



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

IGOR QUARESMA VIANNA

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NO PROCESSO DE
COMINUIÇÃO DA PELOTIZAÇÃO: SUBSTITUIÇÃO DA
MOAGEM A ÚMIDO POR MULTIPRENSAGEM A UMIDADE
NATURAL

VITÓRIA
2021

IGOR QUARESMA VIANNA

**INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NO PROCESSO DE
COMINUIÇÃO DA PELOTIZAÇÃO: SUBSTITUIÇÃO DA
MOAGEM A ÚMIDO POR MULTIPRENSAGEM A UMIDADE
NATURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração Gestão Sustentável e Energia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Carla Cesar Martins Cunha

**VITÓRIA
2021**

IGOR QUARESMA VIANNA

**INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NO PROCESSO DE
COMINUIÇÃO DA PELOTIZAÇÃO: SUBSTITUIÇÃO DA
MOAGEM A ÚMIDO POR MULTIPRENSAGEM A UMIDADE
NATURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, na área de concentração Gestão Sustentável e Energia.

Aprovada em 03 de setembro de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Carla Cesar Martins Cunha
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Eng. Dr. Maycon Athayde
Quebec Iron Ore
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fortalecer e prover sabedoria para tomar as melhores decisões diante inúmeros caminhos que determinam nossa jornada e edificam nosso legado.

Aos meus pais e ao meu irmão que sempre me aconselharam a seguir pelo caminho da educação, que se sacrificaram em prol da minha formação e me guiaram sendo exemplos de caráter, determinação e amor ao próximo.

À minha esposa por todo o seu empenho na união da nossa família, por ter gerado o nosso filho, nosso bem mais precioso que transformou nossas vidas em todos os sentidos e por todo seu apoio ao longo dessa longa jornada.

À minha orientadora Professora Dra. Carla C. M. Cunha por todas as suas recomendações, sua dedicação e seu tempo empenhado à nossa pesquisa.

Agradeço, por fim, à Vale S.A e todos meus colegas de trabalho que me apoiaram e incentivaram, fornecendo todas as condições e recursos para suportar todo este processo de inovação e pesquisa.

RESUMO

O processo de pelletização das usinas de pelletização da Vale S.A. é composto por diferentes operações unitárias, dentre elas, a cominuição, ou fragmentação, das partículas de minério de ferro, realizada tradicionalmente por moinhos de bolas a úmido, conhecidos por apresentarem baixa eficiência energética, e a prensa de rolos de alta pressão (HPGR, do inglês *high pressure grinding roll*), comumente associada a equipamentos de maior eficiência de fragmentação. Em virtude da operação de uma moagem a úmido, operações de desaguagem como espessamento e filtração são necessárias para adequar a umidade das partículas para o processo de aglomeração. O desenvolvimento de rotas de cominuição à umidade natural são capazes de simplificar o processo de pelletização, promovendo oportunidades de ganhos como redução de gastos operacionais, ganhos ambientais e redução de riscos associados ao bombeamento e ao transporte de polpas. O presente trabalho analisou em escala piloto a substituição da rota tradicional pela rota realizada por múltiplas prensagens, avaliando seu potencial de aplicação nas Usinas 1 e 2 da Vale S.A. na Unidade Industrial Tubarão, em Vitória, ES. Os resultados da nova rota demonstraram uma diminuição de 53% dos gastos operacionais, benefícios ambientais com a redução anual de 457.250 l de água, o que representa a eliminação do consumo de água nova no processo de cominuição, 89.292 l de óleo lubrificante, 6.480 kg de graxa mineral e 29.760 MWh de energia elétrica, equivalentes a 98,4, 66,7 e 18,3% de redução, respectivamente. As pelotas queimadas da nova rota apresentaram boa resistência à compressão e pequeno aumento da abrasão, demonstrando viabilidade quanto à qualidade física destas. Por outro lado, houve pequena perda de qualidade metalúrgica (menor metalização e redutibilidade) que pode estar associada a uma menor umidade das pelotas cruas (necessária para formação das pelotas da nova rota) e maior degradação após redução, tópico este que pode ser endereçado com maior grau de aprofundamento em estudos futuros, de modo a elevar a confiabilidade e atratividade desta nova rota de cominuição.

Palavras-chave: Moagem. Cominuição. HPGR. Moinho de bolas. Eficiência energética. Pelotização. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The pelletizing process of Vale S.A.'s pelletizing plants is composed of different unit operations, among them, the comminution, or fragmentation, of iron ore particles, traditionally carried out by wet ball mills, known to have low energy efficiency, and high-pressure grinding roll (HPGR), commonly associated with higher fragmentation efficiency equipment. Due to the operation of a wet grinding, dewatering operations such as thickening and filtration are necessary to adjust the moisture of the particles for the agglomeration process. The development of dry or natural moisture grinding routes can simplify the pelletizing process, promoting opportunities for gains such as reduction of operating expenses, environmental gains and reduction of risks associated with pumping and transport of pulps. The present work analyzed on a pilot scale the replacement of the traditional route by the route performed by multiple pressings, analyzing its application potential in Vale S.A.'s Plants 1 and 2. The results of the new route demonstrated a 53% reduction in operating expenses, environmental benefits with the reduction of 457,250 l of water, which represents the elimination of new water consumption in the comminution process, 89,292 l of lubricating oil, 6,480 kg of mineral grease and 29,760 MWh of electricity per year, equivalent to 98,4, 66,7 and 18,3% reduction, respectively. The fired pellets of the new route showed good compressive strength and a minor abrasion increase, demonstrating viability regarding their physical quality. On the other hand, there was a slight loss of metallurgical quality (lower metallization and reducibility) that may be associated with a lower moisture of the green pellets (necessary for the formation of the pellets of the new route), and greater degradation after reduction, which can be addressed in a greater degree of deepening in future studies, to increase the reliability and attractiveness of this new route of comminution.

Key-words: Grinding. Comminution. HPGR. Ball mill. Energy efficiency. Pelletizing. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotas de produção do aço	24
Figura 2 – Fluxograma do processo de pelletização das Usinas 3 a 6 – Vale S.A. ...	25
Figura 3 – Evolução da capacidade mundial de produção de pelotas	26
Figura 4 – Principais produtores mundiais de pelotas	27
Figura 5 – Unidade Tubarão em Vitória, ES - Vale S.A.....	28
Figura 6 – (a) Britador tipo mandíbula e (b) moinhos de bolas da 8ª planta de pelotização Vale S.A.	32
Figura 7 – (a) HPGR da Usina 3 - Vale S.A. e (b) ilustração do processo de fragmentação por HPGR.....	32
Figura 8 – Influência das forças capilares no mecanismo de ligação.....	33
Figura 9 – Influência do tamanho do grão e da superfície específica na resistência à compressão das pelotas	33
Figura 10 – Benefícios da eficiência energética	40
Figura 11 – Marcos regulatórios brasileiros para eficiência energética.....	41
Figura 12 – Ranking internacional de eficiência energética - 2018	42
Figura 13 – Regiões de validade das 3 leis.....	47
Figura 14 – Comparação entre a potência calculada e a medida	49
Figura 15 – Fluxograma de execução dos ensaios e tratamento dos dados - Metodologia de Donda	52
Figura 16 – Curvas para determinação do consumo específico.....	53
Figura 17 – Ordem de eficiência energética de cominuição de diferentes modos de quebra	54
Figura 18 – Fragmentação interpartículas.....	54
Figura 19 – Prensa de rolos de alta pressão.....	55
Figura 20 – Influência da umidade na HPGR.....	56

Figura 21 – Processo de escalonamento: razão constante entre o diâmetro dos rolos e o <i>gap</i> operacional	57
Figura 22 – Aspectos do processo de cominuição por HPGR.....	59
Figura 23 – Relação das variáveis para escalonamento de HPGRs.....	59
Figura 24 – Tipos de vedações laterais das HPGRs atualmente comercializados.....	60
Figura 25 – Resultados de compressão e abrasão de pelotas com 5 e 7 passadas na HPGR.....	62
Figura 26 – Localização das prensas de rolos nas usinas de pelotização da Vale S.A. em Vitória, ES.....	63
Figura 27 – Circuitos de cominuição propostos na pesquisa. (a) Moinho de bolas em circuito fechado de classificação seguido por HPGR em circuito aberto e (b) múltiplas prensagens na HPGR em circuito aberto de classificação.....	64
Figura 28 – Fluxograma proposto do projeto de inovação tecnológica para as Usinas 1 e 2	67
Figura 29 – Identificação dos pontos para o balanço de massa dos moinhos de bolas.....	79
Figura 30 – Queima em <i>pot-grate</i> , sendo (a) alimentação com pelotas cruas e (b) pelotas queimadas	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais estatísticas de importação e exportação de minério de Fe do Brasil	29
Quadro 2 – Resumo dos efeitos na previsão do consumo específico de energia	50
Quadro 3 – Condições de realização dos ensaios	51
Quadro 4 – Normas utilizadas para as análises de qualidade da pelota queimada ..	65
Quadro 5 – Dados operacionais para ensaio de requerimento energético de Donda.....	70
Quadro 6 – Valores desejados para o produto da moagem e HPGR da rota tradicional.....	71
Quadro 7 – Condições operacionais do moinho de bolas piloto.....	72
Quadro 8 – Parâmetros da HPGR.....	73
Quadro 9 – Resumo dos resultados de cominuição da rota tradicional	77
Quadro 10 – Balanço de massa do moinho 01	80
Quadro 11 – Balanço de massa do moinho 02	80
Quadro 12 – Análise qualitativa do pelotamento e queima da rota tradicional de cominuição	88
Quadro 13 – Consolidação dos resultados dos ensaios da rota tradicional de cominuição	89
Quadro 14 – Fonte de dados para a análise do gasto variável da rota tradicional....	91
Quadro 15 – Parâmetros operacionais da HPGR da rota multiprensagem.....	93
Quadro 16 – Resumo dos resultados de cominuição da rota multiprensagem	96
Quadro 17 – Análise qualitativa do pelotamento da rota multiprensagem	101
Quadro 18 – Diferenças entre os ensaios COREM R180, DR90 e Linder	105
Quadro 19 – Resultados da cominuição, pelotas cruas e queimadas por rota de cominuição	107

Quadro 20 – Qualidade das pelotas cruas provenientes do ensaio de cinética de aglomeração a 1200 rpm no pelotamento em tambor	109
Quadro 21 – Resumo das principais características da rota multiprensagem.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energia necessária para fabricação de corpos moedores.....	44
Tabela 2 – Caracterização física do minério de alimentação	68
Tabela 3 – Química total por faixa granulométrica do minério de alimentação	69
Tabela 4 – Caracterização mineralógica do minério de alimentação	69
Tabela 5 – Distribuição granulométrica do produto da moagem piloto.....	73
Tabela 6 – Parâmetros operacionais da HPGR da rota tradicional	74
Tabela 7 – Resumo da caracterização física da rota tradicional	76
Tabela 8 – Balanço físico e químico da mistura a ser aglomerada	81
Tabela 9 – Qualidade das pelotas cruas: calibração do <i>pot-grate</i>	81
Tabela 10 – Resultados e parâmetros de referência de qualidade da pelota queimada.....	88
Tabela 11 – Potência dos equipamentos de transporte e desaguagem de polpa.....	90
Tabela 12 – Gasto variável da rota tradicional	92
Tabela 13 – Gasto variável para a rota multiprensagem	113

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção mundial de aço (1996 a 2019).....	20
Gráfico 2 – Produção mundial de minério de ferro (%Fe ≥ 58%).....	21
Gráfico 3 – Principais países exportadores de minério de ferro em 2018.....	21
Gráfico 4 – Principais países importadores de minério de ferro em 2018.....	22
Gráfico 5 – Exportação nacional de minério de ferro.....	22
Gráfico 6 – Principais empresas brasileiras produtoras de minério de ferro em 2019.....	23
Gráfico 7 – Capacidade instalada de produção das usinas de pelotização Brasil.....	28
Gráfico 8 – Consumo energético brasileiro por setor em 2019.....	30
Gráfico 9 – Consumo energético da indústria brasileira em 2019, por segmento.....	30
Gráfico 10 – Estratificação do consumo de energia da mineração e pelotização no Brasil em 2019.....	31
Gráfico 11 – Distribuição granulométrica do minério de alimentação.....	68
Gráfico 12 – Requerimento energético da moagem conforme metodologia de Donda.....	71
Gráfico 13 – Consumo específico de energia elétrica por ensaio – Rota tradicional.....	74
Gráfico 14 – Capacidade específica de prensagem por ensaio – Rota tradicional ...	75
Gráfico 15 – Distribuição granulométrica da alimentação, moído e prensado da rota tradicional de cominuição.....	77
Gráfico 16 – Superfície específica e granulometria por energia – Rota tradicional ...	78
Gráfico 17 – Ciclos térmicos para calibração do <i>pot-grate</i>	82
Gráfico 18 – Perfis de pressão para calibração do <i>pot-grate</i>	83
Gráfico 19 – Tempo de exposição do leito de pelotas a temperatura superior a 1200 °C.....	84

Gráfico 20 – Resistência a compressão das pelotas queimadas – Ensaios P1A, P1B e P1C.....	85
Gráfico 21 – Tamboramento das pelotas queimadas.....	85
Gráfico 22 – Perfil de queima final P2 e P1C.....	86
Gráfico 23 – Perfil de pressão final P1C e P2.....	86
Gráfico 24 – Temperatura máxima das pelotas da camada de forramento e de fundo das 4 queimas da rota tradicional.....	87
Gráfico 25 – Compressão e abrasão das pelotas queimadas da rota tradicional.....	87
Gráfico 26 – Energia e força específica a cada passe na HPGR da rota multiprensagem.....	93
Gráfico 27 – Superfície específica e passante em 45 µm a cada passe na HPGR da rota multiprensagem.....	94
Gráfico 28 – Fator BSA a cada passa na HPGR – Rota multiprensagem.....	95
Gráfico 29 – Capacidade especificada HPGR a cada passe da rota multiprensagem.....	95
Gráfico 30 – Superfície específica e granulometria por energia da rota multiprensagem.....	96
Gráfico 31 – Comparativo das rotas de cominuição.....	97
Gráfico 32 – Distribuição granulométrica das partículas da rota multiprensagem.....	98
Gráfico 33 – Umidade da pelota crua no pelotamento.....	99
Gráfico 34 – Número de quedas das pelotas cruas.....	99
Gráfico 35 – Resistência a úmido das pelotas crua.....	100
Gráfico 36 – Resistência a compressão a seco das pelotas cruas.....	100
Gráfico 37 – Perfil térmico da rota multiprensagem.....	101
Gráfico 38 – Resistência à compressão a frio das pelotas queimadas da rota multiprensagem.....	102
Gráfico 39 – Abrasão das pelotas queimadas da rota multiprensagem.....	102
Gráfico 40 – Redutibilidade ISO 11258 DR90 da rota multiprensagem.....	103

Gráfico 41 – Porosidade das pelotas queimadas da rota multiprensagem	103
Gráfico 42 – Redutibilidade COREM R180	104
Gráfico 43 – Metalização ISO 11257 Linder da rota multiprensagem	106
Gráfico 44 – Índice de degradação (-3,15 mm) sob redução da rota multiprensagem	106
Gráfico 45 – Índice de degradação (-0,50 mm) sob redução da rota multiprensagem	107
Gráfico 46 – Cinética de aglomeração das pelotas cruas	108
Gráfico 47 – Esfericidade das partículas	109
Gráfico 48 – Angularidade das partículas	110
Gráfico 49 – Angularidade média das partículas por faixa granulométrica	110
Gráfico 50 – Comparativo do Fator BSA e Fator k entre as rotas de cominuição ...	115
Gráfico 51 – Consumo global de energia elétrica por rota de cominuição	117

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACEE	<i>American Council for an Energy-Efficient Economy</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BSA	<i>Blaine Surface Area</i>
CCS	<i>Cold Compression Strength</i>
Class.	Classificação
Esp.	Espessamento
Homo.	Homogeneização
CM	Carvão Mineral
Dif.	Diferença
ES	Espírito Santo
GEE	Gás de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HPGR	<i>High-Pressure Grinding Roll</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUCN	<i>International Union for Conservation and Natural Resources</i>
LD	Lado Direito
LE	Lado Esquerdo
LKAB	<i>Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MG	Minas Gerais
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MTPA	Milhões de Toneladas de Pelotas por ano
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PEE	Programa de Eficiência Energética
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPC	Perda Por Calcinação
PRD	Pelotas de Redução Direta
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RDI	<i>Reduction Desintegration Index</i>

SE Superfície Específica

TEP Tonelada Equivalente de Petróleo

VSB Vallourec Soluções Tubulares do Brasil

WWF *World Wide Fund for Nature*

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe	Ferro
E_t	Energia Específica Total
$E_{equipamento}$	Energia consumida por um equipamento
P80	Malha na qual passam 80% das partículas no produto
F80	Malha na qual passam 80% das partículas na alimentação
E	Energia
W_i	<i>Work Index</i>
P_i	<i>Sieve size tested</i>
G_{pb}	<i>Grinding ability</i>
k_{wb}	Potência por tonelada de bolas no eixo pinhão do moinho
D	Diâmetro
V_p	Fração do volume do moinho ocupada pelas bolas
C_s	Fração da velocidade crítica de operação do moinho
B	Diâmetro de reposição das bolas
V_{polpa}	Volume de polpa
V_{vazios}	Volume de vazios
x_g	<i>Gap</i> operacional
\dot{m}	Capacidade específica
Q	Vazão
L	Comprimento
u	Velocidade periférica
F_{sp}	Força específica de moagem
F	Força
m	massa
SiO_2	Sílica
Al_2O_3	Alumina
Fe_2O_3	Hematita
FeT	Ferro Total
MgO	Óxido de Magnésio
CaO	Óxido de Cálcio
Na_2O	Óxido de Sódio

K_2O	Óxido de Potássio
TiO_2	Dióxido de Titânio
MnO	Óxido de Manganês
P_2O_5	Pentóxido de Difósforo
Cr_2O_3	Óxido de Cromo
V_2O_5	Pentóxido de Vanádio
ZrO_2	Dióxido de Zircônio
ZnO	Óxido de Zinco
$FeTi$	Ferro e Titânio
$MnFe$	Ferro e Manganês
D80	Malha na qual passam 80% das partículas
N_2	Nitrogênio
Fs	Fator de segurança
rpm	Rotações por minuto
H_2O	Água
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2	Hidrogênio
C	Carbono

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Produção de Aço e Mineração.....	20
1.2	As Rotas de Produção de Aço.....	23
1.3	Pelotização de Minério de Ferro	24
1.4	Consumo de Energia do Brasil.....	29
1.5	O Processo de Cominuição	31
1.6	Moinhos de Bolas	34
1.7	Utilização de HPGRs na Pelotização.....	35
2	TEMA DE PESQUISA	37
2.1	Problemática	37
2.2	Justificativa	38
3	OBJETIVOS	39
3.1	Objetivo Geral	39
3.2	Objetivos Específicos.....	39
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
4.1	Eficiência Energética.....	40
4.2	Teorias Clássicas da Cominuição	44
4.3	Requerimento Energético para Moinhos de Bolas	47
4.4	Prensa de Rolos de Alta Pressão.....	53
4.5	Cominuição por Múltiplas Prensagens.....	61
5	METODOLOGIA.....	63
5.1	Esboço Metodológico.....	63
5.2	Procedimento Experimental	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
6.1	Caracterização do Minério de Alimentação.....	68
6.2	Cominuição, Pelotamento e Queima do Caso Base (Rota Tradicional)....	70

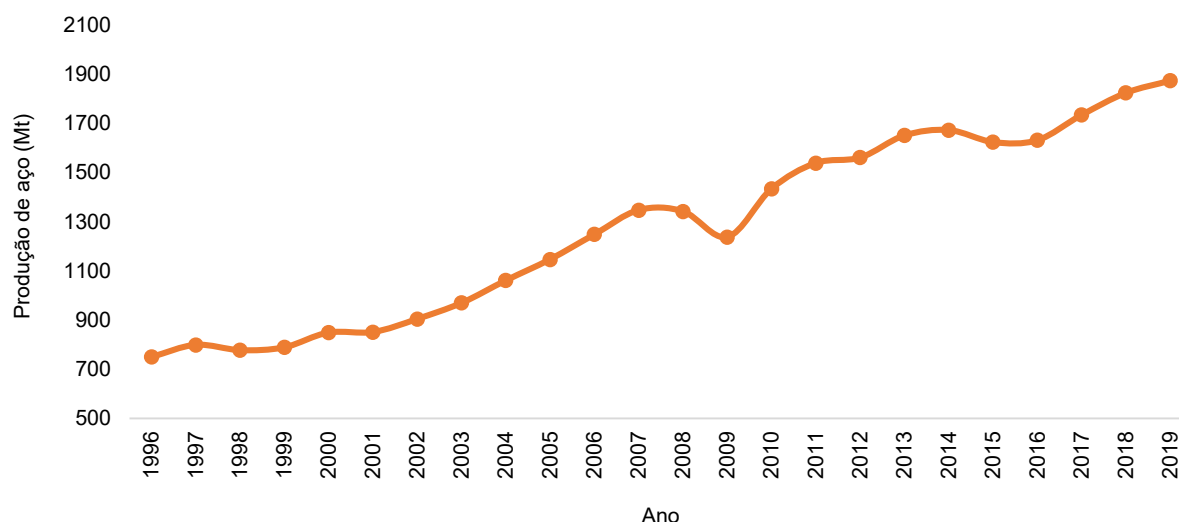
6.2.1. Cominuição.....	70
6.2.2. Pelotamento e queima em <i>pot-grate</i>	80
6.2.3. Análise dos gastos variáveis.....	90
6.3 Cominuição, Pelotamento e Queima da Rota Multiprensagem	92
6.3.1. Cominuição.....	92
6.3.2. Pelotamento e queima em <i>pot-grate</i>	98
6.3.3. Cinética de aglomeração	108
6.3.4. Forma das partículas	109
6.3.5. Análise dos gastos variáveis.....	111
7 CONCLUSÕES	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
APÊNDICE A – SUSTENTABILIDADE.....	126

1 INTRODUÇÃO

1.1 Produção de Aço e Mineração

A produção de aço apresenta-se em constante crescimento desde a década de 90 (Gráfico 1), impulsionada pelo desenvolvimento, crescimento populacional, aumento da industrialização e consumo da sociedade moderna, especialmente nas nações em desenvolvimento, visto que o aço é largamente utilizado para a infraestrutura de um país (portos, ferrovias, estradas, construção civil, transportes e etc.).

Gráfico 1 – Produção mundial de aço (1996 a 2019)



Fonte: *World Steel Association* (2020).

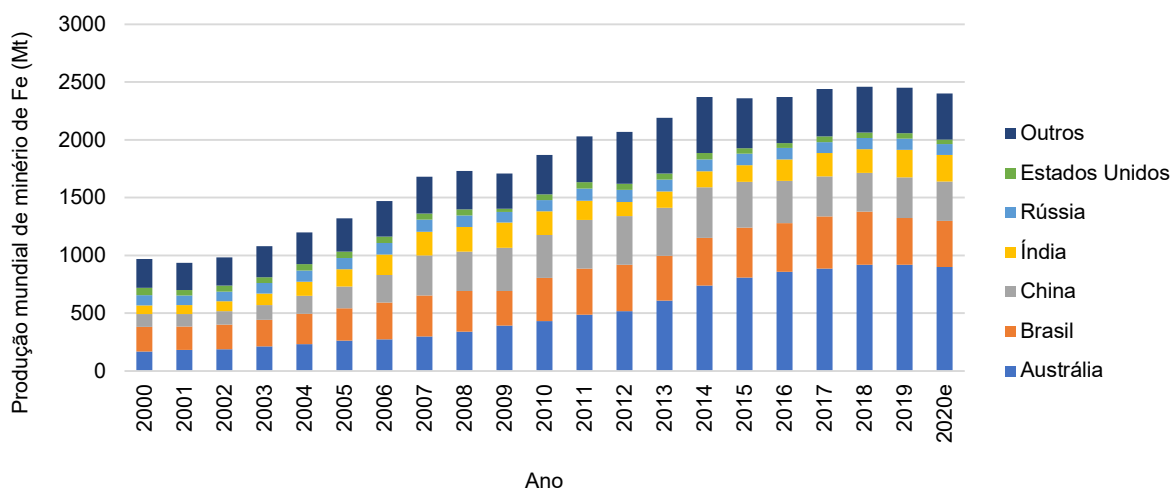
Nota: Elaborado pelo autor.

Este crescimento está diretamente relacionado com a oferta de minério de ferro, principal matéria prima da siderurgia, levando os países produtores e exportadores desta *commodity* a posições estratégicas no mercado mundial.

O Brasil é o segundo maior produtor e exportador de minério de ferro do mundo, atrás apenas da Austrália, como se pode observar nos Gráfico 2 e Gráfico 3. É possível também verificar no Gráfico 4 que o Brasil vem aumentando a oferta de minério no mercado transoceânico nos últimos 20 anos (excetuando-se os anos de 2019 e 2020 em decorrência do acidente ocorrido com a barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, MG), realizando em 2020 uma exportação de 25,8 bilhões de dólares,

equivalentes a 341,0 milhões de toneladas, representando economicamente 12,3% de todas as exportações do país, como ilustra o Gráfico 5.

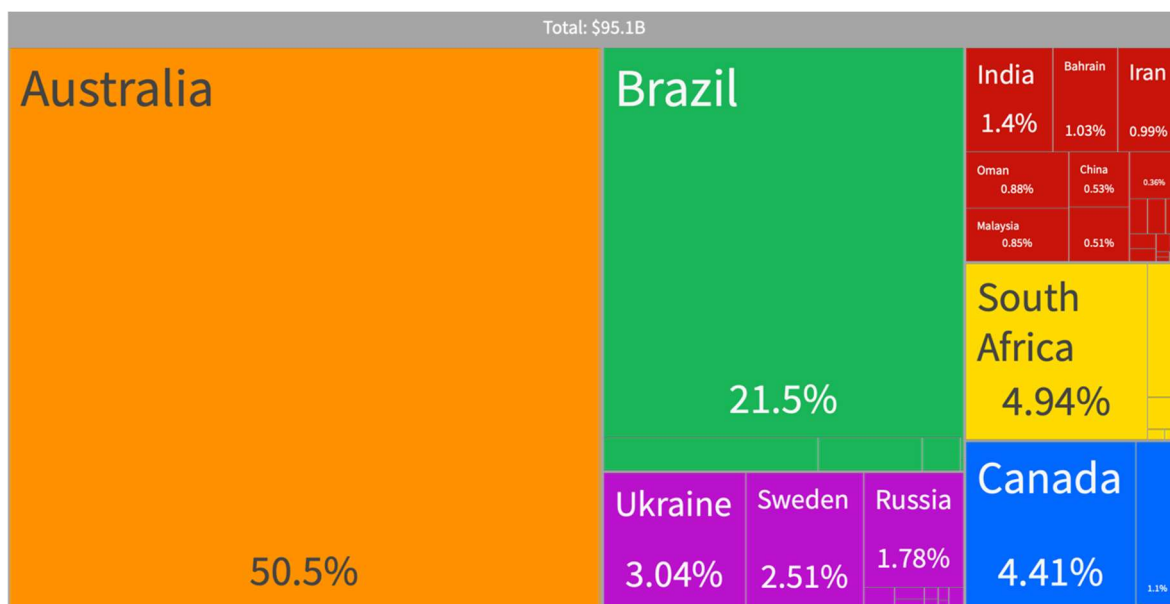
Gráfico 2 – Produção mundial de minério de ferro (%Fe ≥ 58%)



Fonte: *United States Geological Survey* (2021).

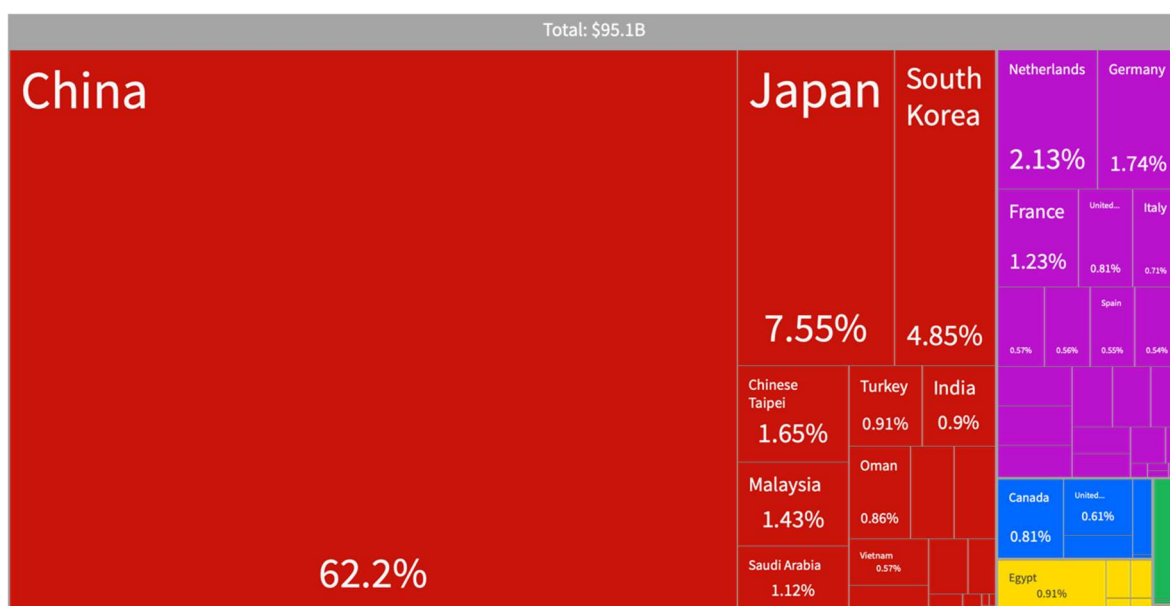
Nota: Adaptado pelo autor.

Gráfico 3 – Principais países exportadores de minério de ferro em 2018



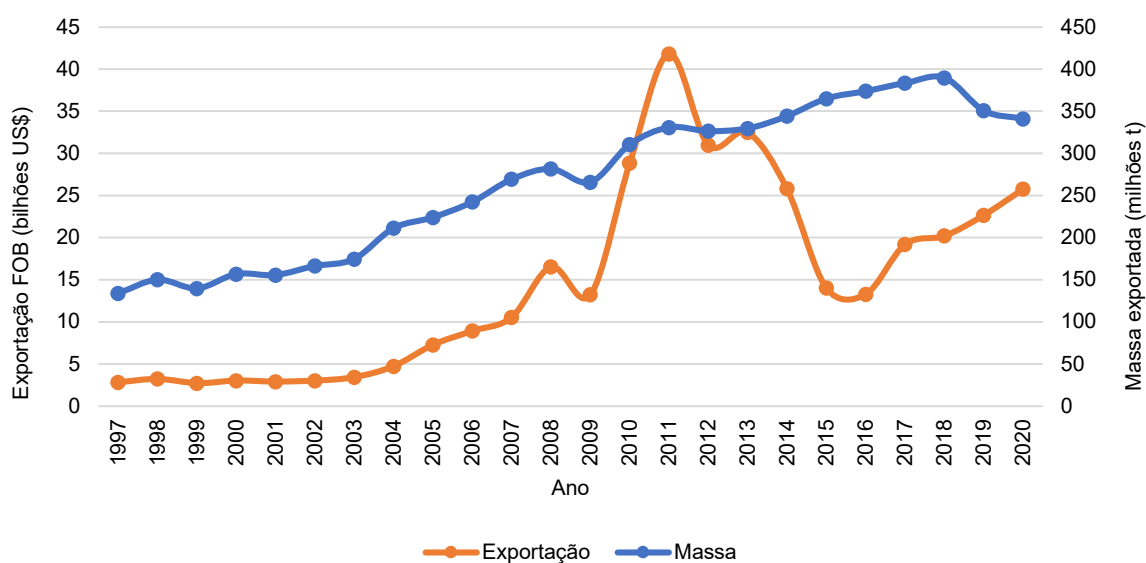
Fonte: *Observatory of Economic Complexity* (2018).

Gráfico 4 – Principais países importadores de minério de ferro em 2018



Fonte: *Observatory of Economic Complexity* (2018).

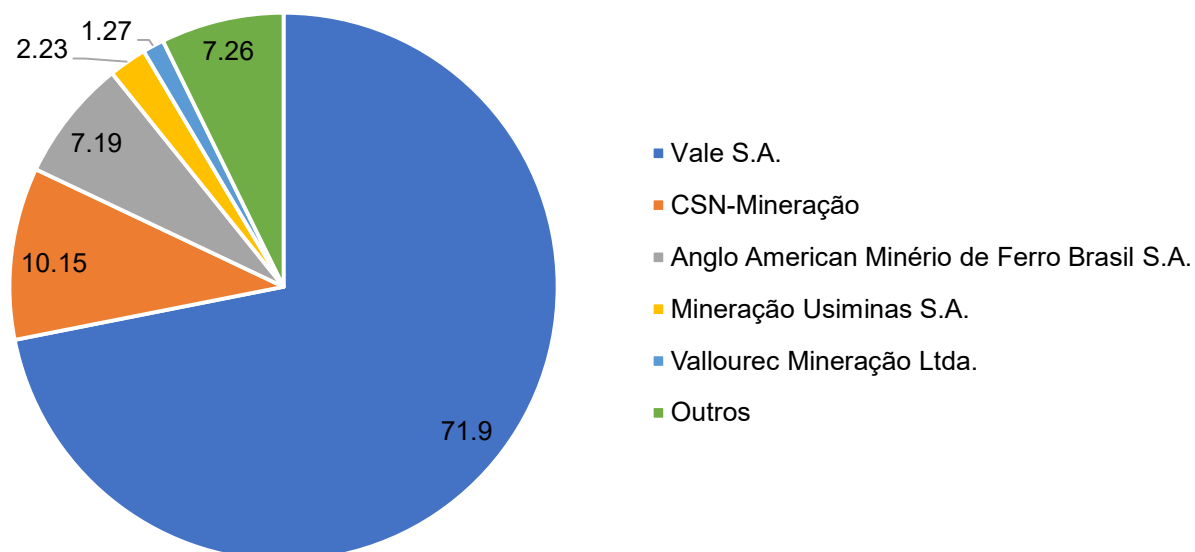
Gráfico 5 – Exportação nacional de minério de ferro



Fonte: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (2021).

No Gráfico 6, podem ser observadas as principais empresas brasileiras produtoras de minério de ferro, apresentando uma participação expressiva da Vale S.A., responsável por 71,9% da produção nacional em 2019.

Gráfico 6 – Principais empresas brasileiras produtoras de minério de ferro em 2019



Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral (2020).

1.2 As Rotas de Produção de Aço

A indústria siderúrgica apresenta duas principais rotas de produção do aço: uma, via redução do minério de ferro nos altos fornos, e outra, via redução direta em fornos elétricos a arco, ilustradas na Figura 1. Em ambas as rotas a permeabilidade do leito da carga metálica é extremamente importante para que a atmosfera redutora permeie por toda a carga, aumentando a eficiência do processo de redução (GEERDERS; TOXOPEUS; VAN DER VLIET, 2009).

Em função disto, os finos de minério encontrados na natureza ou gerados no processo de exploração e concentração mineral precisam ser aglomerados para se tornarem viáveis como matéria prima na siderurgia, iniciando a corrida tecnológica dos processos de aglomeração, como a sinterização e a pelotização.

Figura 1 – Rotas de produção do aço



Fonte: Vale S.A. (2010).

1.3 Pelotização de Minério de Ferro

O processo de pelotização viabiliza o aproveitamento das frações muito finas das partículas de minério, menores que 0,15 mm, conhecidas como *pellet feed*, realizando a aglomeração destas em pelotas.

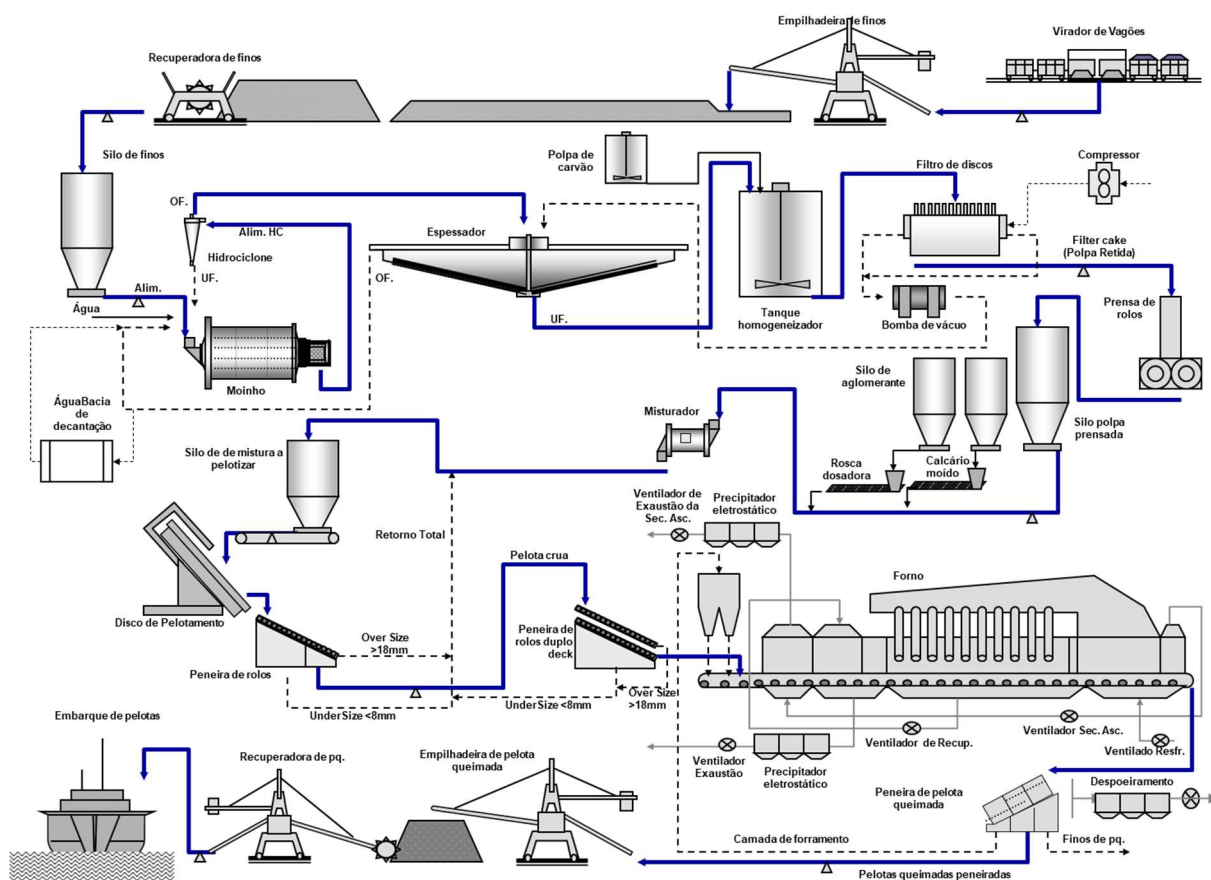
Pelotas são esferas produzidas a partir de minério de ferro concentrado ou *in natura*, de diferentes mineralogias e composições químicas, com as seguintes propriedades (MEYER, 1980):

- Distribuição granulométrica uniforme, entre 9 e 15 mm de diâmetro;
- Elevada porosidade: 25 a 30%;
- Elevado teor de ferro (Fe): maior ou igual a 63%;
- Baixa perda ao fogo e voláteis;
- Composição mineralógica homogênea na forma de hematita, ou compostos de hematita, de fácil redutibilidade;
- Baixa liberação de finos, sendo um material de fácil manuseio e transporte;
- Resistência mecânica uniforme e elevada, mesmo em condições de estresse térmico sob uma atmosfera redutora.

O processo de produção de pelotas consiste, resumidamente, em três etapas, a saber: i) preparação das matérias primas, ii) formação das pelotas cruas e iii) processamento térmico. A preparação das matérias primas é o processo em que o *pellet feed* é fragmentado em partículas ainda menores, de modo a obterem granulometria e área superficial apropriadas para o processo de aglomeração. Essas partículas serão misturadas com aglomerantes e aditivos, formando uma mistura pronta para formação das pelotas cruas e seu subsequente processamento térmico (MEYER, 1980).

As pelotas são formadas em discos ou tambores pelotizadores que irão aglomerar as partículas em pelotas, que posteriormente seguirão para o processamento térmico no forno de endurecimento para consolidação da qualidade física final. A Figura 2 exemplifica um fluxograma tradicional do processo em questão, comumente encontrado nas usinas de pelotização do Brasil atualmente.

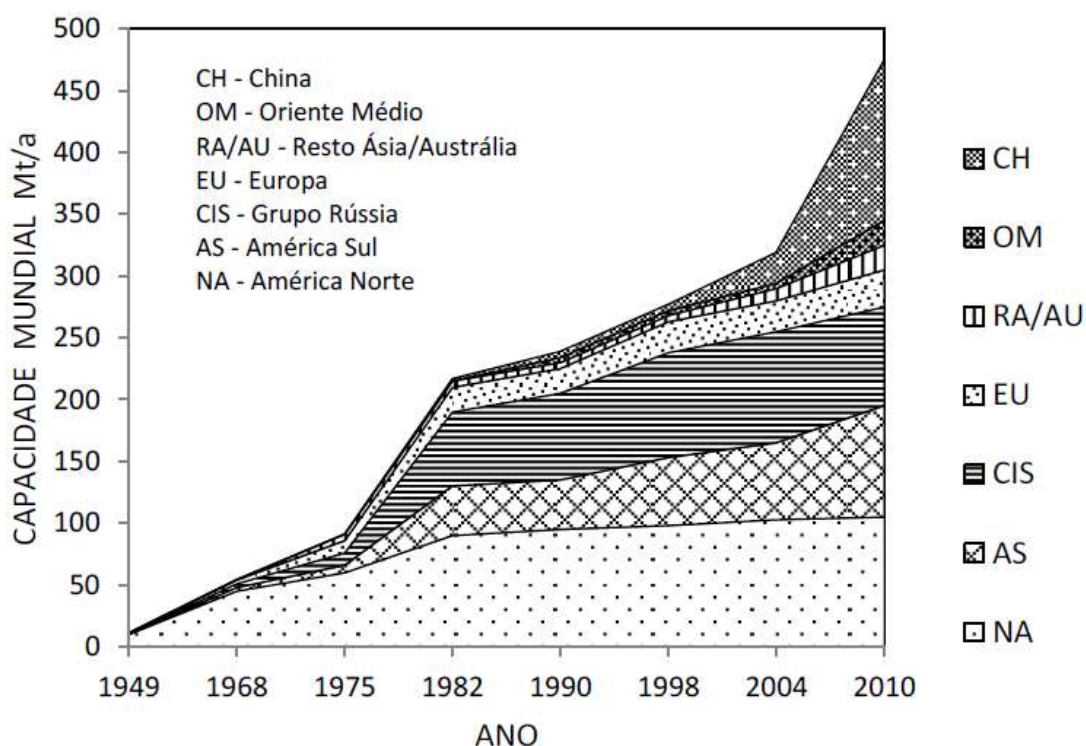
Figura 2 – Fluxograma do processo de pelotização das Usinas 3 a 6 – Vale S.A.



Fonte: Vale S.A. (2010).

O desenvolvimento da pelotização iniciou-se na Suécia, a partir de 1911, por meio dos estudos de A. G. Anderson. Sua aplicação industrial se estabelece a partir de 1950 nos Estados Unidos e vem se expandindo desde então (Figura 3). Os fornos de pelotização já passaram por 3 gerações tecnológicas, sendo o processo denominado *Shaft Furnace* o pioneiro entre eles, tornando-se obsoleto atualmente devido à sua capacidade limitada e seus elevados custos operacionais. As tecnologias conhecidas como *Traveling Grate* e *Rotary-Kiln* respondem atualmente por 95% da produção mundial de pelotas (MOURÃO, 2017).

Figura 3 – Evolução da capacidade mundial de produção de pelotas

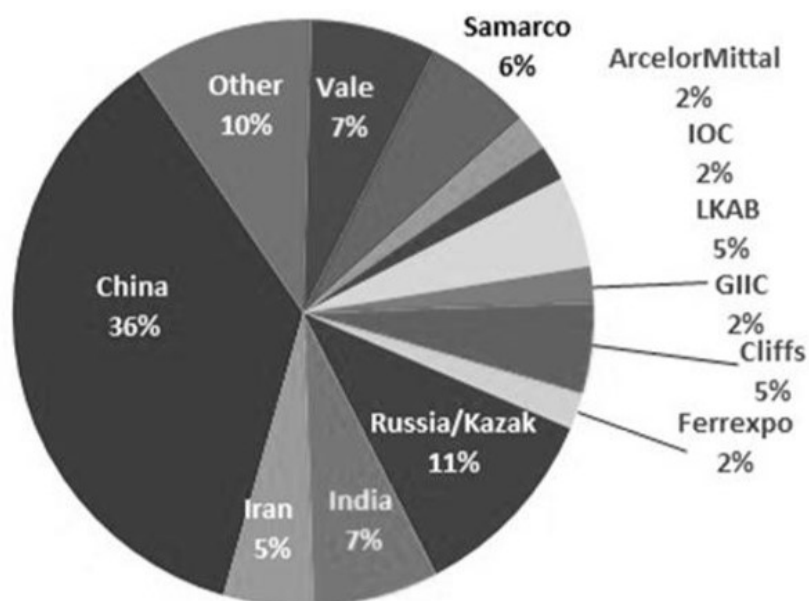


Fonte: Mourão (2017).

A partir dos anos 2000, a China, maior produtor de pelotas (Figura 4) intensificou seu parque industrial de pelotização decorrente de pressões ambientais por tecnologias mais limpas, uma vez que a pelotização apresenta grandes vantagens ambientais comparadas ao processo de sinterização.

O aumento da pressão sobre os produtores de aço em todo o mundo para aumentar a eficiência, reduzir o consumo de energia e cumprir as metas ambientais, contribuiu para o declínio no uso de minério de ferro de baixa qualidade impulsionando investimentos na produção de minério de ferro e produtos de minério de ferro de alta qualidade, como pelotas. (United States Geological Survey, 2019, tradução nossa).

Figura 4 – Principais produtores mundiais de pelotas



Fonte: Luz, França e Braga (2018).

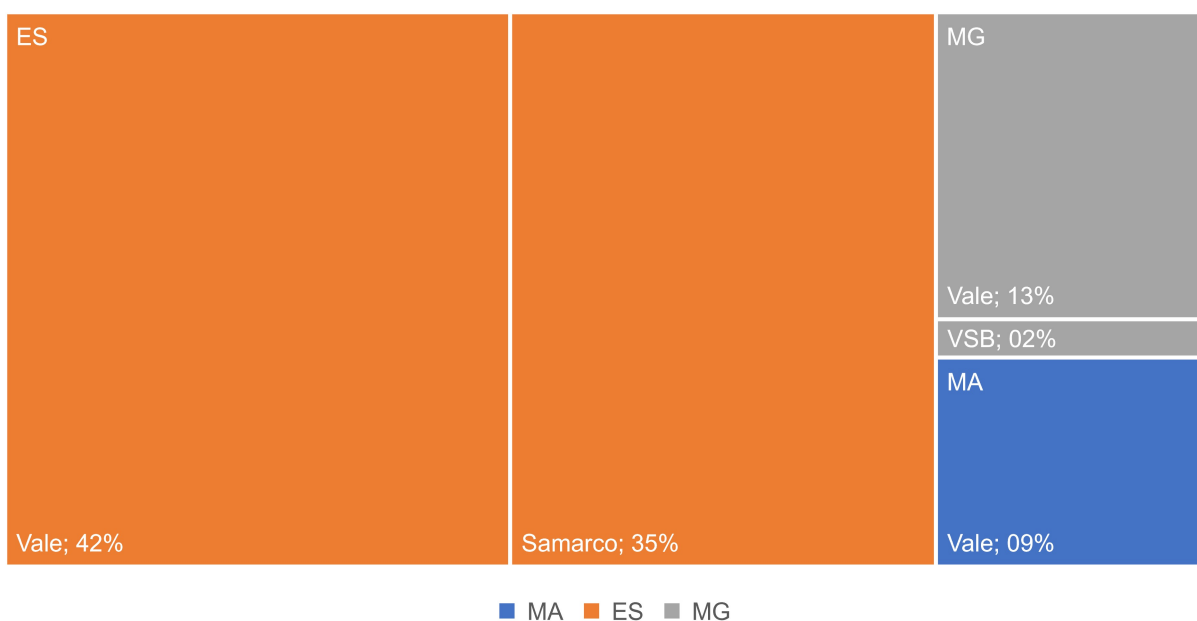
Por outro lado, o Brasil possui a maior unidade industrial de pelletização do mundo, localizada em Vitória, Espírito Santo, na Unidade Tubarão da Vale S.A. (Figura 5), contemplando 8 usinas de pelletização com capacidade de produção de 36,2 milhões de toneladas de pelotas por ano (Mtpa). Ainda no Espírito Santo, existem mais 4 usinas da Samarco Mineração S.A., no município de Anchieta, com capacidade de 30,5 Mtpa, colocando o Espírito Santo em destaque como referência industrial no processo de pelletização (Gráfico 7). A Vale S.A. possui mais 3 usinas, sendo 2 em Minas Gerais com capacidade total de 11,0 Mtpa e 1 no Maranhão, em São Luís, com capacidade de 7,5 Mtpa. Destaque também para a Vallourec Soluções Tubulares do Brasil (VSB), em Jeceaba, Minas Gerais, que possui uma usina de pelletização integrada, para consumo próprio na cadeia produtiva de aços tubulares, com capacidade de 1,36 Mtpa.

Figura 5 – Unidade Tubarão em Vitória, ES - Vale S.A.



Fonte: Oliveira e outros (2018).

Gráfico 7 – Capacidade instalada de produção das usinas de pelotização Brasil



Fonte: Vale S.A. (2019), Samarco Mineração S.A. (2015) e Braga, Criscuolo e Carvalho (2017).
Nota: Dados adaptados pelo autor.

Em 2020, a produção nacional de pelotas de minério de ferro foi de 30 milhões de toneladas, sendo 50,3% destinadas ao mercado externo, contribuindo em US\$1,51 bilhões para a balança comercial brasileira, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais estatísticas de importação e exportação de minério de Fe do Brasil

Tipo	Produto	Unidade	2018	2019	2020
Exportação	Minério	(10 ³ US\$ - FOB)	\$ 16.718.804	\$ 20.237.250	\$ 24.259.114
		(t)	355.070.355	326.159.476	325.927.809
	Pelotas	(10 ³ US\$ - FOB)	\$ 3.501.554	\$ 2.440.553	\$ 1.517.175
		(t)	34.730.088	24.696.824	15.107.180
Importação	Minério	(10 ³ US\$ - FOB)	-	\$ 7.392	\$ 19.143
		(t)	0	54.416	169.700
	Pelotas	(10 ³ US\$ - FOB)	\$ 6,07	\$ 33,82	\$ 50,51
		(t)	7	1.084	1.273

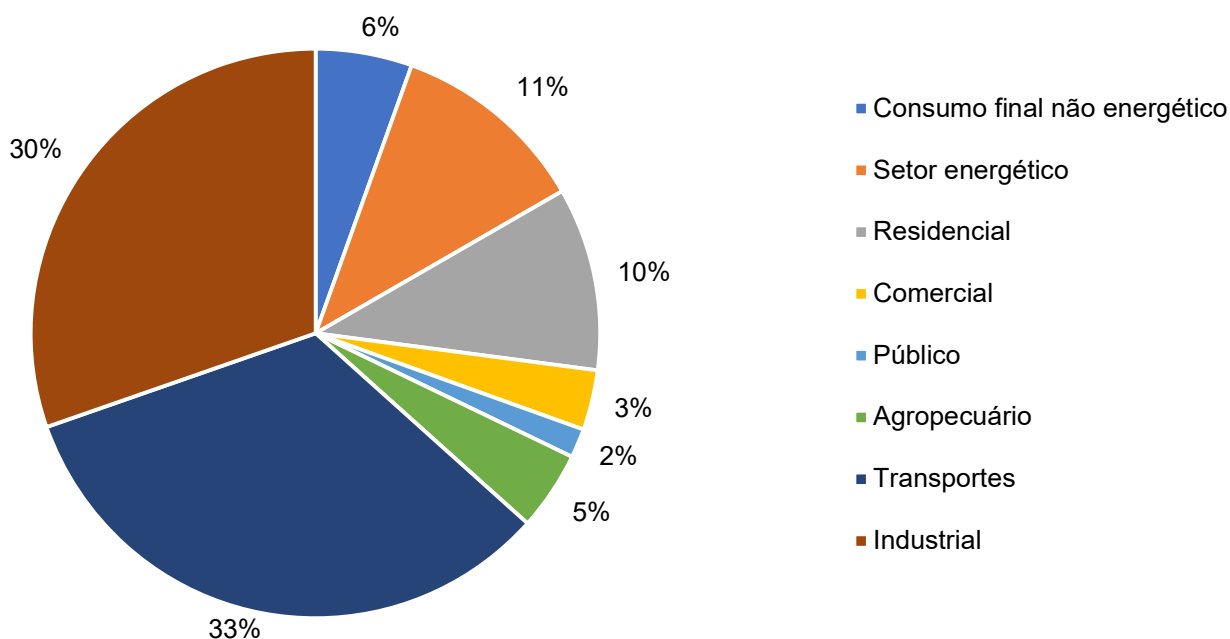
Fonte: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (2021).

Nota: Adaptado pelo autor.

1.4 Consumo de Energia do Brasil

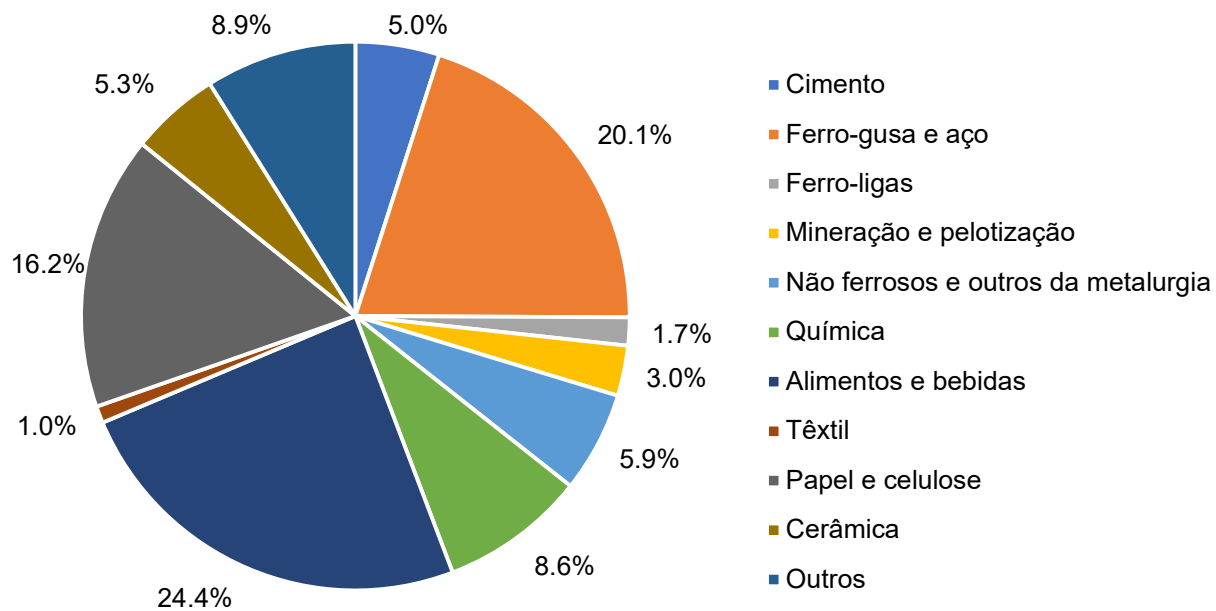
Os Gráfico 8, Gráfico 9 e Gráfico 10 apresentam, respectivamente, os dados referentes ao consumo de energia por setor, consumo de energia por segmento da indústria e a estratificação do consumo por fonte da mineração e pelotização realizados em 2019 no Brasil. Por meio destes dados é possível verificar que 33% de todo consumo de energia nacional foi empregado no setor industrial. Deste setor, 3,0% foram consumidos na mineração e pelotização, dos quais 43% (equivalentes a 1.032×10^3 tep) tiveram como fonte a energia elétrica, 14% óleo diesel, 13% gás natural, 10% carvão mineral (CM) e coque de CM e o restante proveniente de outras fontes.

Gráfico 8 – Consumo energético brasileiro por setor em 2019



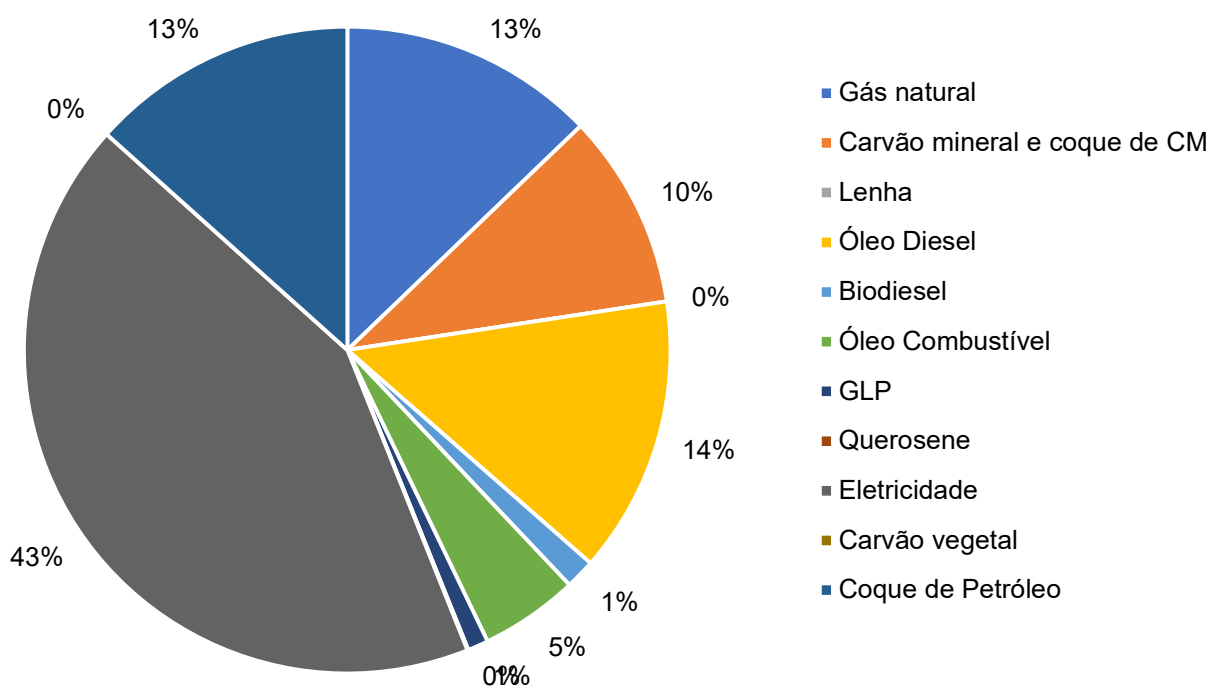
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020).
Nota: Adaptado pelo autor.

Gráfico 9 – Consumo energético da indústria brasileira em 2019, por segmento



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020).
Nota: Adaptado pelo autor.

Gráfico 10 – Estratificação do consumo de energia da mineração e pelotização no Brasil em 2019



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020).
Nota: Adaptado pelo autor.

1.5 O Processo de Cominuição

O processo de cominuição pode ser entendido como um conjunto de operações controladas com o objetivo de reduzir a granulometria de um determinado material para uma determinada aplicação.

Cominuição é o conjunto de operações de redução de tamanho de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo predeterminado. Isso inclui as exigências de controlar o tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos (CHAVES; PERES, 2012).

Os equipamentos mais encontrados para cominuição são britadores, moinhos e prensas de rolos de alta pressão (HPGR, do inglês *high pressure grinding rolls*), ilustrados na Figura 6 e na Figura 7.

Figura 6 – (a) Britador tipo mandíbula e (b) moinhos de bolas da 8ª planta de pelotização Vale S.A.

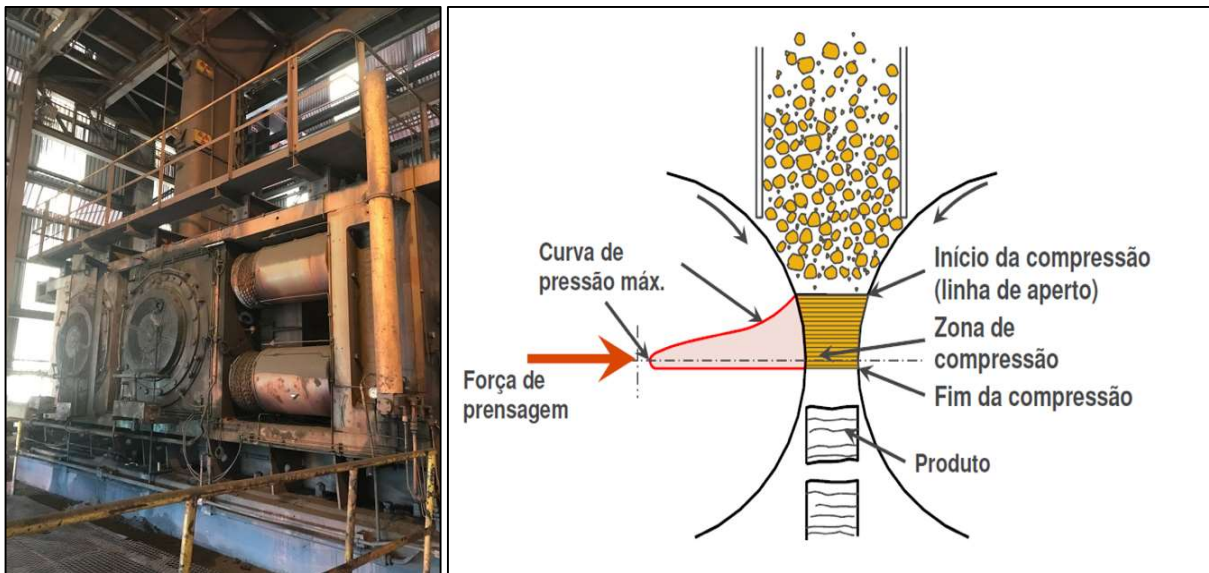


(a)

(b)

Fonte: Kleemann (2019) e arquivo pessoal (2015).

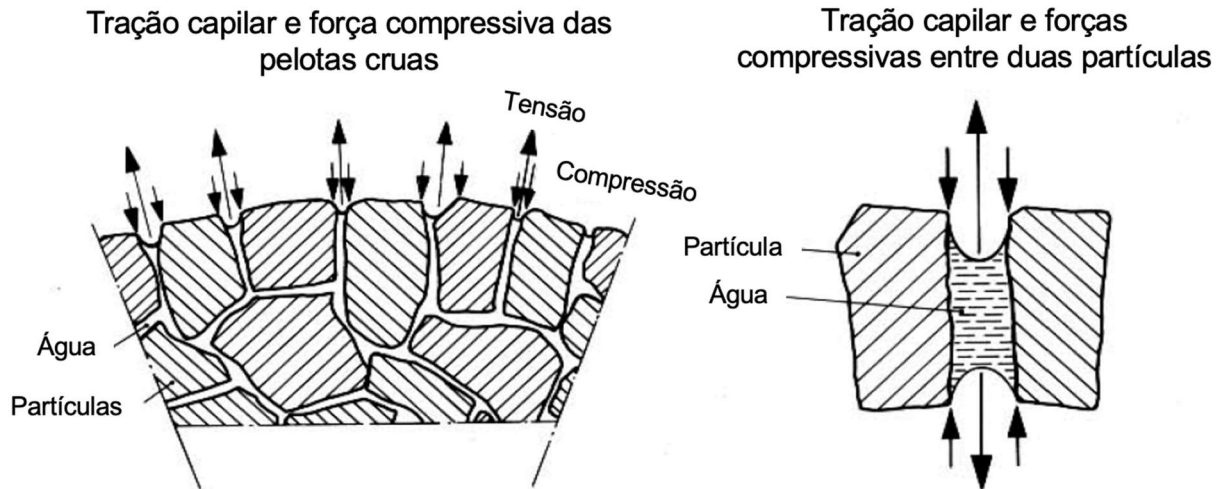
Figura 7 – (a) HPGR da Usina 3 - Vale S.A. e (b) ilustração do processo de fragmentação por HPGR



Fonte: Arquivo pessoal e Vale S.A. (2010).

O objetivo da cominuição para o processo de pelotização é reduzir a granulometria e elevar a superfície específica das partículas, de modo a prover uma mistura adequada para a obtenção de um bom efeito das forças de adesões capilares (Figura 8), favorecendo a formação de pelotas com bom acabamento e resistência física à compressão (Figura 9) e abrasão (MEYER, 1980).

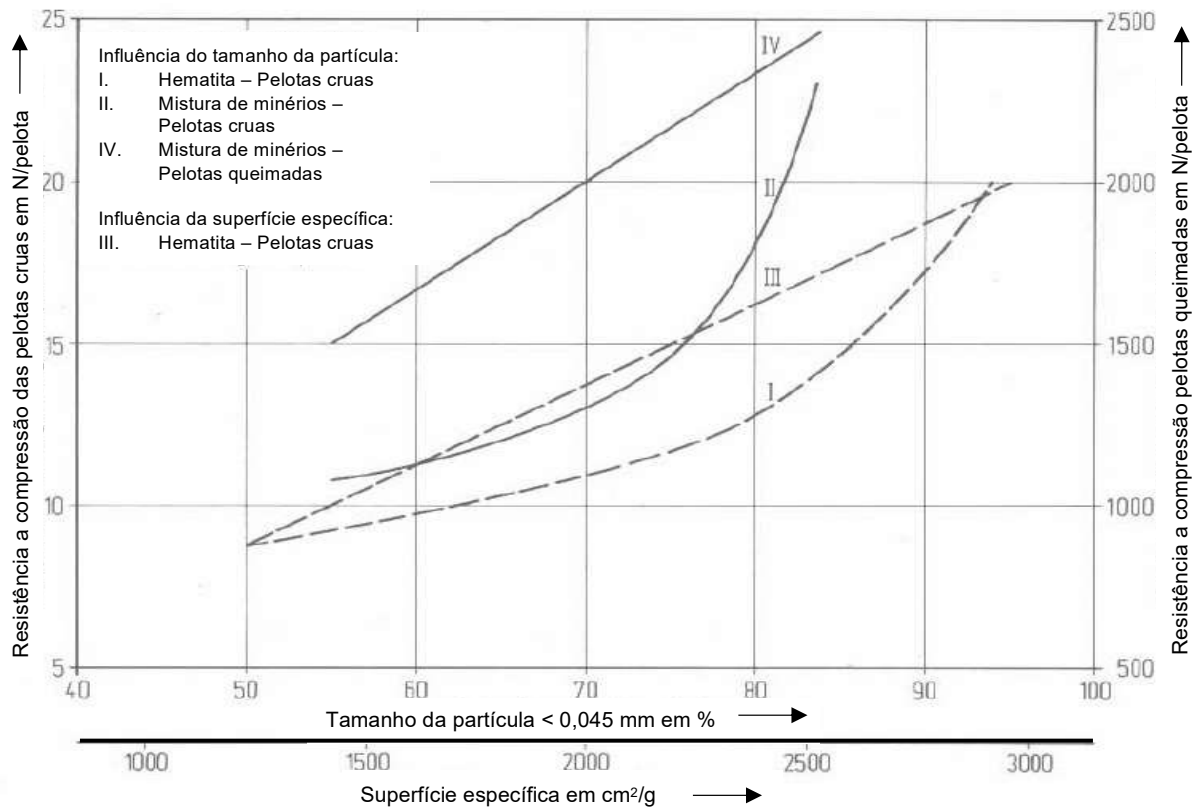
Figura 8 – Influência das forças capilares no mecanismo de ligação



Fonte: Meyer (1980).

Nota: Traduzido pelo autor.

Figura 9 – Influência do tamanho do grão e da superfície específica na resistência à compressão das pelotas



Fonte: Meyer (1980).

Nota: Traduzido pelo autor.

O processo de cominuição é responsável pelos maiores consumos de energia na mineração. Diversos estudos foram realizados para quantificar esta parcela, como o relatório de 1981, amplamente referenciado, do Departamento de Energia dos

Estados Unidos da América e a auditoria realizada por Ballantyne e Powell em 2012, na Austrália, revelando que cerca de 2,0% e 1,3%, respectivamente, de toda energia elétrica consumida nesses países foram em função de processos de cominuição (BALLANTYNE; POWELL, 2014).

Em função da evolução dos temas relacionados a sustentabilidade, como mudanças climáticas, eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa, além dos altos custos associados à energia elétrica produzida por meio da queima de combustíveis fósseis, o processo de cominuição vem se tornando um tópico de estudo cada vez mais priorizado quando se busca por soluções mais eficientes na mineração. Nesta linha, encontra-se a utilização de HPGRs como uma proposta de solução alternativa capaz de apresentar reduções de consumo de energia de 7,7% a 18,4%, comparados a circuitos tradicionais de moagem, intensificando sua aplicação nos últimos anos (ROSÁRIO; HALL, 2008)

1.6 Moinhos de Bolas

A adequação granulométrica das partículas no processo de pelletização de minério de ferro é realizada por moinhos de bolas, operados em circuito aberto ou fechado de classificação com hidrociclones, e prensas de rolos de alta pressão, variando a combinação destes equipamentos de acordo com o fluxograma de cada usina.

O processo de moagem decorre da atuação dos mecanismos de cominuição por abrasão e impacto das partículas. Esses mecanismos são realizados por meio da movimentação dos corpos moedores, que podem ser barras ou esferas (bolas) e o minério a ser cominuído, no interior de uma estrutura metálica cilíndrica, chamados moinhos tubulares (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Os moinhos tubulares são revestidos internamente com placas de diferentes ligas metálicas ou borracha e são produzidas diferentes formas (perfis) de revestimentos, aplicáveis ao tipo de corpo moedor, distribuição granulométrica e tenacidade do minério de alimentação do moinho, velocidade de operação etc. Este revestimento, além de prover proteção à carcaça metálica, exerce a função de promover o

levantamento da carga moedora, determinando, em conjunto com a velocidade de operação, a dinâmica dos corpos moedores (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

Esses equipamentos são conhecidos por serem extremamente ineficientes na utilização de energia no processo de fragmentação, porém, apesar de suas limitações, apresentam vantagens competitivas pela sua simplicidade operacional e de controle de processo e elevada capacidade para processar grandes quantidades de material, sendo largamente utilizados na indústria mineral há muitos anos (WILLS, 1990).

1.7 Utilização de HPGRs na Pelotização

O processo de cominuição em prensa de rolos foi desenvolvido por Schönert, em 1979, após estudos realizados na fragmentação entre partículas por meio da aplicação de força por um pistão em um leito de partículas (SCHÖNERT, 1988).

Até o advento deste equipamento, toda a adequação granulométrica do minério de ferro nas usinas de pelotização era realizada integralmente no processo de moagem em moinhos de bolas ou *cylpebs* (corpo moedor em forma de um tronco de cone).

As prensas vêm sendo cada vez mais utilizadas em função das suas vantagens econômicas decorrentes da melhor eficiência energética para a cominuição de minérios de baixa moabilidade (AMELUNXEN; MEADOWS, 2011).

Os principais benefícios da utilização das HPGRs são: i) elevada eficiência energética, ii) liberação preferencial nos contornos naturais dos grãos, iii) geração de microfissuras e extração aprimorada, iv) elevada produtividade e redução granulométrica em uma pequena área construída, e iv) operação com baixíssima vibração, favorecendo o conjunto de acionamento e estrutura da máquina (BEARMAN, 2006).

Em 1994, foi instalada na LKAB, Suíça, a primeira HPGR para esta aplicação. Com o bom desempenho obtido, esta mesma empresa requisitou mais uma unidade em 1995. No Brasil, a Vale S.A. comprou duas prensas em 1996, uma para a *joint venture*

Hispanobras, sendo aplicada após o processo de filtragem, e outra para as usinas Vale I e II, antes do processo de moagem. Em 1998, a empresa indiana *Kudremukh* seguiu a tendência e investiu em uma HPGR para prensagem de material pós filtragem (*filter cake*) e a *Iron Dynamics* implantou uma HPGR para prensar concentrados provenientes dos concentradores espirais. Na China, a empresa *Wisco Minerals* instalou uma HPGR, em 2002, na usina em Chengchao, e outra, em 2004, na planta E-Zhou. Neste mesmo ano, outra empresa chinesa, a *Zhangjiang Hongchang Pellet Co.*, montou uma HPGR na planta Shangang. Em 2003, a Vale S.A. acrescentou mais uma prensa para a *joint venture* Itabrasco e outras 3 para a usina de pelletização U1N em São Luís, enquanto a Samarco, neste mesmo ano, inaugurou 2 HPGRs nas usinas Samarco I e II (CASTEEL, 2006). Em 2007, a Vale S.A. adotou mais 2 prensas para as Nibrasco I e II. Em 2008, Samarco III iniciou suas operações com a HPGR desde o *start-up* da usina, assim como em 2014, na Vale S.A., em sua 8ª usina e, novamente, na Samarco, em sua 4ª usina.

2 TEMA DE PESQUISA

Com o avanço tecnológico e do conhecimento científico sobre o processo de prensagem, torna-se uma alternativa atrativa, do ponto de vista econômico e ambiental, a realização integral da cominuição das partículas de minério por HPGRs, em substituição aos moinhos de bolas.

2.1 Problemática

Em torno da problemática de ineficiência energética dos processos de cominuição atualmente utilizados, busca-se responder se é possível, e o quanto é possível, melhorar a eficiência energética do processo de cominuição das usinas de pelotização da Unidade Tubarão da Vale S.A., em Vitória, ES, com a substituição integral de toda a moagem por HPGRs. Deste modo, este projeto objetiva responder as seguintes perguntas de pesquisa:

- i. É possível melhorar a eficiência energética do processo de cominuição das usinas de pelotização com a substituição integral da moagem a úmido por HPGRs?
- ii. É tecnicamente viável realizar a adequação granulométrica do *pellet feed* integralmente por múltiplas prensagens para o processo de pelotização, sem deméritos à qualidade do produto final?
- iii. Existindo viabilidade técnica, quais seriam os benefícios econômicos e ambientais do projeto de inovação?

Assim, o presente trabalho contribuirá na análise técnica, econômica e ambiental do projeto de inovação tecnológica, que propõe a adequação granulométrica do *pellet feed* integralmente por HPGRs, comparando o novo fluxograma de processo com os circuitos de cominuição atualmente utilizados nas usinas de pelotização da Unidade Tubarão da Vale S.A. Neste sentido, serão avaliados a eficiência energética de cada circuito e a qualidade do produto cominuído, assim como os impactos no processo de aglomeração.

2.2 Justificativa

As usinas de pelotização Vale I e II, datadas de 1969 e 1973, respectivamente, possuem em conjunto um parque de cominuição com 1 HPGR e 4 moinhos de bolas. Em função da idade avançada dos moinhos, torna-se parte do processo de tomada de decisão a substituição destes por outros, com mesmo tipo de funcionamento, ou a alteração completa do circuito de moagem por HPGRs, levando-se em consideração os benefícios já identificados da utilização de prensas visando à eficiência energética e uma pelotização mais sustentável.

Frente a estas possibilidades, a Vale S.A. direcionou seus projetos para realizar a cominuição por meio de múltiplas prensagens, suprimindo assim o processo de moagem, o que elimina, por consequência, a utilização de água e corpos moedores do processo de cominuição, não sendo mais necessárias as operações de espessamento, homogeneização e filtragem, reduzindo riscos de paradas de usina devido a crises hídricas, como as já ocorridas no Estado do Espírito Santo.

Uma das principais vantagens desta iniciativa é a eliminação dos riscos ambientais de contaminação do solo e mares inerentes ao bombeamento e estocagem de polpa (mistura de água e sólidos em suspensão), assim como da exposição negativa na mídia frente a qualquer evento indesejado, justificando esta pesquisa para produzir informações quantitativas dos benefícios potenciais de sustentabilidade deste projeto.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral estabelecido para este trabalho foi realizar a análise técnica e econômica do projeto de inovação tecnológica no processo de cominuição na pelotização de minério de ferro por meio da adequação granulométrica do *pellet feed* por múltiplas prensagens, comparando-o com a rota tecnológica tradicionalmente utilizada, a saber, moinho de bolas em circuito fechado seguido por prensagem em circuito aberto.

3.2 Objetivos Específicos

De forma complementar, os objetivos específicos definidos para a presente pesquisa foram:

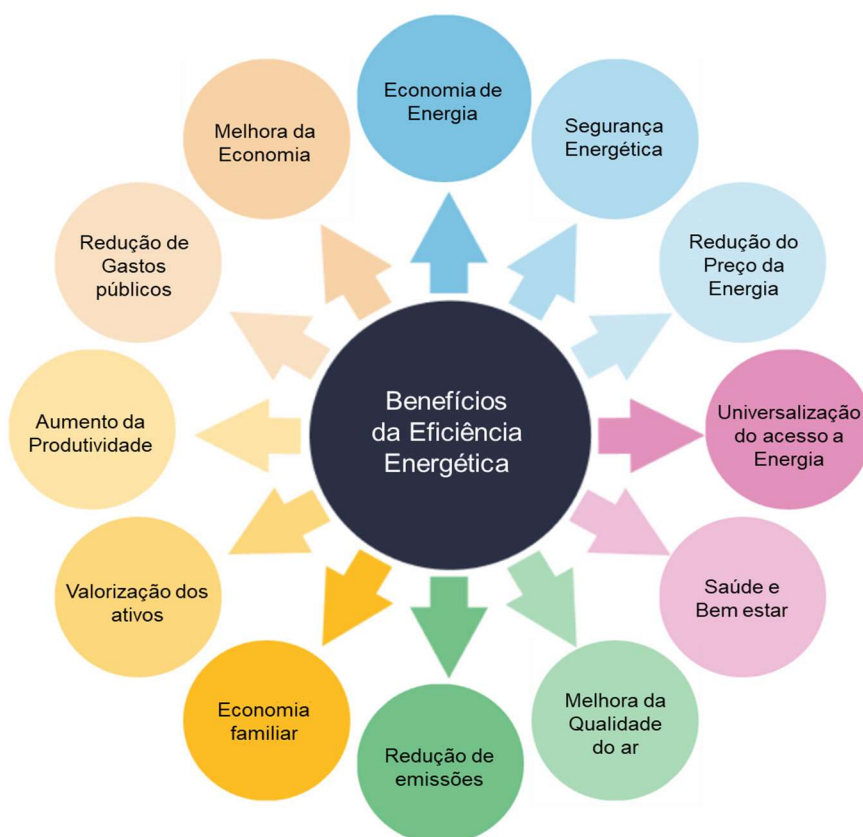
- i. Comparar, em escala piloto, a eficiência energética do processo de cominuição por múltiplas prensagens à rota tradicional;
- ii. Analisar o impacto das diferentes rotas de cominuição na qualidade do processo de aglomeração e queima de pelotas;
- iii. Avaliar os impactos potenciais no consumo específico de água, energia elétrica e demais insumos com a eliminação do processo de moagem a úmido do processo de pelotização, à luz da sustentabilidade da proposta do projeto de inovação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Eficiência Energética

De acordo com o dicionário online Michaelis (2019) da língua portuguesa, eficiência é um atributo ou condição do que é produtivo; desempenho, produtividade, rendimento. Associando-se este conceito com energia, entende-se que eficiência energética é a utilização da energia mínima requerida para realizar um determinado trabalho. Segundo a *International Energy Agency* (2018), eficiência energética é o “combustível” que todas as nações possuem em abundância e que uma política forte de Estado é o processo chave para obtenção de seus múltiplos benefícios (Figura 10), como redução dos custos com energia, contribuição positiva para as mudanças climáticas e qualidade do ar, redução da dependência de importação de energia e investimentos em infraestrutura de uma nação, além de disponibilização de recursos para universalização do acesso à energia para a população.

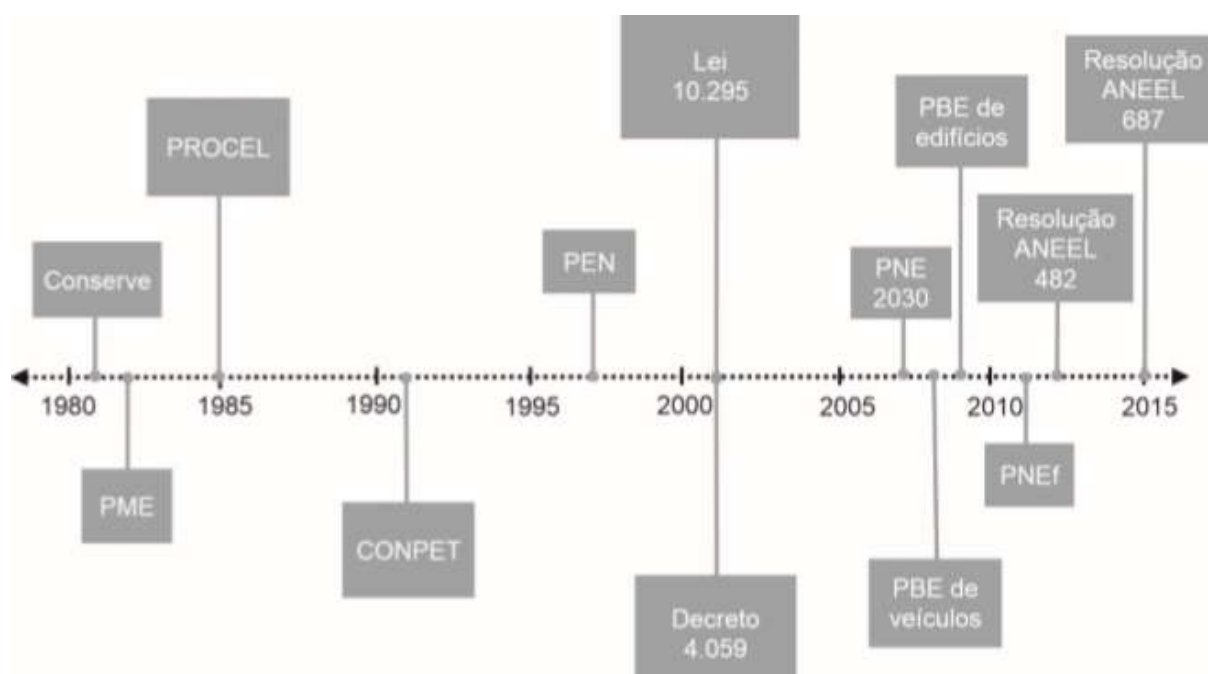
Figura 10 – Benefícios da eficiência energética



Fonte: *International Energy Agency* (2019).
Nota: Traduzido pelo autor.

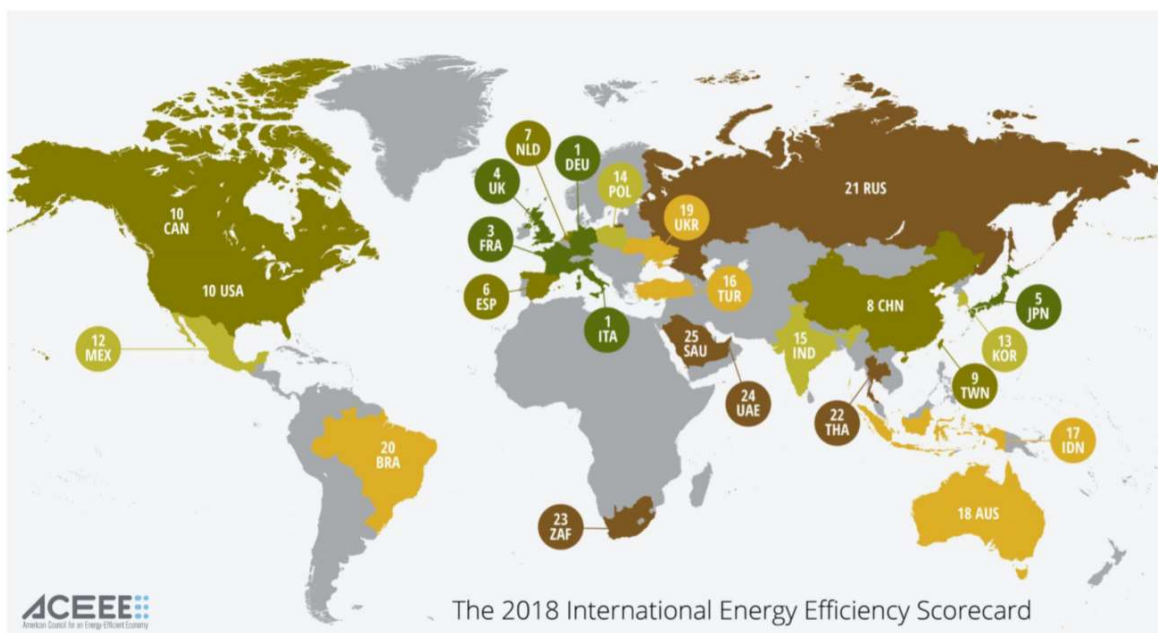
Altoé e outros (2017) resumem, em uma linha do tempo, ilustrada na Figura 11, as políticas públicas brasileiras de incentivo à eficiência energética, destacando que o Brasil está aquém de muitos países desenvolvidos, ocupando a 20ª posição no *ranking international energy efficiency scorecard*, realizado em 2018 pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEE)*, como mostra a Figura 12. Ressalta-se que, para aumentar a eficiência energética, é fundamental a modernização da indústria brasileira, a diversificação da malha de transportes, a implementação de políticas de combate ao desperdício e de normas de eficiência energética mais rigorosas.

Figura 11 – Marcos regulatórios brasileiros para eficiência energética



Fonte: Altoé e outros (2017).

Figura 12 – Ranking internacional de eficiência energética - 2018



Fonte: Castro-Alvarez e outros (2018).

Dentre as políticas listadas, destacam-se a Lei nº 10.295 instituída pelo Decreto nº 4.059 de 2001, que determina níveis máximo de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética para máquinas e equipamentos comercializados no Brasil, e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), lançado em 1985 pelo Governo Federal por meio do Ministério de Minas e Energia (ALTOÉ et al., 2017). Ressalta-se também o Programa de Eficiência Energética (PEE) regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criado a partir de obrigação fixada nos contratos de concessão firmados, em 1998, entre as concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica e a ANEEL. Com o advento da Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, foi atribuído às concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica o dever de aplicar o montante anual mínimo de 0,5% de sua receita operacional líquida em ações de combate ao desperdício de energia elétrica (BRASIL, 2016).

Já a norma ABNT NBR ISO 50001:2018, editada inicialmente em 2011, define eficiência energética como a razão, ou outra relação quantitativa, entre uma saída de desempenho (resultado mensurável quantitativo ou qualitativo relacionado à gestão de atividades, processos, produtos, serviços, sistemas ou organizações) e uma entrada de energia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

No contexto da cominuição, a eficiência energética pode ser entendida como a razão entre a energia mínima requerida para um determinado grau de fragmentação desejado e a energia consumida pelo equipamento utilizado. Assim, Tavares (2004) estabelece a eficiência energética para cominuição como a razão entre a energia específica total (E_t), necessária para fragmentar uma população de partículas pelo método de quebra de partículas individuais, e a energia que um determinado equipamento ($E_{equipamento}$) consome para produzir o mesmo tamanho desta mesma população de partículas, como definido em (01).

$$Eficiência\ energética = 100 \left(\frac{E_t}{E_{equipamento}} \right) \quad (01)$$

Entretanto, ainda não existe consenso na comunidade científica sobre a melhor maneira de avaliar a eficiência energética dos processos de cominuição, sendo necessário compreender a evolução das teorias e metodologias até então desenvolvidas (SALAZAR, 2014).

Tavares (2003), ao estabelecer um novo método para o cálculo de eficiência energética de moinhos industriais, identificou uma variação de eficiência entre 8 e 23%, de acordo com o tipo de material a ser fragmentado, corroborando com a pesquisa realizada por Fuerstenau e Abouzeid (2002), onde verificaram que a eficiência energética de um moinho de bolas, operado a seco, para elevação da área superficial de partículas é da ordem de 25% para cominuição de quartzo e vidro sodo-cálcico, valores extremamente baixos e inaceitáveis para processos considerados sustentáveis, dentro de todo o amplo contexto de sustentabilidade abordado no APÊNDICE A .

Napier-Munn (2015) discute sobre a eficiência energética nos processos de cominuição, realizando as seguintes reflexões: i) O consumo de energia nos processos de cominuição são de fato importantes para as indústrias da mineração? ii) Se for, é possível reduzir substancialmente, e quanto reduzir, em um intervalo de tempo razoável? iii) Quais são as iniciativas que promoverão a redução de energia nos processos de cominuição e o que deve ser feito agora?

Um trabalho elaborado na mina de cobre *Huckleberry*, Canadá, evidenciou melhores consumos energéticos e vantagens econômicas para os circuitos que adotaram a aplicação de HPGRs em comparação com o circuito existente de moagem, identificando uma redução potencial de energia elétrica de 6,9% a 34,1% (WANG et al., 2013).

Ballantyne (2019) realizou uma análise de toda a energia consumida no processo de moagem, considerando todo o ciclo de vida da cadeia de fornecimento de corpos moedores. Esta energia embutida no processo de fabricação deste insumo pode variar de 4,8 a 6,6 kWh/kg, dependendo da metalurgia da bola, da proporção de aço reciclado na matéria-prima e da distância percorrida por caminhão necessária para transportar a carga até o local de utilização, conforme demonstrado na Tabela 1, tornando ainda mais atrativas soluções que aumentem o desempenho dos processos de cominuição que utilizam moinhos de bolas.

Tabela 1 – Energia necessária para fabricação de corpos moedores

Processo		Unidade	Bolas alto cromo	Bolas baixo cromo	Bolas forjadas
Fabricação do aço (todo o ciclo)		kWh/kg	3,30	3,30	6,01
Fabricação das bolas	Fusão (forno de indução)	kWh/kg	0,59	0,00	0,38
	Fusão (forno de arco elétrico)	kWh/kg	0,51	0,49	0,00
	Tratamento térmico (gás)	kWh/kg	0,51	0,00	0,00
	Tratamento térmico (eletricidade)	kWh/kg	0,39	0,31	0,00
	Outros	kWh/kg	0,52	0,28	0,00
	Subtotal	kWh/kg	1,71	1,35	0,45
	Energia média com transporte	kWh/kg	0,12	0,12	0,12
Total	kWh/kg	5,62	4,76	6,58	

Fonte: Ballantyne (2019).

4.2 Teorias Clássicas da Cominuição

Em torno da discussão do cálculo da energia necessária de fragmentação, Rittinger, em 1867, propôs que a elevação da área superficial de uma partícula é proporcional à energia útil aplicada. Esta teoria ficou então conhecida como a Primeira Lei da Cominuição, expressa por (02) (CHAVES; PERES, 2003).

$$E = k_{Rittinger} \left(\frac{1}{P80} - \frac{1}{F80} \right) \quad (02)$$

sendo E a energia específica por unidade de massa; P80 e F80 são as aberturas das malhas das peneiras, do produto e da alimentação, respectivamente, por onde passam 80% (em massa) das partículas; e k é uma constante de ajuste para a natureza de cada material.

Kick, em 1883, propôs que a energia necessária para a fragmentação de uma população de partículas é proporcional à razão de redução do tamanho destas. Esta relação ficou conhecida como a Segunda Lei da Cominuição (03) (CHAVES; PERES, 2003).

$$E = k_{Kick} \cdot \ln \left(\frac{F80}{P80} \right) \quad (03)$$

Entretanto, “As duas teorias encontraram imediatamente adeptos apaixonados e irredutíveis, que se degladiaram durante quase um século, sem trazer nenhum benefício real ou contribuição metodológica objetiva.” (CHAVES; PERES, 2003, p. 593).

Após muitos anos de discussões infrutíferas, Fred Bond publicou, em 1952, as conclusões de seu estudo, no qual estabelece que a energia necessária para fragmentar um determinado minério é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas (BOND, 1952). Bond, então, estabelece a relação entre energia consumida e grau de fragmentação, sendo esta utilizada até os dias atuais, conhecida como a Terceira Lei da Cominuição (04).

$$E = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{F80}} \right) \quad (04)$$

onde W_i é o índice de trabalho (em inglês, *work index*) de Bond, representando o nível de resistência de um determinado material em ser cominuído, em outras palavras, a

energia específica por tonelada do material (kWh/t) para reduzir a partícula de um tamanho infinito até 80% passante em 100 μm .

Bond então desenvolveu uma metodologia para a previsão do W_i por meio da utilização de um moinho de bancada de 12 polegadas de comprimento e diâmetro, à época padronizado pela ABNT NBR 11376:1990 (mas cancelada em maio de 2011). Por meio de uma série de experimentos industriais, Bond estabeleceu o cálculo do W_i expresso em (05).

$$W_i = \frac{49}{P_i^{0,23} \cdot Gpb^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)} \quad (05)$$

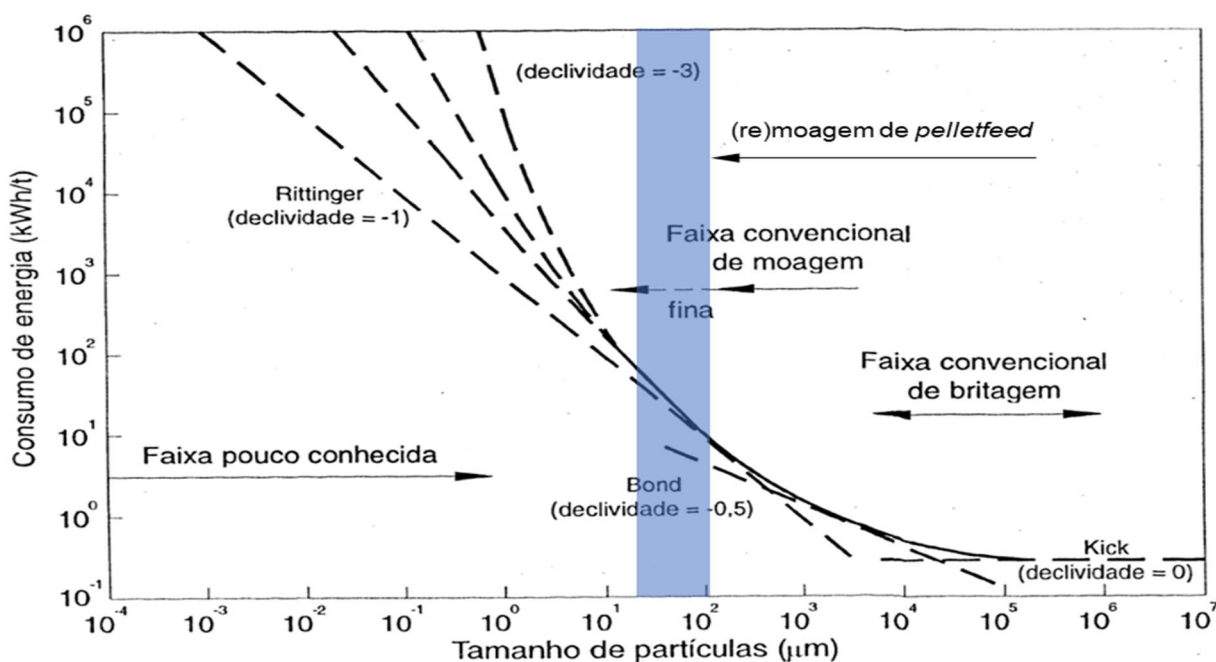
sendo P_i a malha da peneira de teste, em μm , e Gpb , a massa líquida de *undersize* produzida por cada revolução do moinho.

“O método de Bond teve um sucesso estrondoso e passou a ser imediatamente aplicado” (CHAVES et al., 2003, p. 594).

Assim, as relações empíricas estabelecidas por Rittinger, Kick e Bond, entre o consumo de energia para cominuição e a distribuição granulométrica das partículas sujeitas ao processo, tornaram-se clássicas, sendo conhecidas como as Leis da Cominuição. Estas são amplamente utilizadas para os cálculos industriais de projetos de moinhos e instalações de processamento de minério (GORLOV et al., 2009).

Hukki, em 1962, avaliou que as três Leis da Cominuição apresentam melhores adequabilidades para distribuições granulométricas distintas (Figura 13), identificando que a Lei de Kick é mais apropriada para a cominuição das partículas mais grosseiras, onde se encontram os processos de britagem, a Lei de Bond, para a moagem mais fina, como geralmente encontrado em moinhos de barras e de bolas, e a Lei de Rittinger, para partículas ultrafinas (CHAVES; PERES, 2003).

Figura 13 – Regiões de validade das 3 leis



Fonte: Chaves e Peres (2003).

Nota: Adaptado pelo autor.

4.3 Requerimento Energético para Moinhos de Bolas

Donda e Rosa (2014) apresentaram “A Lei de Moagem – Comprovação para minério de ferro”, demonstrando a aplicação da equação (06) para moagem fina de concentrado de minério de ferro ao processo de pelotização, utilizando o método criado por Donda em sua tese de doutorado intitulada “Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas”, tornando-se uma grande contribuição para a determinação do fator k (constante utilizada nas equações dependente do material a ser cominuído), aqui denominada k_{Donda} .

$$E = \frac{1}{k_{Donda}} \cdot \ln\left(\frac{F80}{P80}\right) \quad (06)$$

A metodologia empírica estabelecida pelo autor em moinhos de bancadas, em escala piloto, utilizou a potência calculada para moinhos industriais de modo a realizar o correto escalonamento e cálculo da energia requerida para um determinado tempo de moagem.

Para o cálculo da potência demandada pelos moinhos de bolas de descarga por *overflow*, com diâmetro maior que 2,44 m, Rowland, Mular e Gerald (1982) e Bond (1983) propõem a equação (07).

$$kwb = 4,879 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3V_p) \cdot C_s \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}}\right) \quad (07)$$

Onde:

kwb = potência demandada por tonelada de bolas pelo moinho, no eixo pinhão do moinho, em kW;

D = diâmetro interno ao revestimento do moinho, em metros;

V_p = fração do volume do moinho ocupada pelas bolas, em %;

C_s = fração da velocidade crítica de operação do moinho, em %.

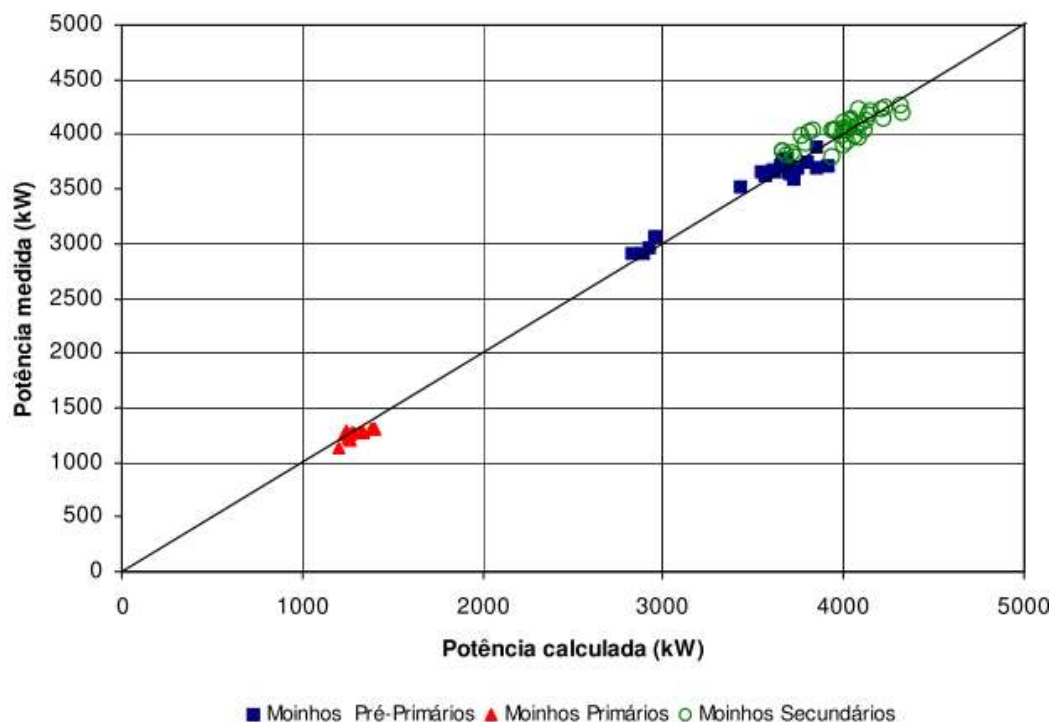
Estes mesmos autores perceberam que o diâmetro dos corpos moedores utilizados influencia a potência para moinhos com diâmetro interno maior que 3,0 m, ajustando a equação (07) para (08).

$$kwb = 4,879 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3V_p) \cdot C_s \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}}\right) + 1,102 \cdot \left(\frac{B - 12,5D}{50,8}\right) \quad (08)$$

sendo B o diâmetro de reposição (*topsize*) dos corpos moedores, em milímetros.

Entre 2000 e 2001, Donda comparou a aplicação de (08) com os dados industriais obtidos na moagem primária e secundária da Usina de Concentração de Germano, da Samarco, em Minas Gerais, como mostra a Figura 14. Os valores máximo e mínimo da razão entre a potência industrial e a calculada foram 1,06 e 0,93, respectivamente, demonstrando a aplicabilidade da referida equação proposta por Rowland e Bond (DONDA, 2003).

Figura 14 – Comparação entre a potência calculada e a medida



Fonte: Donda (2003).

Para a execução de ensaios em moinhos de bancada, com diâmetros inferiores a 2,44 m e seu adequado escalonamento para moinhos industriais, Rowland constatou que a equação (08) determina valores de potência maiores do que os valores reais, sendo então proposta uma correção em função do ângulo de repouso da carga, conforme (09) (ROWLAND; MULAR; GERALD, 1982).

$$kwb = 6,3 \cdot D^{0,3} \cdot \text{sen} \left(51 - 22 \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right) \cdot (3,2 - 3V_p) \cdot C_s \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right) \quad (09)$$

Em 1995, Donda realizou a comparação dos dados obtidos em laboratório, em um moinho de bancada de 12 polegadas de diâmetro e comprimento, por meio da equação (09), com os dados dos moinhos industriais da moagem primária. Os menores valores obtidos da razão entre o consumo industrial e o de laboratório foram 0,91 e 1,09, respectivamente, com valor médio de 1,02, mais uma vez mostrando a boa aderência do modelo proposto por Rowland (DONDA, 2003)

Para a moagem secundária, com ensaios também realizados em 1995, foi constatado inicialmente que os valores previstos em laboratório estavam bem inferiores aos

encontrados industrialmente, com a razão entre real e calculado variando entre 1,41 e 1,75 (e valor médio de 1,58). Isto levou a um entendimento que o modelo deveria ser calibrado por meio da aplicação de fatores de correção para a moagem secundária. Após uma série de melhorias realizadas no concentrador, entre 1995 e 2002, o consumo específico de energia da moagem secundária caiu significativamente, aproximando-se dos valores encontrados pelo modelo da equação (09), validando esta equação também para a aplicação em moagem de concentrados (DONDA, 2003).

Em seu trabalho, Donda (2003) analisou ainda diversas variáveis que pudessem interferir nos resultados da metodologia proposta de previsão do consumo específico de energia para obtenção de uma superfície específica e distribuição granulométrica desejada, tais como, diâmetro do moinho, porcentagem de enchimento, porcentagem de velocidade crítica, porcentagem de sólidos em que são efetuadas as moagens, relação volume da polpa/volume de vazios da carga de corpo moedores, distribuição granulométrica da carga de corpo moedores, forma do corpo moedor, tipo e material do revestimento do moinho e o procedimento experimental adotado. Um resumo dos resultados obtidos em tal estudo encontra-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo dos efeitos na previsão do consumo específico de energia

Efeito	Significativo	
	Granulometria	Superfície específica
Diâmetro do moinho	Sim	Sim
% de sólidos em volume	Sim	Sim
% enchimento	Sim	Sim
Relação V_{polpa}/V_{vazios}	Sim	Sim
Interações	Sim	Sim
% velocidade crítica	Não	Não

Fonte: Donda (2003).

Nota: Adaptado pelo autor.

Após a análise dos dados, foram estabelecidas as condições para realização dos ensaios, conforme detalhado no Quadro 3.

Quadro 3 – Condições de realização dos ensaios

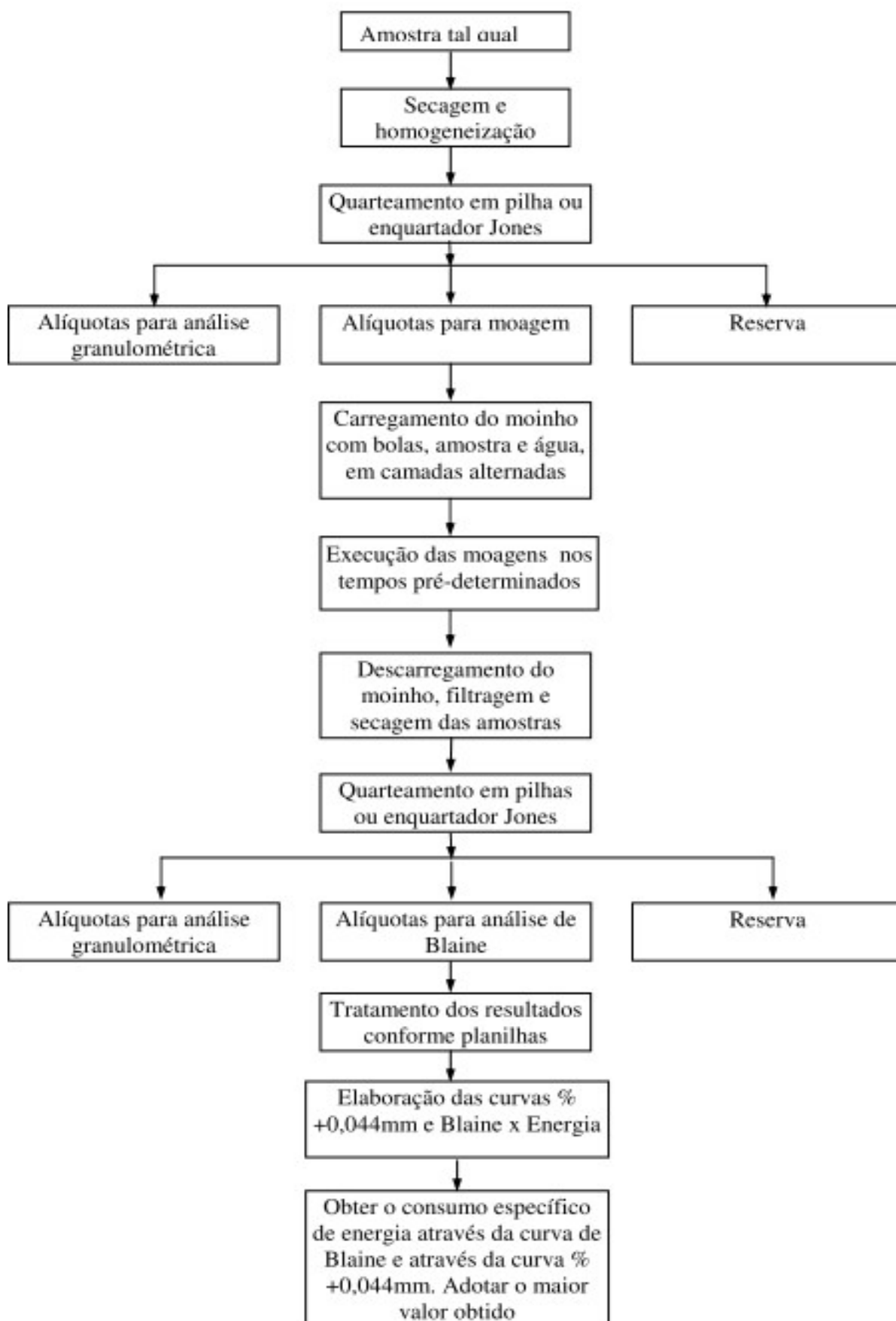
Parâmetro	Condição estabelecida			
Diâmetro interno do moinho (m)	0,254			
Comprimento interno (m)	0,254			
% de enchimento	30,08			
Relação V_{polpa}/V_{vazios}	1,21			
% de sólidos em volume	37,73			
% de sólidos em peso*	75			
% velocidade crítica	65			
Peso de minério (kg) para *peso específico 4,95 t/m ³	3,5			
Peso da carga (kg)	18			
Tipo de corpo moedor	Bolas			
Distribuição da carga moedora	Diâmetro (mm)	%	Peso (kg)	
	30	29	5,22	
	25	38	6,84	
	20	21	3,78	
	15	12	2,16	
Área específica da carga (m ² /t)	34			
Volume interno do moinho (litros)	12,87			
Volume aparente da carga (litros)	3,871			
Volume de vazios da carga (litros)	1,549			
Volume da polpa (litros)	1,874			
Volume real de minério (litros)	0,707			
Volume de água (litros)	1,167			
Potência no eixo pinhão (kW)	0,0573			
Fator de conversão do tempo (minutos) em energia (kWh/t)	0,2727			
Energia (kWh/t) no eixo pinhão / tempo de moagem (minutos)	Energia	6	12	18
	Tempo	22	44	66
Revestimento / <i>lifters</i>	Sem revestimento e sem <i>lifters</i>			
Ponto de tomada da amostra para realização dos ensaios	Alimentação do circuito			

Fonte: Donda (2003).

Nota: Adaptado pelo autor.

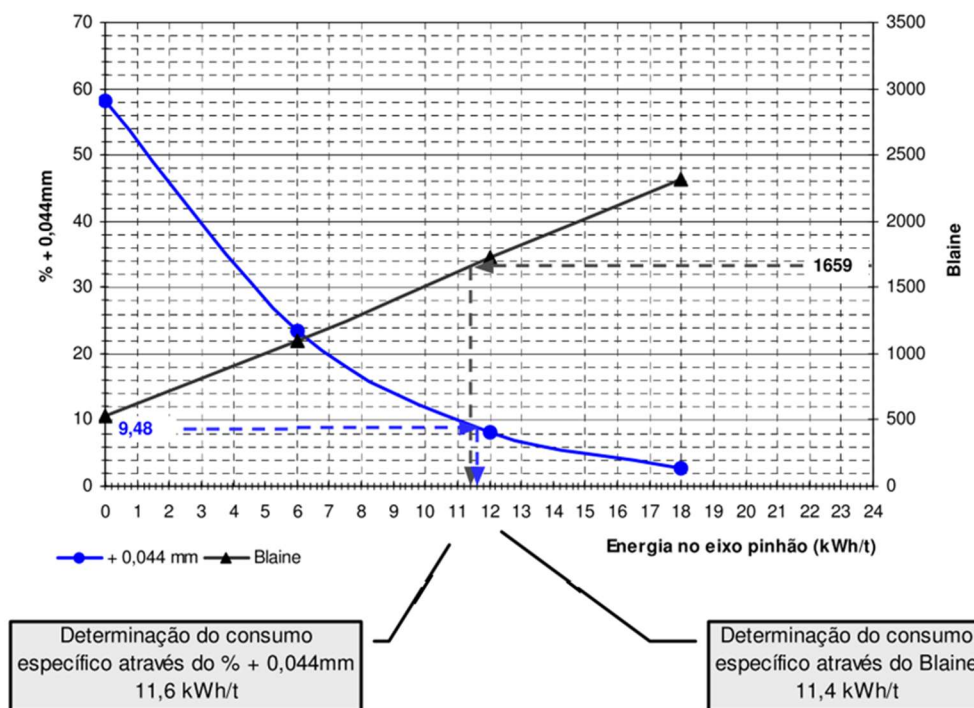
A metodologia proposta por Donda (2003) consistia em aplicar diferentes níveis de energia em amostras de um determinado minério, variando-se o tempo de moagem, em um moinho de bolas de bancada em condições pré-estabelecidas. O tempo de moagem era convertido em consumo específico de energia elétrica por meio da equação (09) para essas condições. O fluxograma na Figura 15 ilustra o procedimento adotado.

Figura 15 – Fluxograma de execução dos ensaios e tratamento dos dados - Metodologia de Donda



Para exemplificar, o consumo específico de energia elétrica para obtenção de 9,48% retido na malha de 0,044 mm foi de 11,6kWh/t e 11,4kWh/t para o alcance da superfície específica do minério de 1659 cm²/g, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Curvas para determinação do consumo específico

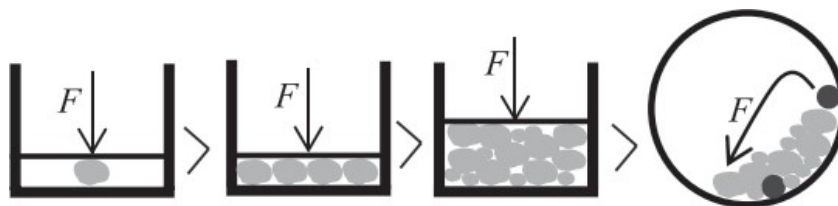


Fonte: Donda (2003).

4.4 Prensa de Rolos de Alta Pressão

A eficiência energética de uma tecnologia de cominuição é determinada pela mobilidade ou grau de confinamento das partículas que estão sendo cominuídas (FUERSTENAU; KAPUR, 1995). Schönert (1988), por sua vez, concluiu que a maior eficiência para a quebra de partículas só é possível por meio da carga lenta de compressão de partículas únicas, tendo, então, estendido sua pesquisa para a quebra de leitos de partículas em uma prensa de pistão. Ele observou que a quebra confinada do leito de partículas era menos eficiente em termos energéticos do que a quebra de partícula única, mas que era muito mais eficiente do que a realizada por um moinho de bolas, por exemplo, em função do modo de transferência de energia, do tipo acerto e erro, das partículas com os corpos moedores, como ilustra a Figura 17.

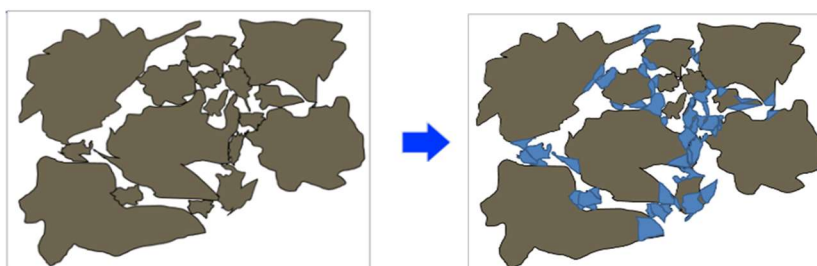
Figura 17 – Ordem de eficiência energética de cominuição de diferentes modos de quebra



Fonte: Rashidi, Rajamani, e Fuerstenau (2017).

Diante das constatações de seus estudos, Schönert (1988, 1991) rapidamente identificou a oportunidade de elevar a transferência de energia de cominuição por meio da fragmentação entre partículas, por meio dos múltiplos pontos de contato entre estas em um leito pressurizado, como ilustrado pela Figura 18. Em outras palavras, as partículas são fragmentadas umas pelas outras, desde que o tamanho da maior partícula seja menor do que a largura e a altura do leito e a força aplicada seja maior do que a tensão de ruptura da partícula.

Figura 18 – Fragmentação interpartículas



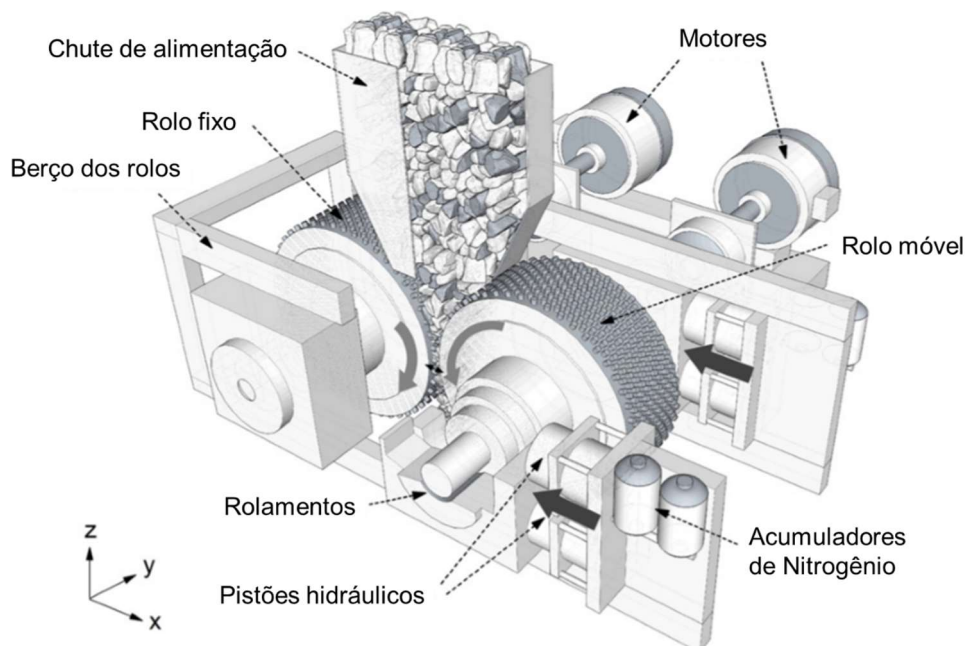
Fonte: *Weir Minerals* (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

Durante a compressão de um leito confinado, partículas menores preenchem os espaços existentes do leito e participam na transferência de energia para o processo de quebra para partículas maiores até uma determinada finura (KLYMOWSKY, 2009). Entretanto, conforme as partículas vão se tornando cada vez mais fragmentadas, o leito se torna mais compacto e maiores forças são necessárias para realizar a redução granulométrica, até atingir um ponto de saturação, onde não existem mais espaços para propagação de trincas e deslocamento de partículas. Neste momento, o processo de quebra é interrompido. Este fenômeno é conhecido como *retardation effect* e foi demonstrado por Fuerstenau, Gutsche e Gapur (1996) em um estudo detalhado acerca da fragmentação de partículas frágeis em um leito de partículas confinadas, utilizando um dispositivo de pistão.

De modo a viabilizar o efeito de quebra interpartículas de maneira contínua, Schönert desenvolveu a prensa de rolos de alta pressão (HPGR), ilustrada na Figura 19 (SCHÖNERT, 1988). Este equipamento consiste em dois rolos com sentido de giro opostos fixados em uma base de sustentação. Um dos rolos possui seu eixo fixo e o outro móvel, com a possibilidade de deslocamento linear. A abertura entre os rolos, conhecida como *gap*, é uma variável dependente das propriedades do material a ser cominuído, tais como, distribuição granulométrica da alimentação, umidade, dureza etc. e da força aplicada no rolo móvel, aplicada por meio de um sistema hidropneumático, onde o óleo pressurizado exerce força nos pistões e, conseqüentemente, no rolo móvel e no leito de partículas. O gás de nitrogênio promove compressibilidade ao sistema, realizando um efeito mola, necessário para prover segurança ao sistema hidráulico e aos rolos em eventuais necessidades de abertura rápida do *gap* para passagem de possíveis corpos estranhos.

Figura 19 – Prensa de rolos de alta pressão



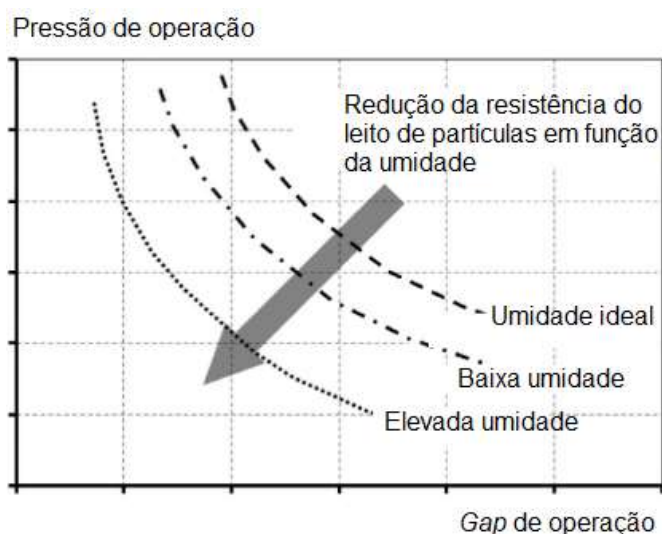
Fonte: Barrios e Tavares (2016).

Nota: Traduzido pelo autor.

Entre os vários fatores que afetam o desempenho da HPGR, a umidade do material apresenta um efeito significativo, como mostra a Figura 20, visto que esta variável influencia no atrito e na aderência entre as partículas e como estas serão comprimidas (FUERSTENAU; ABOUZEID, 2007). Com uma umidade muito alta, onde o material começa a se comportar como uma polpa ou pasta, a resistência à pressão do material

diminui e nenhuma força específica pode ser aplicada (VAN DER MEER, 2015). Por outro lado, o material que é muito seco impedirá a formação de um leito de material competente na zona de compressão, reduzindo o *gap* operacional. Como resultado, é razoável esperar que o efeito de cominuição diminua quando a umidade da alimentação se desviar do valor ideal (SARAMAH; KLEIV, 2013).

Figura 20 – Influência da umidade na HPGR



Fonte: Van der Meer (2015).

Nota: Traduzido pelo autor.

Logo após a introdução do HPGR, Schönert (1985) foi o primeiro a publicar os parâmetros-chave, na forma de equações, para o escalonamento de uma HPGR. O rendimento, a potência e a força de moagem específica são os três principais fatores necessários para o dimensionamento de uma HPGR.

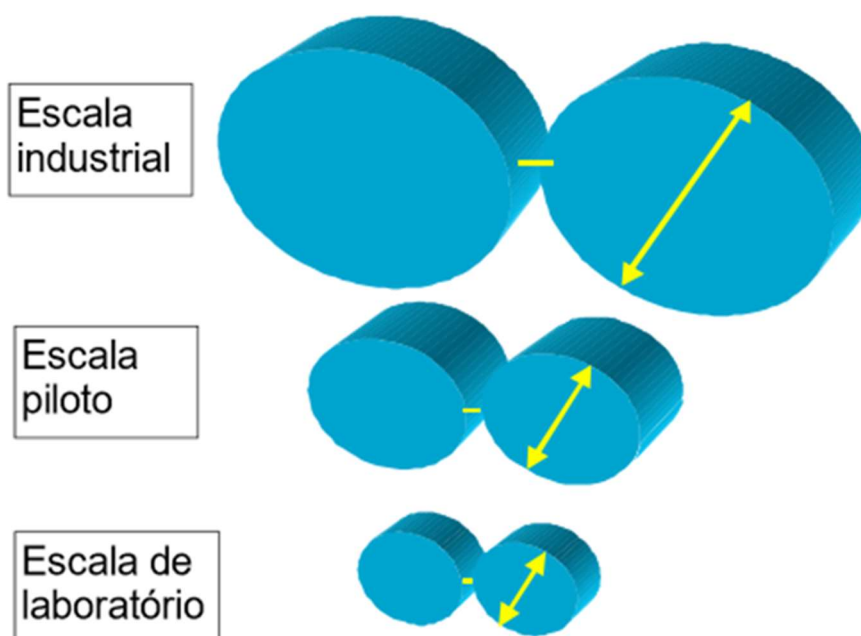
Para realização do escalonamento, pressupõe-se que a razão entre o diâmetro dos rolos e o *gap* operacional (D/x_g) se mantenha constante entre a prensa de laboratório e a industrial, definida em (10). Isto implica que a estimativa do *gap* operacional da prensa industrial seja baseada na medida do *gap* operacional da prensa de laboratório, estabelecido por (11). Essas relações são utilizadas como base, a partir da qual se pode prever a capacidade e a potência da prensa industrial (Figura 21). Por outro lado, quando o fator de escala, descrito por (12), é elevado (por exemplo, 11,2), a precisão de medição do *gap* operacional da prensa de laboratório torna crítico o escalonamento da capacidade específica, e do conseqüente consumo específico de energia elétrica (DANIEL; MORRELL, 2004).

$$\frac{D_{lab}}{x_g^{lab}} = \frac{D_{industrial}}{x_g^{industrial}} \quad (10)$$

$$x_g^{industrial} = \frac{x_g^{lab} \cdot D_{industrial}}{D_{lab}} \quad (11)$$

$$\text{Fator de escala} = \frac{x_g^{industrial}}{x_g^{lab}} = \frac{D_{industrial}}{D_{lab}} \quad (12)$$

Figura 21 – Processo de escalonamento: razão constante entre o diâmetro dos rolos e o *gap* operacional



Fonte: Daniel (2002).
Nota: Adaptado pelo autor

Os principais objetivos do escalonamento é obter a capacidade (t/h) e a distribuição granulométrica do produto prensado. A capacidade do equipamento (t/h) é definida pela largura, diâmetro, velocidade e tipo de superfície dos rolos, além do *gap* operacional, determinado pelas propriedades do material, como a umidade, competência e distribuição granulométrica. A finura do produto é controlada pela força de moagem aplicada no material entre os rolos. Os parâmetros-chave para o escalonamento de uma prensa de rolos são capacidade específica (\dot{m}) e pressão específica de cominuição, definidos em (13) e (14), respectivamente.

$$\text{Capacidade específica} = \dot{m} = \frac{Q}{D \cdot L \cdot u} \quad (13)$$

$$\text{Força ou Pressão específica} = F_{sp} = \frac{F}{1000 \cdot L \cdot D} \quad (14)$$

onde,

Q = vazão mássica, em t/h;

D = diâmetro dos rolos, em m;

L = comprimento dos rolos, em m;

u = velocidade periférica dos rolos, em m/s;

F = força aplicada nos rolos, em kN, obtida pelo produto da pressão do óleo, em Pa, pela área total dos pistões, em m²;

F_{sp} = força específica de moagem, em N/mm².

Nos ensaios experimentais, em unidades de laboratório e piloto, a vazão mássica pode ser determinada por (15) (DANIEL, 2002).

$$Q = \frac{3,6 \cdot m_{ensaio}}{t} \quad (15)$$

onde,

Q = vazão mássica, em t/h;

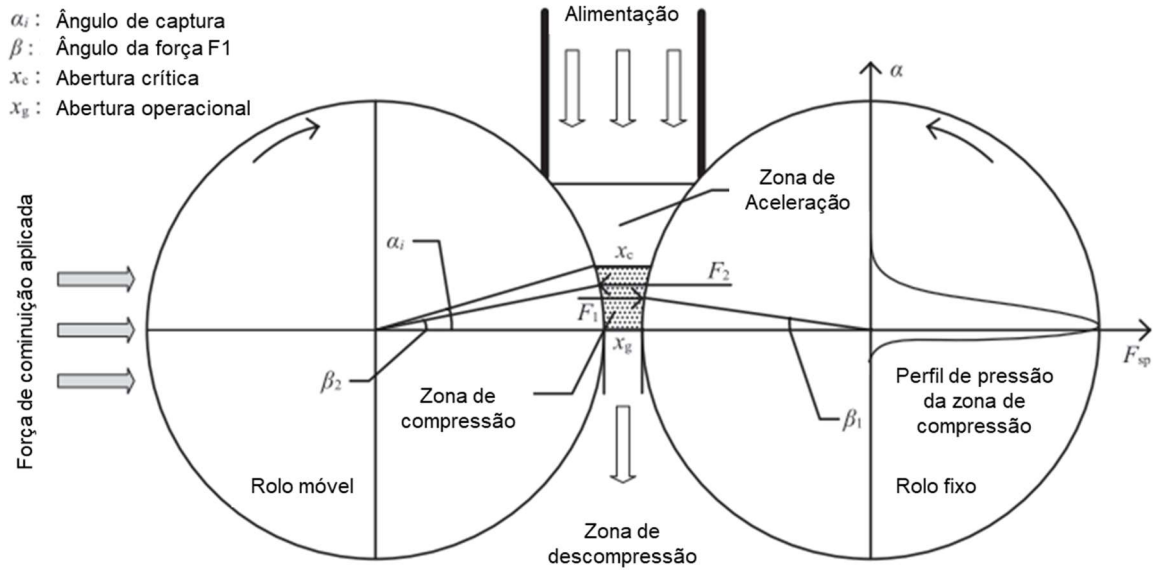
m_{ensaio} = massa utilizada no ensaio piloto, em kg;

t = tempo de execução do ensaio, em s.

A Figura 22 ilustra os aspectos do processo de cominuição por HPGR, identificando as zonas de aceleração, compressão e descompressão das partículas, assim como o perfil de distribuição de pressão da zona de compressão e a localização da abertura crítica e operacional entre os rolos.

Assim, a potência requerida (kW) para uma HPGR simulada é calculada diretamente a partir do produto da energia específica (kWh/t) de cominuição medida durante o ensaio no laboratório (Figura 23) e a vazão mássica prevista (t/h) da HPGR simulada.

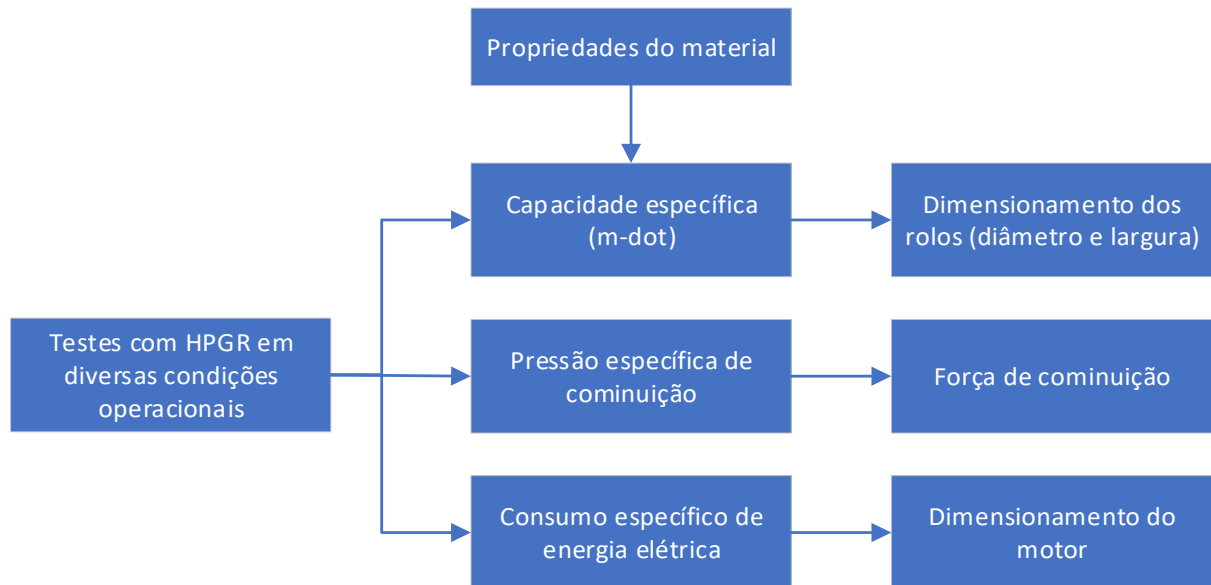
Figura 22 – Aspectos do processo de cominuição por HPGR



Fonte: Rashidi, Rajamani, Fuerstenau (2017).

Nota: Traduzido pelo autor.

Figura 23 – Relação das variáveis para escalonamento de HPGRs



Fonte: Rashidi, Rajamani e Fuestenau (2017).

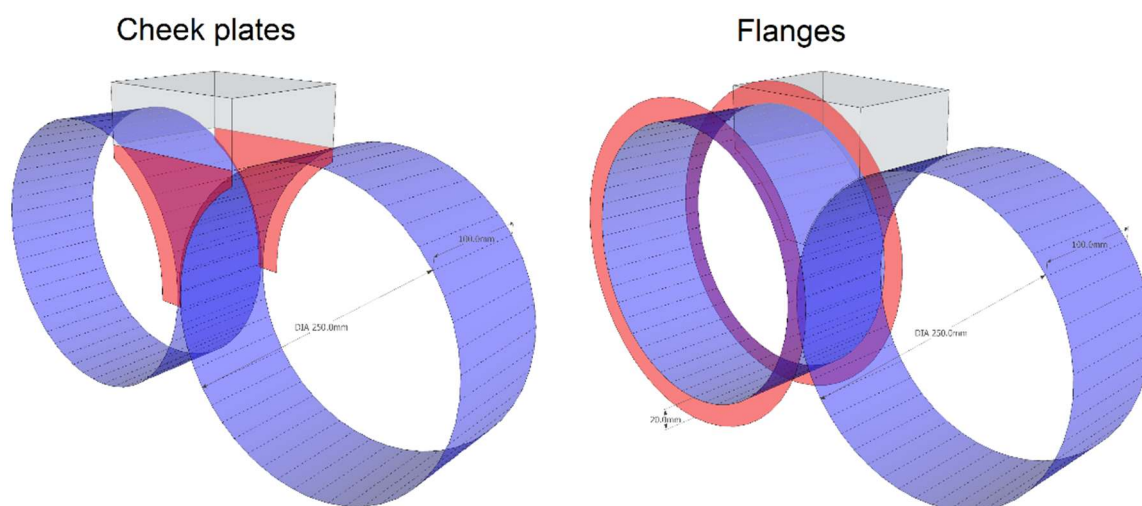
Nota: Adaptado pelo autor.

Um importante ponto a ser levado em consideração no dimensionamento e escalonamento das HPGRs, que possuem sistema de vedação fixo, conhecidos como *cheek plates* (Figura 24), é a perda de desempenho de cominuição do material nas extremidades dos rolos, próximos à vedação lateral. Este fenômeno ocorre em função da variação do grau de confinamento do leito de partículas submetidos à força compressiva dos rolos. À medida que as partículas se aproximam das extremidades,

o grau de confinamento é reduzido, em função do escape das partículas pelo espaçamento existente entre os rolos e o *cheek plate*. Deste modo, o escoamento das partículas aumenta para a região de menor pressão. Este fenômeno é conhecido como *by-pass*. Este *by-pass* pode chegar a 70% quando o *cheek plate* é posicionado a 150 mm dos rolos. Apenas uma pequena folga entre as extremidades do rolo e a vedação lateral (da ordem de uma partícula de diâmetro máximo ou o tamanho do *gap* operacional) é necessária para permitir um *by-pass* significativo e perda expressiva de pressão no leito próximo e além das extremidades dos rolos. Isso leva a um produto mais grosseiro e a uma variação axial significativa de fluxo e desempenho de quebra (CLEARY; SINNOTT, 2021). Para prensagem de concentrados já moídos (remoagem), a influência do distanciamento do *cheek plate* é ainda mais pronunciado, visto que o P80 das partículas da alimentação é cerca de 1.000 vezes menor que o *gap* operacional.

Portanto, é de extrema importância, no dimensionamento e escalonamento das HPGRs, considerar a perda de desempenho ao longo da vida útil do sistema de vedação lateral.

Figura 24 – Tipos de vedações laterais das HPGRs atualmente comercializados



Fonte: Bueno e outros (2017).

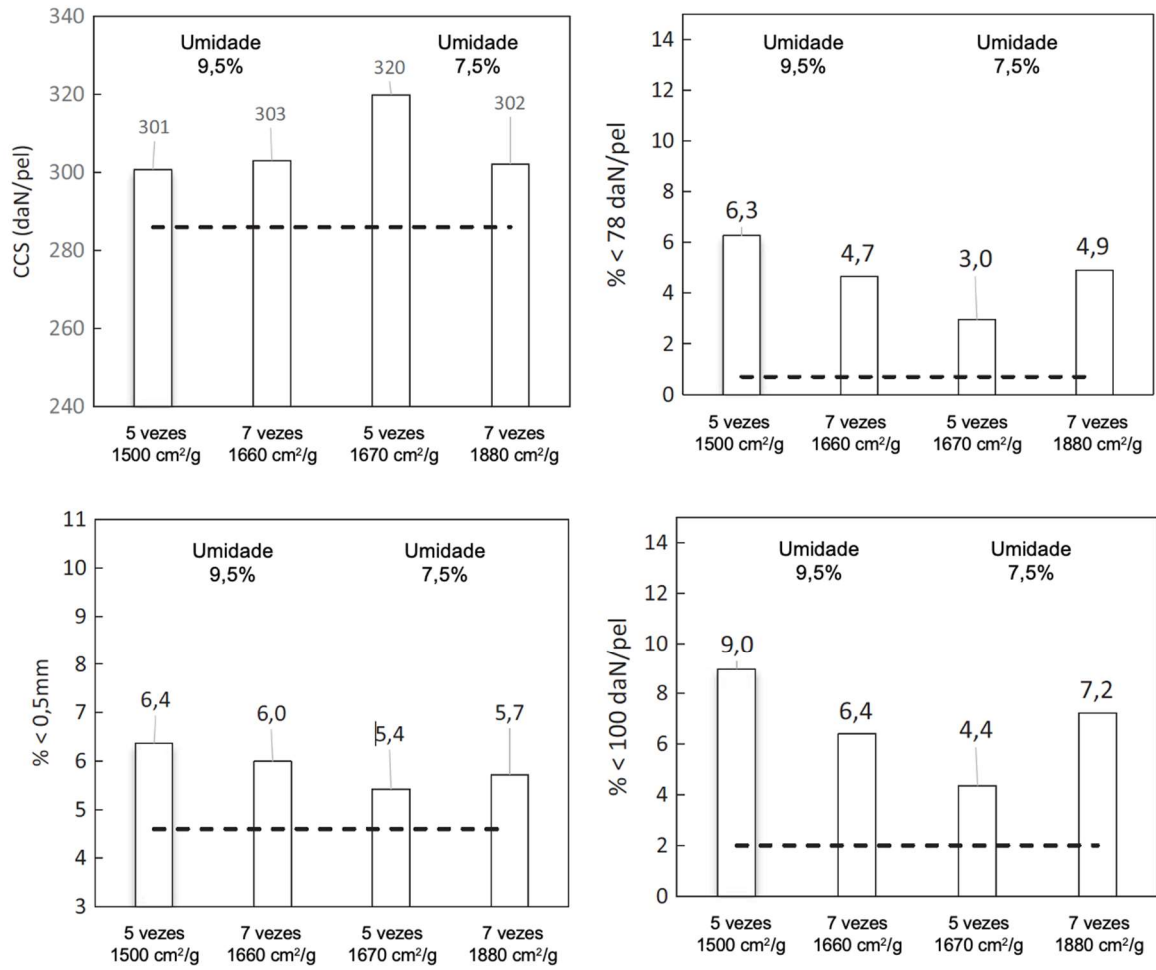
Por fim, Campos e outros (2019) analisaram a influência das variáveis operacionais de uma HPGR piloto e do minério de alimentação na qualidade do produto prensado. Foram manipulados parâmetros como força específica, velocidade dos rolos e umidade do minério de alimentação. O *cheek plate* foi ajustado com distanciamento

de 1,5 mm das extremidades dos rolos e o produto prensado foi coletado em 5 posições abaixo destes. Os resultados mostraram a existência de saturação do ganho de superfície pela HPGR em função da finura do material alimentado, ou seja, quanto mais fino era o minério, maior o *gap* operacional e menor o ganho de superfície específica. Outro ponto claramente identificado foi o efeito das bordas, evidenciado pela diferença do ganho de superfície e menor redução granulométrica (passante na malha de 45 μm) dos minérios coletados nas extremidades comparados aos da região central.

4.5 Cominuição por Múltiplas Prensagens

Mais recentemente, Thomazini e outros (2020) realizaram a análise de pelotas cruas e queimadas por meio da aglomeração de partículas de minério de ferro cominuídas exclusivamente por múltiplas prensagens (5 e 7 passagens na HPGR), alterando a umidade de alimentação da HPGR, nos intervalos de 7 a 7,5% e 9 a 9,5%, e a dosagem do aglomerante (bentonita) em 5,0 e 6,0 kg/t. O processo de aglomeração foi realizado em disco piloto de 800 mm de diâmetro, sendo as pelotas produzidas por cada condição de umidade e aglomerante, classificadas e submetidas ao processo de endurecimento em *pot-grate*. O perfil termodinâmico utilizado foi calibrado de modo reduzir o efeito de uma possível super qualidade promovida por excesso de aporte térmico e ou/ tempo de processamento. Os resultados encontrados foram promissores para a rota de múltiplas prensagens, que apesar de não atingirem os valores especificados de superfície específica para o intervalo de maior umidade de alimentação da HPGR, demonstraram valores de compressão e abrasão da pelota queimada dentro dos padrões de qualidade, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Resultados de compressão e abrasão de pelotas com 5 e 7 passadas na HPGR



Fonte: Thomazini e outros (2020).

Nota: Traduzido pelo autor.

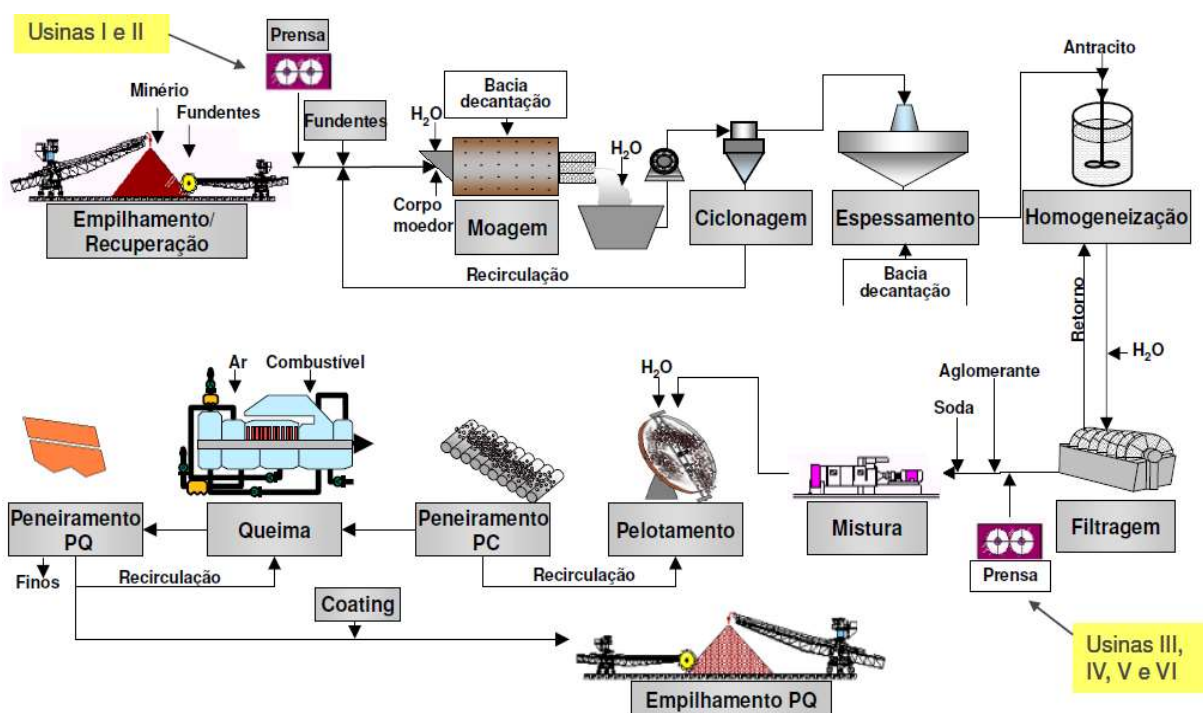
5 METODOLOGIA

5.1 Esboço Metodológico

Conforme Sampieri, Collado e Lucio (2013), o presente projeto de pesquisa trata o tema proposto por meio de um método de natureza aplicada, com abordagem quantitativa do problema de pesquisa proposto. Do ponto de vista de seus objetivos, classifica-se como explicativa. Para atingir os objetivos, a pesquisa se alicerçou seus procedimentos técnicos do tipo experimental, onde as variáveis dependentes são a eficiência energética do processo de cominuição e a qualidade das pelotas cruas e queimadas, e as variáveis independentes são os tipos de rotas tecnológicas adotadas.

As simulações foram realizadas por meio da elaboração de ensaios de moagem e prensagem, em duas diferentes rotas de cominuição, comparando a rota majoritariamente utilizada nas usinas de pelotização da Vale S.A. em Vitória, ES, com a rota do projeto de inovação tecnológica, que objetiva a substituição integral de toda a moagem por prensas de rolos. Na Figura 26 é possível identificar a localização das prensas de rolos no fluxograma das usinas de pelotização 1 a 6.

Figura 26 – Localização das prensas de rolos nas usinas de pelotização da Vale S.A. em Vitória, ES

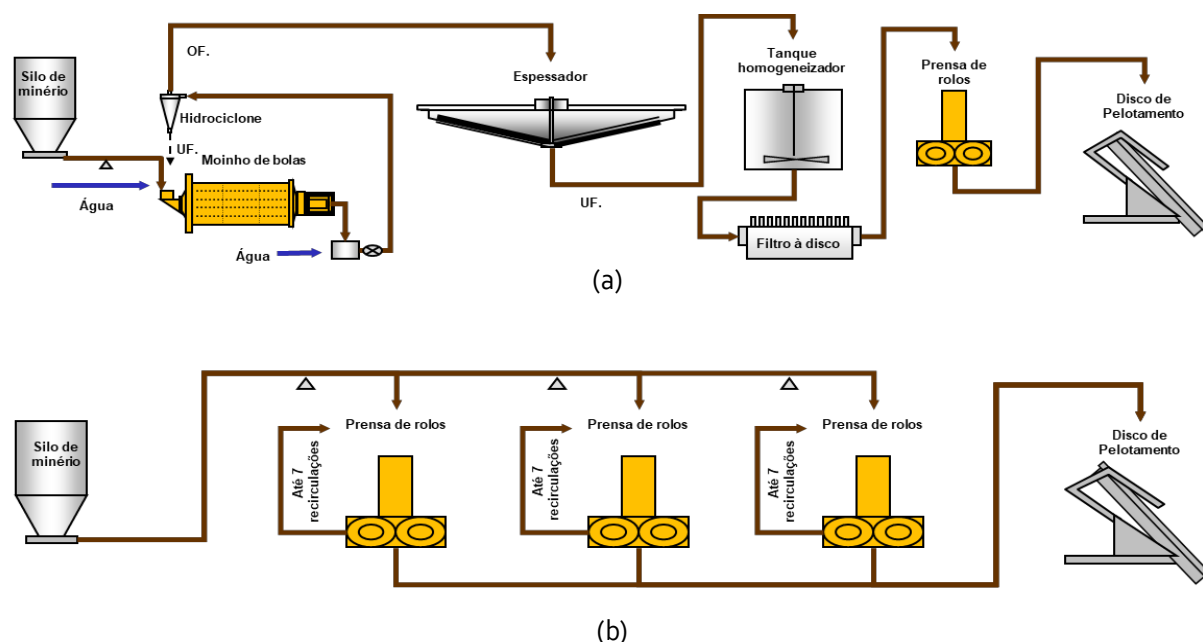


Fonte: Vale S.A. (2010).

A Figura 27 representa a relação dos circuitos de cominuição realizados experimentalmente, a saber:

- Moinho de bolas em circuito fechado de classificação, seguido por HPGR em circuito aberto;
- Múltiplas prensagens.

Figura 27 – Circuitos de cominuição propostos na pesquisa. (a) Moinho de bolas em circuito fechado de classificação seguido por HPGR em circuito aberto e (b) múltiplas prensagens na HPGR em circuito aberto de classificação



Fonte: Elaborado pelo autor.

O *pellet feed* cominuído pelas diferentes rotas foi uma mistura de minérios provenientes das minas do quadrilátero ferrífero da Vale S.A., dos complexos de Itabira e de Minas Centrais, localizados em Minas Gerais, e da mina S11D do complexo de Carajás, localizada no Pará.

O processo de moagem adotou a metodologia desenvolvida por Donda (2003) em um moinho de bolas piloto de 7" de diâmetro e 14" de comprimento, com a utilização de corpos moedores esféricos de ferro fundido branco alto cromo, comumente aplicados nos moinhos industriais. O processo de prensagem decorreu por meio da aplicação da força específica adotada em escala industrial ($3,0 \text{ N/mm}^2$), replicada para a prensa em escala piloto, com rolos de 800 mm de diâmetro e 200 mm de largura. O processo de aglomeração foi realizado em disco piloto, com inclinação variável entre 43° e 46° .

Por fim, as pelotas cruas geradas no disco piloto seguiram para a queima em *pot-grate* de modo a viabilizar a análise de qualidade das pelotas queimadas. Também foram realizados ensaios de cinética de aglomeração em tambores para avaliar a influência das propriedades físicas dos minérios cominuídos no processo de formação de pelotas.

A mistura de minérios de alimentação foi comum para todos os cenários de modo a obter os impactos na eficiência energética apenas pela alteração da rota simulada. A alimentação e o produto das rotas foram analisados fisicamente mediante peneiramento em múltiplas malhas, determinação da superfície específica, por meio do permeabilímetro de Blaine, e obtenção da geometria das partículas com microscópio eletrônico de varredura (MEV). Além da caracterização física, o minério foi analisado quimicamente, com espectrometria de raio-x, e mineralogicamente, por microscopia óptica, de modo a obter todas as informações do minério que está sendo processado.

As pelotas queimadas foram analisadas conforme ensaios padronizados, como descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Normas utilizadas para as análises de qualidade da pelota queimada

Parâmetro	Norma
Tamboramento (% +6,3mm)	ISO 3271:2015
Abrasão (% -0,5mm)	ISO 3271:2015
Compressão	ISO 4700:2015
Metalização ISO DR90	ISO 11257:2015

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Procedimento Experimental

A pesquisa foi dividida em sete macro atividades, sendo elas:

- i. Preparação e caracterização de matérias primas:
 - a. Homogeneização de concentrado de minério de ferro;

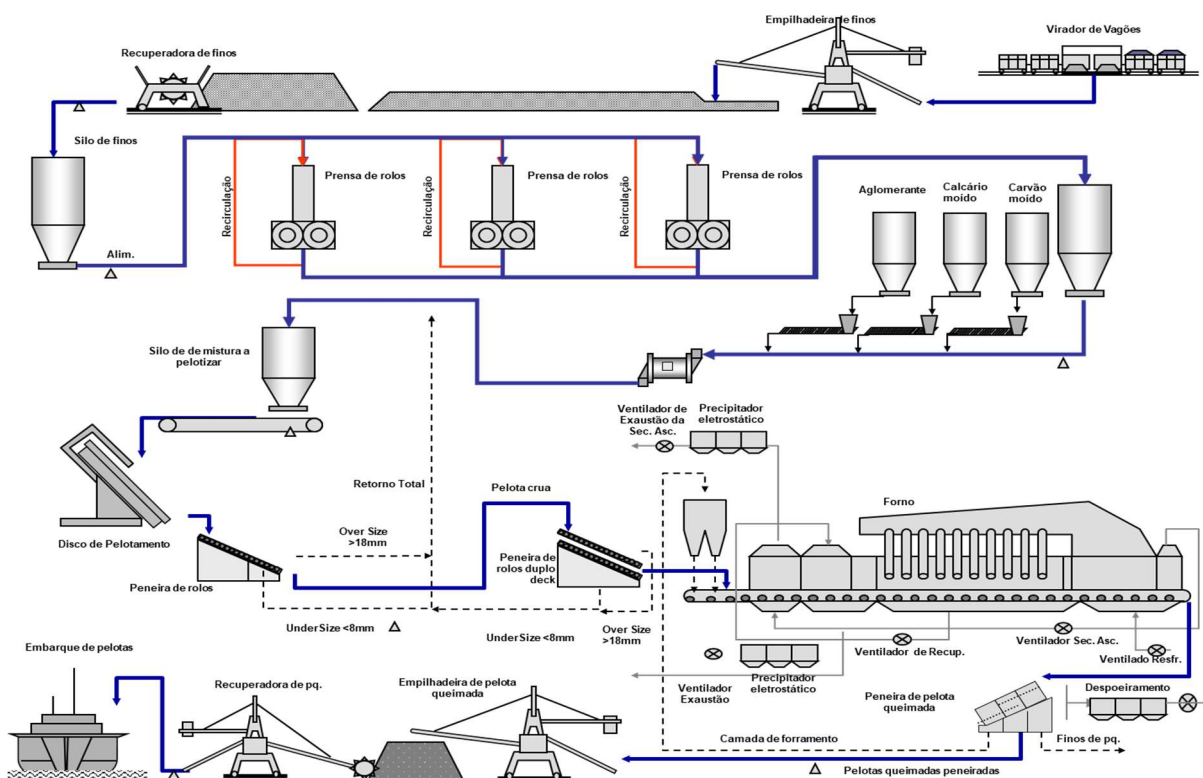
- b. Análise de superfície específica Blaine, distribuição granulométrica e densidade real;
 - c. Análise química total;
 - d. Caracterização mineralógica;
- ii. Cominuição pela rota convencional (moagem a úmido em moinho de bolas seguido por passagem única na HPGR) e queima em *pot-grate* do concentrado cominuído
- a. Moagem a úmido em moinho de bolas, filtragem do concentrado moído e prensagem em única passagem;
 - b. Caracterização física (umidade, superfície específica e distribuição granulométrica);
 - c. Dosagem de insumos, mistura e pelotamento em disco piloto, incluindo análise das propriedades das pelotas cruas (número de quedas, umidade, resistência a seco e a úmido);
 - d. Queima em *pot-grate* incluindo análise química, física (abrasão, compressão, distribuição granulométrica, tamboramento e porosidade) e metalúrgica (redutibilidade e metalização);
- iii. Cominuição pela rota alternativa com múltiplas prensagens (1 a 7 passagens, sem classificação, na HPGR) e queima em *pot-grate* do concentrado cominuído
- a. Prensagem na HPGR;
 - b. Caracterização física (umidade, superfície específica e distribuição granulométrica) a cada passe;
 - c. Dosagem de insumos, mistura e pelotamento em disco piloto, incluindo análise das propriedades das pelotas cruas (número de quedas, umidade, resistência a seco e a úmido);
 - d. Queima em *pot-grate* incluindo análise química, física (abrasão, compressão, distribuição granulométrica, tamboramento e porosidade) e metalúrgica (redutibilidade e metalização);
- iv. Cinética de aglomeração do material cominuído pela rota tradicional e multiprensagem (metodologia proprietária do Corem);

- v. Levantamento do histórico dos consumos específicos a partir dos dados industriais:
 - a. Consumo de corpos moedores;
 - b. Consumo de água;
 - c. Consumo do revestimento das prensas de rolos;
 - d. Consumo do revestimento dos moinhos de bolas;

- vi. Levantamento da demanda energética dos principais ativos de cominuição, bombeamento e desaguagem (bombas de água e polpa, acionamento dos espessadores, tanques de homogeneização e filtros, bombas de vácuo e etc.) do cenário atual e proposto pelo projeto de inovação para as Usinas 1 e 2 (Figura 28);

- vii. Análise comparativa dos cenários analisados.

Figura 28 – Fluxograma proposto do projeto de inovação tecnológica para as Usinas 1 e 2



Fonte: Silva (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização do Minério de Alimentação

O minério de ferro utilizado foi coletado no pátio de finos das usinas da Unidade Tubarão com qualidade química de pelotas para redução direta (PRD), formada por 5,2% de sinter *feed* de Carajás, 46,6% de *pellet feed* da mina Conceição e 48,2% de da mina Brucutu, de modo a viabilizar as análises comparativas dos equipamentos de laboratório com os de escala industrial. A mistura de minérios foi então homogeneizada por agitação manual e, posteriormente, analisado nos equipamentos permeabilímetro Blaine, peneirador aerodinâmico Alpine e pentapicnômetro, para obtenção da superfície específica (SE), percentual passante na malha de 45 μm e da densidade real, respectivamente. Os resultados são mostrados na Tabela 2 e no Gráfico 11 apresentados a seguir.

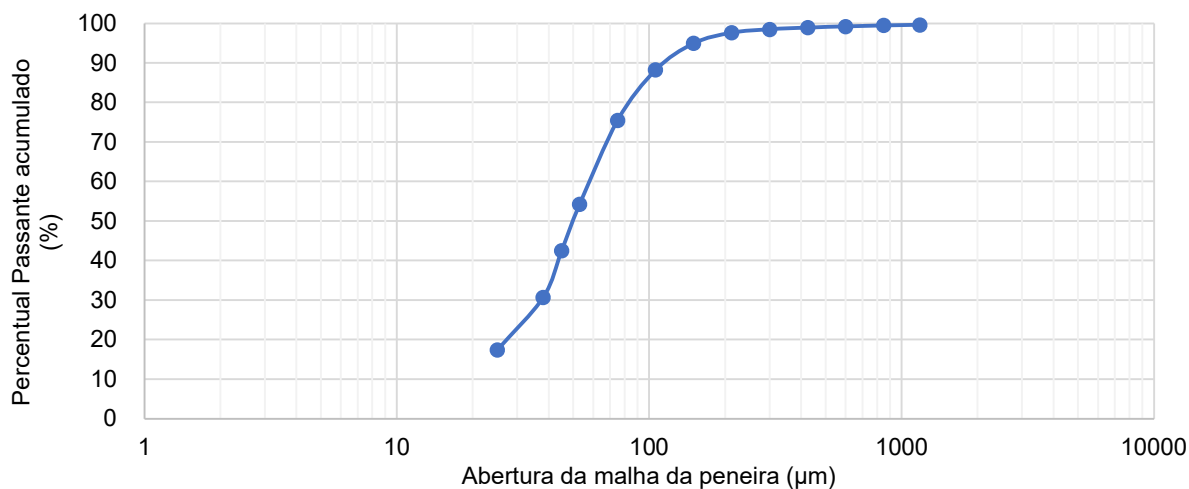
Tabela 2 – Caracterização física do minério de alimentação

Superfície Específica	Densidade real	< 45 μm	D80
480 cm^2/g	5,2 g/cm^3	42,53%	86 μm

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11 – Distribuição granulométrica do minério de alimentação



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Seguindo a caracterização do minério de alimentação, foi realizado a análise química total, por meio de difratometria de raios X, e análise mineralógica por microscopia, ambas análises separadas por faixa granulométrica. Os resultados foram consolidados na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Química total por faixa granulométrica do minério de alimentação

Parâmetro por faixa	+75 µm (%)	-75 +45 µm (%)	-45 +20 µm (%)	-20 µm (%)	Total (%)
% Massa	24,5	29,9	35,1	10,5	100
SiO ₂	5,1	0,4	0,2	0,7	1,4
Al ₂ O ₃	0,2	<0,1	<0,1	0,3	<0,1
Fe ₂ O ₃	93,4	99,8	99,5	98	98
FeT	65,3	69,8	69,6	68,5	68,5
MgO	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
CaO	0,08	0,03	0,03	0,06	0,03
Na ₂ O	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
K ₂ O	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
TiO ₂	0,06	0,06	0,06	0,1	0,07
MnO	0,12	0,07	0,07	0,19	0,09
P ₂ O ₅	0,06	0,03	0,03	0,07	0,04
Cr ₂ O ₃	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,02
V ₂ O ₅	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01
ZrO ₂	<0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
ZnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PPC	1	0,32	0,3	0,88	0,51

Fonte: Corem (2021).

Tabela 4 – Caracterização mineralógica do minério de alimentação

Mineral	+75 µm (%)	-75 +45 µm (%)	-45 +20 µm (%)	-20 µm (%)	Total (%)
% Massa	24,5	29,9	35,1	10,5	100
Magnetita	1,2	0,3	0,4	0,6	0,6
Hematita	91,1	97,4	97	94,6	95,4
Fe - Hidróxido	3,6	1,7	2,3	3,8	2,6
FeTi - Óxidos	0	0	0	0,1	0
MnFe - Óxidos	0,3	0,1	0,1	0,02	0,1
Pirita	0	0	0	0	0
Outros sulfetos	0	0	0	0	0
Quartzo	3,2	0,3	0,1	0,2	0,9
Feldspato	0	0	0	0	0
Mica/Clorita	0	0	0	0,1	0
Argilas	0,2	0	0	0,2	0,1
Outros silicatos	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Carbonato	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
Apatita	0	0	0	0	0
Outros	0	0	0	0	0

Fonte: Corem (2021).

6.2 Cominuição, Pelotamento e Queima do Caso Base (Rota Tradicional)

6.2.1. Cominuição

Após a caracterização físico-química do minério de alimentação dos circuitos de cominuição, foram realizados 3 ensaios de moagem em um moinho de bancada com duração de 24, 48 e 90 minutos, com as condições operacionais listadas no Quadro 5, de modo a obter a energia específica escalonada para um moinho industrial, conforme a metodologia desenvolvida por Donda, baseada na equação de Rowland, Mular e Gerald. O produto de cada moagem foi peneirado, obtendo a distribuição granulométrica das partículas, e analisado a SE, possibilitando a obtenção das curvas de energia específica por SE (Fator BSA) e por percentual retido na malha de 45 μm (fator k_{Donda}). No Gráfico 12 é possível observar o valor do fator BSA, igual a 70,56 (cm^2/g)/(kWh/t) e k_{Donda} , igual a 0,122 t/kWh .

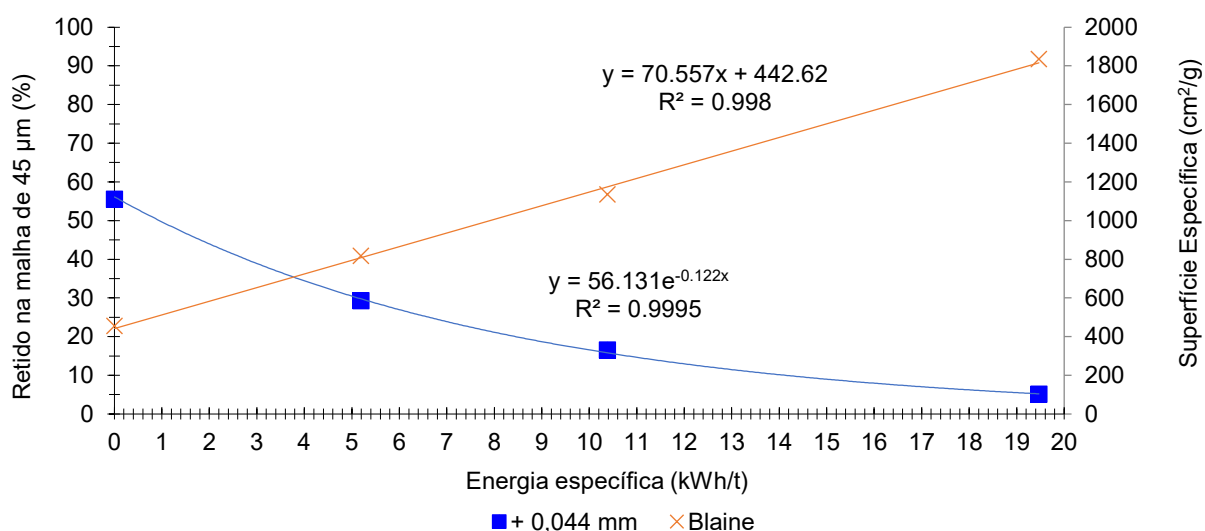
Quadro 5 – Dados operacionais para ensaio de requerimento energético de Donda

Parâmetro	Valor
Diâmetro do moinho (m)	0,18
Comprimento do moinho (m)	0,36
Volume moinho (l)	9,16
Grau de enchimento (%)	33
Porcentagem da velocidade crítica (%)	62
Rotação do moinho (rpm)	68
Volume carga moedora (l)	3,01
Porosidade da carga moedora (%)	40
Volume vazios (l)	1,20
Relação polpa/vazios	1,2
Volume polpa (l)	1,45
Percentual de sólidos em volume (%)	38
Volume minério (l)	0,55
Volume água (l)	0,90
Massa amostra (kg)	2,8
Percentual de sólidos da polpa (%)	76
Massa carga moedora (kg)	14
Potência no eixo pinhão (kW)	0,036
Fator de conversão do tempo de moagem em minutos para energia específica (kWh/t)	0,216

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Requerimento energético da moagem conforme metodologia de Donda



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

As equações (16) e (17) indicam, respectivamente, a energia específica, em kWh/t, necessária para elevar a superfície do minério de alimentação até o ponto esperado para os processos subsequentes e para reduzir o percentual retido na malha de interesse (45 µm) até a granulometria desejada.

$$y = 70,557x + 442,62 \quad (16)$$

$$y = 56,131e^{-0,122x} \quad (17)$$

O Quadro 6 estabelece os valores de referência comumente utilizados em escala industrial de superfície específica e granulometria para o produto da moagem e prensagem, a serem buscados nos equipamentos em escala piloto.

Quadro 6 – Valores desejados para o produto da moagem e HPGR da rota tradicional

Parâmetro	Unidade	Referência
Superfície específica do produto da moagem	cm²/g	1550 ± 50
Ganho de superfície na HPGR	cm²/g	300 ± 50
Superfície específica no pelotamento	cm²/g	1850 ± 50
Granulometria passante em 45 µm do produto da moagem	%	85 ± 3
Granulometria passante em 45 µm no pelotamento	%	87 ± 3

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Com base no ensaio do requerimento energético, a energia específica para atingir a superfície específica alvo de 1550 cm²/g é de 15,69 kWh/t.

De modo a gerar a massa necessária para os ensaios de prensagem, pelotamento e queima em *pot-grate*, utilizou-se um moinho de bolas piloto de maior capacidade. As informações da moagem em escala piloto estão listadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Condições operacionais do moinho de bolas piloto

Parâmetro	Valor
Diâmetro e comprimento (polegadas)	24 x 36
Grau de enchimento (%)	35
Carga moedora (diâmetro e peso)	25 mm – 156 kg 20 mm – 178 kg 15 mm – 61 kg 12,5 mm – 39 kg
Taxa de alimentação (kg/h)	150
Percentagem de sólidos	78%
Taxa horária de alimentação de polpa (kg/h)	192

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

O produto da moagem foi separado em 2 lotes, sendo o primeiro com 850 kg, referente ao produto do moinho do início da moagem, com a carga circulante e percentual de sólidos em estabilização (de modo a aproveitar toda a massa disponível), e o lote 2, com 390 kg, já com a operação estável. Ambos foram caracterizados fisicamente antes de alimentar a HPGR, conforme consolidado na Tabela 5. O lote 1 apresentou o produto mais grosseiro em função do aproveitamento da massa antes da estabilização da carga.

A moagem em escala piloto apresentou em média (ponderada pela massa), uma superfície específica de 1538 cm²/g e consumiu uma energia específica de 16,0 kWh/t. Por meio da equação (16), determinou-se que o consumo específico para esta mesma superfície pelo moinho de bancada seria de 15,52 kWh/t. Este resultado demonstra alinhamento entre os dados obtidos em ambas as moagens, visto que o desvio entre os resultados foi de apenas 3,09%.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica do produto da moagem piloto

Malha (μm)	% Passante		
	Lote 1	Lote 2	Média
150	100,0	100,0	100,0
106	99,9	100,0	99,9
75	99,7	99,5	99,7
53	93,4	92,4	93,1
45	85,7	84,9	85,5
38	73,2	73,4	73,2
25	50,8	52,0	51,2
-25	0,0	0,0	0,0
P80 (μm)	42	42	42
Superfície Específica (cm^2/g)	1.505	1.615	1.538
Massa (kg)	850	360	1.210

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Após a moagem, o produto de cada lote foi processado em passada única na HPGR piloto. As características do equipamento e parâmetros iniciais do processo de prensagem foram consolidadas no Quadro 8. Um parâmetro importante pré-estabelecido foi a força específica de cominuição, definida em $3,0 \text{ N/mm}^2$ equivalentes a uma pressão de 48 bar do conjunto hidráulico, calculada em função da quantidade e diâmetro dos pistões do rolo móvel.

Quadro 8 – Parâmetros da HPGR

Parâmetro	Valor
Diâmetro dos rolos (mm)	800
Largura dos rolos (mm)	250
Quantidade e potência dos motores (kW)	2 x 250
Quantidade e diâmetro dos pistões (mm)	2 x 280
Pressão inicial de nitrogênio (bar)	48
Pressão inicial do hidráulico (bar)	15
Gap zero (mm)	5
Velocidade periférica dos rolos (m/s)	0,75

Fonte: Corem (2021)

Foram realizados, no total, seis ensaios, sendo quatro para processar a massa proveniente do lote 1 e dois ensaios para a massa do lote 2. A Tabela 6 consolida o registro das variáveis operacionais obtido durante os ensaios, destacando-se o

consumo específico de energia elétrica no Gráfico 13 (sendo a energia líquida aquela consumida apenas pela fragmentação do minério, obtida pela subtração entre a energia total e a necessária para girar os rolos sem a alimentação de minério na HPGR) e a capacidade específica no Gráfico 14, variáveis importantes para o escalonamento.

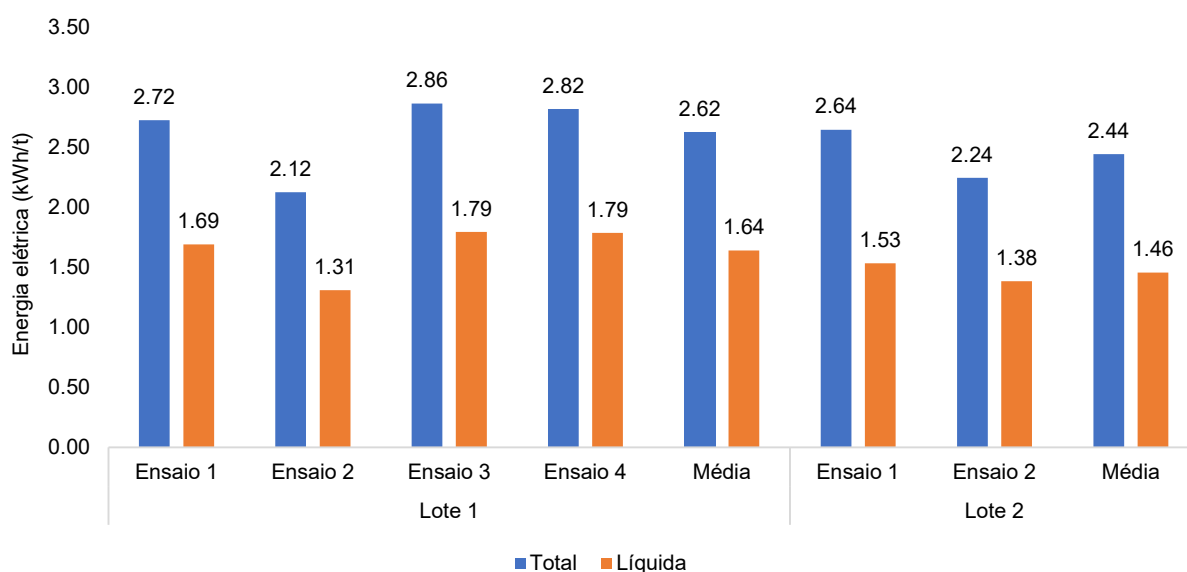
Tabela 6 – Parâmetros operacionais da HPGR da rota tradicional

Variáveis de processo	Unidade	Lote 1					Lote 2		
		# 1	# 2	# 3	# 4	Média	# 1	# 2	Média
Massa processada	kg	222	236	232	207	224	190	197	194
Energia específica total	kWh/t	2,72	2,12	2,86	2,82	2,62	2,64	2,24	2,44
Energia específica líquida	kWh/t	1,69	1,31	1,79	1,79	1,64	1,53	1,38	1,46
Força específica	N/mm ²	3,10	3,00	3,00	3,10	3,05	3,00	3,10	3,05
Pressão de óleo	bar	49,6	49,5	49,4	49,7	49,6	49,4	50,5	50,0
Dif. de pressão (LE-LD)	bar	0,80	0,80	0,80	0,50	0,73	0,10	0,60	0,35
Pressão N ₂	bar	46,1	46,8	46,2	46,6	46,4	46,2	50,5	46,8
Pressão N ₂ / Hidráulico	%	0,93	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Gap	mm	8,65	8,20	8,15	8,40	8,34	8,95	8,80	8,87
Desalinhamento (LE-LD)	mm	2,50	2,40	2,50	3,00	2,59	1,10	2,00	1,56
Taxa de alimentação	t/h	42,0	53,2	41,8	41,4	44,8	40,0	50,7	45,5
Umidade na alimentação	%	7,20	7,50	7,20	8,10	7,49	5,50	7,10	6,32
Capacidade específica (ṁ)	(t/h)/(m ³ /s)	279	353	277	275	297	267	336	302
Velocidade periférica	m/s	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Fonte: Corem (2021)

Nota: Elaborado pelo autor.

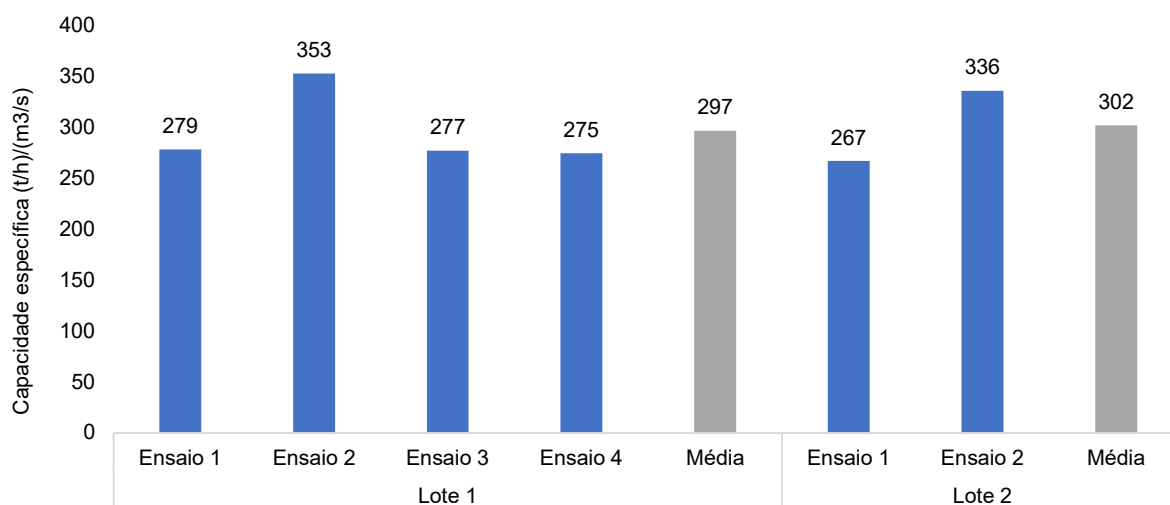
Gráfico 13 – Consumo específico de energia elétrica por ensaio – Rota tradicional



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Capacidade específica de prensagem por ensaio – Rota tradicional



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

A cada ensaio, o produto das bordas (aproximadamente 15% da largura dos rolos) e centro HPGR foi segregado e acumulado para posterior caracterização física, de modo a avaliar o efeito borda, característico de equipamentos que adotam sistema de vedação lateral fixo, tipo *cheek plate*, como é o caso do equipamento empregado no presente estudo e de todas as prensas de rolos industriais utilizadas nas usinas de pelotização da Vale S.A.

Na prensagem de ambos os lotes, foi possível identificar, na Tabela 7, que o ganho de superfície específica das bordas foi praticamente uma região de não moagem, visto que os resultados foram abaixo de $50 \text{ cm}^2/\text{g}$ e não houve elevação do percentual passante na malha de controle, impactando negativamente na amostra global.

Tabela 7 – Resumo da caracterização física da rota tradicional

Malha (μm)	Feed	Lote 1			Lote 2				
		Moído	HPGR Centro	HPGR Borda	HPGR Global	Moído	HPGR Centro	HPGR Borda	HPGR Global
1180	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
850	99,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
600	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
425	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
300	98,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
212	97,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
150	95,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	98,6	99,7
106	88,3	99,9	99,9	100,0	99,9	100,0	99,7	99,0	99,6
75	75,5	99,7	99,6	99,8	99,6	99,5	99,1	97,7	98,9
53	54,2	93,4	94,8	93,5	94,6	92,4	93,6	90,1	93,1
45	42,5	85,7	88,2	85,2	87,7	84,9	87,6	82,0	86,7
38	30,8	73,2	77,1	71,9	76,3	73,4	78,0	70,3	76,9
25	17,4	50,8	57,9	50,0	56,7	52,0	59,3	50,3	58,0
P80	86	42	40	42	40	42	39	44	40
Blaine	480	1.505	1.810	1.560	1.770	1.615	1.995	1.620	1.940

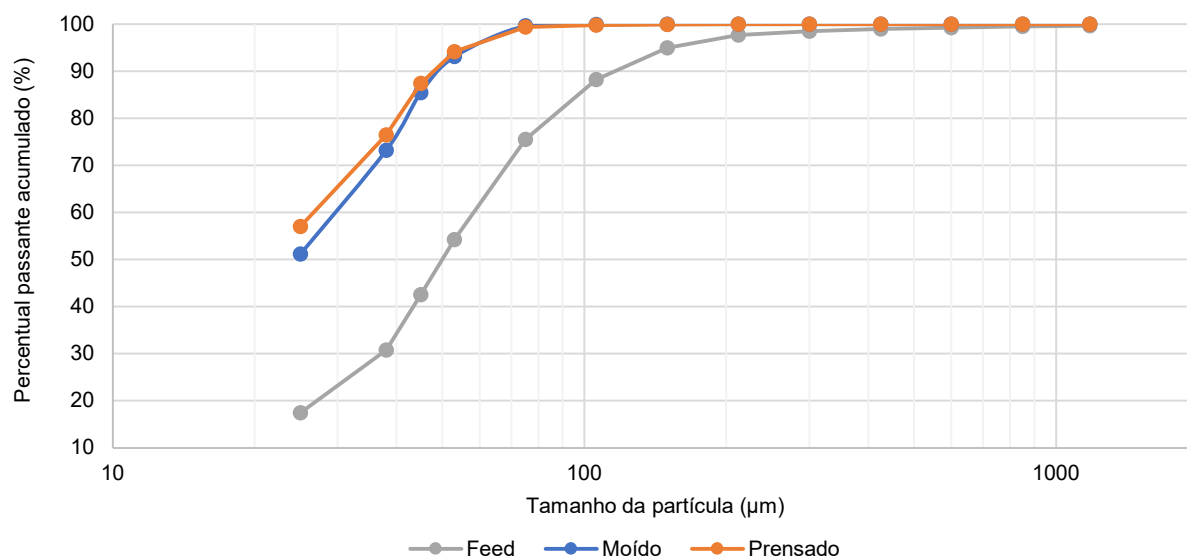
Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

De modo a gerar a massa de minério de alimentação das fases de pelotamento e queima com valores de superfície específica dentro da referência, conforme Quadro 6, foi consolidado o produto dos lotes 1 e 2 (HPGR Global) em uma única mistura, combinada nas proporções de 70% e 30%, respectivamente, resultando em uma SE de $1.821 \text{ cm}^2/\text{g}$ e percentual passante na malha de $45 \mu\text{m}$ de 87,43%. O Gráfico 15 demonstra a distribuição granulométrica obtida na rota tradicional (alimentação da moagem ou *feed*, produto moído e prensado em passada única após moagem).

Já o Quadro 9 reúne as principais características físicas e das variáveis de desempenho do processo de cominuição da rota tradicional. Nela é possível observar que a HPGR apresenta o fator BSA bem superior ao da moagem, porém um fator k significativamente inferior, demonstrando que a HPGR é um ótimo equipamento para ganho de área superficial, mas bastante inferior à moagem para redução da granulometria de *pellet feed*.

Gráfico 15 – Distribuição granulométrica da alimentação, moído e prensado da rota tradicional de cominuição



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Quadro 9 – Resumo dos resultados de cominuição da rota tradicional

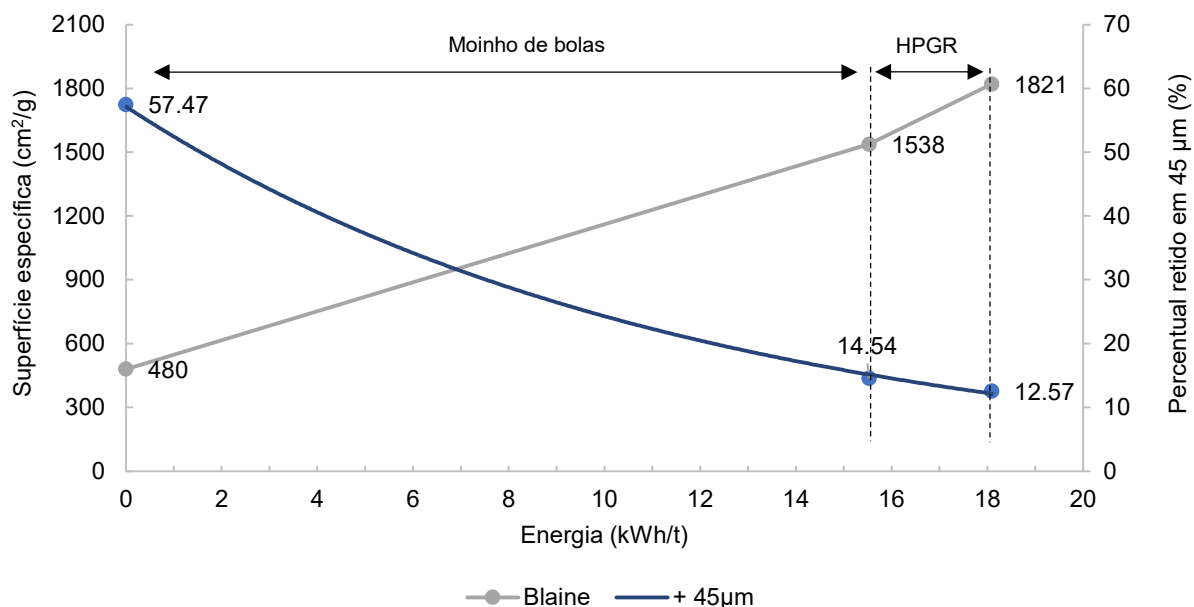
Indicadores de processo	Unidade	Moagem	Prensagem	Circuito
Consumo específico de energia elétrica	kWh/t	15,52	2,57	18,09
Superfície específica da alimentação	cm ² /g	455	1538	480
Superfície específica do produto	cm ² /g	1538	1821	1821
Aumento de superfície específica	cm ² /g	1083	283	1341
Fator BSA	(cm ² /g)/(kWh/t)	69,8	110,2	74,1
D80 da alimentação (F80)	µm	86,88	42,0	86,88
D80 do produto (P80)	µm	42,0	40,1	40,1
Passante em 45 µm da alimentação	%	44,45	85,46	42,53
Passante em 45 µm do produto	%	85,46	87,43	87,43
Fator k	t/kWh	0,122	0,057	0,084

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

O circuito como um todo consumiu 18,09 kWh/t, apresentando um fator k igual a 0,084 t/kWh e fator BSA igual a 74,1. O Gráfico 16 demonstra a elevação da área superficial e a redução do percentual retido na malha de 45 µm promovido por cada um dos equipamentos pela energia específica acumulada.

Gráfico 16 – Superfície específica e granulometria por energia – Rota tradicional

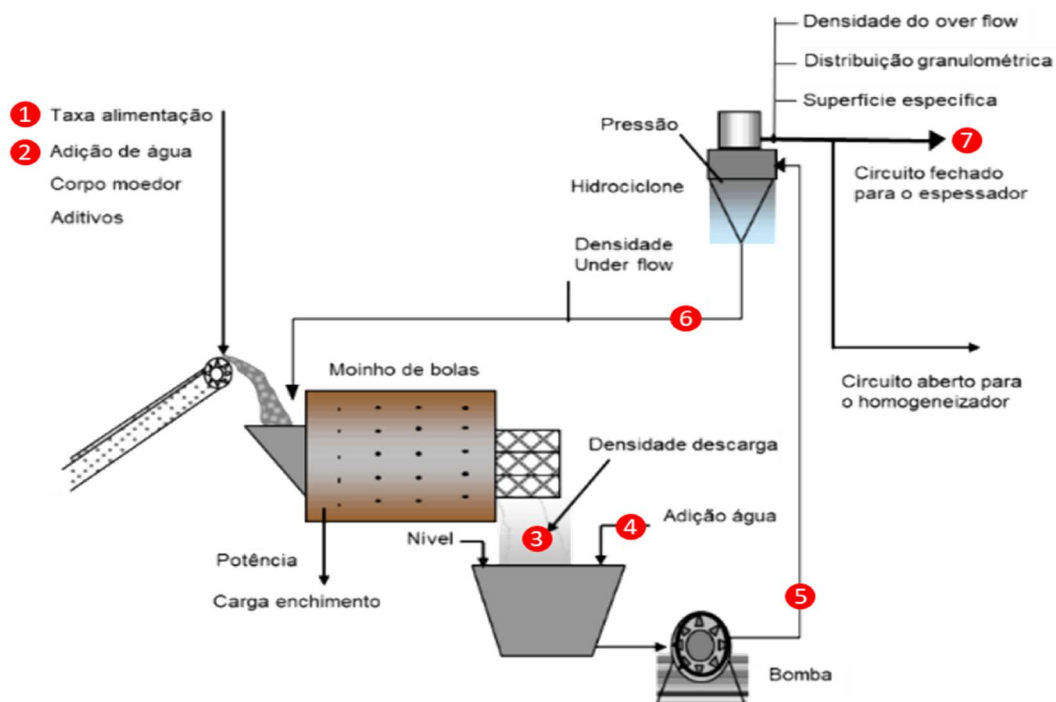


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

De modo a calcular o consumo de água da moagem do circuito tradicional de cominuição, foi realizado o balanço de massa em 2 moinhos em escala industrial, por meio da medição de campo do percentual de sólidos da alimentação e descarga do moinho (pontos 1 e 3, respectivamente, da Figura 29) e alimentação, *underflow* e *overflow* dos hidrociclones (pontos 5, 6 e 7, nesta ordem, da Figura 29), quando estes operavam em regime estável (mínimo 2 horas de operação sem interrupções da taxa de alimentação).

Figura 29 – Identificação dos pontos para o balanço de massa dos moinhos de bolas



Fonte: Elaborado pelo autor.

De posse do percentual de sólidos, foi possível calcular a vazão de água requerida para a operação dos moinhos (pontos 2 e 4 da Figura 29). O Quadro 10 e o Quadro 11 consolidam os dados obtidos no balanço de massa dos moinhos 01 e 02, respectivamente. No moinho 01, o consumo de água totalizou $493,9 \text{ m}^3/\text{h}$, correspondente a $3,14 \text{ m}^3/\text{t}$. O moinho 2, apresentou um consumo de $603,4 \text{ m}^3/\text{h}$, equivalente a $2,81 \text{ m}^3/\text{t}$. As vazões horárias dependem da vazão mássica de sólidos na alimentação do moinho, logo irão variar de acordo com a capacidade de cada equipamento. Por outro lado, a vazão específica por tonelada de minério representa melhor o consumo típico da operação dos moinhos a úmido para a remoagem de minério de ferro nas usinas de pelletização, já que independe da capacidade de cada moinho. Neste caso, identifica-se uma variação entre $2,81$ e $3,14 \text{ m}^3$ de água por tonelada (base seca) de minério na alimentação dos moinhos.

Quadro 10 – Balanço de massa do moinho 01

Descrição	Unidade	1	2	3	4	5	6	7
Vazão de sólidos	t/h	157,0	0	439,0	0	439,0	282,0	157,0
Percentual de água	%	8,0	100,0	18,3	100	56,8	20,0	76,4
Percentual de sólidos	% p/p	92,0	0,0	81,7	0	43,2	80,0	23,6
Sólidos em volume	% v/v	69,4	0,0	46,8	0	13,0	44,0	5,7
Sólidos + água	t/h	170,7	14,1	537,4	480	1016,8	352,6	664,5
Água	m ³ /h	13,7	14,1	98,3	479,8	578,1	70,6	507,5
Sólidos	m ³ /h	30,9	0	86,4	0	86,4	55,5	30,9
Sólidos + água	m ³ /h	44,6	14,1	184,8	479,8	664,6	126,1	538,4
Densidade da polpa	t/m ³	3,83	1,00	2,91	1,00	1,53	2,80	1,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11 – Balanço de massa do moinho 02

Descrição	Unidade	1	2	3	4	5	6	7
Vazão de sólidos	t/h	214,9	0,0	561,0	0,0	561,0	346,0	214,9
Percentual de água	%	8,8	100,0	18,3	100	55,6	18,6	74,4
Percentual de sólidos	% p/p	91,3	0,0	81,7	0,0	44,4	81,5	25,6
Sólidos em volume	% v/v	67,2	0,0	46,8	0,0	13,6	46,4	6,3
Sólidos + água	t/h	235,5	26,2	686,6	577	1263,2	424,9	838,9
Água	m ³ /h	20,6	26,2	125,7	577,2	702,8	78,8	624,0
Sólidos	m ³ /h	42,3	0,0	110,4	0,0	110,4	68,1	42,3
Sólidos + água	m ³ /h	62,9	26,2	236,1	577,2	813,2	146,9	666,3
Densidade da polpa	t/m ³	3,74	1,00	2,91	1,00	1,55	2,89	1,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que esta água é recirculada pelos espessadores, portanto, a eliminação da fase de moagem a úmido não resultaria na economia total destas vazões, e sim uma pequena parcela perdida por evaporação, equivalente a aproximadamente 2,5%. Importante observar que, além do aspecto ambiental, um dos benefícios com relação à redução do consumo hídrico é a eliminação de equipamentos e seus respectivos consumos de energia elétrica das fases de desaguagem e transporte de polpa, uma vez que estes seriam eliminados com a rota multiprensagem.

6.2.2. Pelotamento e queima em *pot-grate*

Para realizar o processo de aglomeração em disco piloto e, posteriormente, a queima em *pot-grate*, foram adicionados os seguintes insumos: bentonita (aglomerante

mineral), calcário calcítico (fundente e fonte de CaO para correção química) e antracito (combustível sólido). As dosagens de cada insumo e sua respectiva qualidade química e física encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Balanço físico e químico da mistura a ser aglomerada

Material	%	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	MnO (%)	S (%)	C (%)	-45 µm (%)	SE (cm ² /g)
HPGR lote 1	70	68,6	1,58	<0,1	0,03	<0,04	0,09	0,02		87,7	1770
HPGR lote 2	30	68,6	1,62	<0,1	0,03	<0,04	0,09	0,01		86,7	1940
Total Minério	100	68,6	1,59	0	0,03	0	0,09	0,02	0	87,4	1821
Bentonita	0,5	15	52,2	16	1,46	2,64	0,18	0,03	0	65,0	2945
Calcário	1,81	0,6	0,95	0,5	54,2	0,22	0,02	0,05	0	72,6	3970
Antracito	1,54	0,9	6,99	4,83	0,17	0,13	0,01	0,59	81,4	73,3	6920
Total <i>mix</i>	103,85	68,71	1,98	0,16	1,02	0,02	0,09	0,03	1,25	90,2	2014
Total <i>mix</i> /100	100	66,16	1,9	0,16	0,98	0,02	0,09	0,03	1,21	86,8	1939

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Foram preparadas três misturas (P1A, P1B e P1C) com o mesmo balanço de massa da Tabela 8 que alimentaram o disco de pelotamento piloto para formar as pelotas. A qualidade física destas (resistência a quedas e resistência a força compressiva seca e úmida) pode ser observada na Tabela 9.

Tabela 9 – Qualidade das pelotas cruas: calibração do *pot-grate*

Parâmetro / Mistura	P1A	P1B	P1C	Média
Umidade das pelotas no pelotamento (%)	8,1	8,1	8,1	8,1
Umidade das pelotas na alimentação do <i>pot-grate</i> (%)	8,1	8,0	8,0	8,0
Número de quedas (quedas)	4,0	5,0	4,0	4,3
Resistência pelotas cruas (kg)	1,3	1,5	1,3	1,3
Resistência pelotas secas (kg)	6,1	5,9	6,1	6,0

Fonte: Corem (2021).

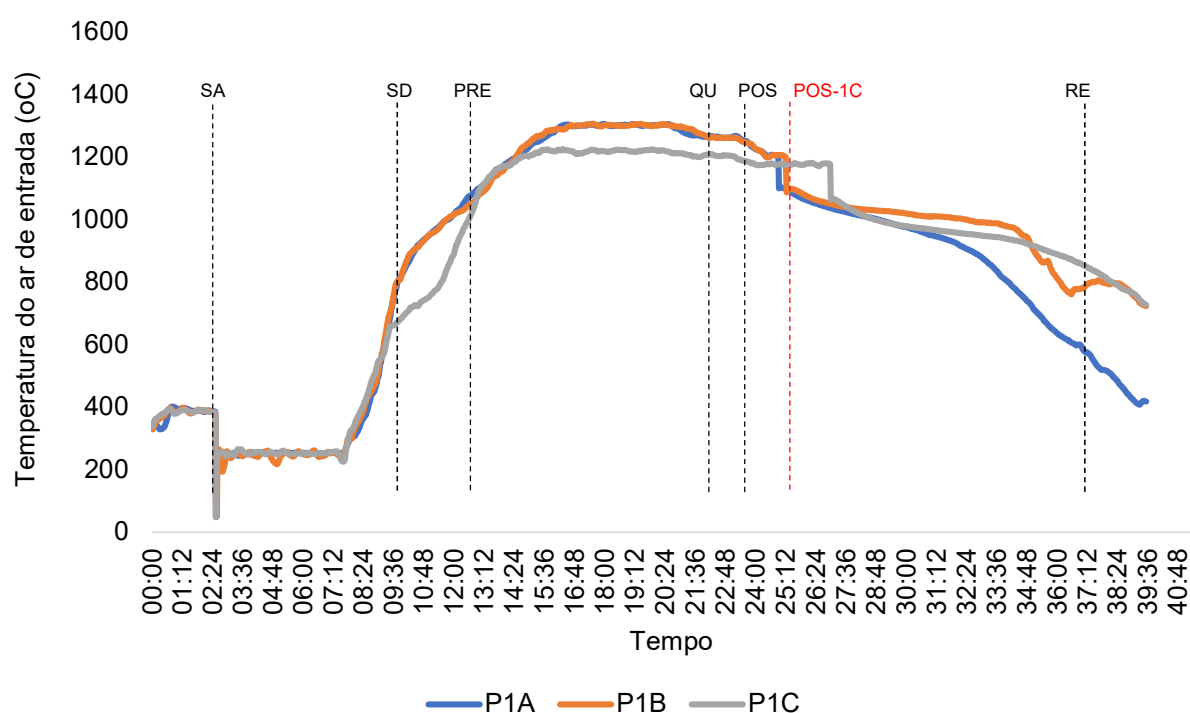
Elaborado pelo autor.

As três queimas foram realizadas com foco em ajustar os perfis de temperatura e pressão para definição de um processamento térmico menos agressivo e mais sensível às variações da qualidade física do minério, que é objeto de interesse do presente estudo.

O perfil térmico inicialmente assumido (P1A) para o *pot-grate* foi baseado no forno da Usina 7, visto que as usinas de pelotização 1 e 2 foram paralisadas e o último perfil

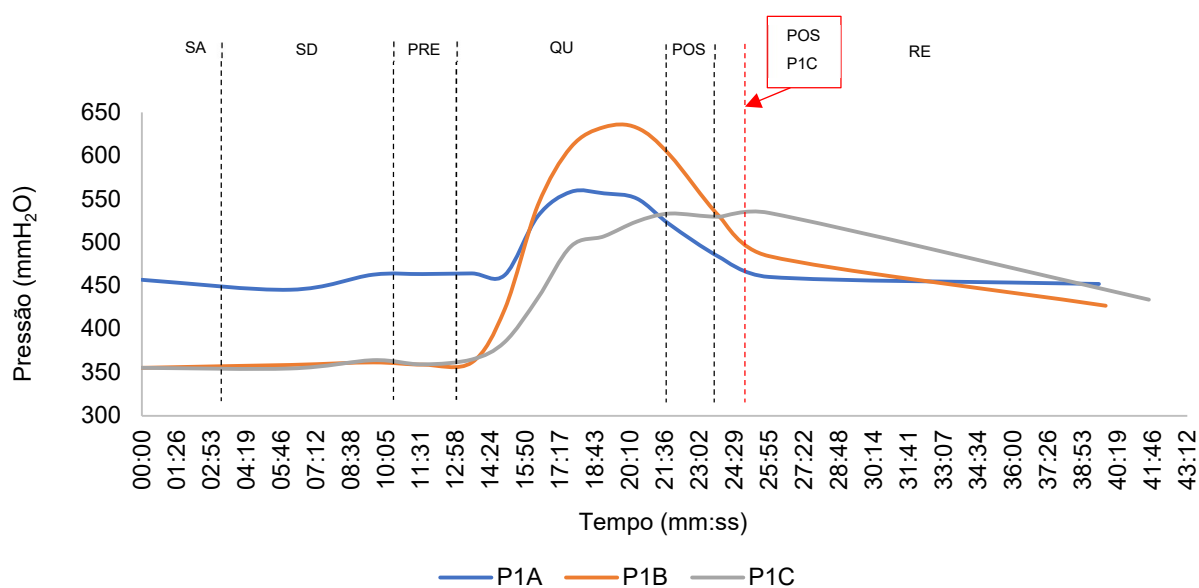
térmico adotado nestas plantas apresentava excesso de carga térmica no forno, o que poderia gerar um excesso de qualidade, prejudicando a análise de possíveis impactos na qualidade final em função da rota de cominuição. Foram realizadas mais duas queimas, sendo a segunda (P1B) com o mesmo perfil térmico da primeira, porém com pressões mais baixas até a região de queima, e a terceira (P1C) com temperaturas mais baixas, maior duração na pós-queima e também com pressões mais baixas até a região de queima, como pode ser observado no Gráfico 17 e Gráfico 18.

Gráfico 17 – Ciclos térmicos para calibração do *pot-grate*



Fonte: Corem (2021).

Notas: Elaborado pelo autor. SA = Secagem ascendente; SD = Secagem descendente; PRE = Pré-queima; QU = Queima; POS = Pós-queima; RE = Resfriamento.

Gráfico 18 – Perfis de pressão para calibração do *pot-grate*

Fonte: Corem (2021).

Notas: Elaborado pelo autor. SA = Secagem ascendente; SD = Secagem descendente; PRE = Pré-queima; QU = Queima; POS = Pós-queima; RE = Resfriamento.

A Figura 30 ilustra o processo de queima em *pot-grate* para simular o forno de endurecimento industrial e analisar, de forma controlada, os parâmetros do processamento térmico em escala piloto.

Figura 30 – Queima em *pot-grate*, sendo (a) alimentação com pelotas cruas e (b) pelotas queimadas



(a)

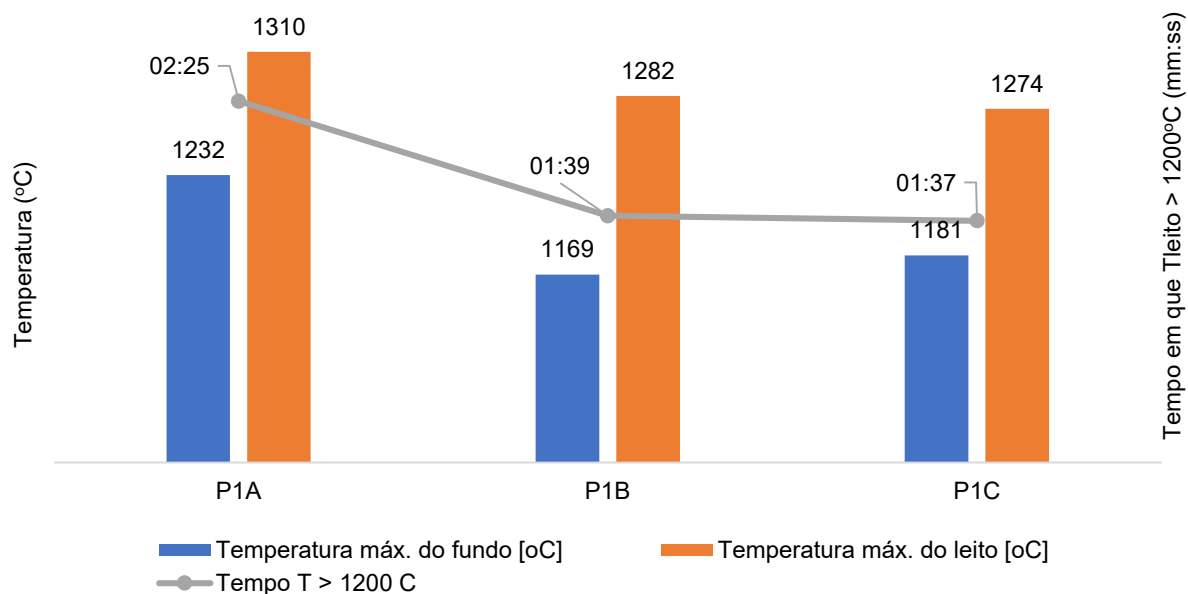


(b)

Fonte: Corem (2021).

No Gráfico 19 é possível observar o tempo de exposição do leito de pelotas à temperatura acima de 1200 °C, além das temperaturas máximas do leito e do fundo atingidas durante o processamento térmico.

Gráfico 19 – Tempo de exposição do leito de pelotas a temperatura superior a 1200 °C

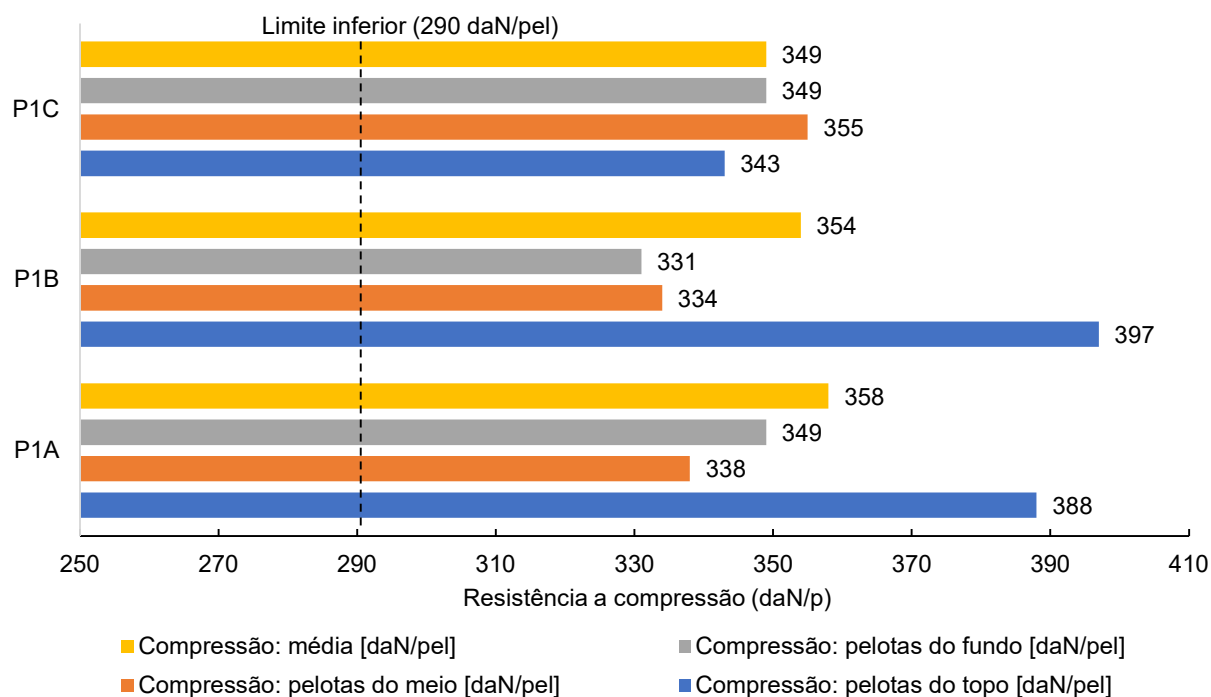


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Após o descarregamento do *pot-grate*, foram realizadas as análises de compressão (topo, meio e fundo) e tamboramento (-0,5 mm e +6,3 mm). Conforme pode ser observado no Gráfico 20 e no Gráfico 21, a queima P1C representou a queima mais calibrada para evitar super qualidade, tornando as análises subsequentes mais sensíveis à variação apenas da mudança da rota de cominuição.

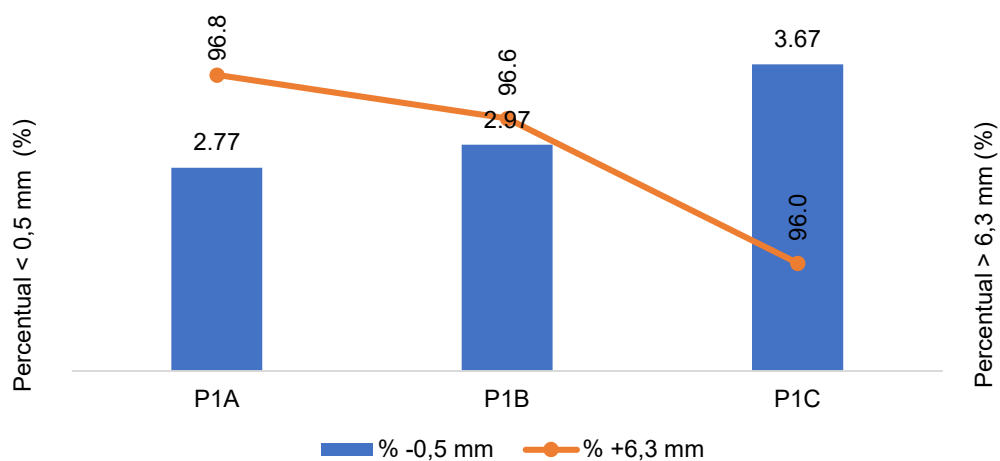
Gráfico 20 – Resistência a compressão das pelotas queimadas – Ensaios P1A, P1B e P1C



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 21 – Tamboramento das pelotas queimadas

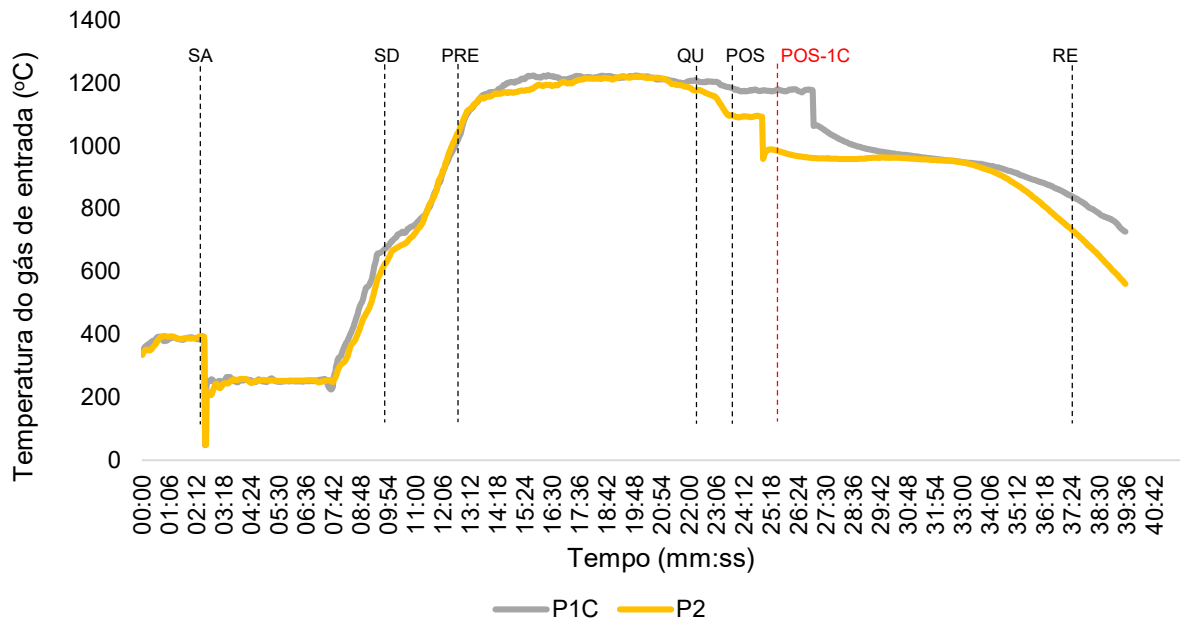


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Com a experiência obtida nos 3 ensaios de calibração, observou-se a oportunidade de reduzir ainda mais o perfil de temperatura e pressão, explorando a sobra de qualidade disponível. Foi então estabelecido o perfil de queima P2, com redução da temperatura do final da queima e pós-queima e com diminuição ainda mais expressiva na pressão de trabalho. Nos Gráfico 22 e Gráfico 23 é possível observar a comparação entre os perfis de pressão e de temperatura P2 com P1C.

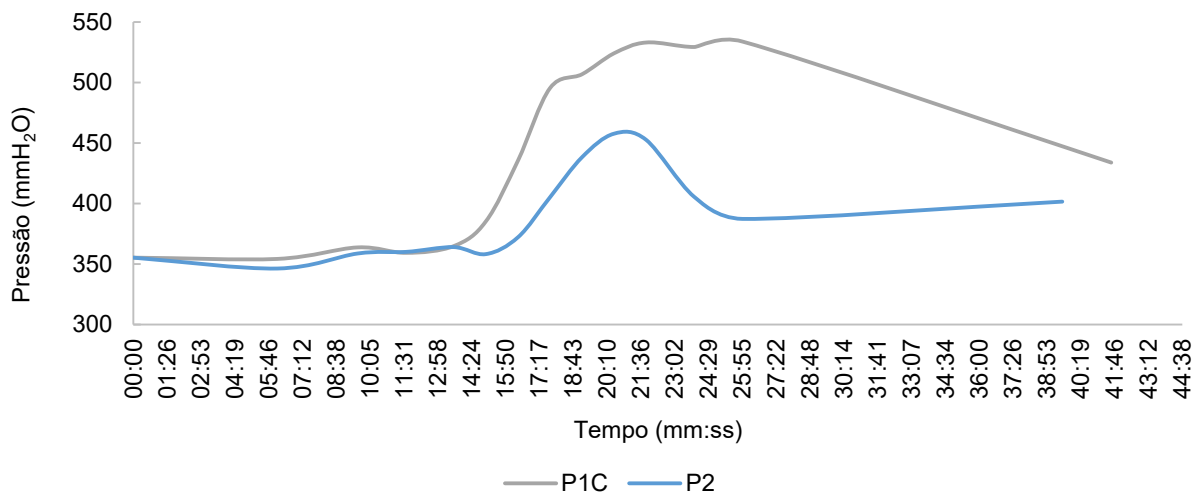
Gráfico 22 – Perfil de queima final P2 e P1C



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 23 – Perfil de pressão final P1C e P2

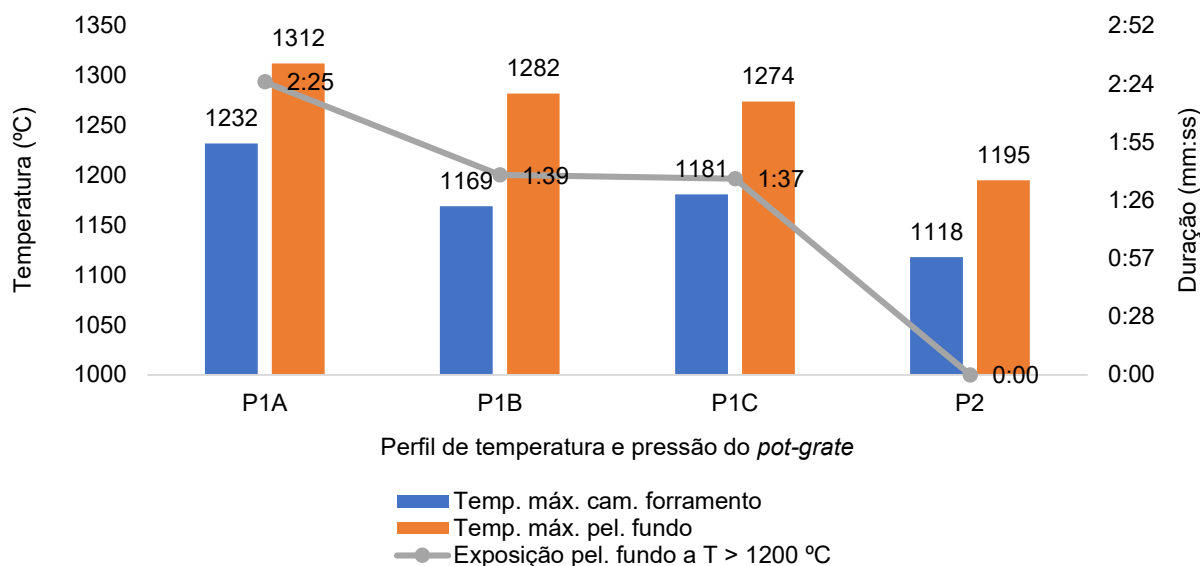


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 24 verifica-se que os ajustes realizados eliminaram a exposição das pelotas de fundo a temperaturas acima de 1200 °C, o que diminui a velocidade das reações de sinterização das pelotas e promovem a redução da qualidade, tornando-se um perfil de queima ainda mais sensível a variáveis externas ao processamento térmico, como a característica física das partículas do minério (superfície específica e distribuição granulométrica).

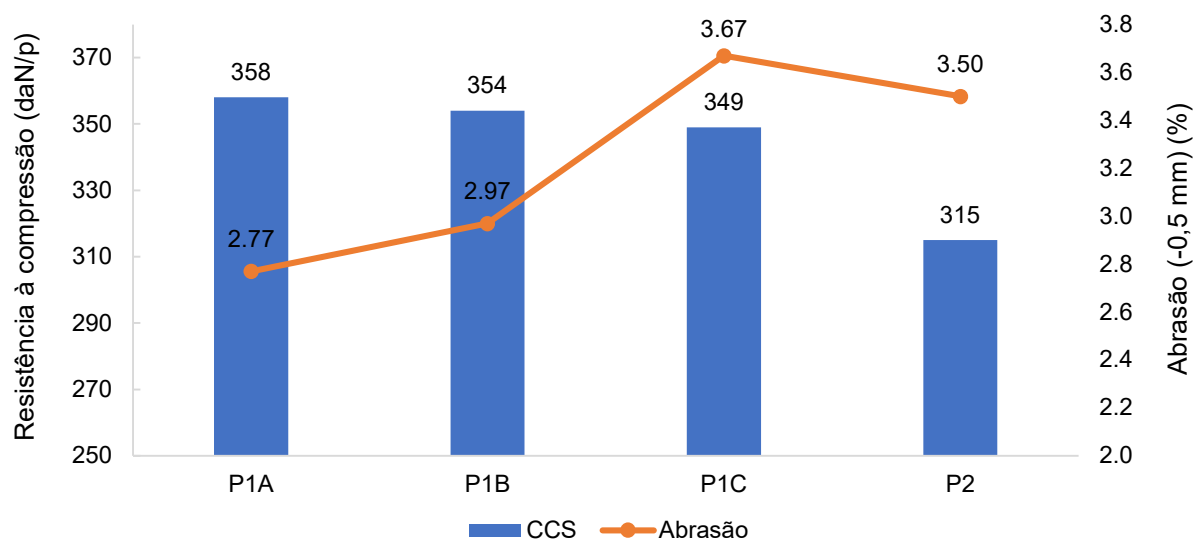
Gráfico 24 – Temperatura máxima das pelotas da camada de forramento e de fundo das 4 queimas da rota tradicional



Fonte: Corem (2021).
Nota: Elaborado pelo autor.

Estas alterações promoveram o resultado esperado, aproximando a resistência à compressão para o limite inferior de especificação de 290 daN/p. A abrasão, apesar de ter reduzido de 3,67 para 3,50%, foi considerada uma boa referência, sendo, portanto, padronizado o perfil P2 como padrão para a realização de todas as demais queimas subsequentes. Os resultados dos testes quanto a resistência à compressão e abrasão são ilustrados no Gráfico 25.

Gráfico 25 – Compressão e abrasão das pelotas queimadas da trota tradicional



Fonte: Corem (2021).
Nota: Elaborado pelo autor.

De modo a aumentar a abrangência da pesquisa, a partir das queimas realizadas com o perfil P2, foram incluídas as seguintes análises para mensurar a qualidade metalúrgica das pelotas: ISO Linder, ISO DR90, Corem R180, porosidade e SATMAGAN. A Tabela 10 mostra as principais referências de qualidade da pelota queimada. Os resultados encontrados de todas as variáveis analisadas para a rota tradicional de cominuição foram consolidados no Quadro 12 e no Quadro 13.

Tabela 10 – Resultados e parâmetros de referência de qualidade da pelota queimada

Parâmetro	Unidade	Referência	
Tamboramento (% > 6,3 mm)	(%)	93,5	Maior melhor
Abrasão (% < 0,5 mm)	(%)	5,5	Menor melhor
Resistência à compressão a frio (CCS)	(daN/pel)	290	Maior melhor
Metalização ISO DR90	(%)	95,0	Maior melhor

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o objetivo foi realizar o processamento térmico com a maior proximidade possível dos valores de referência, evitando excesso de qualidade, os dados foram considerados satisfatórios e definidos como base de comparação para a rota multiprensagem, mesmo que a abrasão tenha ficado relativamente abaixo do valor de referência, como já mencionado anteriormente.

Quadro 12 – Análise qualitativa do pelotamento e queima da rota tradicional de cominuição

DESCRIÇÃO	Local	ENSAIO			
		P1A	P1B	P1C	P2
Análise qualitativa	Pelotamento	Pelotamento normal, pelotas pegajosas a 8,1% de umidade			Pelotamento normal, pelotas pegajosas a 8,1% de umidade
	Queima	Perfil de queima e pressão industrial. Tempo de exposição das pelotas do fundo a T >1200 °C: 1'49"	Pressões e vazão de gases reduzidas. Tempo de exposição das pelotas do fundo a T >1200 °C: 1'00"	Menor temperatura de queima, tempo de exposição das pelotas do fundo a T >1200 °C: 1'00"	Perfil de temperatura e pressão reduzidos. Pelotas de fundo não atingiram 1200 °C

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Quadro 13 – Consolidação dos resultados dos ensaios da rota tradicional de cominuição

DESCRIÇÃO		UNIDADE	P1A	P1B	P1C	P2	
FEED	Qualidade física do minério	Percentual - 45 µm	%	87,4			
		Sup. Espec. Blaine	cm ² /g	1821			
PELOTAMENTO	Umidade do minério	%H ₂ O no pelotamento	%	8,13	8,13	8,13	8,05
		%H ₂ O no <i>pot-grate</i>	%	8,10	8,01	8,00	7,95
	Qualidade física das pelotas cruas	Número de quedas	QTD	4	5	4	3
Resistência a úmido		kg	1,27	1,47	1,26	1,30	
Resistência a seco		kg	6,06	5,92	6,13	6,05	
QUEIMA	Variáveis de processo	Temp. pré-queima	°C	1079	1079	1079	1079
		Temp. máx. gás queima	°C	1302	1302	1219	1219
		Temp. pelotas do fundo	°C	1310	1282	1274	1195
		Massa pelotas cruas	kg	90	90	90	90
		Altura leito de pelotas	cm	34	34	34	34
		Ciclo térmico	min	39'33"	39'50"	41'37"	39'33"
		Prod. pelotas cruas	t/h.m ²	1,37	1,36	1,30	1,37
		Prod. de grelha	t/dia.m ²	28	28	26,8	28
PELOTAS QUEIMADAS	Qualidade física das pelotas queimadas	Tamboramento (+ 6,3 mm)	%	96,8	96,6	96,0	96,0
		Abrasão (- 0,5 mm)	%	2,8	3,0	3,7	3,5
		CCS: Média	daN/p	358	354	349	315
		CCS: Desvio padrão	daN/p	109	119	107	112
		CCS: Menor que 140 daN/p	%	1,1	4,4	4,4	2,2
		CCS: Menor que 90 daN/p	%	1,1	2,2	1,1	1,1
		CCS: Topo	daN/p	388	397	343	316
		CCS: Meio	daN/p	338	334	355	300
		CCS: Fundo	daN/p	349	331	349	329
	Qualidade metalúrgica das pelotas queimadas	Porosidade	%	28,4	28,8	30,4	33,4
		SATMAGAN (T/M/F)	%	< 0,2 < 0,2 < 0,6	< 0,2 < 1,6 < 0,4	< 0,2 < 0,2 < 0,3	< 0,2 < 0,2 < 0,4
		ISO Linder: RDI _{DR-3,15}	%	-	-	-	1,40
		ISO Linder: RDI _{DR-0,5}	%	-	-	-	0,05
		ISO Linder: ¹⁾ Metalização	%	-	-	-	90,68
		Redutibilidade	%	-	-	-	96,30
ISO DR90: ²⁾ Metalização		%	-	-	-	94,71	
Corem R180: Redutibilidade		%	-	-	-	93,50	
Notas:							
1) Medido							
2) Calculado: Metalização = 1,43 * R90 - 43							

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

6.2.3. Análise dos gastos variáveis

Para a análise dos gastos variáveis da rota tradicional, foi realizado um levantamento de campo para obtenção das potências de projeto dos equipamentos necessários para o transporte, homogeneização e espessamento da polpa de minério, listados na Tabela 11. Deve-se ressaltar que o consumo de energia elétrica destes equipamentos deve ser considerado, visto que estes deixarão de existir na rota multiprensagem.

Tabela 11 – Potência dos equipamentos de transporte e desaguagem de polpa

Equipamento	Área	Usina	Potência [kW]	Total [kW]
Moagem	Bomba de classificação do moinho 1	1	185	834
	Bomba de classificação do moinho 2	1	185	
	Bomba de classificação do moinho 1	2	232	
	Bomba de classificação do moinho 2	2	232	
Homogeneização	Acionamento do agitador do tanque homogeneizador 1	1	110	740
	Acionamento do agitador do tanque homogeneizador 2	1	110	
	Bomba de recalque do tanque para filtragem	1	150	
	Acionamento do agitador do tanque homogeneizador 1	2	110	
	Acionamento do agitador do tanque homogeneizador 2	2	110	
	Bomba de recalque do tanque para filtragem	2	150	
Espessamento	Acionamento de giro das pás do espessador	1	7,5	255
	Bomba de polpa do espessador	1	90	
	Acionamento de giro das pás do espessador	2	7,5	
	Bomba de polpa do espessador	2	150	
Total				1.829

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os insumos considerados para os moinhos foram: energia elétrica, corpos moedores, revestimento de borracha, graxa e óleo. Para a prensa de rolos, foram considerados energia elétrica, revestimento metálico (pinos ou *studs*), graxa e óleo. Já para a filtragem, os insumos contemplados foram energia elétrica, setores e tecidos filtrantes.

Em função da multidisciplinaridade do tema, os dados foram obtidos de diferentes fontes, sendo consolidados no Quadro 14.

Quadro 14 – Fonte de dados para a análise do gasto variável da rota tradicional

Item	Processo	Fonte de dados
Graxa mineral engrenagem e pinhões	Moagem	Relatório de gestão de ativos (ano base 2020)
Óleo lubrificante redutores e unidade hidráulica	Moagem	
Óleo lubrificante redutores	Prensagem	
Óleo unidade hidráulica	Prensagem	
Graxa mineral dos mancais	Prensagem	
Tecido filtrante	Filtragem	Relatório Gastos Operacionais (ano base 2020)
Setor filtrante	Filtragem	
Revestimento de borracha dos moinhos	Moagem	Estimado para uma vida útil média de 12.000 h
Revestimento metálico	Prensagem	Estimado para uma vida útil de 80.000 h para pinos de 50 mm
Corpos moedores	Moagem	Relatório de Resumos Operacionais (ano base 2020)
Energia elétrica	Moagem	Teste em escala de bancada (ensaio padronizado de Donda)
Energia elétrica	Prensagem	Teste em escala piloto
Energia elétrica	Filtragem	Relatório Resumos Operacionais (ano base 2020)
Energia elétrica	Classificação Espessamento e Homogeneização	Dados nominais dos motores, considerando 90% da potência de projeto
Água alimentação moinhos	Moagem	Balanço de massa
Água recirculada (97,5%)	Moagem	Estimado
Água nova	Moagem	Calculado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no levantamento realizado, foi possível calcular o gasto variável anual da rota tradicional, detalhado na Tabela 12.

Tabela 12 – Gasto variável da rota tradicional

Item	Processo	Consumo	Unidade	Gasto anual	
Graxa mineral engrenagem e pinhões	Moagem	8.640	kg/ano	R\$	514.400,00
Óleo lubrificante redutores e unidade hidráulica	Moagem	90.288	l/ano	R\$	648.000,00
Óleo lubrificante redutores	Prensagem	80	l/ano	R\$	2.000,00
Óleo unidade hidráulica	Prensagem	418	l/ano	R\$	3.200,00
Graxa mineral dos mancais	Prensagem	1.080	kg/ano	R\$	89.400,00
Tecido filtrante	Filtragem	2,81	und/kt	R\$	644.614,00
Setor filtrante	Filtragem	0,03	und/kt	R\$	47.273,83
Revestimento de borracha	Moagem	7,52	kg/h	R\$	1.113.468,76
Revestimento metálico (studs)	Prensagem	160	g/h	R\$	190.395,51
Corpos moedores	Moagem	0,69	kg/t	R\$	26.690.313,96
Energia elétrica	Moagem	15,52	kWh/t	R\$	19.593.728,72
Energia elétrica	Prensagem	2,57	kWh/t	R\$	3.243.438,46
Energia elétrica	Filtragem	2,20	kWh/t	R\$	2.779.252,30
Energia elétrica	Class./Esp. /Homo.	2,17	kWh/t	R\$	2.736.906,60
Água na alimentação dos moinhos	Moagem	2,95	m ³ /t	R\$	-
Água recirculada (97,5% de recirculação)	Moagem	2,88	m ³ /t	R\$	-
Água nova	Moagem	0,07	m ³ /t	R\$	3.607.702,50
Total				R\$	61.908.094,65

Nota: Elaborado pelo autor.

O consumo de energia elétrica de 2,17 kWh/t, referente aos equipamentos de transporte e desaguagem de polpa (moagem, homogeneização e espessamento), listados na Tabela 11, foi calculado utilizando-se a produção anual de 6,2 Mtpa, em um ano base com 340 dias, 24 horas de operação por dia e um fator de 0,9, referente à razão estimada entre a potência de operação e a potência de projeto.

6.3 Cominuição, Pelotamento e Queima da Rota Multiprensagem

6.3.1. Cominuição

A rota de cominuição por múltiplas prensagens foi realizada com o mesmo minério que alimentou a rota tradicional, sendo processado exclusivamente na HPGR, onde o produto da primeira passada alimentou a segunda e, assim, sucessivamente, até completar 7 passes, sendo caracterizado fisicamente o produto a cada passagem.

Os parâmetros operacionais, como velocidade, força específica, energia e etc., foram registrados a cada passe e consolidados no Quadro 15. Destaca-se no Gráfico 26 a energia total consumida pela HPGR em cada passe, tendo grande relação com a força específica aplicada, visto que quanto maior a força, maior será o torque dos motores para realizar o giro dos rolos.

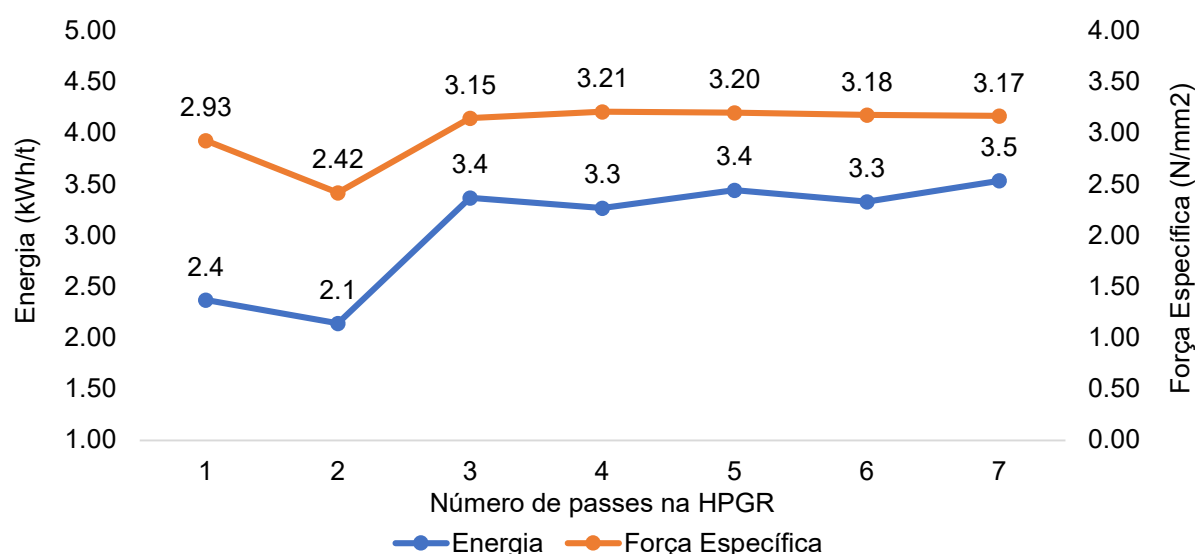
Quadro 15 – Parâmetros operacionais da HPGR da rota multiprensagem

Indicadores de processo	Unidade	Número de passes na HPGR						
		1	2	3	4	5	6	7
Massa processada	kg	4077	3180	2545	2521	1737	1727	1712
Energia específica total	kWh/t	2,37	2,14	3,37	3,27	3,44	3,33	3,53
Energia específica líquida	kWh/t	1,31	1,28	2,06	2,04	2,16	2,09	2,23
Força específica	N/mm ²	2,93	2,42	3,15	3,21	3,20	3,18	3,17
Pressão de óleo	bar	47,7	39,3	51,1	52,3	51,9	51,5	51,3
Diferença de pressão (LE-LD)	bar	0,3	0,4	0,3	0,5	0,6	0,4	0,5
Pressão N ₂	bar	45,4	35,7	46,8	47,7	48,0	47,5	48,3
Pressão N ₂ / Hidráulico	%	95%	91%	92%	91%	93%	92%	94%
Gap	mm	7,94	9,97	7,60	8,51	7,91	7,93	7,19
Desalinhamento (LE-LD)	mm	2,2	1,2	0,8	0,9	0,5	0,4	0,2
Taxa de alimentação	t/h	36,2	31,0	33,6	36,3	34,1	35,8	33,9
Umidade na alimentação	%	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Capacidade específica (ṁ)	(t/h)/(m ³ /s)	259	278	223	241	226	237	225
Velocidade periférica	m/s	0,70	0,56	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 26 – Energia e força específica a cada passe na HPGR da rota multiprensagem

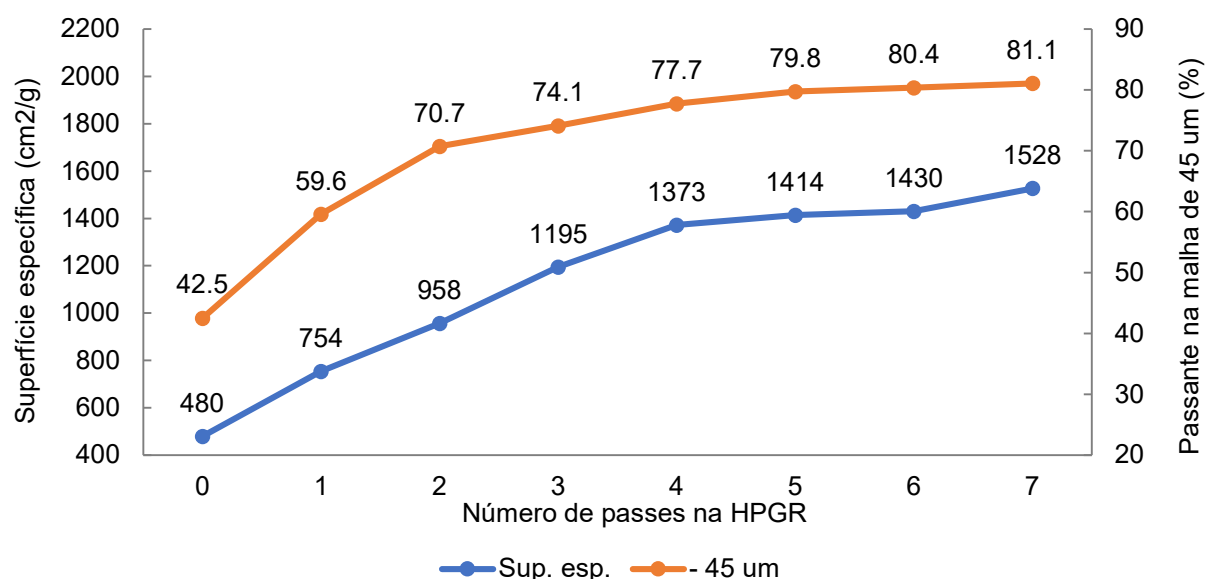


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 27, é apresentado os resultados de granulometria e superfície específica. Neste é possível observar que, a partir do quarto passe, o incremento de superfície específica reduziu significativamente. O Gráfico 28 complementa esta análise ao ilustrar a razão entre o ganho de superfície específica pela energia gasta em cada passe (Fator BSA). A energia aplicada praticamente não se traduziu em resultado, identificando um ponto de saturação do leito de partículas sobre pressão aplicada pelos rolos. Entretanto, este ponto pode diferir de acordo com o minério analisado, visto que a compressibilidade dependerá das propriedades de cada mineral (BUENO, 2019).

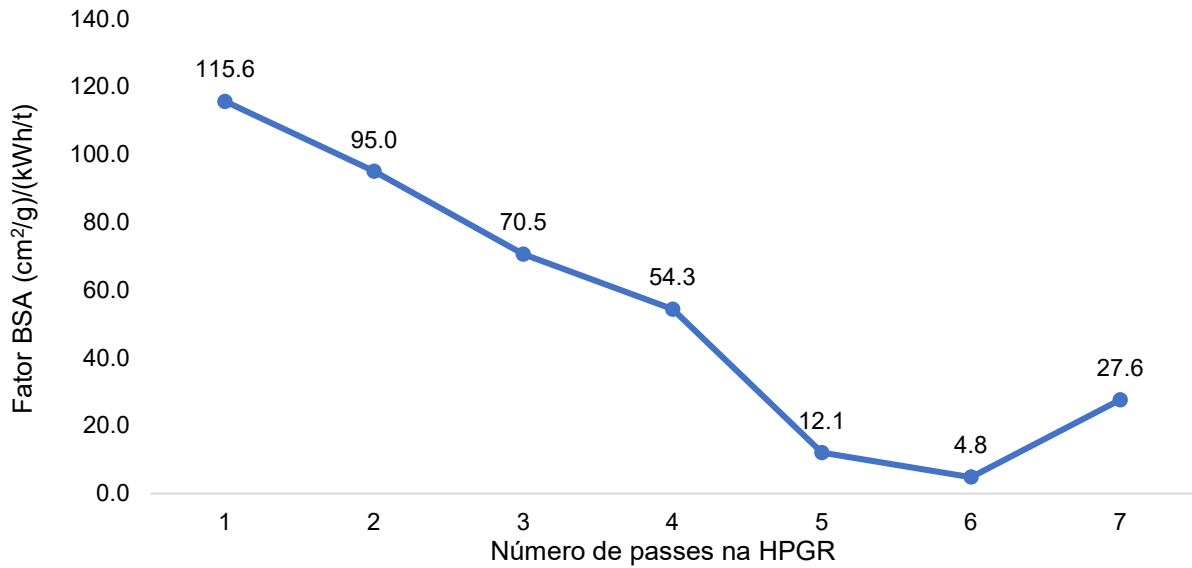
Gráfico 27 – Superfície específica e passante em 45 µm a cada passe na HPGR da rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

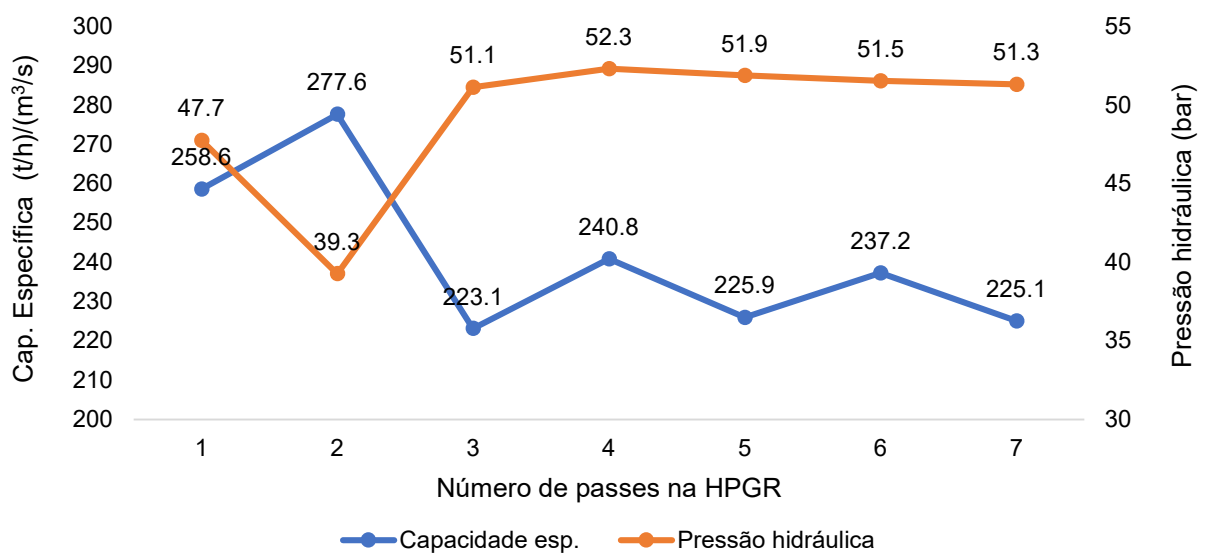
Gráfico 28 – Fator BSA a cada passa na HPGR – Rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).
 Nota: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 29 demonstra a capacidade específica obtida em cada passe. Nele é possível observar que, a partir do 3º passe, houve uma estabilização com média de 232 (t/h)/(m³/s). Como os passes 1 e 2 apresentaram menor força específica, estes foram capazes de processar uma maior vazão mássica com menor velocidade dos rolos, o que acabaram exibindo maior capacidade. Quanto menor a pressão nos rolos, mais fácil torna-se a passagem do material e, conseqüentemente, eleva a capacidade do equipamento.

Gráfico 29 – Capacidade especificada HPGR a cada passe da rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).
 Nota: Elaborado pelo autor.

Os resultados de qualidade e da eficiência energética de cominuição a cada passagem foram consolidados no Quadro 16. Cabe ressaltar que nem a superfície específica e nem o percentual passante na malha de 45 μm das partículas para o pelotamento chegaram no valor alvo desejado na rota multiprensagem (conforme estabelecido no Quadro 6). Já o Gráfico 30 consolida as informações da energia específica acumulada por superfície específica e percentual retido na malha de 45 μm .

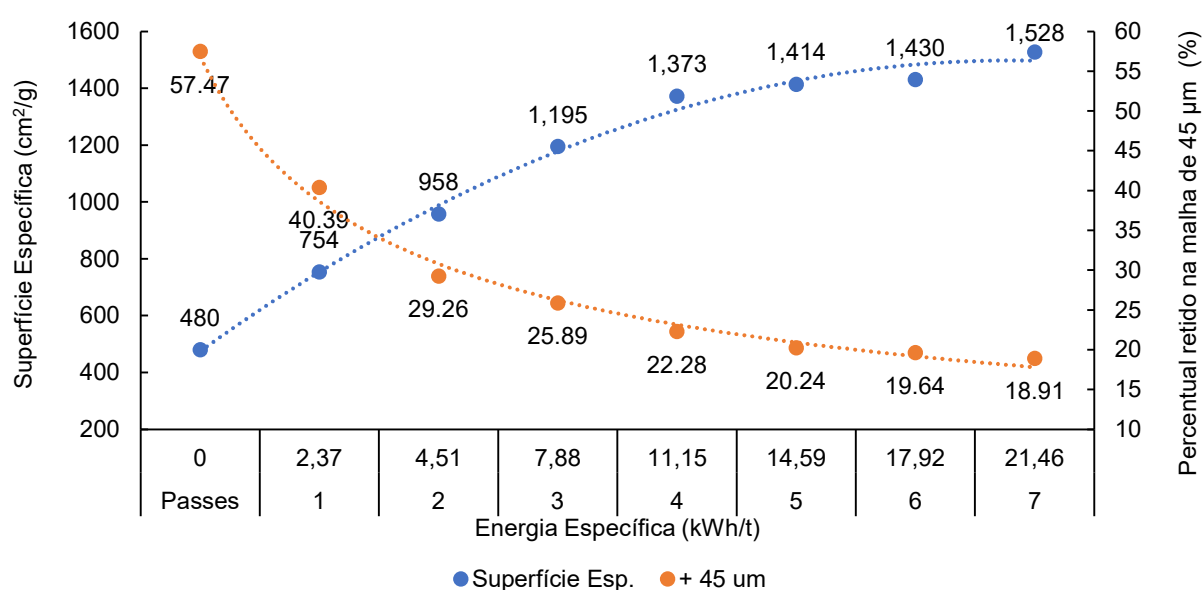
Quadro 16 – Resumo dos resultados de cominuição da rota multiprensagem

Indicadores de processo	Unidade	Número de passes na HPGR						
		1	2	3	4	5	6	7
Sup. Esp. da Alimentação	cm^2/g	480	754	958	1195	1373	1414	1430
Sup. Esp. do Produto	cm^2/g	754	958	1195	1373	1414	1430	1528
Aumento de Blaine	cm^2/g	274	204	238	178	42	16	98
Fator BSA	$(\text{cm}^2/\text{g})/(\text{kWh}/\text{t})$	116	95	71	54	12	5	28
D80 da Alimentação (F80)	μm	86,0	71,4	59,4	53,7	48,9	46,0	44,0
D80 do Produto (P80)	μm	71,4	59,4	53,7	48,9	46,0	44,0	44,0
Passante em 45 μm do Produto	%	59,61	70,74	74,11	77,72	79,76	80,36	81,09
Razão de redução (F80/P80)	%	1,20	1,20	1,11	1,10	1,06	1,05	1,00

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 30 – Superfície específica e granulometria por energia da rota multiprensagem

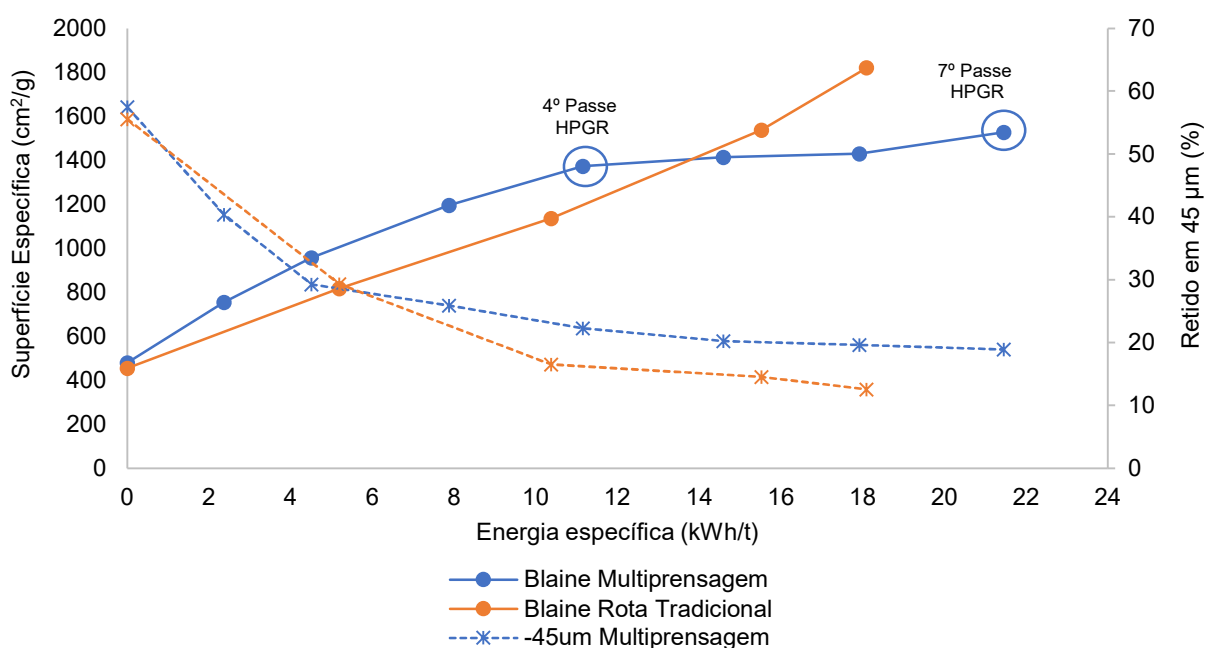


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 31, é possível comparar o quanto cada rota elevou a área superficial e reduziu o percentual retido na malha de 45 μm por energia específica. A superfície final da rota multiprensagem ficou 293 cm^2/g abaixo da rota tradicional. A eficiência energética para elevação da área superficial só foi superior para a HPGR apenas até o 4º passe, evidenciando um risco para atingimento da qualidade das pelotas cruas e queimadas.

Gráfico 31 – Comparativo das rotas de cominuição

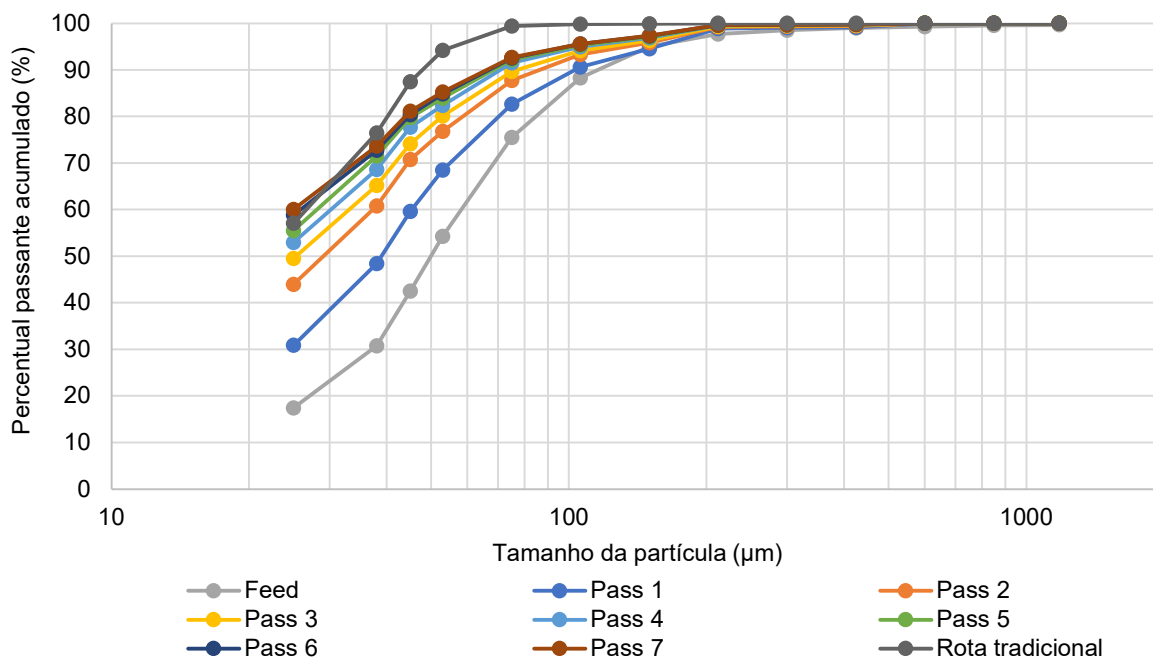


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Verifica-se ainda, no Gráfico 32, que a rota tradicional apresenta partículas mais finas, especialmente entre 45 e 75 μm , o que pode promover melhor acabamento e qualidade das pelotas provenientes desta rota.

Gráfico 32 – Distribuição granulométrica das partículas da rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).

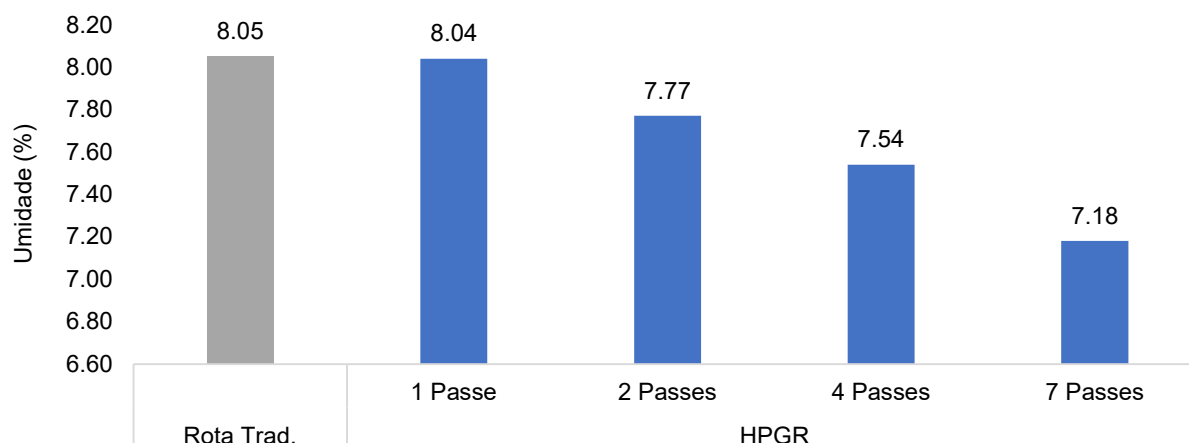
Nota: Elaborado pelo autor.

6.3.2. Pelotamento e queima em *pot-grate*

Em virtude da semelhança da qualidade física dos minérios processados do quarto ao sétimo passes e do alto custo para realização dos ensaios em escala piloto, foram realizados apenas os ensaios dos materiais provenientes do 1º, 2º, 4º e 7º passes.

O Gráfico 33 apresenta a umidade da pelota crua na saída do disco de pelotamento. É possível observar que uma menor umidade foi necessária para a formação das pelotas à medida que a quantidade de passes na HPGR ia aumentando. Esta constatação evidencia um potencial benefício de redução de combustível do forno para a rota multiprensagem, visto que uma menor quantidade de energia seria necessária para secagem das pelotas cruas.

Gráfico 33 – Umidade da pelota crua no pelotamento

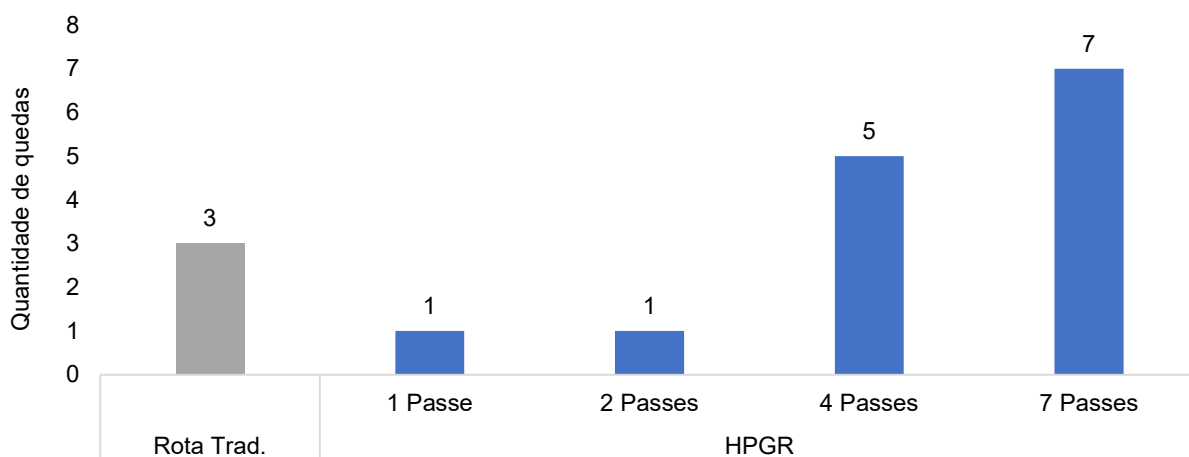


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Os Gráfico 34, Gráfico 35 e Gráfico 36 demonstram que, conforme a quantidade de passes foi aumentando, a resistência a quedas das pelotas cruas também se elevou. A partir do 4º passe na HPGR, os resultados de resistência física já foram superiores à rota tradicional, mesmo com as partículas mais grosseiras, mostrando que o efeito da forma das partículas também influencia na formação das pelotas cruas.

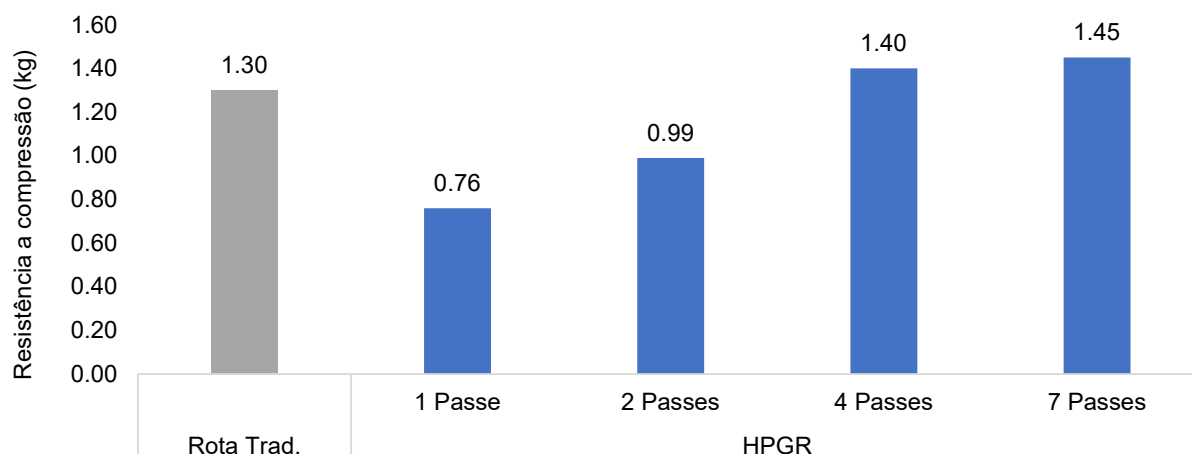
Gráfico 34 – Número de quedas das pelotas cruas



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

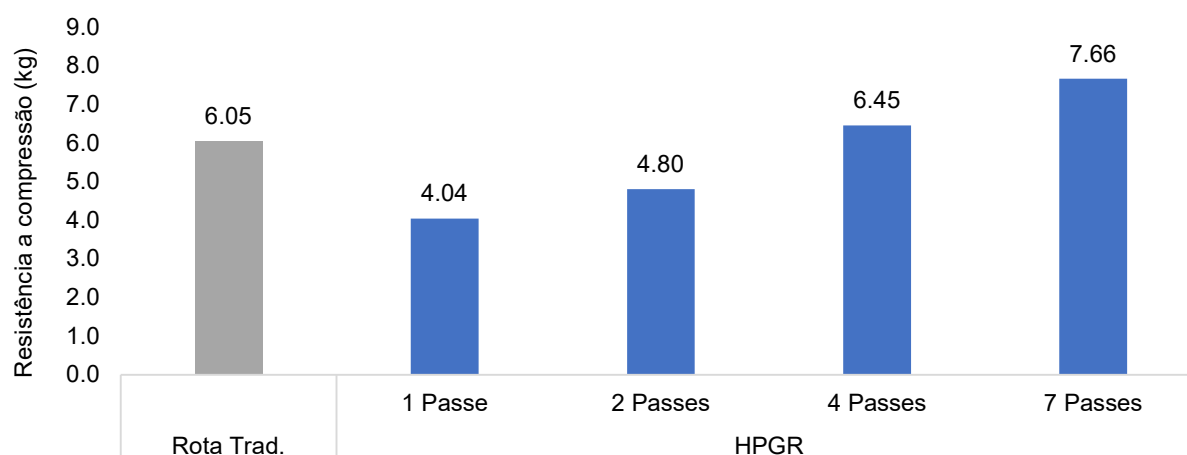
Gráfico 35 – Resistência a úmido das pelotas crua



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 36 – Resistência a compressão a seco das pelotas cruas



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

As informações qualitativas do processo de aglomeração realizado no disco de pelotamento piloto são detalhadas no Quadro 17, corroborando com os dados quantitativos apresentados da qualidade física das pelotas cruas, evidenciando também que o acabamento das pelotas foi melhorando com a elevação da quantidade de passes na HPGR.

Quadro 17 – Análise qualitativa do pelotamento da rota multiprensagem

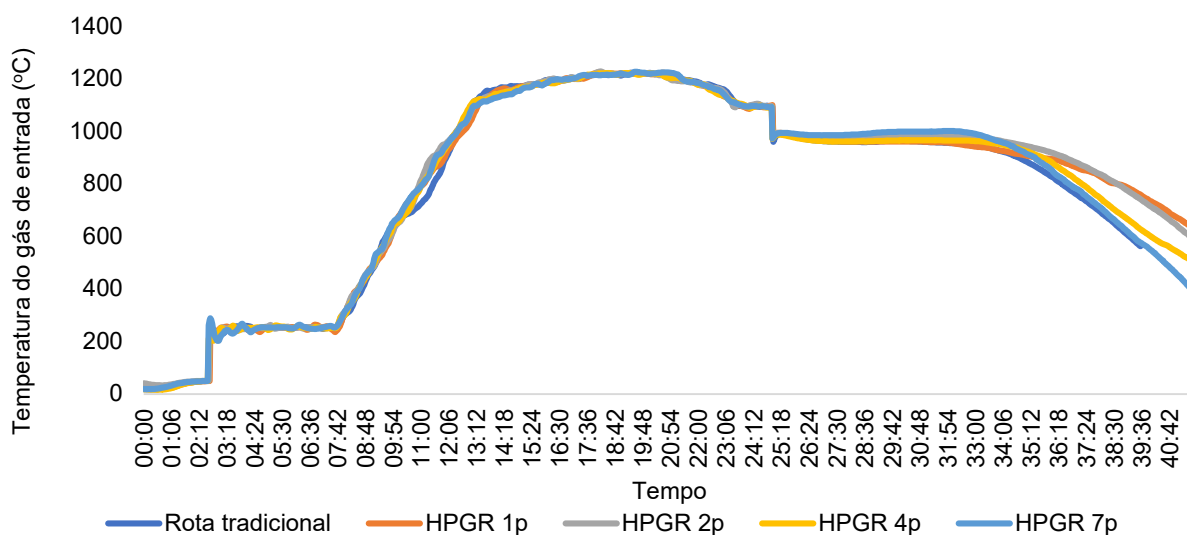
Quantidade de passes na HPGR	1 Passe	2 Passes	4 Passes	7 Passes
Análise qualitativa	Pelotas pouco pegajosas. Reduzido a taxa de alimentação do disco para aumentar o tempo de residência e resiliência das pelotas, porém sem resultado.	Pelotas ligeiramente pegajosas, com melhor acabamento superficial e menor rugosidade que as pelotas com apenas 1 passe	Pelotas com menor umidade, aspecto normal, não pegajosas	Pelotas com bom acabamento

Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Para os ensaios de queima, foram mantidas as configurações de ciclo e perfil térmico da rota tradicional (Gráfico 37), assim como as mesmas dosagens de insumos (bentonita, antracito e calcário), de modo a possibilitar a comparação dos resultados entre as rotas.

Gráfico 37 – Perfil térmico da rota multiprensagem



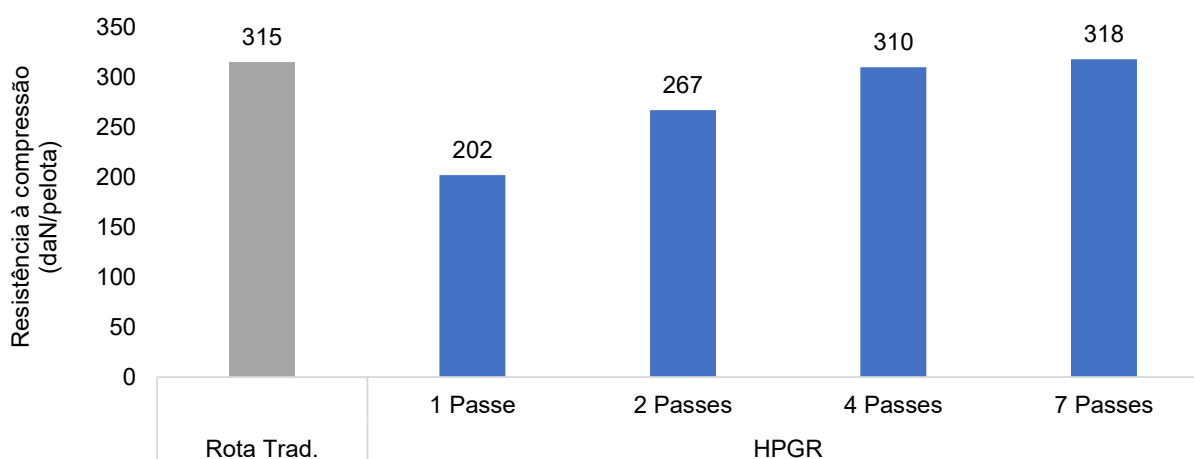
Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Os resultados de qualidade física das pelotas queimadas são apresentados no Gráfico 38 e Gráfico 39. As pelotas, após 1 ou 2 passes, não exibiram qualidade física suficiente como era esperado, em virtude da granulometria mais grosseira das partículas. Por outro lado, a resistência à compressão das pelotas, a partir do 4º passe na HPGR, apresentaram valores acima do limite inferior de 290 daN/p e próximos ao

encontrado na rota tradicional. Já em relação a abrasão, apenas as pelotas após 7 passes apresentaram valores dentro da especificação, assim como a rota tradicional. Como a abrasão é influenciada pela queima e acabamento superficial das pelotas, é compreensível que o resultado apenas após 7 passes na HPGR apresentou valor satisfatório, devido à diferença significativa da granulometria e área superficial das partículas com menos passes.

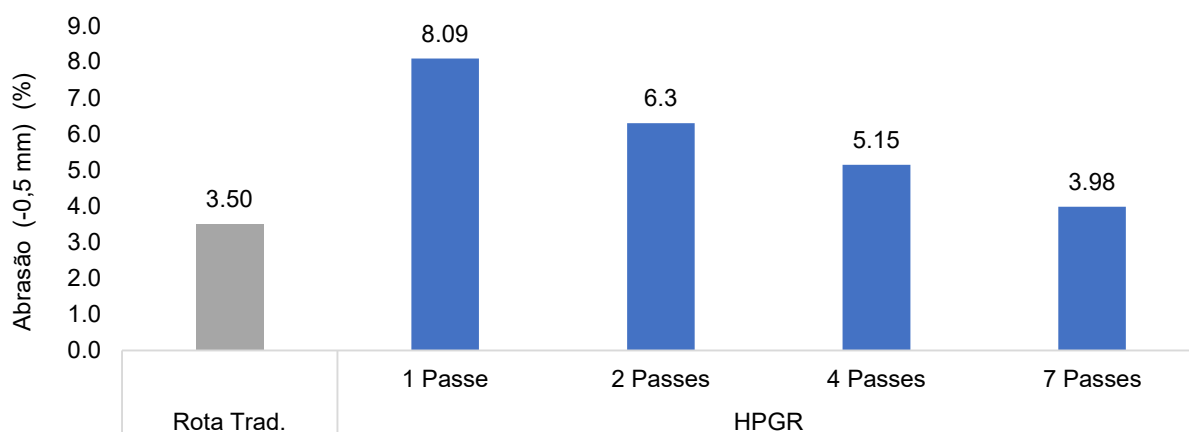
Gráfico 38 – Resistência à compressão a frio das pelotas queimadas da rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 39 – Abrasão das pelotas queimadas da rota multiprensagem



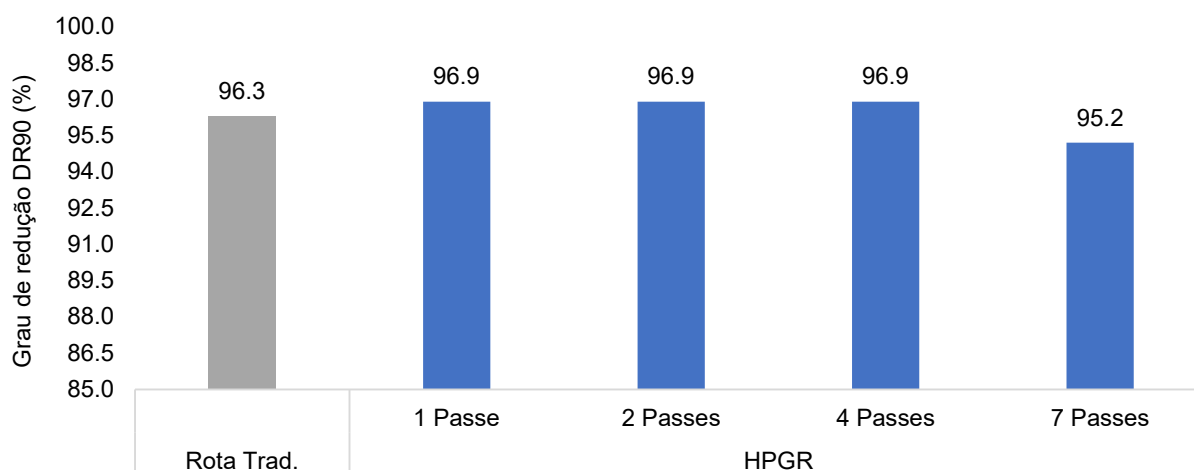
Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Os resultados de qualidade metalúrgica representam o comportamento que as pelotas irão desempenhar em sua aplicação final, neste caso, nos reatores de redução direta. O Gráfico 40 ilustra os resultados dos testes de redutibilidade realizados por meio do experimento padrão ISO 11258, que determina, para um tempo de redução de 90 min,

o grau de redução, referido como o grau final de redução (R90), expresso como uma percentagem em massa. Os resultados não demonstraram diferença significativa entre as rotas, exceto para o ensaio com material após 7 passes da rota multiprensagem.

Gráfico 40 – Redutibilidade ISO 11258 DR90 da rota multiprensagem

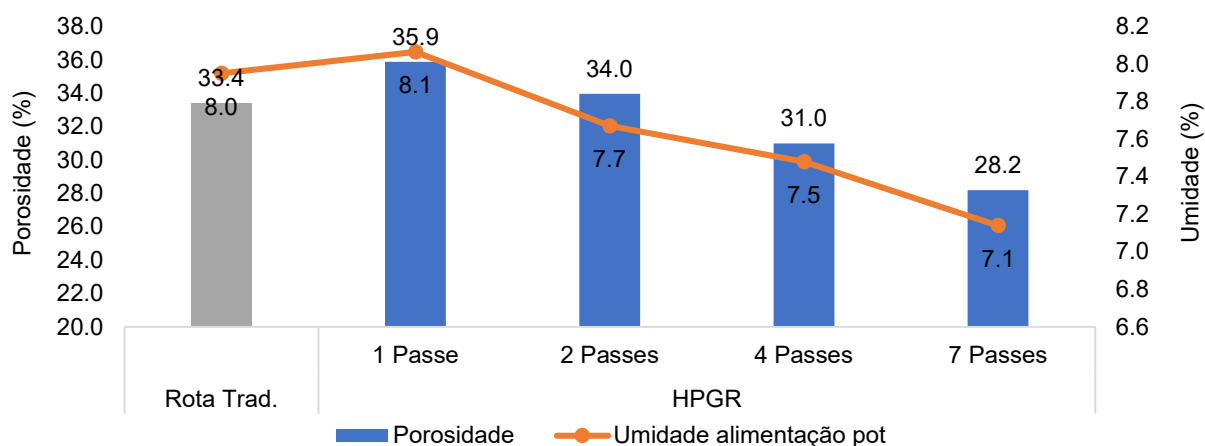


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

A redução da redutibilidade das pelotas produzidas com o minério após 7 passes na HPGR pode ter sido influenciada pela menor porosidade das pelotas (Gráfico 41). Esta porosidade, por sua vez, pode ter sido influenciada pela menor umidade das pelotas cruas na alimentação do *pot-grate*, visto que, com uma umidade reduzida, menor será a evaporação, diminuindo a quantidade de poros gerados.

Gráfico 41 – Porosidade das pelotas queimadas da rota multiprensagem

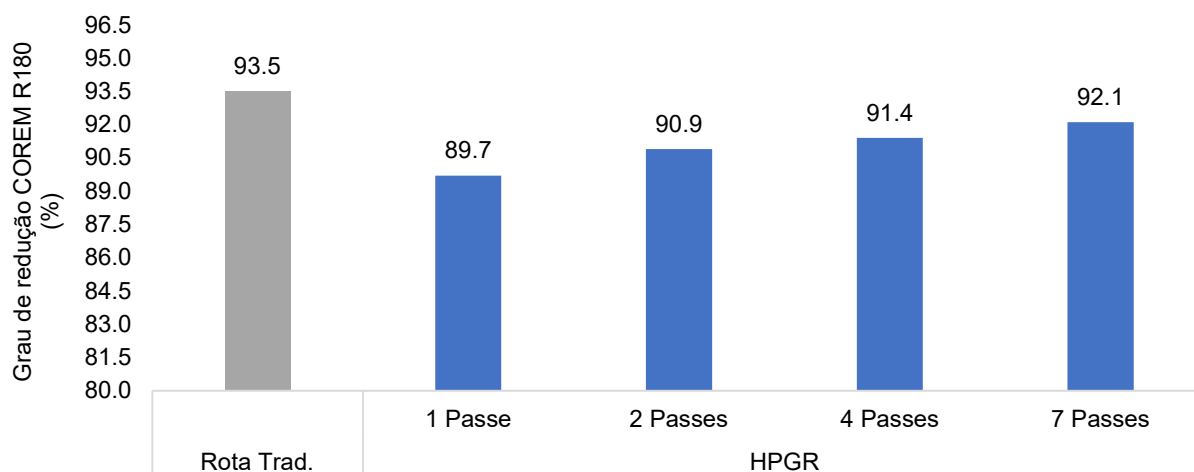


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

De modo a avaliar o grau de redução das pelotas de uma forma ainda mais aproximada de uma condição real, foi realizado o ensaio COREM R180 (Gráfico 42), que simula melhor o processo de redução direta, além dos tradicionais ensaios DR90 e R180. O ensaio DR90 é um teste isotérmico usando uma única composição de gás para toda a redução, conforme descrito no Quadro 18. Já o R180 é um teste não isotérmico de 3 estágios. Ele começa com uma temperatura baixa e um gás de redução mais fraco e avança em direção a temperaturas mais altas e um gás de redução mais forte (LAFORÉST; DUBÉ; LACROIX, 2019).

Gráfico 42 – Redutibilidade COREM R180



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Quadro 18 – Diferenças entre os ensaios COREM R180, DR90 e Linder

Ensaio	R180 (COREM)			DR90 (ISO 11258)	Linder (ISO 11257)
Reator	Cilindro vertical de 75 mm de diâmetro interno com balança			Cilindro vertical de 75 mm de diâmetro interno com balança	Cilindro vertical rotativo de 130 mm de diâmetro interno e 200 mm de largura
Amostra	500 ± 0,1 g			500 ± 0,1 g	500 ± 0,1 g
Tamanho das pelotas	+10 e -12,5 mm			50%: +10 e -12,5 mm 50%: +12,5 e -16 mm	50%: +10 e -12,5 mm 50%: +12,5 e -16 mm
Tempo de redução	180 min			90 min	300 min
Gás redutor	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 1	Mix 1
%CO	5,5	14	26	30	36
%CO ₂	28,5	20	8	15	5
%H ₂	61	61	61	45	55
%N ₂	5	5	5	10	4
Vazão (l/min)	30	30	30	50	13
Resultados	% redução após 180 min			% redução após 90 min e grau de metalização calculado	Índice de desintegração sob redução (RDI) e grau de metalização calculado
Temperatura	Temperatura variável de 400 a 850 ± 5°C			Isotérmico a 800 ± 5°C	Isotérmico a 760 ± 5°C

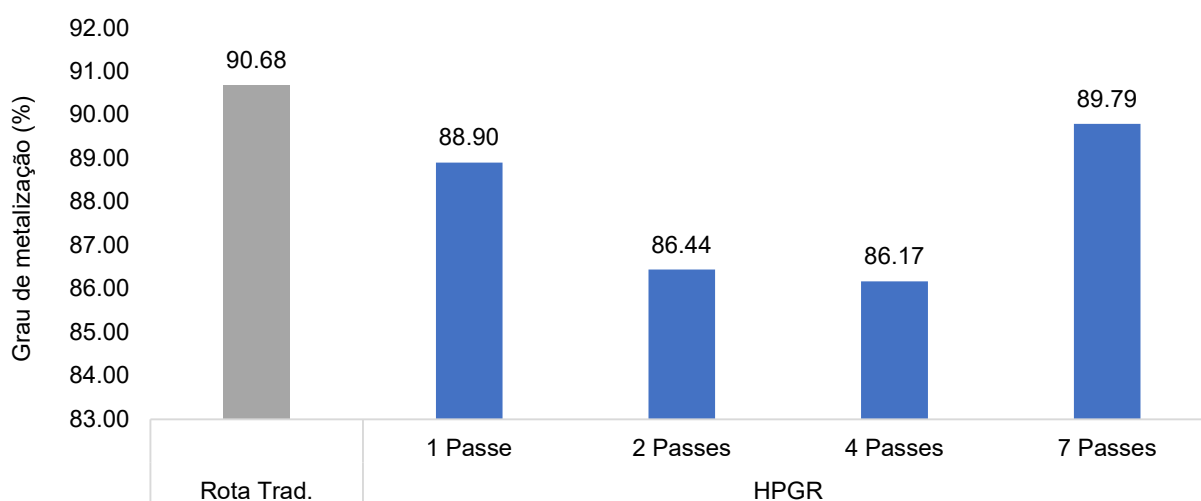
Fonte: Laforest, Dubé e Lacroix (2019) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019).

Nota: Elaborado pelo autor.

Os resultados de redutibilidade R180 demonstram que as pelotas produzidas pela rota multiprensagem tiveram menor grau de redução comparadas à rota tradicional em todos os ensaios, apesar da diferença ter diminuído conforme a quantidade de passes na HPGR foi aumentando. Isto pode representar um risco à nova rota e necessita maior aprofundamento para avaliar se este fato se deve à influência do teor de umidade das pelotas cruas na alimentação do *pot-grate*, às diferenças físicas do minério cominuído pelas rotas ou ambos.

Para a análise de grau de metalização e desintegração dinâmica foi realizado o ensaio padronizado pela norma ISO 11257 e seus resultados foram consolidados no Gráfico 43. É possível observar que os valores após 2 e 4 passes da rota multiprensagem ficaram, aproximadamente, 4 pontos percentuais abaixo da rota tradicional e que apenas após 7 passes na HPGR o grau de metalização se aproximou de 90%. Neste mesmo ensaio é efetuada a análise de desintegração, por meio de peneiramento da massa após a redução, obtendo o percentual de partículas abaixo de 3,15 mm (Gráfico 44).

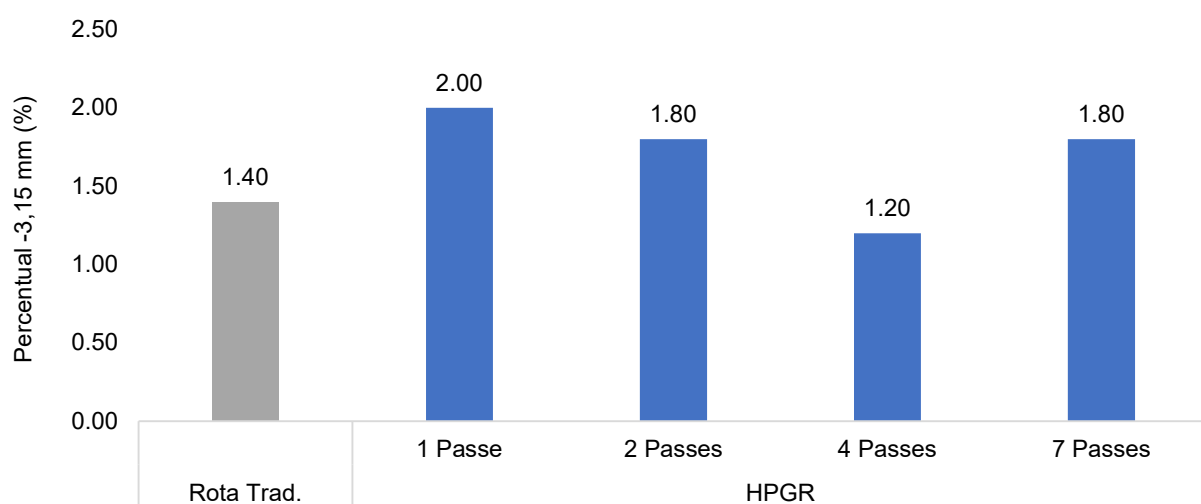
Gráfico 43 – Metalização ISO 11257 Linder da rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 44 – Índice de degradação (-3,15 mm) sob redução da rota multiprensagem

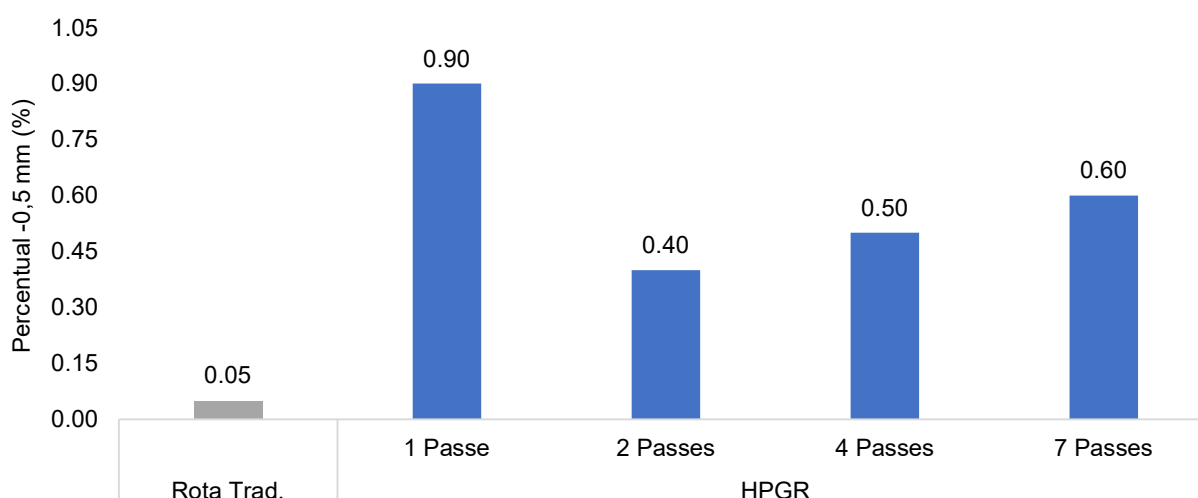


Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Os ensaios de degradação após redução, na fração de partículas menores que 0,5 mm, evidenciaram uma maior geração de finos para a rota multiprensagem (Gráfico 45). Na fração inferior a 3,15 mm, apenas o resultado com 4 passes na HPGR foi inferior à rota tradicional. Assim, o Quadro 19 consolida todos os principais resultados obtidos nos ensaios de ambas as rotas de cominuição.

Gráfico 45 – Índice de degradação (-0,50 mm) sob redução da rota multiprensagem



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Quadro 19 – Resultados da cominuição, pelotas cruas e queimadas por rota de cominuição

Parâmetros		Rota Trad.	HPGR				
			1 Passe	2 Passes	4 Passes	7 Passes	
Cominuição	Superfície específica (cm ² /g)	1821	754	958	1373	1528	
	Percentual passante em 45µm (%)	87,4	59,6	70,7	77,7	81,1	
	Energia cominuição (kWh/t)	18,09	2,37	4,51	11,15	21,46	
	Fator BSA (cm ² /g)/(kWh/t)	74,1	115,6	106,0	80,1	48,8	
	Fator k [t/kWh]	0,084	0,149	0,150	0,085	0,052	
Ensaio físicos: Pelotas cruas	%H ₂ O (pelotamento)	8,05	8,04	7,77	7,54	7,18	
	%H ₂ O (alimentação do pot-grate)	7,95	8,07	7,67	7,48	7,14	
	Nº Quedas	3	1	1	5	7	
	Resistência pelota crua (kg)	1,30	0,76	0,99	1,40	1,45	
	Resistência pelota seca (kg)	6,05	4,04	4,80	6,45	7,66	
Ensaio físicos: Pelotas queimadas	Abrasão % -0.5 mm	3,50	8,09	6,3	5,15	3,98	
	CCS média (daN/pel)	315	202	267	310	318	
	CCS desvio padrão (daN/pel)	112	75	88	120	147	
	< 140 daN/pel (%)	2,2	18,9	7,8	7,8	11,1	
	< 90 daN/pel (%)	1,1	5,6	1,1	6,7	6,7	
	Topo (daN/pel)	316	213	263	290	320	
	Fundo (daN/pel)	300	205	298	362	349	
Ensaio metalúrgicos: Pelotas queimadas	Porosidade (%)	33,4	35,9	34,0	31,0	28,2	
	ISO Linder	RDI _{DR-3.15} (%)	1,40	2,00	1,80	1,20	1,80
		RDI _{DR-0.5} (%)	0,05	0,90	0,40	0,50	0,60
	ISO DR 90	¹⁾ Metalização (%)	90,68	88,90	86,44	86,17	89,79
		Redutibilidade (%)	96,30	96,90	96,90	96,90	95,20
	COREM R180 - Redutibilidade (%)	²⁾ Metalização (%)	94,71	95,57	95,57	95,57	93,14
		93,50	89,70	90,90	91,40	92,10	

Fonte: Corem (2021).

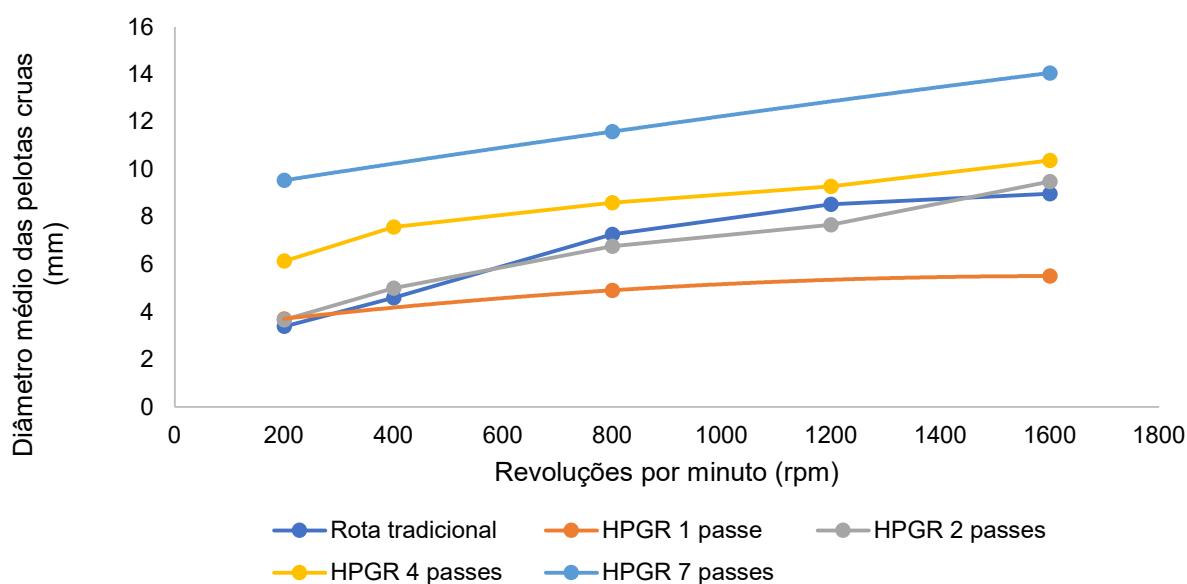
Nota: Elaborado pelo autor.

6.3.3. Cinética de aglomeração

De modo a analisar apenas o efeito da rota de cominuição e quantidade de passes da HPGR na formação das pelotas cruas, foi realizado o ensaio de cinética de aglomeração, desta vez, mantendo a mesma umidade para cada ensaio. É possível observar no Gráfico 46 que as pelotas após 4 e 7 passes na HPGR apresentam velocidade de crescimento superior às pelotas da rota tradicional. Entretanto, as pelotas com apenas 1 passe não conseguiram crescer.

Os resultados referentes à qualidade das pelotas geradas a partir da rotação do tambor a 1200 rpm, passantes na malha de 11,2 e retidas na peneira de 10 mm, estão consolidados no Quadro 20. É possível observar que a resistência a seco das pelotas da rota multiprensagem é maior com a rota tradicional em todos os casos. Por outro lado, a resistência a úmido não apresentou diferenças superiores a 0,3 kg. Estas análises comparativas fornecem informações sobre o efeito isolado da rota de cominuição, visto que todas as condições de alimentação foram iguais, porém, para a análise de risco de escalonamento da tecnologia, os resultados referentes à qualidade física das pelotas cruas provenientes do disco piloto, ilustrados nos Gráfico 34, Gráfico 35 e Gráfico 36, são mais representativos, visto que se aproximam mais da condição industrial.

Gráfico 46 – Cinética de aglomeração das pelotas cruas



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Quadro 20 – Qualidade das pelotas cruas provenientes do ensaio de cinética de aglomeração a 1200 rpm no pelotamento em tambor

Rota Cominuição	Nº de quedas	Resistência a compressão (kg)	
		A úmido	A seco
Rota tradicional	7	1,3	4,8
HPGR 2 passes	1	1,3	5,9
HPGR 4 passes	6	1,0	6,1
HPGR 7 passes	8	1,2	6,6

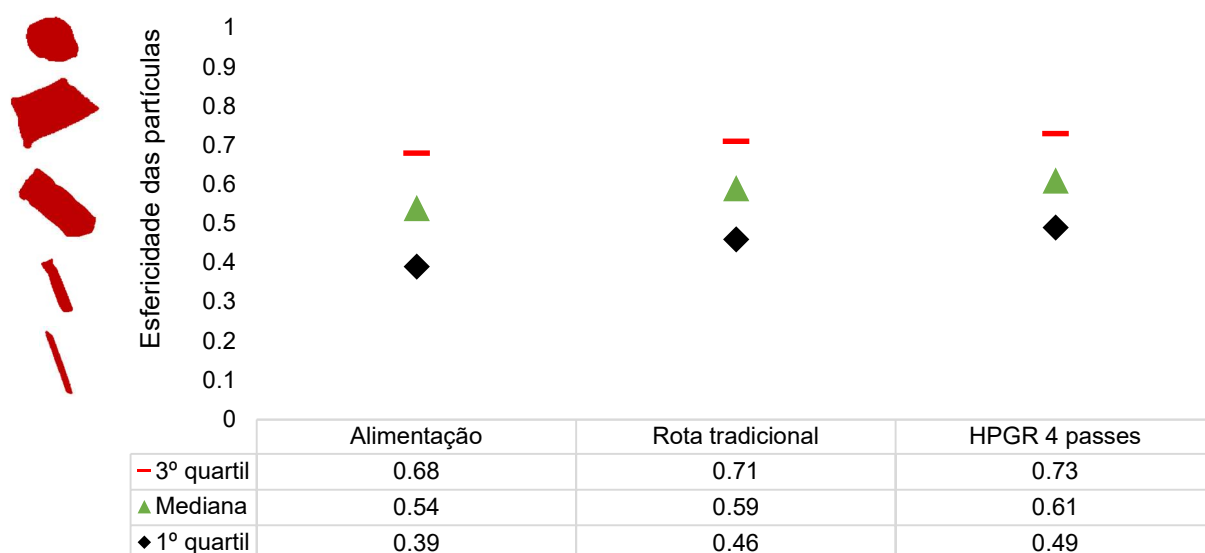
Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

6.3.4. Forma das partículas

As partículas do *mix* de minério de alimentação, produto da rota tradicional e o produto da rota multiprensagem após 4 passes na HPGR foram analisadas por microscopia óptica de varredura, de forma a avaliar as diferenças na forma dos grãos que pudessem auxiliar o entendimento das diferenças na qualidade física das pelotas. O Gráfico 47 demonstra o grau de esfericidade das partículas, onde é possível identificar que as partículas após 4 passes na HPGR apresentam maiores simetrias.

Gráfico 47 – Esfericidade das partículas

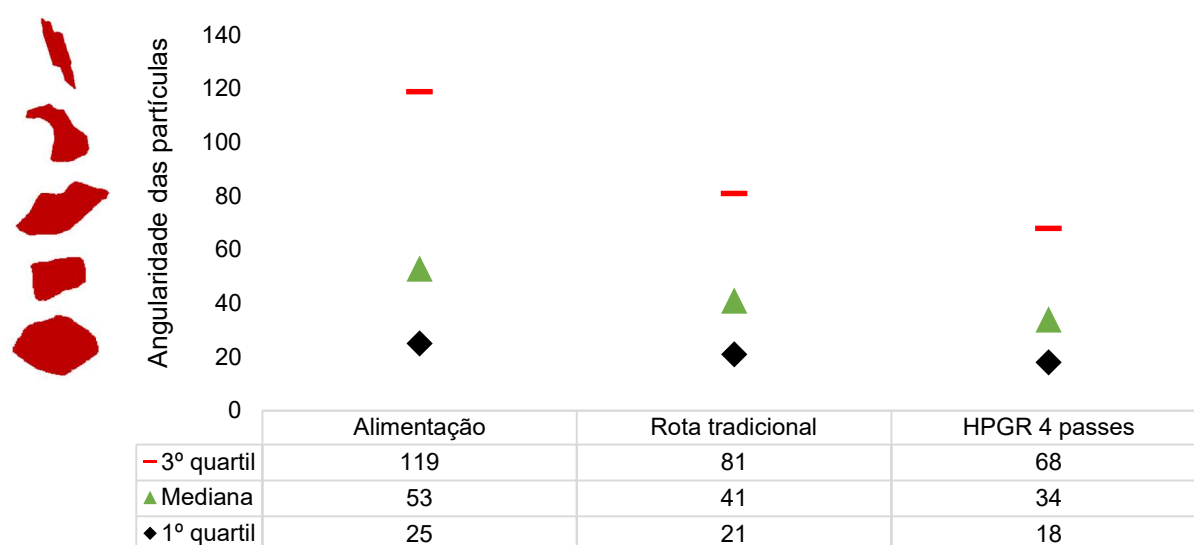


Fonte: Corem(2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Esse fato é consequência da forma de fragmentação, uma vez que a distribuição da pressão interpartículas favorece a quebra de quinas, propiciando maior geração de partículas mais esféricas. A angularidade também acompanha este mesmo raciocínio, como pode ser observado no Gráfico 48 e no Gráfico 49, demonstrando que a rota multiprensagem apresentou o menor valor médio em todas as 3 faixas granulométricas analisadas, com maior diferença para as partículas maiores que 45 μm .

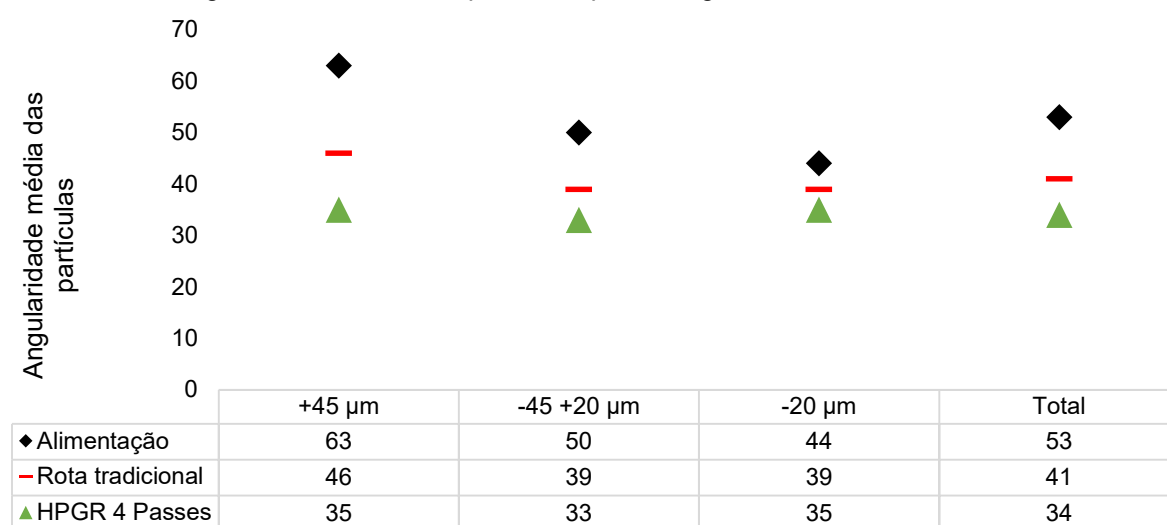
Gráfico 48 – Angularidade das partículas



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Gráfico 49 – Angularidade média das partículas por faixa granulométrica



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

6.3.5. Análise dos gastos variáveis

A análise dos gastos variáveis da rota multiprensagem levou em consideração os insumos como óleo, graxa, revestimento metálico e energia elétrica das prensas de rolos. Não foram incluídas na análise a energia elétrica do circuito de transportadores de correia, necessários para realização das recirculações (quantidade de passadas), visto que, além de serem equipamentos que consomem pouca energia elétrica, dependem do *layout* de cada usina.

A quantidade de prensas, que determina o consumo anual de graxa, óleo e revestimento metálico, foi definida a partir do cálculo da vazão mássica necessária para atendimento da produção das Usinas 1 e 2 juntas (6,2 Mtpa), conforme equação (18).

$$\frac{t}{h} = \frac{\text{Produção anual} \cdot \text{Quantidade máxima de passes}}{340 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \cdot (1 - (\% \text{ finos} + \% \text{ Umidade} + \text{PPC}))} \cdot (1 + F_s) \quad (18)$$

Assim, considerando-se o percentual de finos igual a 1,00%, umidade equivalente a 8,50%, Perda por Calcinação (PPC) igual a 0,50%, um fator de segurança (F_s) de 20% e, no máximo, 7 passes nas HPGRs, determinou-se, por meio de (18), a vazão mássica para atendimento da produção das Usinas 1 e 2 juntas como sendo 7.092 t/h.

A quantidade de prensas é obtida pela razão entre a capacidade específica para uma prensa teórica e a capacidade mínima obtida a partir dos ensaios experimentais (gargalo do sistema), ou seja, 223 (t/h)/(m³/s), referente ao 3º passe na HPGR, como pode ser observado no Quadro 15.

$$\text{Quantidade de HPGRs} = \frac{\text{capacidade específica da HPGR}}{\text{capacidade específica mínima experimental}} \quad (19)$$

Como já mencionado anteriormente, a capacidade específica da HPGR é calculada pela equação (13). De modo a evitar uma velocidade periférica (u) elevada, estabeleceu-se uma relação limite em que esta seja igual a 0,8 vezes o diâmetro dos

rolos. Por exemplo, caso os rolos da HPGR tenham 2,0 m de diâmetro, a velocidade periférica máxima será igual a 1,6 m/s. Deste modo, a capacidade específica é definida por meio de (20).

$$\text{capacidade específica da HPGR} = \frac{7092}{0,8 \cdot D^2 \cdot L} \quad (20)$$

Logo, a quantidade de HPGRs passa a ser definida pela equação (21), mais simplificada.

$$\text{Quantidade de HPGRs} = \frac{7092}{0,8 \cdot D^2 \cdot L \cdot 223,1} \quad (21)$$

Para evitar superdimensionamento e conseqüente CAPEX elevado, as dimensões da HPGR são calculadas de acordo com o catálogo de cada fabricante, de modo que a quantidade de HPGRs para atendimento ao projeto minimize a diferença entre o valor inteiro mais próximo e o valor calculado por meio da equação (21).

Para fins ilustrativos, definiu-se uma HPGR com rolos de 2,4 m de diâmetro e 2,4 m de largura. Neste caso, a quantidade de prensas calculada pela equação (21) resulta em 2,87 e o maior número inteiro mais próximo (quantidade de prensas a ser considerada) é 3,00, resultando em uma diferença igual a 0,13. Deste modo, a Tabela 13 consolida a estimativa dos gastos variáveis da rota multiprensagem, adotando a proporcionalidade dos insumos consultados da prensa existente na rota tradicional, conforme levantamento apresentado no Quadro 14, extrapolando-se para as prensas definidas de forma ilustrativa com rolos de 2,4 por 2,4 m (diâmetro e largura, respectivamente).

Tabela 13 – Gasto variável para a rota multiprensagem

Item	Consumo	Unidade	Custo anual	
Óleo lubrificante redutores	240	l/ano	R\$	6.000,00
Óleo unidade hidráulica	1254	l/ano	R\$	9.600,00
Graxa mineral mancais	3240	kg/ano	R\$	268.200,00
Revestimento metálico (<i>studs</i>)	1234,2	g/h	R\$	1.468.765,40
Energia elétrica (para 7 passes)	21,5	kWh/t	R\$	27.106.958,25
Energia elétrica (para 4 passes)	11,2	kWh/t	R\$	14.084.167,15
Total 7 Passes			R\$	28.859.523,64
Total 4 Passes			R\$	15.833.732,55

Nota: Elaborado pelo autor.

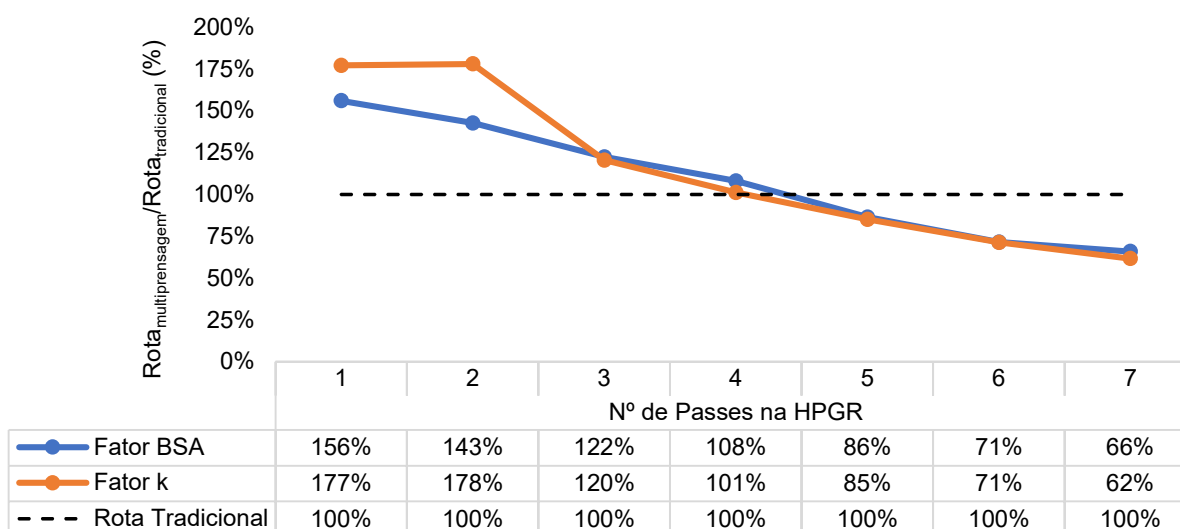
7 CONCLUSÕES

Considerando a problemática relacionada à ineficiência energética da rota de cominuição tradicionalmente utilizada nas usinas de pelotização da Vale S.A. e a proposição do presente trabalho em avaliar a possibilidade de melhorar este processo por meio de uma rota alternativa, foi possível observar que a nova rota proposta apresenta importantes ganhos econômicos e ambientais, porém ainda requer maiores pesquisas no tocante à qualidade física das pelotas de modo a eliminar as incertezas remanescentes e elevar a confiança na execução de investimentos para efetivação da mudança.

As comparações entre as rotas foram realizadas em escala piloto, atendendo aos objetivos específicos, evidenciando as diferenças de eficiência energética do processo de cominuição e permitindo analisar de forma isolada o impacto das diferentes rotas na qualidade do processo de aglomeração (pelotas cruas) e na queima de pelotas. Foram também avaliados os impactos potenciais nos consumos específicos de água, de energia elétrica e demais insumos com a eliminação do processo de moagem a úmido do processo de pelotização.

Os ensaios realizados demonstraram que a rota de cominuição por múltiplas prensagens não promoveu a mesma fragmentação das partículas realizadas pela rota tradicional mesmo após 7 passes na HPGR, gerando um produto mais grosseiro, com superfície específica inferior em 293 cm²/g e 6,3 pontos percentuais a menos no passante na malha de 45 µm, consumindo 3,37 kWh/t a mais de energia elétrica (com relação apenas aos equipamentos de cominuição). A eficiência energética, tanto para superfície específica (Fator BSA) quanto para redução granulométrica (Fator k) da nova rota, só superou a rota tradicional até o 4º passe, conforme ilustrado no Gráfico 50, apresentando quedas sucessivas de desempenho, demonstrando que a nova rota estudada é susceptível ao grau de compactação da mistura de minérios, oferecendo risco de não obtenção das mesmas superfície e granulometria desejadas do material para o processo de aglomeração.

Gráfico 50 – Comparativo do Fator BSA e Fator k entre as rotas de cominuição



Fonte: Corem (2021).

Nota: Elaborado pelo autor.

Entretanto, a qualidade física das pelotas cruas proveniente da aglomeração das partículas fragmentadas pela nova rota foi mais elevada, tanto na compressão a seco, a úmido e no número de quedas a partir do 4º passe, demandando, inclusive, uma menor umidade para formação das pelotas e uma cinética de aglomeração mais elevada. Estes resultados demonstraram que o efeito de forma das partículas influenciou na qualidade física das pelotas cruas, visto que as partículas geradas pela rota multiprensagem apresentaram maior esfericidade, menor angularidade e, mesmo com granulometria mais grosseira, propiciaram a formação de pelotas mais resistentes.

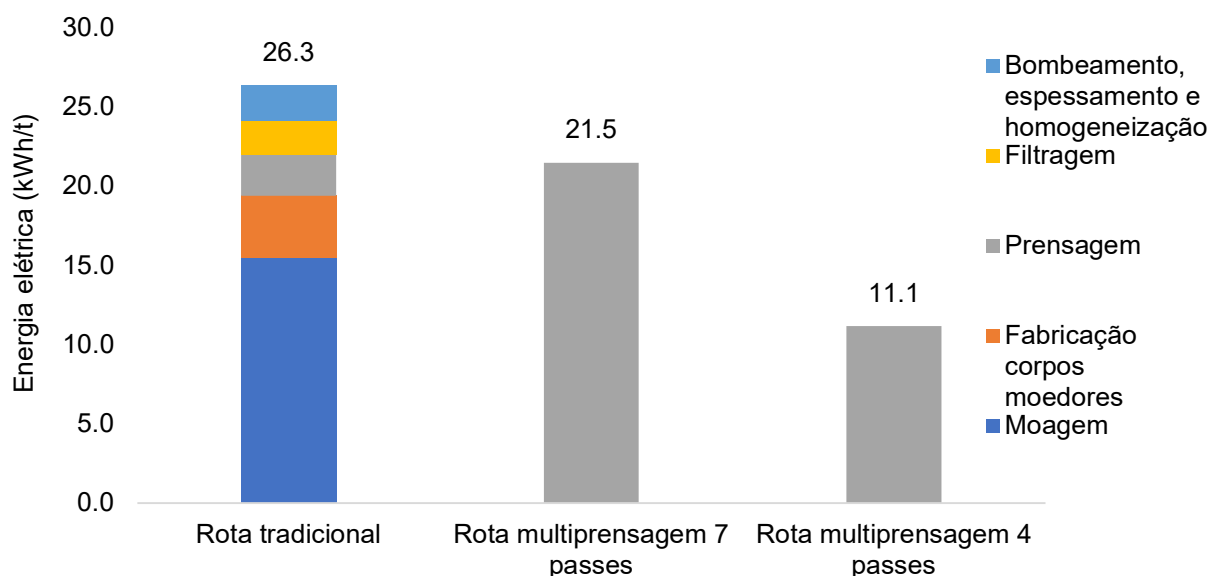
Os resultados de qualidade física das pelotas queimadas demonstraram que a resistência média à compressão foi atendida. Tais resultados são muito semelhantes aos da rota tradicional, registrando valores de 310 e 318 daN/p para 4 e 7 passes na prensa frente aos 315 daN/p da rota tradicional, porém, com maior percentual de pelotas muito frágeis (inferiores a 140 e 90 daN/p), evidenciando uma possível geração de maior quantidade de finos no transporte e manuseio destas. O ensaio de abrasão confirma esta maior geração de finos das pelotas da rota multiprensagem, visto que, após tamboramento, o percentual de finos menores que 0,5 mm foi mais elevado, em 1,65 pontos percentuais para as pelotas geradas a partir do minério cominuído após 4 passes e 0,48 pontos percentuais após 7 passes. Outra

característica física observada foi uma menor porosidade das pelotas da nova rota, que pode ter sofrido influência de um menor teor de umidade das pelotas cruas na alimentação do *pot-grate*, propiciando menor evaporação na secagem e, conseqüentemente, gerando menos poros.

Em termos de qualidade metalúrgica, as pelotas queimadas da nova rota após 7 passes na prensa apresentaram redutibilidade (COREM R180) e metalização (ISO Linder) ligeiramente inferiores, em 0,89 e 1,40 pontos percentuais, respectivamente, comparadas à rota tradicional, que podem ter sido influenciadas por uma menor porosidade, visto que os fenômenos de redução dependem da passagem do gás redutor pelas pelotas. A degradação das pelotas após redução foi mais elevada para a nova rota, especialmente na fração de finos abaixo de 0,50 mm. Em linhas gerais, os resultados metalúrgicos demonstraram maiores fragilidades, visto que o grau de redução, metalização e degradação das pelotas são de extrema importância para os reatores de redução direta.

Com relação aos gastos variáveis, a rota inovadora por múltiplas prensagens apresenta enorme vantagem, especialmente pela eliminação dos consumos de corpos moedores, energia elétrica dos equipamentos de bombeamento, homogeneização e desaguagem e insumos da filtragem, chegando a uma redução de 54% desses gastos para as pelotas após 7 passes. Ao comparar a energia elétrica global, incluindo a aquela necessária para a fabricação dos corpos moedores, conforme estabelecido por Ballantyne (2019), e a energia dos processos eliminados, a rota tradicional apresenta um consumo de 26,3 kWh/t, enquanto a nova rota, 11,1 e 21,5 kWh/t, para 4 e 7 passes na HPGR, respectivamente, como ilustrado no Gráfico 51.

Gráfico 51 – Consumo global de energia elétrica por rota de cominuição



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os aspectos ambientais, por não utilizar água em seu processo de cominuição, a nova rota propicia a eliminação do consumo de água nova de 0,074 m³/t, ou 457.250 l anuais (considerando a capacidade das usinas em 6,2 Mtpa), permitindo a utilização deste volume para finalidades mais nobres. Outro benefício da nova rota proposta é a redução do consumo de óleo e graxa, uma vez que os moinhos consomem um volume anual consideravelmente superior comparado às HPGRs. A rota tradicional resulta em um consumo de 90.786 l de óleo lubrificante e 9.720 kg de graxa mineral. Já a rota multiprensagem, composta por 3 HPGRs, consumiria um total de 1.494 l de óleo e 3.240 kg de graxa, representando uma redução percentual de 98,4% e 66,7%, respectivamente, o que certamente apresenta uma geração de resíduos significativamente inferior, além da redução dos riscos associados a manipulação e estocagem destes produtos químicos. Assim, o Quadro 21 resume as principais características da nova rota.

Quadro 21 – Resumo das principais características da rota multiprensagem

Aspecto		Principais características da rota multiprensagem
Sustentabilidade	Social	Promove a redução de riscos associados às operações de desaguagem e bombeamento de polpas, reduzindo a exposição de trabalhadores na linha de frente, com atividades de manutenção e operação das fases eliminadas: moagem, espessamento, homogeneização e filtragem.
	Ambiental	Capaz de reduzir o consumo de 457.250 l de água, 89.292 l de óleo lubrificante, 6.480 kg de graxa mineral e 29.760 MWh de energia elétrica por ano, considerando sua implantação nas usinas 1 e 2 de pelletização com capacidade de 6,2 Mtpa.
	Econômico	Potencial de redução de OPEX na ordem de 53% devido, essencialmente, à eliminação dos custos com corpos moedores. Não foram considerados os impactos com potencial redução de efetivo e outros gastos de manutenção das operações eliminadas.
Qualidade	Minério Cominuído	A superfície específica e granulometria passante na malha de controle (45 µm) ficaram inferiores em 293 cm ² /g e 6,3 pontos percentuais, respectivamente, em relação à rota tradicional após 7 passes na HPGR. Os ganhos de superfície e redução granulométrica se estabilizaram após 4 passes. Estes valores podem variar em função do grau de compactação da mistura de minérios.
	Pelotas Cruas	Melhor qualidade física (resistência a seco e a úmido e número de quedas) a partir do 4º passe da rota multiprensagem, mesmo com uma distribuição granulométrica mais grosseira e menor área superficial.
	Pelotas Queimadas	Física
Metalúrgica		Ligeira perda nos resultados de redutibilidade e metalização, que podem estar associados a uma menor porosidade das pelotas queimadas promovidas por uma menor umidade das pelotas cruas da rota multiprensagem, e elevação considerável da degradação após redução na malha de 0,50 mm.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos resultados, a nova rota apresentou uma expressiva redução de gastos operacionais, promovendo benefícios com a diminuição de riscos associados ao transporte de polpas e operações das áreas de desaguagem, eliminadas pela nova rota, além de benefícios ambientais com menor consumo de água, óleo e graxa. Porém, apresentou resultados de qualidade metalúrgica das pelotas queimadas ligeiramente inferiores, que podem ser endereçados com maior grau de aprofundamento em estudos futuros, de modo a elevar a confiabilidade e atratividade desta nova rota de cominuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 50001**: Sistemas de gestão de energia – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY. **The 2018 International Energy Efficiency Scorecard**. Washington: ACEEE, 2018.
- ALTOÉ, L.; COSTA, J. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; MARTINEZ, F. J. R.; FERRAREZ, A. H.; VIANA, L. A. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 285-297, abr. 2017.
- AMELUNXEN, P. A.; MEADOWS, D. Not Another HPGR Trade-off Study!, **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 28, p. 1-7, 2011.
- ACSELRAD, H. Discursos da sustentabilidade urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v.1, p. 79-90, 1999.
- BALLANTYNE, G. R. Quantifying the additional energy consumed by ancillary equipment and embodied in grinding media in comminution circuits. **Semi-autogenous and High Pressure Grinding Technology**, v. 4101, p. 1-12, 2019.
- BALLANTYNE, G. R., POWELL, M. S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. **Minerals Engineering**, v. 65, p. 109-114, 2014.
- BARRIOS, G. K. P.; TAVARES, L. M. A preliminar model of high pressure roll grinding using the discrete element method and multi-body dynamics coupling. **Minerals Engineering**, v. 156, p. 32-42, 2016.
- BEARMAN, R. High-Pressure Grinding Rolls - Characterizing and Defining Process Performance for Engineers. In: KAWATRA, S. K. (org). **Advances in Comminution**. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006. p. 3-14.
- BOND, F. C. The Third Theory of Comminution. **Transactions on AIME Mining Engineering**, v. 193, p. 484-494, 1952.
- BOND, F. C. **Crushing and Grinding Calculations**. In: Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Bulletin. 1983.
- BRAGA, D. S.; CRISCUOLO, L. G. R.; CARVALHO, J. L. R. E-Pellet - Carvão Vegetal como Alternativa Energética para Pelotização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 5., 2017. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2017. p. 102-110. ISSN: 2594-357X. DOI 10.5151/2594-357X-30528. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/e-pellet-carvao-vegetal-como-alternativa-energetica-para-pelotizacao>. Acesso em: 11 fev. 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Programa de Eficiência Energética**. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>. Acesso em: 25 maio 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 Global**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>. Acesso em: 22 abr. 2019.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future**. The World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987.

BUENO, G. **Desvendando a prensagem de pellet feed de minério de ferro na unidade de tubarão**. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

BUENO, G.; TAVARES, L. M. M.; BARRIOS, G. K. P.; MAYERHOFER, F. C.; CARVALHO, R. M. Comparação de Vedações Laterais em Prensas de Rolos Via Simulação Pelo Método dos Elementos Discretos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 5., 2017. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2017. p. 90-101. ISSN: 2594-357X. DOI 10.5151/2594-357X-30458. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/comparacao-de-vedacoes-laterais-em-prensas-de-rolos-via-simulacao-pelo-metodo-dos-elementos-discretos>. Acesso em: 11 fev. 2019.

CAMPOS, T. M. BUENO, G.; BARRIOS, G. K. P. TAVARES, L. M. Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 1: Experimental results. **Minerals Engineering**, v. 140, n. 105875, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105875>. Acesso em: 11 fev. 2019.

CASTEEL, K. HPGR: Making its case for commercialization. **Engineering and Mining Journal**, v. 207, n. 1, p. 60-64, 2006.

CASTRO-ALVÁREZ, F.; VAIDYANATHAN, S.; BASTIAN, H.; KING, J. **The 2018 International Energy Efficiency Scorecard**. Washington: American Council for Energy-Efficient Economy, 2018.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2003. v. 3.

COUNCIL OF EUROPE. **Convention on the Conservation of Europe Wildlife and Natural Habitats**. Bern, 1979. Disponível em: <https://rm.coe.int/1680078aff>. Acesso em: 12 fev. 2019.

DANIEL, M. J. **HPGR model verification and scale up**. 2002. 203 f. Thesis (Master's Degree in Engineering) – University of Queensland, Brisbane, 2002.

DANIEL, M. J.; MORRELL, S. HPGR model verification and scale-up. **Minerals Engineering**, v. 17. p. 1149-1161, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília, 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf). Acesso em: 13 fev. 2021.

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

DONDA, J. D.; ROSA, A. C. **A Lei de Moagem**: comprovação para minério de ferro. Ouro Preto: L&E Graphar, 2014. 219 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética Nacional 2020 - Ano Base 2019**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 13 fev. 2021.

FUERSTENAU, D. W.; ABOUZEID, A. -Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution. **International Journal of Mineral Processing**, v. 67, p. 161-185, 2002.

_____. Role of feed moisture in high-pressure roll mill comminution. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, p. 203-210, 2007.

FUERSTENAU D. W., KAPUR P. C. Newer Energy-Efficient Approach to Particle Production by Comminution. **Powder Technology**, v. 82. p. 51-57, 1995.

FUERSTENAU D. W., GUTSCHE O., KAPUR P. C. Confined Particle Bed Comminution under Compressive Loads. **International Journal of Mineral Processing**, v. 44-45, p. 521-537, 1996.

GEERDES, M.; TOXOPEUS, H., VAN DER VLIET, C. **Modern Blast Furnace Ironmaking**: An Introduction. 2. ed. Amsterdam: IOS Press, 2009.

GORLOV, E. G.; RED'KINA, N. I.; KHODAKOV, G. S. New Approaches to Determination of Energy Consumption for the Comminution Process. **Solid Fuel Chemistry**, v. 43, p. 391-399, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Benefits of Energy Efficiency**. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/archive/benefits>. Acesso em: 12 maio 2019.

_____. **Energy Efficiency Indicators**: Highlights - 2018. Paris: IEA, 2018.

INTERNATIONAL UNION FOR THE CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES (IUCN). **World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development**. Switzerland: IUCN, 1980. 77 p.

KLEEMANN. **Crushing Technology**. [S. d]. Disponível em: <https://www.kleemann.info/en/technologies/crushing-technology/>. Acesso em: 23 abr. 2019.

KLYMOWSKY R. HPGR-Accepted Technology in Mining. *In*: MINING MAGAZINE CONGRESS, 2009, Toronto. **Anais** [...]. Toronto: Mining Magazine, 2009.

LAFORÉST, G.; DUBÉ, M.; LACROIX, O. **On the Difference Between Isothermal and Non-Isothermal Reduction Tests: A Comparison Between COREM R180 and ISO DR90**. São Paulo: Editora Blücher, out. 2019. p. 340-351. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/on-the-difference-between-isothermal-and-non-isothermal-reduction-tests-a-comparison-between-Corem-r180-and-iso-dr90>. Acesso em: 13 fev. 2021.

LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J. **The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. Nova York: Universe Books, 1972.

MEYER, K. **Pelletizing of Iron Ores**. 1. ed. Nova York: Spring-Verlag, 1980.

MICHAELIS. **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**. [2019?] Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/>. Acesso em: 04 maio 2019.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS (MDIC). **Exportação Brasileira**. [2021?]. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 13 fev. 2021.

MOURÃO, J. M. **Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro**. Vitória: Conceitual Consultoria Mínero-Siderúrgica, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj1m63gl4jwAhXvIrkGHS8QCdEQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.abmbrasil.com.br%2Fdownload%2Ffile%2Faspectos-conceituais-relativos-a-pelotizacao-de-minerio-de-ferro&usg=AOvVaw3oFohA70JNS8QZn8WdCmTE>. Acesso em: 20 abr. 2019.

NAPIER-MUNN, T. Is progress in energy-efficient comminution doomed?. **Minerals Engineering**, v. 73, p. 1-6, 2015.

OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY (OEC). **Which countries export Iron Ore?. (2018)**. Disponível em: https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/show/all/52601/2018/. Acesso em: 10 fev. 2021.

OLIVEIRA, C. R. G.; FERRO, F. H.; SOUSA, G. C. D.; VIANNA, I. Q.; FARDIN, J. F. Utilização de Modelagem em Regressão Linear Para Solução de Problema em Prensa de Rolos de Alta Pressão na Pelotização. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS*, 6., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABCM, 2018. P. 116-126.

PURVIS, B.; YONG, M.; DAREN R. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. **Sustainability Science**, v. 14, p. 681-695, 2019.

RASHIDI, S., RAJAMANI, R. K., FUERSTENAU, D. W. A review of the modeling of high pressure grinding rolls. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 34, p. 125-140, 2017.

ROSARIO, P.; HALL, R. A Structured Approach to the Evaluation of the Energy Requirements of HPGR and Sag Mill Circuits in Hard Ore Applications. **Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 110, n. 3, p. 117-123, 2008.

ROWLAND Jr; CHESTER, A. Selection of Rod Mills, Ball Mills, Pebble Mills and Re grind Mills. *In: MULAR, A.L.; GERALD, V.J. Design and Installation of Comminution Circuits*. Nova York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1982. p. 393-438.

SALAZAR, J. S. **Comparação de rotas de cominuição itabirítico usando de minério de ferro conceitos de sustentabilidade e eficiência energética**. 2014. 231 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SAMARCO MINERAÇÃO S.A. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2014**. Belo Horizonte: Samarco, 2015. Disponível em: <https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2020/12/2014-Relatorio-Anual-de-Sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2019.

SARAMAK, D.; KLEIV, R.A. The effect of feed moisture on the comminution efficiency of HPGR circuits. **Minerals Engineering**, v. 43-44, p. 105-111, 2013.

SCHÖNERT, K. Sizing of High Pressure Twin Roll Mills. **Zement Kalk Gips**, n. 12 p. 728-730, 1985.

_____. A First Survey of Grinding with High-Compression Roller Mills. **International Journal of Mineral Processing**, v. 22. P. 401-412, 1988.

_____. The Characteristics of Comminution with High Pressure Roller Mills. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 9, p.149-158, 1991.

SILVA, W. **Fluxo da Usina**. Destinatário: Igor Vianna. [S. I.], 18 fev. 2019. 1 mensagem eletrônica.

TAVARES, L. M. Optimum routes for particle breakage by impact. **Powder Technology**, v. 142, p. 81-91, 2004.

_____. **Um novo método para o cálculo da eficiência energética de moinhos industriais**. 2003. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10093/>. Acesso em: 20 abr. 2019.

THOMAZINI, A.; TRES, E. P.; MACEDO, F. A. D.; ATHAYDE, M.; BUENO, G.; FERNANDES, R. B.; NUNES, R. A. P. Development of a Novel Grinding Process to Iron Ore Pelletizing through HPGR Milling in Closed Circuit. **Mining, Metallurgy and Exploration**, v. 37, n. 3, p. 933-941, 2020.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Conference on the Human Environment**. Nova York: United Nations, 1973.

_____. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Kyoto: United Nations, 1998.

_____. **Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer**. Treaty Series. Montreal: United Nations, 1989.

_____. **Paris Agreement**. Paris: United Nations, 2015. P. 3.

_____. **The future we want**. Rio+20 United Nations Conference on Sustainable Development. Rio de Janeiro: United Nations, 2012.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Global iron ore production data; Clarification of reporting from the USGS. **Mining Engineering**, v. 69, n. 2, p. 20, 2017.

_____. **Annual Publications: Iron Ore Statistics and Information**. [S. l.]. 2019. Disponível em: <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/mcs-2019-feore.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2019.

VALE S.A. **Metalurgia, Metalurgia Extrativa e a Siderurgia**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. (Apostila do Curso de Especialização em Pelotização de Minério de Ferro).

VALE S.A. **Pelotização Cadeia de Valor**. 171 slides. Valer - Educação Vale. Vitória, 2019

VAN DER MEER, F. P. Pellet feed grinding by HPGR. **Minerals Engineering**, v. 73, p. 21-30, 2015.

WANG, C.; MEJIA, O.; NADOLSKI, S.; KLEIN, B. Energy and Cost Comparisons of HPGR-based Circuits. **Engineering and Mining Journal**, v. 214, n. 12, p.102-108, 2013.

WEIR MINERALS. **HPGR Scale-up Pellet Feed Applications**. *In*: VALE TECHNICAL SEMINAR. Vitória, 2018. 29 slides.

WILLS, B. A. Comminution in the Minerals Industry - An Overview. **Minerals Engineering**, v. 3 p. 1-2, 3-5, 1990.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 7. ed. Massachusetts: Elsevier Science & Technology Books, 2006. 456 p.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Mineral Processing Technology**. 7. ed. Massachusetts: Elsevier Science & Technology Books, 2006.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel Statistical Yearbook 2018**. Brussels, Belgium. Disponível em: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY_2018.pdf. Acesso em: 25 abr. 2019.

APÊNDICE A – SUSTENTABILIDADE

O termo sustentabilidade vem sendo empregado cada vez mais como *marketing* “verde” de produtos ou serviços, para o posicionamento de uma instituição frente às demandas da sociedade, do que de fato exercido plenamente em seus pilares comumente estabelecidos: social, ambiental e econômico. A sustentabilidade continua sendo um conceito aberto com inúmeras interpretações e compreensão específica do contexto (PURVIS; YONG; DAREN, 2019). Para entender melhor o que esta palavra significa, faz-se necessário uma busca por referências e práticas que caracterizam e estabelecem sentido a ela, ilustrando e contextualizando seu histórico, suas origens e seu processo construtivo.

“Uma consequência da falta de rigor nos fundamentos teóricos da sustentabilidade e do paradigma dos três pilares é a dificuldade em produzir estruturas operacionais para a caracterização da sustentabilidade que permanecem enraizadas na teoria.” (PURVIS; YONG; DAREN, 2019).

Acsehrad (1999) realiza um raciocínio reflexivo sobre os significados, apresentados como noções, acerca da sustentabilidade.

[...] sustentabilidade remete antes à lógica das práticas, em que efeitos práticos considerados desejáveis são levados a acontecer, do que ao campo do conhecimento científico, em que os conceitos são construídos para explicar o real (ACSELRAD, 1999).

Este conceito vem sendo construído com significativas contribuições desde 1968, após a criação do Clube de Roma e a publicação, em 1972, do relatório *The Limits of Growth*, elaborado por uma equipe do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que estipula que “se a taxa de crescimento populacional, industrialização, poluição, produção de alimentos e depleção de recursos naturais continuarem inalterados, os limites para o crescimento será atingido nos próximos cem anos” (MEADOWS et al., 1972). Assim, a noção de que as práticas atuais não sustentarão um futuro próximo é estabelecida.

Em torno da problemática apresentada pelo MIT, a Organização das Nações Unidas (ONU) elaborou a primeira conferência internacional, realizada em Estocolmo, também em 1972, para tratar das questões relacionadas ao homem e à degradação do meio ambiente, no qual estabeleceu, no primeiro princípio da Declaração da Conferência de ONU no Ambiente Humano, que

o homem tem o direito fundamental à liberdade, à igualdade e ao desfrute de condições de vida adequadas em um meio ambiente de qualidade tal que lhe permita levar uma vida digna e gozar de bem estar, tendo a solene obrigação de proteger e melhorar o meio ambiente para as gerações presentes e futuras (UNITED NATION, 1973, tradução nossa).

É importante ressaltar que a ideia dos benefícios sociais do direito de usufruir e proteger o meio ambiente e do bem-estar social foram inseridas no contexto da sustentabilidade.

No final da década de 70, em 1979, foram realizadas as convenções de Berna, abordando as preocupações para a conservação da fauna e da flora (COUNCIL OF EUROPE, 1979) e de Genebra, sobre a poluição atmosférica transfronteiriça, já trazendo a temática da extrapolação dos impactos ambientais das fronteiras geográficas das nações. (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, 1979).

Em 1980, a *International Union for Conservation and Natural Resources* (IUCN), com a colaboração da *World Wide Fund for Nature* (WWF) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), lançaram a Estratégia de Conservação Mundial (WCS, do inglês *World Conservation Strategie*), com os objetivos de: (i) explicar as contribuições da conservação dos recursos biológicos para a sobrevivência humana e o desenvolvimento sustentável; (ii) identificar as prioridades dos problemas de conservação e os principais requisitos para tratar com eles; e (iii) propor alternativas efetivas para o alcance da estratégia. Assim, a noção de conservação toma o centro da discussão sobre a temática de sustentabilidade e desenvolvimento (INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION AND NATURAL RESOURCES, 1980).

A Convenção de Viena, realizada em 1987, contribuiu para a criação do Protocolo de Montreal de modo a reduzir, até sua total eliminação, a utilização de substâncias que destroem a camada de ozônio, reforçando a preocupação internacional com o aquecimento global, o derretimento das calotas polares e a proteção da vida na terra (UNITED NATIONS, 1989). Também em 1987, a ONU indicou a primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, para chefiar a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada em 1983. Em seu trabalho, intitulado “Nosso Futuro Comum”, também conhecido como Relatório de Brundtland, no capítulo 2, parte IV, Brundtland afirma que

o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades presentes sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atenderem suas próprias necessidades (BRUNDTLAND, 1987, tradução nossa).

É, então, estabelecida uma primeira definição sobre sustentabilidade

Na sequência, o Rio de Janeiro sediou, em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), que acabou sendo conhecida internacionalmente como Rio-92. Nesta conferência, 179 países assinaram a Agenda 21 Global,

[...] um programa de ação baseado num documento de 40 capítulos, que constitui a mais abrangente tentativa já realizada de promover, em escala planetária, um novo padrão de desenvolvimento, denominado “desenvolvimento sustentável”. O termo “Agenda 21” foi usado no sentido de intenções, desejo de mudança para esse novo modelo de desenvolvimento para o século XXI” (BRASIL, 2019).

Cabe salientar que, em 2002, este plano foi reforçado na Conferência de Joanesburgo.

O Protocolo de Quioto, criado em 1997 durante a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, estabeleceu notoriamente as preocupações e ações relacionados às mudanças climáticas, definindo metas claras e específicas para contenção de emissões de gases de efeito estufa (GEE), em especial o CO₂ (UNITED NATIONS, 1998). O Brasil ratificou sua aprovação por meio do Decreto Legislativo nº 144, de 2002, fazendo parte das 37 nações signatárias deste protocolo.

A ONU, em 2012, novamente no Rio de Janeiro, publicou o relatório *The future we want* após a Convenção das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável. Neste documento é citado que o principal desafio global para a sustentabilidade é a erradicação da pobreza, tratando este desafio como um pré-requisito para o desenvolvimento sustentável, inserindo as pessoas como papel central da transformação (UNITED NATIONS, 2012).

Mais recentemente, em 2015, foi elaborado o Acordo de Paris, contendo 29 artigos. Seu objetivo, explicitado, no artigo 2, visa a

[...] fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas, no contexto do desenvolvimento sustentável e os esforços para erradicar a pobreza, incluindo: (a) manter o aumento da temperatura média global bem abaixo dos 2°C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas; (b) aumentar a capacidade de adaptar-se aos impactos adversos das mudanças climáticas e fomentar a resiliência ao clima e o desenvolvimento de baixas emissões de gases de efeito estufa, de uma forma que não ameace a produção de alimentos; (c) promover fluxos financeiros consistentes com um caminho de baixas emissões de gases de efeito estufa e de desenvolvimento resiliente ao clima (UNITED NATIONS, 2015, p.3, tradução nossa).

Retornando mais uma vez ao que Acsehrad (1999) contextualiza em sua publicação “Discursos da sustentabilidade urbana”, com o conceito apresentado da causalidade teleológica, uma vez que sustentabilidade está associada a um cenário futuro dependente de que práticas sustentáveis ocorram no presente. Como bem colocado no relatório *The future we want*, as pessoas são o papel central desta temática e, como sociedade, é preciso agir, do modo a não mais ser concebida que a noção de sustentabilidade é sempre algo futuro.