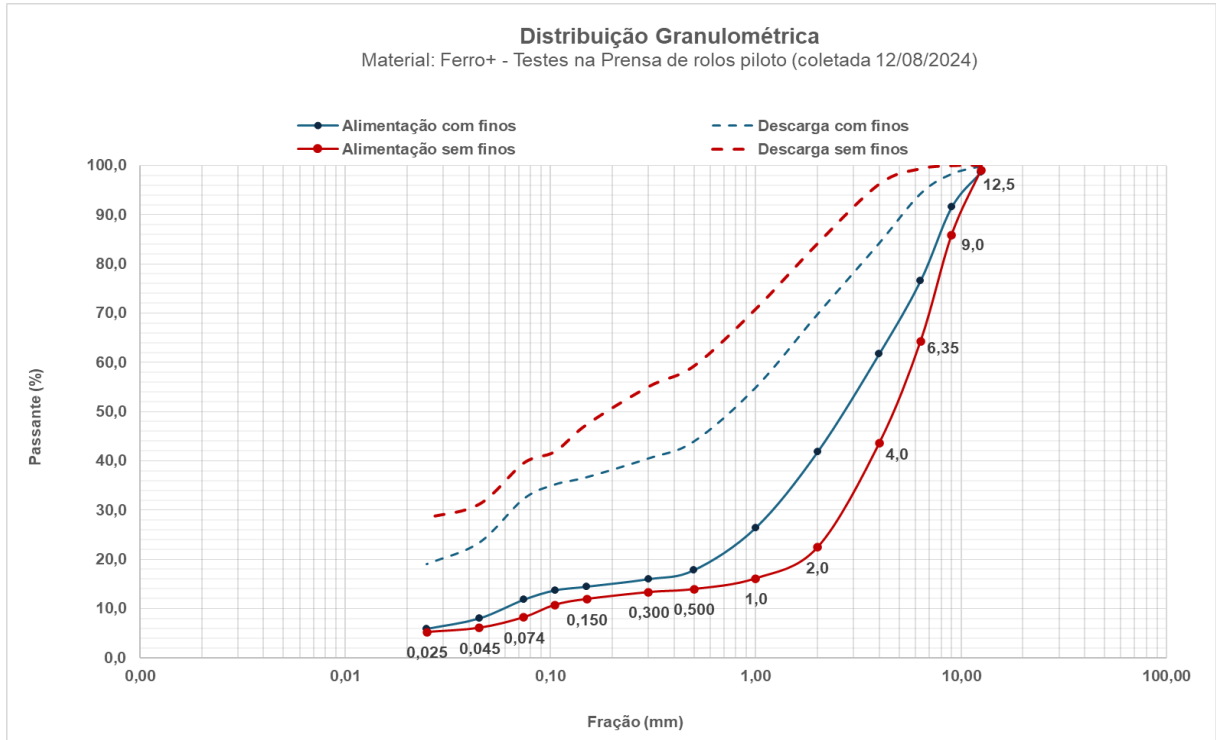
Fonte: O próprio autor (2024)

5.2.3 Análise Granulométrica

O Gráfico 2 apresenta as curvas granulométricas correspondentes às amostras de alimentação e aos produtos gerados durante os testes. As amostras analisadas incluem material proveniente da correia transportadora TC-11, caracterizado pela ausência da fração fina, e material coletado no silo de Sínter Feed, que contém os finos oriundos da carga circulante do processo. A comparação dessas distribuições granulométricas possibilita a

avaliação do impacto da fração fina na fragmentação do minério durante a operação da prensa de rolos.

Gráfico 2 - Distribuição granulométrica da 2ª campanha de testes



Fonte: O próprio autor (2024)

Observa-se uma maior eficiência de moagem na amostra da TC-11, evidenciada por um distanciamento considerável entre as curvas de alimentação e descarga da prensa de rolos lisos. Embora os resultados proporcionem uma percepção das condições operacionais, ainda não é possível determinar com precisão e assertividade qual fator teve maior influência na melhoria da moagem, se a granulometria ou a umidade.

5.3 Desenvolvimento dos testes – 3ª campanha

5.3.1 Testes na prensa de rolos com amostras da TC-11, Silo de Sínter Feed e Silo de Granulado

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam a alimentação da prensa de rolos com diferentes materiais: o material da TC-11 com uma umidade de 5,03%, o material do silo de sínter com

uma umidade natural de 13,53%, e o material do mesmo silo após a perda de umidade, resultando em uma umidade de 9,0%.

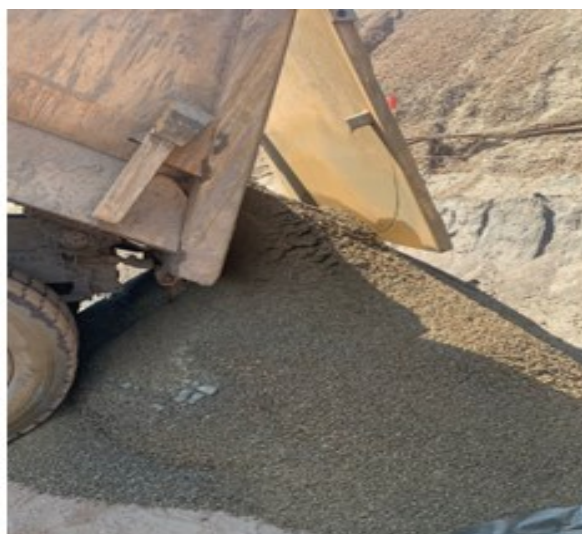
Estas variações são cruciais para entender a influência da granulometria e a umidade na alimentação da prensagem de rolos, contribuindo para a otimização do processo e a melhoria dos parâmetros operacionais. Os dados obtidos a partir destas amostras fornecem insights valiosos para ajustes nas condições de operação e no tratamento prévio dos materiais, visando maximizar a eficiência do processo industrial e a qualidade do produto final.

Figura 29 - TC-11 – Umidade 5,03%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 30 - Silo Sínter – Umidade tal qual 13,53%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 31- Silo Sínter – após perda de umidade 9,0%



Fonte: O próprio autor (2024)

As amostragens das descargas foram realizadas na pilha em diversos pontos, utilizando-se um coletor especialmente projetado para alcançar maiores profundidades na pilha. Esse procedimento foi fundamental para garantir a obtenção de uma amostra mais representativa do material. A estratégia de amostragem mais profunda na pilha visou mitigar os efeitos da segregação natural do material, que frequentemente resulta na formação de uma “saia” na pilha, comprometendo a uniformidade das amostras.

Figura 32 - TC-11 – Umidade 5,03%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 33 - Silo Sínter – Umidade tal qual 13,53%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 34 - Silo Sínter – após perda de umidade 9,0%

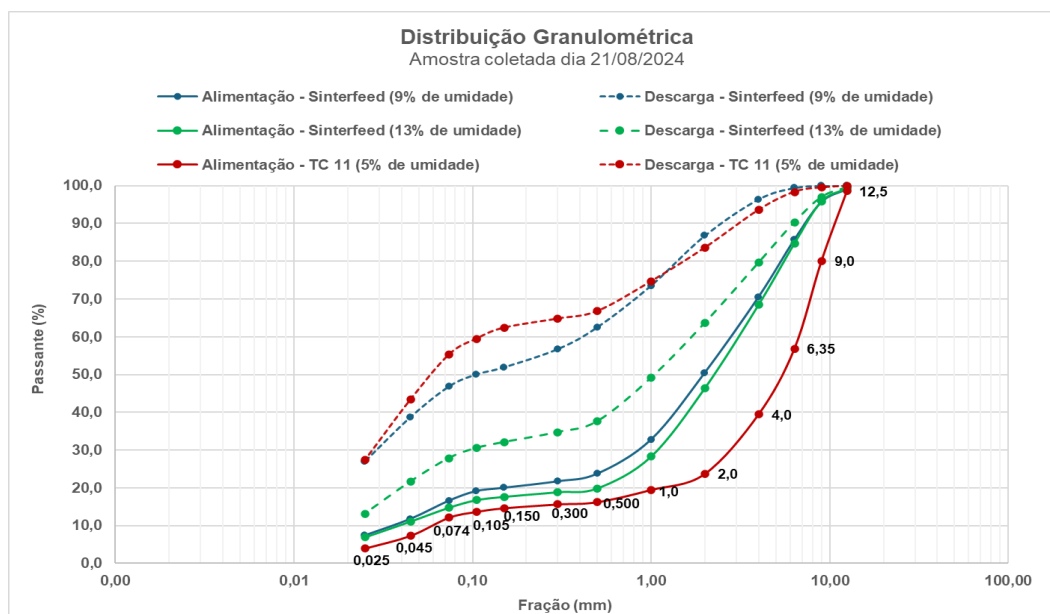


Fonte: O próprio autor (2024)

5.3.2 Análise Granulométrica

O Gráfico 3 exibe as curvas granulométricas das amostras de alimentação e dos produtos obtidos nos testes, incluindo materiais coletados na correia transportadora TC-11, isentos de fração fina, e amostras do silo de sinter, contendo finos tanto em sua condição natural de umidade (“tal qual”) quanto após a redução do teor de umidade. Essa análise possibilita comparar os efeitos da presença e da umidade dos finos sobre o perfil granulométrico durante o processo de cominuição.

Gráfico 3 - Distribuição granulométrica da 3ª campanha de testes



Ao comparar as amostras coletadas no silo de síter, uma com umidade tal qual e outra após a perda de umidade por 23 horas, ambas contendo finos, verificou-se uma melhor eficiência de moagem na amostra com menor teor de umidade. No entanto, a maior eficiência de moagem foi observada na amostra sem finos, evidenciada por um maior distanciamento entre as curvas de alimentação e descarga na prensa de rolos de superfície lisa.

Os resultados indicam que, nas condições testadas, a granulometria desempenhou um papel mais significativo na eficiência do processo de moagem em comparação com a umidade do material.

5.3.3 Testes na Prensa de Rolos com 100% Granulado e Mistura 80% Síter Feed +20% Granulado

As Figuras 35 e 36 ilustram a alimentação das prensas de rolos com diferentes materiais sendo 100% granulado e mistura considerando síter feed + granulado na proporção de 80/20.

As imagens fornecem uma visão detalhada das condições de alimentação utilizadas nos ensaios, permitindo uma análise comparativa do impacto das granulometrias e umidade nos processos de compactação.

Figura 35- Granulado - Umidade 3,12%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 36 - Sínter Feed + Granulado



Fonte: O próprio autor (2024)

Respeitando os procedimentos estabelecidos, as amostragens das descargas foram realizadas em diversos pontos utilizando um coletor especializado. Este equipamento permitiu o acesso a camadas mais profundas da pilha, garantindo a obtenção de amostras mais representativas. As amostras coletadas foram posteriormente enviadas para ensaios de granulometria, com o objetivo de evitar a formação de uma "saia" que causa a segregação

natural do material, assegurando assim a uniformidade e a confiabilidade dos dados granulométricos obtidos.

Figura 37- Granulado - Umidade 3,12%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 38 – *Blend Sínter Feed + Granulado* Umidade 4,65%



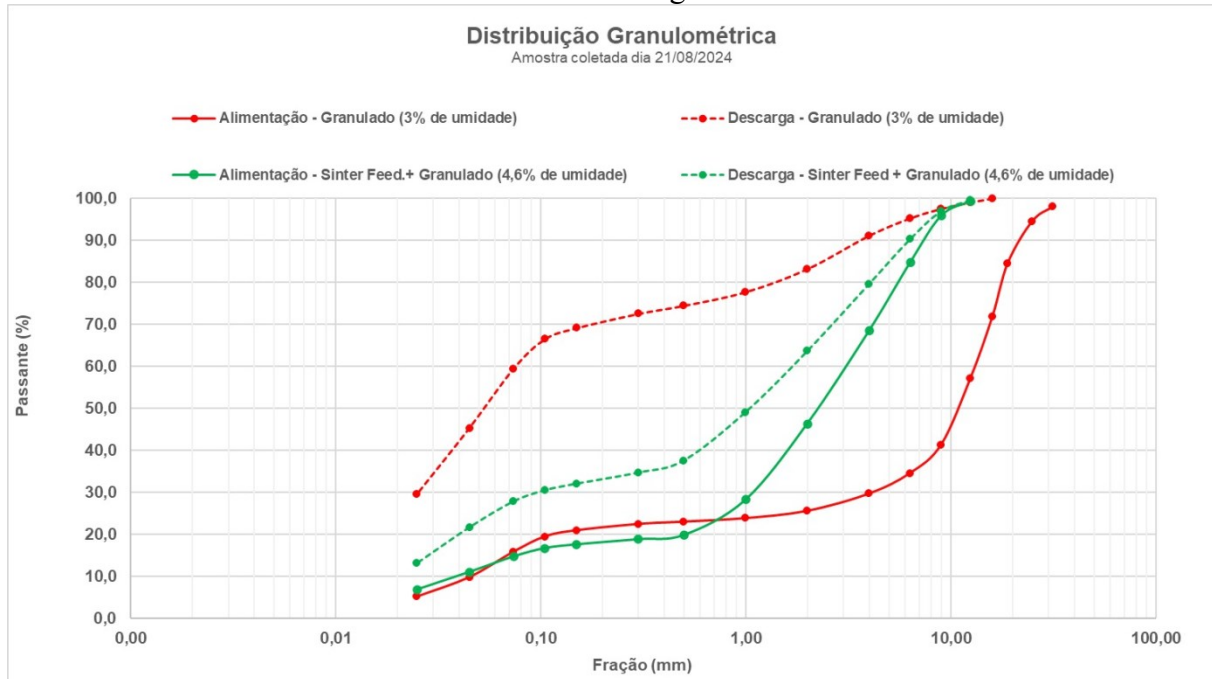
Fonte: O próprio autor (2024)

5.3.4 Granulometria

O Gráfico 4 apresenta as curvas granulométricas das amostras de alimentação e dos produtos obtidos nos testes realizados com material do silo de granulado, assim como com a mistura composta por sinter feed e granulado. A análise comparativa dessas distribuições evidencia as variações no perfil granulométrico entre os diferentes materiais processados,

possibilitando a avaliação do impacto das composições utilizadas sobre a eficiência do processo de cominuição.

Gráfico 4 - Distribuição granulométrica da 3ª campanha de testes com granulado e *blend* sinter feed + granulado



Fonte: O próprio autor (2024)

Os resultados indicaram uma melhor performance de moagem na prensa quando utilizada uma alimentação composta por 100% de granulado.

5.4 Desenvolvimento dos testes – 4ª campanha

5.4.1 Testes na prensa de rolos com Granulado e Composição de misturas (*blend*) com Granulado + Sinter Feed

A Figura 39 apresenta os materiais amostrados no silo de granulado, com uma umidade de 3,75%, e na TC-11, com uma umidade de 6,30%. Esses dados são essenciais para compreender as diferenças nas características dos materiais e seu impacto no desempenho dos testes realizados na prensa de rolos.

Figura 39- Origens: Silo de Granulado e SF grosso da TC-11



Fonte: O próprio autor (2024)

As figuras a seguir ilustram a alimentação das prensas de rolos, com diferentes materiais e níveis de umidade:

- 100% de Granulado com umidade de 3,75%;
- Mistura 80% Granulado + 20% Sínter Feed Grosso com umidade de 4,26%;
- Mistura 70% Granulado + 30% Sínter Feed Grosso com umidade de 4,52%;
- Mistura 60% Granulado + 40% Sínter Feed Grosso com umidade de 4,77%.

Os *blends* compostos destas amostras representam as condições de alimentação utilizadas nos testes para avaliar o desempenho da prensa de rolos em diferentes combinações de materiais e umidade.

Figura 40- 100% Granulado- Umidade 3,75%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 41- *Blend* 80/20% - Umidade 4,26%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 42- *Blend* 70/30% - Umidade 4,52%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 43 - *Blend* 60/40% - Umidade 4,77%



Fonte: O próprio autor (2024)

Para determinar a massa representativa de cada proporção de mistura, foi utilizada a balança da Pá carregadeira, que permitiu pesar as massas e garantir a homogeneização dos *blends* formados.

Os testes começaram com a amostra composta por 100% de granulado. A taxa de alimentação definida para esses testes foi de 70 t/h, valor que foi rigorosamente aferido durante a execução dos ensaios.

Após a conclusão dos testes com a amostra de 100% granulado, os testes seguintes envolveram a mistura de granulado com sínter feed grosso da TC-11 nas diferentes proporções que são citadas acima.

As amostras das descargas foram coletadas em diversos pontos utilizando um coletor, o que permitiu acessar a pilha em maior profundidade e garantir uma amostra mais representativa. As amostras coletadas foram então enviadas para ensaio de granulometria, eliminando a possibilidade da formação de saia devido à segregação natural do material.

Figura 44 - 100% Granulado - Umidade 3,75%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 45- *Blend* 80/20% - Umidade 4,26%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 46- *Blend 70/30%* - Umidade 4,52%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 47- *Blend 60/40%* - Umidade 4,77%



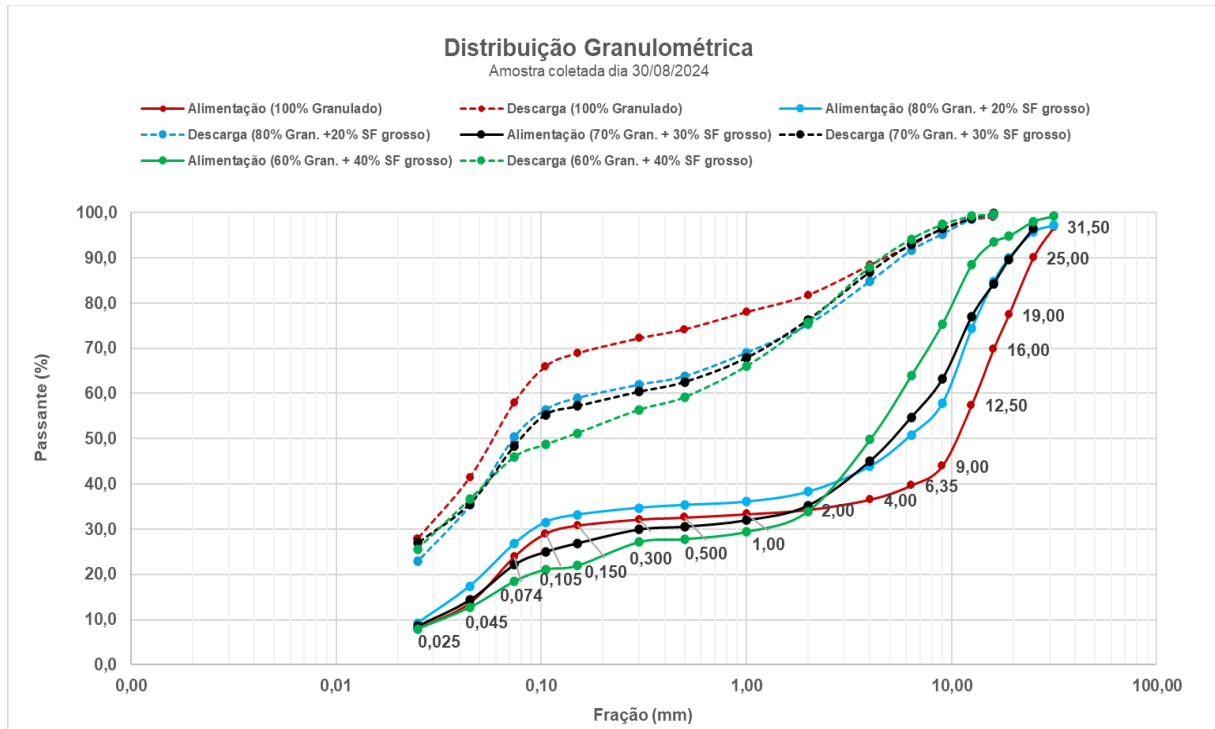
Fonte: O próprio autor (2024)

5.4.2 Análise Granulométrica

O Gráfico 5 apresenta as distribuições granulométricas das amostras de alimentação e dos produtos obtidos nos testes com 100% de minério granulado, assim como com as misturas

de granulado e sinter feed grosso. Essa análise detalhada das curvas granulométricas permite comparar as diferentes condições de alimentação e avaliar seus efeitos sobre o desempenho do processo de moagem.

Gráfico 5- Distribuição granulométrica da 4ª campanha de testes



Fonte: O próprio autor (2024)

Este gráfico requer uma análise detalhada. As curvas granulométricas dos blends 80/20, 70/30 e 60/40 mostram um comportamento bastante similar; no entanto, quando comparadas com os testes realizados com 100% de material granulado um material sem especificação química destinada ao mercado, apresentam uma divergência significativa. Essa diferença, conforme os estudos realizados, já era esperada, uma vez que a granulometria mais grossa (>15,0 mm e <37,5 mm) apresentando o granulado uma umidade restrita à superfície externa criam condições ideais para uma melhor performance do processo. No entanto, o objetivo deste estudo é encontrar uma combinação de mistura (*blend*) que não só garanta a eficiência do processo, mas também maximize o aproveitamento das massas de minério.

Diante dos resultados acima, e buscando encontrar a melhor concepção da mistura (*blend*) será realizada mais uma campanha de testes, utilizando novamente 100% de granulado e a mistura na proporção de 60% granulado e 40% sinter feed grosso, com o objetivo de corroborar com os achados obtidos na quarta campanha de testes e validar as conclusões anteriores.

5.5 Desenvolvimento dos testes – 5º campanha

5.5.1 Testes na prensa de rolos com 100% Granulado e Mistura *blend* 60% Granulado + 40% Sinter Feed

A Figura 48 ilustra os materiais amostrados, com o granulado apresentando uma umidade de 3,53% e o material da TC-11 com uma umidade de 5,80%. Esses dados são fundamentais para a análise comparativa dos diferentes materiais e suas influências no desempenho do processo de moagem.

Figura 48 - Origens: Silo de Granulado e SF grosso da TC-11



Fonte: O próprio autor (2024)

As Figuras 49 e 50 ilustram a alimentação das prensas de rolos, com as seguintes condições:

- 100% de Granulado umidade 3,53%;
- Mistura de 60% Granulado + 40% Sínter Feed Grosso umidade 4,43%.

Essas imagens representam as condições de alimentação utilizadas na quinta campanha de testes, permitindo uma análise detalhada do impacto da umidade e das proporções de mistura no desempenho das prensas de rolos.

Figura 49 - 100% Granulado- Umidade 3,53



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 50 - Blend 60/40% - Umidade 4,43%



Fonte: O próprio autor (2024)

Os testes foram inicialmente realizados com a amostra de 100% de granulado, com a taxa de alimentação definida em 70 t/h, valor que foi cuidadosamente aferido durante a execução dos ensaios.

Após a conclusão dos testes com a amostra de 100% de granulado, foi realizado o teste com a mistura de granulado e sinter feed grosso da TC-11.

As amostras das descargas foram coletadas em diversos pontos com o auxílio de um coletor especializado, que permitiu acessar as camadas mais profundas da pilha, garantindo a obtenção de amostras mais representativas. Essas amostras foram enviadas para ensaios de granulometria.

Figura 51- 100% Granulado – Umidade 3,53%



Fonte: O próprio autor (2024)

Figura 52- Blend 60/40% - Umidade 4,43%

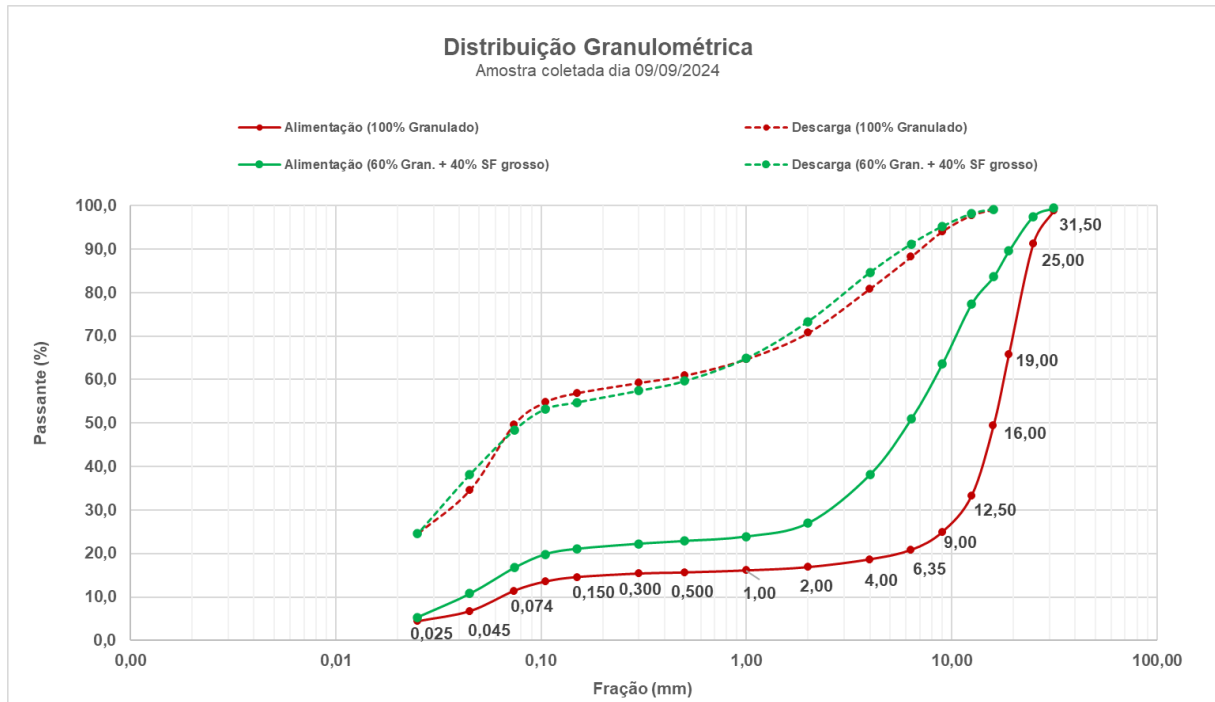


Fonte: O próprio autor (2024)

5.5.2 Análise Granulométrica

O Gráfico 6 apresenta as distribuições granulométricas das amostras de alimentação e dos produtos obtidos nos testes com 100% de minério granulado, bem como com a mistura de granulado e sinter feed grosso. Essa comparação detalhada das curvas granulométricas possibilita avaliar o efeito das diferentes composições sobre a eficiência do processo de moagem e compactação durante a operação da prensa de rolos.

Gráfico 6 - Distribuição granulométrica da 5ª campanha de testes



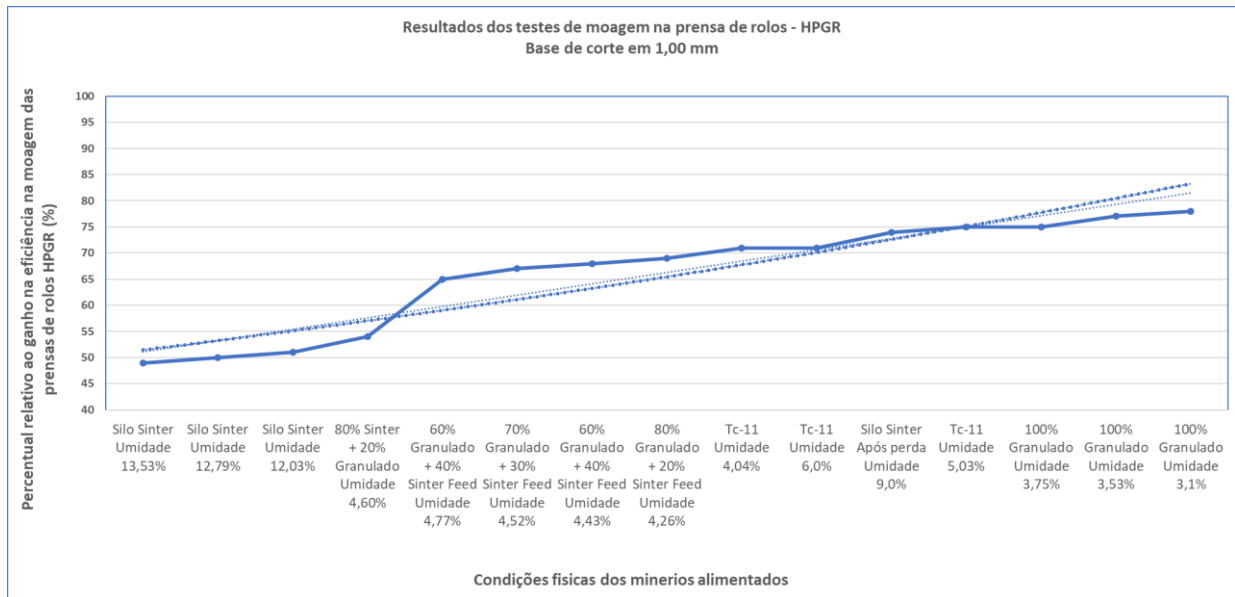
Fonte: O próprio autor (2024)

Observou-se que, em ambas as condições comprovadas, a moagem dos materiais foi realizada, com introdução significativa entre as curvas de alimentação e descarga. Entretanto, conforme evidenciado em testes anteriores, a amostra por 100% de granulado apresentou uma eficiência de detalhamento superior, sabendo-se que a composição granulométrica proporcional do material é determinante para a otimização do processo.

O apêndice que segue apresenta uma consolidação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios conduzidos na prensa de rolos (HPGR), oferecendo uma visão integrada do comportamento dos minérios sob distintas condições operacionais. A análise foi estruturada na fração inferior a 1,0 mm, adotada como critério de corte para avaliação da eficiência relativa do processo de cominuição das prensas de rolos.

O gráfico 7 confirma que a eficiência de cominuição está fortemente condicionada por dois fatores principais: umidade e granulometria do material alimentado. A representação gráfica evidencia a correlação entre essas variáveis, permitindo identificar as combinações que favorecem o maior desempenho do equipamento.

Gráfico 7 - Visão geral da eficiência de moagem da prensa de rolos HPGR considerando todas as condições de testes



Fonte: O próprio autor (2025)

A perspectiva global apresentada no gráfico acima nos possibilita compreender não apenas a influência individual de cada parâmetro, mas também o efeito combinado entre eles, oferecendo subsídios técnicos para a definição de condições operacionais que maximizem a eficiência do processo e aprimorem a performance da prensa de rolos. A consolidação dos dados em um único gráfico viabiliza uma análise macro dos resultados, facilitando a interpretação de tendências gerais e o entendimento do comportamento dos minérios em diferentes cenários de umidade e granulometria. Essa abordagem amplia a visão sobre o potencial da tecnologia HPGR, permitindo avaliar de forma comparativa a eficiência do processo em todos os testes realizados.

6 CONCLUSÃO

Os estudos realizados para avaliar a influência da granulometria e da umidade na performance das prensas de rolos (HPGR) demonstraram que minérios com maior granulometria e menor teor de umidade apresentam desempenho superior no processo de cominuição. Esse comportamento foi particularmente evidente nas amostras compostas por 100% de material granulado, caracterizado como um subproduto da mineração, sem especificação química que atenda ao mercado.

A umidade mostrou-se um parâmetro crítico para a eficiência do processo. Sob condições de baixa umidade, o minério é eficientemente capturado e conduzido pelos rolos, garantindo maior tração e eficiência de moagem. Por outro lado, em teores mais elevados, observou-se deslizamento do material sobre os rolos, comprometendo o aproveitamento energético e reduzindo a efetividade da cominuição.

Embora o uso de material 100% granulado tenha promovido a maior redução granulométrica, a análise sistêmica do processo evidencia que a alimentação da TC-11 sem a presença de finos provenientes da carga circulante apresenta um comportamento mais equilibrado em relação às premissas operacionais. Ressalta-se, ainda, que a rota de processo deve contemplar não apenas o desempenho da moagem, mas também a etapa subsequente de separação magnética, que demanda a geração de finos <1,00mm para assegurar a eficiência global da planta.

Nesse contexto, a estratégia operacional proposta pelo setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) consiste em adotar condições de alimentação das prensas HPGR com menor teor de umidade e ausência de finos oriundos da carga circulante, priorizando uma mistura composta por minério da Tc-11 associado a granulado. Essa configuração foi comprovada como a mais adequada nos ensaios, possibilitando simultaneamente a otimização da moagem, a ampliação da taxa de alimentação e a melhoria da etapa de concentração magnética com aumento da fração menor que 1,00mm.

Adicionalmente, destaca-se que o granulado empregado na alimentação das prensas de rolos corresponde a produtos fora de especificação química para o mercado, o que favorece o aproveitamento desse material dentro do processo produtivo da cominuição dos HPGR. Essa condição contribui diretamente para o cumprimento das metas de eficiência estabelecidas, reforçando a aplicabilidade industrial dos resultados obtidos e consolidando uma proposta operacional mais robusta para a utilização da tecnologia HPGR em escala industrial.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros a serem implementados na planta de beneficiamento, com o objetivo de melhorar a recuperação e a eficiência do circuito produtivo, o setor de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da mineradora, recomenda a substituição do britador terciário HP-200 por uma prensa de rolos para a cominuição de material 100% granulado um material sem especificação química destinada ao mercado. Além disso, sugere-se uma alteração no processo com a redução das malhas da peneira PN-03 para 9,0 mm, a fim de reter uma maior quantidade de material granulado para alimentação da prensa de rolos. A granulometria mais grossa, combinada com uma umidade superficial reduzida, em torno de 4,0%, demonstrou garantir uma excelente performance no processo de moagem.

Outra vantagem associada à substituição do britador HP-200 pela prensa de rolos HRC 800 refere-se ao tipo de minério alimentado na planta. Quando o minério apresenta características argilosas, ocorre o embuchamento do britador, o que não é observado no processo com a prensa de rolos, contribuindo para maior eficiência operacional.

Com o objetivo de reduzir a carga circulante com a possibilidade de geração de um novo produto, o setor de P&D ainda investigou os minérios com granulometria inferior a 2,0 mm e propôs a implantação do processo de concentração por espirais, uma vez que este material apresenta viabilidade econômica de mercado. Essa abordagem visa eliminar a recirculação desse material como carga circulante para as prensas de rolos HRC 800.

É importante destacar que os testes realizados pela equipe de P&D foram conduzidos utilizando a prensa de rolos lisos, enquanto os equipamentos da Usina são equipados com rolos pinados, o que tende a aumentar a performance das prensas.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A.C. **Introdução ao tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

AZAPAGIC, A. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 12, n. 6, p. 639- 662, 2004.

BARRIOS, G.K.P. **Modelagem da Prensa de Rolos Usando o Método dos Elementos Discretos com Acoplamento Dinâmico e o Modelo de Substituição de Partículas**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

BERGERMAN, M. G.; Cominuição fundamentos. Curso de especialização em tratamento de minérios. Catalão, 26 out. 2012. 33 slides. Notas de aula. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/02._Cominuicao_-_fundamentos.pdf>. Acesso em: 19 de junho de 2025.

CAMPOS, T. M. **Modelagem matemática da prensa de rolos aplicada à cominuição de minério de ferro**. Orientadores: Luís Marcelo Marques Tavares e Gabriel Kamilo Pantoja Barrios. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/18051/1/monopoli10026009.pdf>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024.

CHAVES, A. P. **Teoria e pratica do tratamento de Minérios**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

CHAVES, A.P. **Beneficiamento de Minérios**. São Paulo: Cortez, 2003.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia mineral do Brasil**. Disponível em:

<https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3974>, 2009. Acesso em: 06 de setembro 2024.

FERRO, F. H. **Aplicação de modelagem em regressão linear para solução de limitação operacional em uma prensa de rolos de alta pressão**. Orientadora: Jussara Farias Fardin. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_12745_Disserta%E7%E3o%20Aplica%E7%E3o%20MRL%20Solu%E7%E3o%20HPGR.PDF. Acesso em: 10 de dezembro de 2024).

GOMES, F. B. **A prensa de rolos como alternativa para os circuitos de cominuição nas atividades de mineração e a viabilidade de sua aplicação**. Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres. 2010. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1321M.PDF>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2024.

KLYMOWSKY, R.; PATZELT, N. *Application of HPGR in Comminution Circuits*. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.062>>. Acesso em: 12 de abril de 2025.

LUZ, A. B. da, SAMPAIO, J. A., SALVADOR, L.M. **Tratamento de Minérios**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2004.

LUZ, A.B.da; ALMEIDA, P. **Tratamento de Minérios**. São Paulo: Cortez, 1989.

LUZ, A. B da.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

METSO OUTOTEC. *HRC™800 - High Pressure Grinding Rolls (HPGR): Parâmetros Operacionais*. Disponível em: <<https://www.mogroup.com>>. Acesso em: 13 de abril de 2025.

MORLEY, C. *High Pressure Grinding Rolls (HPGR) in Mineral Processing*. 2008. Disponível em:<<https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2410288>>. Acesso em: 12 de abril de 2025.

NANDI, V. S., VICENTE, C. A., SILVA, A. L., MONTEDO, O. R. K., OLIVEIRA, A. P. N.. Influência do Teor de Umidade das Matérias-Primas no Tempo de Escoamento das Barbotinas. *Cerâmica Industrial*, 16(4), 2011.

NUNES, A. P. L. O papel da mineração como base de todas as outras indústrias. **Revista TecHoje**, 2014. Disponível em:<http://www.techoje/categoria/detalhe_artigo/1892>. Acesso em: 13 de setembro de 2024.

PENNA, C. G. **Efeitos da mineração no meio ambiente**. (o)eco, 2009. Disponível em: <www.eco.com.br/carlos-gabaglia-penna/20837-efeitos-da-mineracao-no-meio-ambiente>. Acesso em: 03 de setembro de 2024.

PRNO, J. An analysis of factors leading to the establishment of a social license to operate in the mining industry. **Resources Policy**, v. 38, n. 4, p. 577-590, 2013.

RIBEIRO, F. S.; RUSSO, J. F. C.; COSTA, T. Aplicação de prensas de rolos em minério de ferro. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 399-404, 2010. DOI: 10.1590/S0370-44672010000200027. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rem/a/cHXy8pMRg7QCrhKYFNhvDhN/?lang=pt>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2024.

ROSA, A. C.; CARVALHO, D.; DONDA, J. D. Uso de HPGR (*High Pressure Grinding Rolls*) na Etapa de britagem dos concentradores de Germano – Samarco Mineração. **39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro**, Ouro Preto, p. 195-204, 2009. DOI: 10.5151/2594-357X-15530. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/uso-de-hpgr-high-pressure-grinding-rolls-na-etapa-de-britagem-dos-concentradores-de-germano-samarco-mineracao>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2024.

SOUZA, M. C. *et al.* Controle automático de *gap* para prensa de rolos. **19º Seminário de Automação e TI Industrial**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 19, p. 124-131, 2015. DOI: 10.5151/2237-0234-26470. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/control-automat-ico-de-gap-para-prensa-de-rolos>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024.

TORRES, M.; CASALI, A. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls. **Minerals Engineering**, v. 22, n. 13, p. 1137–1146, 2009.

Tratamento de minérios e hidrometalurgia, In memoria Prof. Paulo Abib Andery. Recife. ITEP, 1989.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology**: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Cornwall: Pergamon Press, 7^a ed., 2006.