FRANCISCO JUNIOR BATISTA PEDROSA

O *High Pressure Grinding Rolls* como alternativa à cominuição de óxido de alumínio eletrofundido: uma avaliação do potencial de simplificação de um circuito

São Paulo
2019

FRANCISCO JUNIOR BATISTA PEDROSA

O *High Pressure Grinding Rolls* como alternativa à cominuição de óxido de alumínio eletrofundido: uma avaliação do potencial de simplificação de um circuito

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pedrosa, Francisco Junior Batista

O High Pressure Grinding Rolls como alternativa à cominuição de óxido de alumínio eletrofundido: uma avaliação do potencial de simplificação de um circuito / F. J. B. Pedrosa -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
155 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.HPGR 2.Óxido de alumínio eletrofundido 3.Cominuição 4.Simulações
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus pela força que sempre me dá nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, pelo estímulo, suporte e apoio de sempre. Sem eles nada disso teria sentido.

Ao meu orientador, Professor Doutor Maurício Guimarães Bergerman pela dedicação, paciência e a frequente disponibilidade para o esclarecimentos de dúvidas.

À Elfusa Geral de Eletrofusão, que permitiu a execução deste trabalho. Em especial ao sr. Flávio Aprígio pela colaboração na realização do trabalho junto à empresa.

Ao Arthur Dias pelo auxílio na amostragem industrial.

À Metso Minerals que possibilitou a realização dos ensaios HPGR HRC™.

Ao Willer T. Ito pela disponibilidade e pelo apoio na realização dos ensaios HPGR HRC™.

À Juliana Segura Salazar da UFRJ pelo apoio em relação à modelagem e às simulações matemáticas de HPGR e a parceria na elaboração do artigo.

À equipe da Metso: Edilson, Bruno Pontes, Julio Almeida.

Ao Dimas e a Livia Gimenes pelo grande apoio na reta final da produção deste trabalho. Muito obrigado!

À bibliotecária Maria Cristina Martinez Bonesio, pelo auxílio na busca de artigos e os esclarecimentos sobre as diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP.

Ao sr. Frank P. van der Meer pelos esclarecimentos e compartilhamento de artigos.

À sra. Samira Rashidi pelo compartilhamento de artigos.

Ao Professor Doutor Homero Delboni Júnior pelo esclarecimentos sobre a modelagem e simulação matemática de HPGR.

À equipe da Minpro e HDA Thiago Jatobá, Wellington e Vitor pelos esclarecimentos sobre o JKSimMet®. E a equipe do laboratório de caracterização física da HDA, Henrique e Hélio, que me auxiliaram na execução dos ensaios *drop weight*.

Ao Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais e a equipe de trabalho deste (Rogério, Rosendo, Jefferson, Fernando, Nilton, Juscelino, Dora e Helena).

Ao sr. Mike Daniel pelo compartilhamento de artigos e de sua dissertação de mestrado.

Ao Professor Doutor Arthur Pinto Chaves pelo apoio e compartilhamento de conhecimento.

Aos meus amigos do PMI Eliana, Livia Marques, Ranyere, Carlos, Gilmar e Paula.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

PEDROSA, Francisco Junior Batista. **O High Pressure Grinding Rolls como alternativa à cominuição de óxido de alumínio eletrofundido: uma avaliação do potencial de simplificação de um circuito.** 2019. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Uma parcela considerável do consumo energético, e consequentemente, dos custos das operações de tratamento de minérios é atribuída a cominuição. O *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR) surge com o apelo de eficiência energética, o que, potencialmente, reduziria os custos operacionais. Nesta pesquisa, esta tecnologia é analisada como uma alternativa à rota convencional de cominuição de óxido de alumínio eletrofundido de um empreendimento em particular, que compreende um complexo circuito de britadores de rolos. Duas amostras de óxido de alumínio eletrofundido, denominadas BT e TB, foram submetidas a ensaios de HPGR (circuito aberto) e de caracterização física (DWT, WI, AI, densidade). Adicionalmente, foram realizadas simulações no software JKSimMet® 6.0 com o objetivo de prever o desempenho do equipamento em circuito fechado e realizar o escalonamento da unidade industrial. As distribuições granulométricas dos produtos dos ensaios de HPGR em circuito aberto e as distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos fechados de HPGR simulados foram comparadas às granulometrias do produto requeridas pelo circuito industrial. Avaliou-se, também, o atendimento da vazão mássica requerida. Os resultados demonstram que a rota alternativa baseada no HPGR oferece um expressivo potencial de simplificação do circuito, com uma redução considerável do número de equipamentos de cominuição de 13 para 1, o que, além de, possivelmente, impactar na redução de custos operacionais, facilita o controle da operação.

Palavras-chave: HPGR. Óxido de alumínio eletrofundido. Cominuição. Simulações.

ABSTRACT

PEDROSA, Francisco Junior Batista. **HPGR as alternative to electrofused aluminum oxide comminution route: an assessment of circuit simplification potential**. 2019. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

A considerable portion of energy consumption and, as a consequence, operational costs in mineral processing is associated with comminution. High Pressure Grinding Rolls (HPGR) are appealing for their energy efficiency, which would potentially reduce operating costs. This study evaluates this technology as an alternative to the conventional electrofused aluminum oxide comminution route of a specific plant comprising a complex roll crushing circuit. Two electrofused aluminum oxide samples, called BT and TB, were submitted to HPGR (open circuit) and physical characterization (DWT, WI, bulk density, specific gravity) tests. In addition, simulations were conducted using JKSImMet® 6.0 software, aiming to predict the performance of a closed-circuit equipment and scale-up of an industrial scale unit. Product size distributions of the open-circuit HPGR tests and closed circuit HPGR simulations were compared with the product size distribution required by industrial comminution circuit. The required throughput was also evaluated. Results show that the alternative HPGR route provides a remarkable potential for circuit simplification, while considerably reducing the number of comminution equipments from 13 to 1, which facilitates operational control and possibly reduces operating costs.

Keywords: HPGR. Electrofused aluminum oxide. Comminution. Simulations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ordem de eficiência energética para diferentes mecanismos de cominuição	25
Figura 2 - High Pressure Grinding Rolls.....	26
Figura 3 - Sistema hidráulico de pressão	26
Figura 4 - Sistema hidráulico de pressão: tradicional e da Metso	27
Figura 5 – Aspectos geométricos do processo de cominuição do HPGR	28
Figura 6 - Tensão interparticular presente no HPGR	30
Figura 7- Sistemas de desgaste envolvidos na cominuição interparticular na moagem de rolos (I: abrasão; II: indentação).....	36
Figura 8 - Relação entre a vazão mássica específica o tipo de revestimento dos rolos	43
Figura 9 - Efeito da segregação durante a alimentação do material	44
Figura 10 - Relação entre a vazão mássica específica, vazão mássica e a velocidade dos rolos.....	45
Figura 11 - Influência da força específica de moagem na granulometria do produto	46
Figura 12 - Relação entre a umidade do material de alimentação e o efeito de cominuição	48
Figura 13 - Relação entre a energia específica e a força específica de moagem	48
Figura 14 - Modelo de Morrell et al. (1997) para distribuição do tamanho da partícula	51
Figura 15 - Procedimento de escalonamento que assume a razão diâmetro dos rolos/ abertura operacional entre os rolos como constante.....	57
Figura 16 - Principais componentes do HRC™	59
Figura 17- Fluxograma geral da produção do óxido de alumínio eletrofundido.....	66

Figura 18 - Rota tradicional de cominuição de óxido de alumínio eletrofundido	67
Figura 19 - Britadores de rolos (A) e peneiras circulares (B)	68
Figura 20 - Circuito de peneiramento comercial do circuito de cominuição TB	69
Figura 21 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa	72
Figura 22 - Pontos de amostragem na usina	73
Figura 23 - Aparato DWT	81
Figura 24 - Relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante	84
Figura 25 - HRC™ 300	87
Figura 26 - Metso D1000 (A) e as suas superfícies que representam os rolos (B) ...	89
Figura 27 - Distribuições granulométricas das amostras coletadas nesta pesquisa e histórico de distribuição granulométrica da alimentação do circuito de britadores de rolos	94
Figura 28 - Curva paramétrica da relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante do ensaio drop weight com amostra de óxido de alumínio BT	97
Figura 29 - Curva paramétrica da relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante do ensaio drop weight simplificado com amostra de óxido de alumínio TB	97
Figura 30 - curvas t_{10} versus t_n para óxido de alumínio eletrofundido BT	98
Figura 31 - Distribuições granulométricas dos ensaios realizados com o óxido de alumínio BT no D1000 e no HRC™ 300 (estudo da Metso em 2010)	103
Figura 32 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem dos ensaios realizados com o óxido de alumínio BT no D1000 (abertura inicial de 19 mm)	104
Figura 33 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem de um ensaio realizado com o óxido de alumínio BT no D1000 (abertura inicial de 12 mm)	105
Figura 34 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem dos ensaios realizados com o óxido de alumínio BT no HRC™ 300 (estudo da Metso em 2010)	105

Figura 35 - Distribuições granulométricas dos ensaios realizados com a amostra de óxido de alumínio TB no D1000	106
Figura 36 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem dos ensaios realizados com o óxido de alumínio TB no D1000 (abertura inicial entre os rolos de 19 mm).....	107
Figura 37 - Distribuição granulométrica do produto do D1000 (1 N/mm^2) e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB.....	108
Figura 38 - Distribuição granulométrica do produto do D1000 (3 N/mm^2) e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	108
Figura 39 - Vazão mássica específica em função da força específica de moagem..	110
Figura 40 - Energia específica de cominuição em função da força específica	111
Figura 41 - Distribuições granulométricas experimentais e ajustadas para amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT	115
Figura 42 - Distribuições granulométricas experimentais e ajustadas para amostra de óxido de alumínio eletrofundido TB	115
Figura 43 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%	119
Figura 44 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com malha de 3,35 mm (eficiência de 50%) e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	119
Figura 45 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%	120
Figura 46 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm (eficiência de 80%) e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	121
Figura 47- Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 0,5 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%	124

Figura 48 - Distribuições granulométricas do circuito HPGR fechado com um peneira com abertura de malha de 0,5 mm (eficiência de 50%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	124
Figura 49 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 0,5 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%	125
Figura 50 - Distribuições granulométricas do circuito HPGR fechado com um peneira com malha de 0,5 mm (eficiência de 80%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	125
Figura 51 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%	128
Figura 52 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 50%) e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	128
Figura 53 - Circuito HPGR fechado (BT) com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%	129
Figura 54 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 80%) e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT.	130
Figura 55 - Circuito HPGR (TB) fechado com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%	133
Figura 56 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 50%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB.	133
Figura 57 - Circuito HPGR (TB) fechado com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%	134
Figura 58 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 80%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais aplicações do HPGR	34
Tabela 2 - Dados de entrada e saída do modelo de Morrell et al. (1997)	53
Tabela 3 - Valores default da função quebra para quebra de partículas individuais utilizado no modelo de britadores de Whiten	55
Tabela 4 - Valores de E_{cs} (kWh/t) associados a função quebra	56
Tabela 5 - Especificações dos equipamentos da linha HRC™ aggregates.....	60
Tabela 6- Aplicações de HPGR em minerais industriais	61
Tabela 7- Relação dos principais fabricantes: unidades comerciais e ensaios de HPGR	62
Tabela 8 - Equipamentos da britagem estagiada	67
Tabela 9 - Equipamentos dos circuitos de britadores de rolos da Elfusa	68
Tabela 10 - Malhas de classificação industrial e os seus respectivos produtos. Circuito de britadores de rolos BT	75
Tabela 11 - Malhas de classificação industrial e os seus respectivos produtos. Circuito de britadores de rolos TB	75
Tabela 12 - Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora.....	79
Tabela 13 - Classificação da resistência ao impacto de acordo com o A . b.....	84
Tabela 14 - Especificações técnicas do HRC™ 300	87
Tabela 15 - Condições operacionais dos ensaios realizados no HRC™ 300.....	88
Tabela 16 - Condições operacionais dos ensaios D1000	90
Tabela 17 - Densidades reais e aparentes das amostras de óxido de alumínio BT e TB.....	95
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de WI de Bond.....	95
Tabela 19 - Parâmetros de fragmentação para os óxidos de alumínio em estudo...	98

Tabela 20 - Função quebra para a quebra de partículas individuais para a amostra de óxido de alumínio BT.....	99
Tabela 21 - Valores de E_{cs} (kWh/t) associados à função quebra para a quebra de partículas individuais para a amostra de óxido de alumínio BT.....	99
Tabela 22 - Função quebra para a quebra de partículas individuais para amostra de óxido de alumínio TB.....	99
Tabela 23 - Valores de E_{cs} (kWh/t) associados à função quebra para quebra de partículas individuais para a amostra de óxido de alumínio TB.....	100
Tabela 24 - Função quebra para quebra por compressão de leitos (extrapolada) para o óxido de alumínio BT.....	100
Tabela 25 - Função quebra para quebra por compressão de leitos (extrapolada) para o óxido de alumínio TB.....	101
Tabela 26 - Índices de abrasividade de Bond para a amostra de óxido BT	101
Tabela 27 - Parâmetros granulométricos obtidos nos ensaios de HPGR realizados na amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT	103
Tabela 28 - Parâmetros granulométricos obtidos nos ensaios de HPGR realizados com o óxido de alumínio eletrofundido TB	106
Tabela 29 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito aberto de HPGR e as especificações máxima e média anual de granulometria do produto requeridas pelo circuito industrial TB	109
Tabela 30 - Parâmetros de vazão mássica e de energia obtidos nos ensaios no HRC™ 300	110
Tabela 31 - Dimensionamento da vazão mássica e do consumo de potência a partir da vazão mássica específica.....	112
Tabela 32 - Dados utilizados na calibração do modelo de Morrell et al. (1997)	114
Tabela 33 - Cenários estabelecidos para as simulações realizadas	118
Tabela 34 - Resumo dos resultados das simulações para os cenários 1 e 2.....	122

Tabela 35 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado com uma malha de 3,35 mm e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	123
Tabela 36 - Síntese das simulações dos cenários 3 e 4	126
Tabela 37 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado em uma malha de 0,5 mm e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	127
Tabela 38 - Resumo das simulações dos cenários 5 e 6	131
Tabela 39 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado em uma malha de 1,40 mm e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	132
Tabela 40 - Resumo das simulações dos cenários 7 e 8	135
Tabela 41 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado em uma malha de 1,40 mm e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	136
Tabela 42 - Comparação entre as rotas tradicional e HPGR, em termos de equipamentos de cominuição.....	137
Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de densidade aparente para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.....	150
Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de densidade real obtidos a partir da amostra de óxido de alumínio BT.....	150
Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de densidade real para a amostra de óxido de alumínio TB.....	152
Tabela A.4 - Resultados dos ensaios de WI para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.....	153

Tabela A.5 - Resultados do ensaio *drop weight* completo para amostra de óxido de alumínio BT em termos de E_{cs} versus t_{10} 154

Tabela A.6 - Resultados do ensaio *drop weight* simplificado para a amostra de óxido de alumínio TB, em termos de E_{cs} versus t_{10} 154

Tabela A.7 - Resultados dos ensaios de AI de Bond para a amostra de óxido de alumínio BT.....155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	índice de abrasividade de Bond
AISIL6	aço especial utilizado no revestimento de rolos Hexadur
APF	Abertura do britador na posição fechada
CLP	ensaio de compressão de leito de partículas
D/x _g	relação entre o diâmetro dos rolos e a abertura operacional
DWT	<i>drop weight test</i> (ensaio <i>drop weight</i>)
EE	Eficiência energética
EUA	Estados Unidos da América
HPGR	<i>High Pressure Grinding Rolls</i>
HRC ^{TM}	conceito HPGR da Metso
JKMRC	Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre
L/D	relação entre o comprimento e o diâmetro dos rolos do HPGR
LTM EPUSP	Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
M _{dot}	vazão mássica específica (termo utilizado pelos fabricantes)
SAG	moagem semi-autógena
<i>Top size</i>	tamanho da maior partícula em um determinado fluxo
UFLC	célula de carga ultra rápida

LISTA DE SIMBOLOS

x_c	abertura crítica que delimita as zonas de pré-britagem e de compressão
D	diâmetro dos rolos (m)
x_g	abertura operacional entre os rolos (m ou mm)
ρ_{floco}	densidade do floco (t/m^3)
$\rho_{\text{alim.}}$	densidade aparente da alimentação (t/m^3)
α_{ip}	ângulo de captura das partículas para zona compressão
M	vazão mássica (t/h)
U	velocidade do material na abertura entre os rolos (m/s)
L	comprimento do rolo (m)
c	fator de correção
m_{ensaio}	requerimento em massa utilizado no ensaio (kg)
t	tempo de execução do ensaio (s)
$\dot{m}_{\text{floco}}$	vazão mássica específica calculada a partir da relação entre abertura operacional e o diâmetro dos rolos (t.s/h.m^3)
$\dot{m}_{\text{alim.}}$	vazão mássica específica obtida a partir da vazão de alimentação ($\text{t.s/m}^3.\text{h}$)
F_{sp}	força específica de moagem (N/mm^2)
F	força de moagem ou força aplicada nos rolos (kN)
F	fração do material cominuído na zona de bordas (%)
γ	fator de divisão específico do minério
E_{cs}	energia específica de cominuição (kWh/t)
$\text{Pot.}_{\text{moagem}}$	potência de moagem (kW)
$\text{Pot.}_{\text{vazio}}$	potência consumida em vazio (kW)

Pot. eixo	potência consumida no eixo dos rolos (kW)
τ	torque no eixo dos rolos (N.m)
t_{10}	porcentagem passante em uma abertura equivalente a 1/10 do tamanho original da partícula
t_{10p}	parâmetro da função quebra para zona de pré-britagem
t_{10e}	parâmetro da função quebra para zona de efeito de bordas
K_{1p}, K_{2p}, K_{3p}	parâmetros do modelo para zona de pré-britagem
K_{1e}, K_{2e}, K_{3e}	parâmetros do modelo para zona de efeito de bordas
K_{1h}, K_{2h}, K_{3h}	parâmetros do modelo para zona de compressão
K_p bordas	coeficiente de potência na zona de bordas
K_p compressão	coeficiente de potência na zona de compressão
(t_{10h})	parâmetro da função de quebra na zona de compressão
D_{real}	densidade real (g/cm ³)
m_{seca}	massa da partícula seca (g)
m_{imersa}	massa da partícula imersa em água deionizada (g)
v_f	volume final de água e sólidos (cm ³)
v_i	volume inicial de água (cm ³)
WI	índice de trabalho de Bond (kWh/t)
A_m	abertura da malha de controle do ensaio (μm)
Mob	média dos últimos três valores do índice de moabilidade (g/rev)
P	abertura da peneira na qual passam 80% da massa do produto
(μm);	
F	abertura da peneira na qual passam 80% da massa da alimentação (μm)
h_i	altura inicial de onde o cilindro de aço é liberado (cm)
$\bar{m}$	massa média de cada lote de partículas a serem fragmentadas
(g)	

E_{is}	energia específica de entrada requerida para cada teste, igual a energia específica de cominuição E_{cs} (kWh/t)
M_d	massa do cilindro de aço (kg)
E_{real}	energia real aplicada (kWh/t)
h_f	altura residual da partícula quebrada (cm)
t_{10}	porcentagem passante em uma abertura equivalente a 1/10 do tamanho original da partícula
A e b	parâmetros característicos do minério em relação à resistência ao impacto
α	parâmetro de nitidez da separação
C	partição de água para os finos (%)
d_{50C}	diâmetro de corte corrigido, ou tamanho que a eficiência da separação é $C/2$ (mm)
F_{80}	diâmetro no qual passam 80% das partículas de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo da alimentação de um equipamento ou circuito de cominuição (mm)
F_{50}	diâmetro no qual passam 50% das partículas de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo da alimentação de um equipamento ou circuito de cominuição (mm)
P_{80}	diâmetro no qual passam 80% das partículas de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo do produto de um equipamento ou circuito de cominuição (mm)
P_{50}	diâmetro no qual passam 50% das partículas de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo do produto de um equipamento ou circuito de cominuição (mm)
P_{30}	diâmetro no qual passam 30% das partículas de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo da alimentação ou produto de um equipamento ou circuito de cominuição (mm)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. OBJETIVO	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS (HPGR)	25
2.1.1. Equipamento, mecanismo de cominuição interparticular e aplicações....	25
2.1.2. Variáveis de operação.....	37
2.1.2.1. Vazão mássica	37
2.1.2.2. Força específica de moagem.....	41
2.1.3. Desempenho	42
2.1.3.1. Parâmetros que influenciam a vazão mássica específica.....	42
2.1.3.2. Parâmetros que influenciam a granulometria do produto..	46
2.1.3.3. Parâmetros que influenciam a energia específica de cominuição ...	48
2.1.4. Modelagem matemática	49
2.1.4.1. Modelo de Morrell et al. (1997)	49
2.1.5. Fabricantes e suas metodologias de ensaios	58
2.2. CIRCUITO DE COMINUIÇÃO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO ELETROFUNDIDO DA ELFUSA GERAL DE ELETROFUSÃO.....	65
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
3.1. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	71
3.2. AMOSTRAGEM E CIRCUITO DE COMINUIÇÃO PROPOSTO	72

3.3. DETERMINAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO PRODUTO REQUERIDAS PELO CIRCUITO INDUSTRIAL A PARTIR DO HISTÓRICO DE DADOS DE PRODUÇÃO	74
3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	76
3.4.1. Análise granulométrica.....	76
3.4.2. Densidade	76
3.4.3. WI de Bond	78
3.4.4. <i>Drop weight</i>	81
3.4.5. AI de Bond.....	85
3.5. ENSAIO DE HPGR EM ESCALA PILOTO E DE BANCADA	86
3.5.1. Metso HRCTM 300.....	86
3.5.2. Metso D1000	88
3.6. MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE HPGR	91
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL	93
4.1.1. Distribuições granulométricas dos fluxos amostrados.....	93
4.1.2. Densidade real e aparente	94
4.1.3. WI de Bond.....	95
4.1.4. <i>Drop weight</i>	96
4.1.5. AI de Bond.....	101
4.2. ENSAIOS DE HPGR.....	102
4.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO HPGR	113

4.3.1. Calibração do modelo.....	113
4.3.2. Simulações e verificação do atendimento das especificações de granulometria do produto.....	117
4.4. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SIMPLIFICAÇÃO DO CIRCUITO.....	136
5. CONCLUSÕES.....	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
APÊNDICES	150
APÊNDICE A - Resultados completos dos ensaios de densidade aparente e real para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.....	150
APÊNDICE B - Resultados completos dos ensaios de WI de Bond para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.....	153
APÊNDICE C - Resultados complementares dos ensaios <i>drop weight</i> (relação E_{cs} versus t_{10}) para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.	154
APÊNDICE D - Resultados completos dos ensaios de AI de Bond para a amostra de óxido de alumínio BT	155

1. INTRODUÇÃO

A cominuição, prática frequente em empreendimentos mineiros e de transformação mineral, é responsável por uma parcela significativa do consumo energético das usinas de Tratamento de Minérios (em alguns casos quase 80%) e por, aproximadamente, 2% da energia elétrica gerada globalmente (ABOUZEID; FUERSTENAU, 2009; NAPIER-MUNN, 2015). A busca pelo aumento de sua eficiência é impulsionada pelas elevadas vazões mássicas requeridas, em função da diminuição dos teores dos minérios, pelo alto consumo de aço (corpos moedores e de revestimentos) e pela baixa eficiência energética das tecnologias de cominuição convencionais¹ (ABOUZEID; FUERSTENAU, 2009). Neste contexto, o *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR), ou Prensa de Rolos de Alta Pressão, surge como uma opção atrativa em termos de eficiência energética e custo-benefício para o tratamento de determinados tipos de minérios (NAPIER-MUNN, 2015; RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017).

O desenvolvimento do HPGR está vinculado aos estudos de cominuição interparticular realizados pelo professor Dr. Klaus Schönert em 1979 (SCHÖNERT, 1988). A indústria cimenteira e a mineração de diamantes foram as pioneiras na inserção deste equipamento, em 1985 e 1987, respectivamente (KLYMOWSKY et al., 2002). A partir da década de 1990, após o aperfeiçoamento dos revestimentos dos rolos e das campanhas de ensaio, esta tecnologia passou ser aplicada no tratamento de minérios metálicos, inclusive dos considerados resistentes e abrasivos (KLYMOWSKY et al., 2002; DELBONI JÚNIOR, 2007; MORLEY, 2010). Recentemente, este equipamento tem encontrado aplicação no setor de minerais industriais (ITO, 2017²; VAN DER MEER, 2018). No entanto, a sua aplicação na produção de grãos abrasivos, tais como o óxido de alumínio eletrofundido, ainda tem sido pouco explorada pela literatura científica (SCHÖNERT, 1991a; KARIMI; DJOKOTO, 2012).

---

¹ Este termo está relacionado aos equipamentos de moagem.

² ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

Neste sentido, considerando as características deste equipamento, identificou-se no mesmo, uma alternativa à rota tradicional de cominuição de óxido de alumínio eletrofundido, da Elfusa Geral de Eletrofusão, que, atualmente, é executada por um circuito de britagem estagiada, seguida por dois circuitos paralelos de britadores de rolos, cujos os equipamentos são dispostos em um *layout* complexo, que impõe desafios à sua operação.

Pressupõe-se que o HPGR tenha potencial para substituir o circuito de britadores de rolos, simplificando-o drasticamente, promovendo benefícios, tais como: eficiência energética, ganhos de produção, redução do número de equipamentos e dos custos de operação.

A ausência de informações sobre a tecnologia HPGR aplicada à cominuição de óxidos fundidos fundamenta o presente estudo. Nesse contexto, almeja-se colaborar com projetos de engenharia posteriores que considerem este tipo de aplicação.

1.1. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo analisar a aplicação do HPGR na cominuição do óxido de alumínio eletrofundido, avaliando o potencial de simplificação de um circuito. Pretende-se apresentar a técnica de modo a estabelecer seus possíveis benefícios e limitações ao circuito de cominuição investigado, por meio do estudo de caso de um empreendimento que atua no setor de eletrofusão de óxidos de alumínio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS (HPGR)

2.1.1. Equipamento, mecanismo de cominuição interparticular e aplicações

O desenvolvimento do HPGR está relacionado aos estudos fundamentais de cominuição interparticular conduzidos pelo Prof. Dr. Klaus Schönert, da Universidade de Clausthal da Alemanha. Em sua pesquisa Schönert concluiu que apesar da maior eficiência energética (EE) ser observada na quebra pela compressão de partículas individuais, a eficiência energética obtida pela quebra de um leito comprimido de partículas é consideravelmente superior à obtida em moinhos tubulares (SCHÖNERT, 1979; SCHÖNERT; FLÜGEL, 1980; SCHÖNERT, 1988), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Ordem de eficiência energética para diferentes mecanismos de cominuição

Fonte: Rashidi, Rajamani e Fuerstenau (2017). Adaptado pelo autor.

A aplicação prática dos resultados obtidos por Schönert é um projeto de dois rolos acoplados a uma estrutura rígida. Um dos rolos rotaciona em uma posição fixa, enquanto o outro rolo rotaciona movendo-se linearmente, mediante a ação de um sistema hidráulico de pressão. A alimentação, normalmente, se dá por gravidade a partir de um silo instalado acima dos rolos (SCHÖNERT, 1988). A Figura 2 ilustra o HPGR.

Fonte: Barrios e Tavares (2016). Adaptado pelo autor.

O sistema hidráulico de pressão é responsável por introduzir a força de moagem no leito de partículas via rolo flutuante. Geralmente é constituído, por um ou dois cilindros acumuladores de nitrogênio e por um ou dois pistões em cada lado do rolo flutuante. Os cilindros acumuladores de nitrogênio são do tipo pistão ou bexiga. O óleo é introduzido no sistema via unidade hidráulica que é constituída por um reservatório e bomba de óleo, válvulas e elementos de temperatura (KLYMOWSKY et al., 2002). A Figura 3 ilustra o sistema hidráulico de pressão.

Fonte: Barrios e Tavares (2015). Adaptado pelo autor.

O sistema hidráulico de pressão, tradicionalmente empregado pelos fabricantes, compreende a utilização de uma força de compressão similar à exercida pelos pistões hidráulicos. A Metso desenvolveu um conceito em que a força aplicada pelos pistões é a metade da força de compressão. Esta particularidade é resultado da atuação da estrutura principal do equipamento (*Arch Frame*) como um braço de força e do posicionamento dos pistões acima da linha formada pelo centro dos rolos. Tal configuração possibilita a redução do número e das dimensões dos cilindros hidráulicos (OLIVEIRA, 2015). Detalhes sobre a estrutura principal da Metso são apresentados no item 2.1.5 deste estudo. A Figura 4 apresenta a diferença entre o sistema hidráulico convencional e o desenvolvido pela Metso.

Figura 4 - Sistema hidráulico de pressão: tradicional e da Metso

Fonte: Morley (2010) e Ito (2017)³. Adaptado pelo autor.

A operação de um HPGR tem início após o ajuste inicial da abertura entre os rolos (*zero gap*) e das pressões hidráulica e de nitrogênio. No decorrer do processo uma pressão de operação é atingida ajustando a abertura entre os rolos ao leito de partículas. Tal parâmetro passa a ser denominado abertura operacional entre os rolos (*working gap*).

O processo de cominuição em um HPGR inicia-se com a alimentação das partículas entre os rolos em uma zona que é denominada de pré-britagem. Nesta região, as partículas com tamanho superior a uma determinada abertura crítica (*critical gap*) são cominuídas pelo mecanismo de quebra de partícula individual, similar ao experimentado pelos britadores de rolos convencionais. As partículas com tamanho

³ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

inferior a esta abertura, são direcionadas à uma região de alta pressão, onde ocorre a cominuição interparticular (zona de compressão). A transição do material da zona de pré-britagem para a zona de compressão é caracterizada pela compactação, fricção e rearranjo das partículas, no qual as menores ocupam os vazios entre as maiores. Neste processo, a densidade aparente do material aumenta gradualmente, atingindo até 85% da densidade real do material. Em seguida, as partículas sofrem descompressão, deixando o equipamento em formato de floco (*flake*) ou em fluxo livre (SCHÖNERT, 1988; SCHÖNERT, 1991a; SCHONERT; LUBJUHN, 1993; RASHIDI, RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017). A Figura 5 ilustra este processo, bem como as suas variáveis geométricas.

Figura 5 – Aspectos geométricos do processo de cominuição do HPGR

Fonte: Lubjuhn e Schönert (1993). Adaptado pelo autor.

A abertura crítica que delimita as zonas de pré-britagem e de compressão (x_c) é definida pela Equação 1 (MORRELL et al., 1997).

$$x_c = 0,5 \left\{ (D + x_g) - \left[(D + x_g)^2 - \frac{4 \cdot \rho_{\text{floco}} \cdot D \cdot x_g}{\rho_{\text{alim.}}} \right]^{0,5} \right\} \quad (1)$$

Onde:

D: diâmetro dos rolos (m);

x_g : abertura operacional entre os rolos (m);

ρ_{floco} : densidade do floco (t/m^3);

$\rho_{\text{alim.}}$: densidade aparente da alimentação (t/m^3).

A determinação do ângulo de captura das partículas para zona de compressão, é de fundamental importância, pois permite uma definição adequada do *top size* de alimentação que minimize a quebra de partícula única e, conseqüentemente, direcione a maior parte da alimentação para região onde ocorre a cominuição interparticular (RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017). O ângulo de captura é calculado pela Equação 2.

$$\alpha_{ip} = \arccos \left(1 - \frac{\left(\frac{\rho_{\text{floc}}}{\rho_{\text{alim.}}} - 1 \right) \cdot x_g}{1000 \cdot D} \right) \quad (2)$$

Onde:

α_{ip} : ângulo de captura das partículas para zona compressão [$^\circ$];

ρ_{floc} : densidade do floco (t/m^3);

$\rho_{\text{alim.}}$: densidade aparente da alimentação (t/m^3);

x_g : abertura operacional entre os rolos (mm);

D: diâmetro do rolo (m).

Schönert e Lubjuhn⁴ (1992, apud OLIVEIRA, 2015) observaram, após um extensivo trabalho experimental, que o ângulo de captura das partículas para zona de compressão varia entre 7 e 13°.

Na prática, a definição do *top size* de alimentação que maximize a cominuição interparticular é feita com base na experiência de fabricantes e dos pesquisadores a partir da relação entre este parâmetro e a abertura operacional dos rolos. Schönert (1991a) sugeriu que esta relação não deve exceder o valor de 2,5. van der Meer

---

⁴ SCHÖNERT, K.; LUBJUHN, U. Angle of compression and throughput in high-pressure grinding rolls. **Zement-Kalk-Gips**, v; 45, p. 621-627, 1992.

(2010), mostrou que uma boa estimativa para esta relação seria 1,75. A Metso Brasil utiliza um *top size* de alimentação determinado pela razão entre o diâmetro do rolo e um fator de 25. A Metso dos EUA determina o *top size* de alimentação a partir da relação entre o diâmetro do rolo e um fator de 40 (ITO, 2017) ⁵.

A cominuição interparticular é definida por Schönert (1991a) como o resultado de uma tensão interparticular em leito, na qual as partículas são tensionadas umas contra as outras, contanto que, o tamanho o médio da maior partícula seja inferior ao comprimento e a altura do leito. Este mecanismo é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Tensão interparticular presente no HPGR

Fonte: van der Meer (2018).

O campo de tensão aplicado na partícula e a sua quebra, são influenciados pelo número de partículas vizinhas (pontos de contato), o que varia conforme a distribuição granulométrica e o empacotamento do leito. Se a intensidade da tensão é a mesma em todos os pontos do leito, há uma tensão interparticular homogênea. Esta condição, no entanto, frequentemente, não é atingida na prática devido à presença do efeito de bordas (SCHÖNERT, 1991a).

O efeito de bordas é decorrente do gradiente de pressão que se forma ao longo do comprimento dos rolos e da ausência de confinamento na região de suas bordas (MORRELL et al., 1997). Este fenômeno determina a fração relativamente grosseira frequentemente verificada nos produtos do HPGR.

---

⁵ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

De acordo com Morley (2010), a não homogeneidade do perfil de distribuição da pressão está relacionada com o projeto do equipamento, uma vez que a movimentação dos rolos e o estado estacionário das *cheek plates*⁶, reduzem o intertravamento das partículas.

Herman, Knorr e Whalen (2013) alertam que além do produto das bordas ser mais grosseiro que a região central dos rolos, existem outros impactos negativos dessa ineficiência, tais como o desgaste não uniforme dos rolos e a redução da eficiência energética do processo, já que no centro dos rolos, a força aplicada é muito maior do que a necessária para fragmentar as partículas.

Alternativas para a redução do efeito de bordas vêm sendo desenvolvidas, tais como a utilização de pinos de revestimento diferenciados na região das bordas e rolo fixo munido com flanges, o que aumenta o intertravamento das partículas na região das bordas (OLIVEIRA, 2015).

Frente ao exposto, observa-se que o efeito de bordas é uma consequência indesejável do processo e deve ser minimizado, uma vez que influencia o desempenho da operação, inclusive quanto ao principal atrativo do equipamento que é maior eficiência energética em relação aos equipamentos convencionais de moagem. Schönert (1991b) considera que a maior eficiência energética do HPGR em comparação aos moinhos tubulares, é atribuída à tensão interparticular e ao transporte controlado das partículas, garantido pelo regime de alimentação afogado (*choke-feed*). Nos moinhos tubulares, a energia é transferida as partículas, de modo, relativamente aleatório, por uma carga de corpos moedores de maneira não confinada e isto leva à perdas devido aos choques improdutivos entre os corpos moedores, ou entre estes componentes e o revestimento (SCHÖNERT, 1991b; FUERSTENAU; VAZQUEZ-FAVELA, 1997; DANIEL, 2002). Em contrapartida, em um HPGR, a energia é aplicada diretamente a um leito de partículas, sem necessidade de um meio moedor, o que propicia seu maior aproveitamento (FUERSTENAU; VAZQUEZ-FAVELA, 1997).

---

⁶ São placas metálicas utilizadas nas laterais dos rolos com o objetivo de aumentar o confinamento das partículas. Estes componentes são amplamente utilizados pelos fabricantes tradicionais de HPGR.

Fuerstenau e Vazquez-Favela (1997) observaram que a maior eficiência energética do HPGR em relação ao moinho de bolas é restrita às operações caracterizadas pela baixa relação de redução, isto é, quando baixos níveis de energia são aplicados. Quando elevadas relações de redução são requeridas (altos níveis de energia aplicados), os moinhos de bolas tornam-se mais eficientes energeticamente do que o HPGR, devido ao efeito de retardamento da quebra de partículas grosseiras característico da cominuição interparticular.

Schönert (1988) avaliou que a tensão interparticular, além promover a redução de tamanho, pode provocar um considerável enfraquecimento das partículas que não foram cominuídas. Esta particularidade não foi avaliada neste estudo, mas é um ponto de atenção, uma vez que o enfraquecimento pode influenciar na tenacidade dos grãos abrasivos. Estes produtos requerem resistência mecânica relativamente alta para sua aplicação comercial.

O enfraquecimento do material pelo HPGR vem sendo investigado em diversos estudos ao longo dos últimos anos (TAVARES, 2005; SHI; LAMBERT; DANIEL, 2006; BALLANTYNE; HIDEN; VAN DER MEER, 2018). Um procedimento comumente utilizado para análise desta particularidade é a realização do ensaio de moabilidade de Bond (WI de Bond) na alimentação e no produto deste equipamento e a comparação de seus resultados. Esta prática deve ser analisada com cautela, pois uma possível redução do WI também pode ser atribuída ao maior percentual de finos na granulometria do produto do HPGR quando comparado com a granulometria de alimentação do procedimento padrão de WI, no qual há um cuidado para minimizar a geração de finos (BALLANTYNE; HIDEN; VAN DER MEER, 2018). Com o objetivo de reduzir este efeito, Ballantyne; Hiden; van der Meer (2018) sugeriram a utilização de duas abordagens: a reconstituição da granulometria do produto do HPGR para atingir uma granulometria de alimentação similar à obtida pela britagem estagiada do procedimento padrão de Bond (STEPHENSON, 1997⁷ apud BALLANTYNE; HIDEN; VAN DER MEER, 2018) e a utilização do conceito de Energia Específica de Tamanho (*Size Specific Energy*). Esta última é definida como a energia específica requerida

---

⁷ STEPHENSON, I. **The Downstream effects of high pressure grinding rolls processing**. Thesis (Doctor in philosophy) - University of Queensland, Brisbane, 1997.

para gerar uma quantidade de material passante em malha em particular, que é geralmente definida como 75 μm (BALLANTYNE; PEUKERT; POWELL, 2015).

Tavares (2005), com o objetivo de avaliar de maneira mais direta o enfraquecimento das partículas via HPGR, propôs uma comparação entre esta tecnologia e outras duas convencionais (britador de rolos e moinho de martelos). Uma amostra de minério de cobre e outra minério de ouro, em condições tal qual, foram cominuídas pelas três rotas, de modo a obter um mesmo P_{80} nos três produtos. Estes, por sua vez, foram submetidos, em frações estreitas de tamanho, a ensaios em uma célula de carga ultra rápida (UFLC), equipamento que determina a resistência da partícula individual frente ao mecanismo de impacto. As conclusões de Tavares (2005) sobre o enfraquecimento das partículas estão enumeradas a seguir:

- É maior em partículas grosseiras e imperceptível em partículas inferiores a 1,5 mm. Este fato é justificado pelo acúmulo de tensões residuais nas partículas grosseiras antes de adquirir estabilidade. Estas tensões não são suficientes para quebrar tais partículas, mas são capazes de enfraquecê-las;
- Depende da energia específica de entrada, isto é, da força de moagem aplicada;
- Não depende da posição transversal das partículas no leito, já que o campo de tensão quase que hidrostático no interior do leito é apto a produzir um enfraquecimento uniforme. Segundo o autor, tanto as partículas da região central do leito, quanto as partículas próximas às superfícies dos rolos são tensionadas com a mesma intensidade.

Diversos autores, tais como Schönert (1988), Tavares (2005), Shi; Lambert e Daniel (2006) e van Der Meer e Gruendken (2010) consideram que o enfraquecimento do material pelo HPGR tem potencial para reduzir o consumo energético de um circuito de cominuição, quando este equipamento é aplicado em uma etapa de pré-moagem. Nesta alternativa, o HPGR substitui as etapas de britagem terciária, quaternária ou a moagem de barras (VAN DER MEER E GRUENDKEN, 2010). Ainda que esta aplicação seja a mais tradicionalmente utilizada, o HPGR também é utilizado em outros tipos de circuitos de cominuição por diferentes motivos. A Tabela 1 ilustra os principais circuitos de cominuição onde o HPGR é aplicado, as razões que estimularam a sua escolha, bem como, as tecnologias de cominuição concorrentes para estas aplicações.

Tabela 1 - Principais aplicações do HPGR

Aplicação	Minérios/ materiais	Ganhos potenciais	Equipamento concorrente	Referência
Pré-moagem de bolas	Clínquer, cobre, ouro, ferro, platina	Eficiência energética, Aumento do desempenho metalúrgico (flotação)	Britadores cônicos, Moinhos semi- autógenos e moinhos de barras	Aydogan, Ergün e Hakan (2006), Benzer et al. (2017) Mazzinghy et al. (2015), Godoy et al. (2010), Burchardt et al. (2011), van der Meer e Gruendken (2010)
Rebritagem de <i>pebbles</i> da moagem semi- autógena	Cobre e ouro	Eficiência energética, elevadas vazões mássicas	Britadores cônicos	van der Meer e Gruendken (2010)
Preparação para lixiviação em pilha	Cobre e ouro	Aumento do desempenho metalúrgico (lixiviação)	Britadores cônicos	Morley (2006), Burchardt et. al. (2011)
Britagem terciária e quaternária	Basalto, calcário, diabásio, dolomito, feldspato, silicato	Especificações de granulometria do produto, flexibilidade operacional e aumento da vida útil dos revestimentos	Britadores cônicos, britadores de martelo	Ito (2017) ⁸ ; van der Meer (2018)
Preparação de <i>pellet</i> <i>feed</i>	concentrado de minério de ferro	Aumento da área superficial e maior geração de finos	Moinhos de bolas	van der Meer (2015)
Moagem de liberação de diamantes	Diamantes	Aumento de liberação, preservação das gemas	Britadores cônicos	Daniel e Morley (2010)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas aplicações apresentadas na Tabela 1, o HPGR pode ser configurado em três opções (VAN DER MEER; GRUENDKEN, 2010; BURCHARDT et al., 2011):

- Circuito aberto;

⁸ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

- Circuito fechado com peneiramento (ou classificador);
- Circuito fechado com recirculação das bordas do produto.

O tipo de configuração do circuito de HPGR é determinado pelas características do processo, sobretudo em relação às operações subsequentes (MORLEY, 2006; VAN DER MEER; GRUENDKEN, 2010).

Neste estudo, analisa-se a aplicação do HPGR em substituição a etapa de britagem quaternária final, isto é, o produto obtido no HPGR já seria comercializado sem a necessidade de um outro estágio de cominuição subsequente.

O principal atrativo da escolha do HPGR para o circuito analisado no presente trabalho é o potencial de uma única unidade ser capaz de produzir uma relação de redução similar a múltiplas unidades de britadores convencionais. O HPGR, preferencialmente, cominui partículas com tamanho inferior à sua abertura operacional, devido ao mecanismo de cominuição interparticular. Isto possibilita que o produto, relativamente mais fino do que a abertura de trabalho, seja recirculado em uma mesma unidade e, ainda assim, seja novamente cominuído. Na britagem convencional, em consequência do mecanismo de quebra de partícula individual, a cominuição do produto mais fino que a abertura de trabalho requer estágios subsequentes de cominuição, com equipamentos ajustados com menores aberturas (VAN DER MEER; GRUENDKEN, 2010).

Diante do exposto acima, presume-se que um circuito de HPGR tem um grande potencial para simplificar o circuito de britadores de rolos da Elfusa, em termos de número de equipamentos, sem impactar negativamente a relação de redução requerida pelo processo.

A viabilidade da aplicação de um circuito de HPGR é fortemente influenciada pelo desgaste do revestimento dos rolos, devido à preponderância deste componente na determinação da disponibilidade e dos custos operacionais do equipamento (KLYMOWSKY et al., 2002; SESEMANN; BROECKMANN; HÖFTER, 2014).

Um bom conhecimento do processo de desgaste do revestimento dos rolos é de suma importância para escolha do material mais adequado e, conseqüentemente, para estimativas mais precisas de vida útil (SESEMANN; BROECKMANN; HÖFTER, 2014). Na concepção de Theisen (2001), existem dois diferentes mecanismos de desgaste presentes na operação de um HPGR, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7- Sistemas de desgaste envolvidos na cominuição interparticular na moagem de rolos (I: abrasão; II: indentação)

Fonte: Theisen (2001). Adaptado pelo autor.

A área I da Figura 7, é caracterizada pela abrasão de partículas grosseiras em função da velocidade periférica do rolo. Já a região II é caracterizada por sulcos provocados por partículas extremamente pequenas, de modo que a remoção do revestimento do rolo se dá por micro fadigas, que desprendem minúsculas áreas em decorrência de repetidas deformações (THEISEN, 2001).

Na visão de Klymowsky et al., (2002) e de Sesemann; Broeckmann; Höfter (2014), os fatores que influenciam o desgaste do revestimento dos rolos são reunidos em três classes:

- Propriedades do revestimento dos rolos: resistência ao desgaste, construção da camada autógena de proteção.
- Propriedades físicas do minério: granulometria de alimentação, umidade, tenacidade, abrasividade, composição mineralógica, tamanho do grão.
- Operação: pressão de moagem, velocidade do rolo.

Deste modo, a previsão segura do desgaste do revestimento dos rolos requer a caracterização do minério quanto a: abrasividade, composição mineralógica, tamanho do grão, tenacidade e ductibilidade (KLYMOWSKY et al., 2002).

Após a avaliação do mecanismo de desgaste, seleciona-se o tipo de revestimento mais adequado para uma determinada aplicação.

Até meados da década de 1990, o HPGR era equipado exclusivamente com rolos revestidos com superfície dura (principalmente ligas de níquel). Neste período, o equipamento era majoritariamente aplicado à indústria cimenteira, onde a abrasividade do material é consideravelmente baixa. Com a introdução da tecnologia nos circuitos de cominuição de minérios tenazes e abrasivos, foram desenvolvidos dois tipos de revestimentos considerados inovações pelo setor (OBERHEUSER, 1996; THEISEN, 2001; SESEMANN; BROECKMANN; HÖFTER, 2014):

- Pinos cilíndricos de carbetto de tungstênio prensados ou colados em um material de base de aço endurecido e temperado. Uma vantagem desse sistema é a criação de uma camada autógena de proteção ao desgaste. A superfície dos pinos é alguns milímetros mais alta do que a superfície dos rolos, de modo que o material mais fino fica preso entre os pinos. Esta camada de material fino impede o desgaste adicional do material da base dos rolos;
- Hexadur: são placas hexagonais de material resistente, presas à superfície dos rolos por um sistema de pressão isostática quente. O aço utilizado como material de base (AISIL6) é capaz de suportar cargas mecânicas elevadas.

2.1.2. Variáveis de operação

A vazão mássica e a força específica de moagem são as principais variáveis da operação de um HPGR, sendo inclusive consideradas como parâmetros chave para o dimensionamento deste equipamento (SCHÖNERT, 1985).

2.1.2.1. Vazão mássica

A vazão mássica em um HPGR é influenciada, principalmente, pelas características do equipamento (velocidade, dimensões e revestimentos dos rolos) e

pelas propriedades do minério⁹ (SCHÖNERT; LUBJUHN, 1991). Este parâmetro é definido pela Equação 3, que é amplamente conhecida como equação da continuidade¹⁰ (SCHÖNERT, 1985; SCHÖNERT; LUBJUHN, 1990; MORRELL et al., 1997).

$$M = 3600 \cdot U \cdot L \cdot \rho_{\text{foco}} \cdot x_g \cdot c \quad (3)$$

Onde:

M : vazão mássica (t/h);

x_g : abertura de trabalho entre os rolos (m);

ρ_{foco} : densidade do floco (t/m³);

U: velocidade do material na abertura entre os rolos (m/s);

L: comprimento do rolo (m);

c : fator de correção.

Apesar da equação da continuidade ser bem consolidada na literatura, seu emprego é válido somente se a densidade do floco permanecer constante ao longo do comprimento do rolo e o efeito de bordas for tão mínimo que possa ser negligenciado (LUBJUHN; SCHÖNERT, 1993). Este feito é conseguido exclusivamente em unidades de laboratório com diâmetro inferior a 300 mm (RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017).

Uma subestimação significativa da vazão mássica simulada, pela equação da continuidade, em relação ao valor experimental, foi reportada em simulações de minério de ferro itabirítico (SALAZAR, 2014 e CAMPOS et al., 2016). Este fato foi atribuído, pelos autores, às características particulares deste minério, tais como alta

---

⁹ Densidade, umidade da alimentação, granulometria de alimentação, condições de alimentação (natural ou escalpada). A influência destas variáveis na vazão mássica serão apresentadas posteriormente neste trabalho.

¹⁰ Também denominada como modelo de *plug flow*, fluxo de pistão simples ou fluxo contínuo (DANIEL, 2002; ALVES, 2012; CAMPOS et. al. 2016).

susceptibilidade à quebra e a elevada proporção de finos, que implica em uma tendência de envio do mesmo para as bordas dos rolos (extrusão).

Nos ensaios experimentais, em unidades de laboratório e piloto, a vazão mássica é determinada Equação 4 (DANIEL, 2002).

$$M = 3,6 \cdot \frac{m_{\text{ensaio}}}{t} \quad (4)$$

Onde:

M: vazão mássica obtida experimentalmente nos ensaios HPGR (t/h);

m_{ensaio} : requerimento em massa utilizado no ensaio (kg);

t: tempo de execução do ensaio (s).

A vazão mássica experimental além de ser utilizada na calibração de modelos matemáticos, também permite, juntamente com as dimensões e velocidade dos rolos, a determinação do índice de vazão mássica específica, conhecido pelos fabricantes como M_{dot} (SCHÖNERT; LUBJUH, 1990; RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017). Este parâmetro, característico da operação de um HPGR, é normalmente assumido como similar em unidades de laboratório/piloto e industrial, o que possibilita um escalonamento direto da vazão mássica de uma unidade industrial, desde que se considere as mudanças nas proporções relativas dos produtos do centro e das bordas dos rolos (PATZELT et al., 2000; MORLEY; 2006). No entanto, este procedimento deve ser realizado com cautela, uma vez que estudos têm mostrado que a vazão mássica específica também é influenciada pelas dimensões do equipamento, principalmente, em função da granulometria de alimentação (BURCHARDT et al., 2011). Deste modo, a cominuição presente em uma unidade de menores dimensões, tal como um HPGR de laboratório, difere da experimentada por um HPGR industrial, que possui grandes dimensões, devido à considerável diferença entre as granulometrias de alimentação destes dois equipamentos¹¹. Por este motivo, os

---

¹¹ Esta particularidade, no entanto, nem sempre é válida, pois existem aplicações de unidades industriais de grandes dimensões em que são utilizadas granulometrias de alimentação compatíveis

fabricantes optam pela realização dos ensaios de escala piloto, cujos equipamentos utilizados possuem dimensões, e, conseqüentemente, limites de *top size* de alimentação, superiores aos das unidades de laboratório (RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017).

Cabe ressaltar que o ensaios em equipamentos de escala de laboratório têm apresentado resultados positivos no escalonamento de unidades industriais através da utilização de modelos matemáticos, tal como demonstrado por Daniel (2002) e Alves (2012).

Segundo Klymowsky et al. (2002), a vazão mássica específica pode ser calculada a partir da relação entre a abertura operacional e o diâmetro os rolos ($\dot{m}_{\text{flocos}}$), conforme a Equação 5, ou então, através da vazão mássica de alimentação ($\dot{m}_f$), de acordo com a Equação 6.

$$\dot{m}_{\text{flocos}} = \frac{x_g}{D} \cdot \rho_{\text{flocos}} \cdot 3,6 \quad (5)$$

Onde:

$\dot{m}_{\text{flocos}}$: vazão mássica específica obtida a partir da relação entre a abertura operacional e o diâmetro dos rolos (t.s/m³h);

x_g : abertura de trabalho entre os rolos (mm);

ρ_{flocos} : densidade do floco (t/m³);

D: diâmetro do rolo (m).

$$\dot{m}_{\text{alim.}} = \frac{M}{D \cdot L \cdot U} \quad (6)$$

Onde:

---

com a granulometria de alimentação empregada no ensaio de HPGR de escala de laboratório, como é o caso das aplicações de preparação de *pellet feed* (Klymowsky et al., 2002).

$\dot{m}_{\text{alim.}}$: vazão mássica específica obtida a partir da vazão mássica de alimentação (t.s/m³h);

M: a vazão mássica de alimentação (t/h);

L: é o comprimento dos rolos (m);

U: velocidade periférica dos rolos (m/s);

O cálculo da vazão mássica específica a partir da vazão de alimentação é o mais utilizado nas aplicações práticas. Isto porque o parâmetro de vazão mássica específica obtido pela relação entre a abertura e o diâmetro dos rolos é limitado a HPGRs de laboratório, nos quais o efeito de bordas tende a ser insignificante (RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017).

2.1.2.2. Força específica de moagem

Em um HPGR, a pressão de moagem aplicada ao leito de partículas controla a granulometria do produto. Esta variável é quantificada pela força específica de moagem (SCHÖNERT, 1985, 1988). Este parâmetro, que pode ser calculado pela Equação 7, é definido como a força aplicada na área projetada dos rolos (RASHIDI; RAJAMANI; FUERSTENAU, 2017).

$$F_{\text{sp}} = \frac{F}{(1000 \cdot L \cdot D)} \quad (7)$$

Onde:

F_{sp} : força específica de moagem (N/mm²);

F: força de moagem ou força aplicada nos rolos (kN);

L : comprimento dos rolos (m);

D: diâmetro dos rolos (m).

De acordo com Morley (2006), valores típicos de força específica de moagem em operações industriais estão entre 1 e 4,5 N/mm² para rolos pinados e de até 6 N/mm² em rolos revestidos com Hexadur.

2.1.3. Desempenho

A análise do desempenho da operação do HPGR é de fundamental importância, pois permite a definição da melhor condição de processo para atender uma determinada demanda. Este parâmetro, que é influenciado pelas características do equipamento e as propriedades do material, é avaliado com base em três aspectos: vazão mássica, consumo de energia e granulometria do produto. A seguir são apresentados os principais fatores que influenciam estas variáveis.

2.1.3.1. Parâmetros que influenciam a vazão mássica específica

O desempenho do HPGR em relação à vazão mássica é avaliado, principalmente, pelo índice de vazão mássica específica. O tipo de revestimento dos rolos, as condições e a distribuição granulométrica de alimentação, a densidade e a tenacidade do minério exercem elevada influência na vazão mássica específica. Ao mesmo tempo, este parâmetro é moderadamente influenciado pela velocidade dos rolos e pela umidade do minério e apresenta uma fraca relação com a força específica de moagem e a razão L/D (KLYMOWSKY et al., 2002).

Os rolos pinados, por proporcionarem uma maior aderência entre as partículas de minério e sua superfície, produzem uma maior vazão mássica específica do que os rolos ranhurados. Estes, por sua vez, geram vazões mássicas específicas superiores às obtidas com os rolos lisos, conforme apresentado na Figura 8 (KLYMOWSKY et al., 2002). Tal efeito no entanto é limitado a determinados tipos de minério. O quartzo, por exemplo, não apresenta aderência a superfície ranhurada, e, conseqüentemente, não está susceptível a variação da vazão mássica específica em função do tipo de revestimento utilizado, tal como observado por Schönert (1990) e Schönert e Lubjuhn (1993).

Figura 8 - Relação entre a vazão mássica específica o tipo de revestimento dos rolos

Fonte: Klymowsky et al., (2002). Adaptado pelo autor.

A vazão mássica de um HPGR é maximizada por um regime de alimentação afogado. Esta condição, denominada *Choke-feed*, é determinada pelo nível e a fluidez do material no silo de alimentação (KLYMOWSKY et al., 2002).

No decorrer da alimentação do material, um efeito de segregação pode promover o desalinhamento dos rolos, devido à diferença da distribuição granulométrica ao longo do comprimento dos mesmos e isto influencia a vazão mássica, conforme visualizado na Figura 9 (KLYMOWSKY et al., 2002). Portanto este efeito deve ser minimizado o tanto quanto possível (VAN DER MEER, 2018).

Figura 9 - Efeito da segregação durante a alimentação do material

Fonte: Van der Meer e Maphosa (2012). Adaptado pelo autor.

Como o HPGR se comporta como um dispositivo volumétrico, a densidade do minério possui uma importante influência na vazão mássica específica. Deste modo, é esperado que minérios que apresentem uma maior densidade proporcionem uma maior vazão mássica específica do que aqueles de menor densidade (KLYMOWSKY et al., 2002).

O impacto da distribuição granulométrica de alimentação na vazão mássica específica depende, essencialmente, do quão estreita ela é. Esta característica pode estar relacionada à tenacidade do minério e à configuração do circuito. Quanto maior a tenacidade o minério, menor percentual de finos gerado nas etapas de cominuição anteriores ao HPGR, menor a densidade aparente e menor a vazão mássica específica (KLYMOWSKY et al., 2002; OLIVEIRA, 2015). Uma alimentação escalpada, isto é, aquela em se retira uma determinada parcela de finos e os encaminha diretamente para o produto, apresenta uma menor vazão mássica específica do que uma alimentação natural, o que também é justificado pela menor densidade aparente em função da ausência de finos (VAN DER MEER; GRUENDKEN, 2010; ROSARIO et al., 2011; VAN DER MEER; MAPHOSA, 2012).

A vazão mássica e o índice de vazão mássica específica apresentam um comportamento antagônico em relação à velocidade dos rolos. Com um aumento da velocidade relativa dos rolos (U/D), a vazão mássica específica decresce de maneira comedida, enquanto a vazão mássica aumenta linearmente, conforme apresentado na Figura 10. No entanto, o aumento da vazão mássica não é proporcional ao aumento

da velocidade (KLYMOWSKY et al., 2002; VAN DER MEER, 2018). Esta particularidade é atribuída à representação matemática destes parâmetros definidas pelas Equações 3 e 6, descritas na seção 2.1.2.1.

Figura 10 - Relação entre a vazão mássica específica, vazão mássica e a velocidade dos rolos

Fonte: Klymowsky et al., (2002). Adaptado pelo autor.

A influência da umidade da alimentação no desempenho de um HPGR varia consideravelmente em função da natureza do material e das características do equipamento (FUERSTENAU; ABOUZEID, 1998; KLYMOWSKY et al., 2002). Schönert (1988), Fuerstenau e Abouzeid (1998), Saramak e Kleiv (2013) verificaram que um excesso de umidade implica em uma diminuição da abertura operacional entre os rolos e, conseqüentemente, em uma redução da vazão mássica específica. Este fato é justificado pela extrusão do material no leito em decorrência da redução da fricção entre partículas devido à lubrificação de suas superfícies pela água (FUERSTENAU; ABOUZEID, 1998). O fenômeno de extrusão é principalmente observado em aplicações de *pellet feed*, onde os níveis de umidade chegam a 13% (VAN DER MEER, 2015; CAMPOS et al., 2017). Em contrapartida, um material seco impede a formação de um leito coeso na zona de compressão, o que também promove uma redução da abertura operacional entre os rolos e da vazão mássica específica (SARAMAK; KLEIV, 2013).

Como o leito de partículas é submetido a um processo de compressão no qual as partículas são compactadas em níveis de até 85% da densidade real do material, é notória a influência da umidade de alimentação na formação dos flocos e na consistência dos mesmos (SCHÖNERT, 1988; SARMAK; KLEIV, 2013). Deste modo, esta variável pode ser considerada um problema sob o ponto de vista operacional, pois um floco muito resistente pode exigir equipamentos auxiliares para desaglomeração, ou então aumentar, excessivamente, a carga circulante, o que poderia implicar em uma diminuição da vazão mássica do circuito e aumentar o consumo de energia (VAN DER MEER; GRUENDKEN, 2010; SARMAK; KLEIV, 2013).

2.1.3.2. Parâmetros que influenciam a granulometria do produto

O produto obtido em um HPGR tem sua granulometria definida em função das propriedades do minério e das condições operacionais do equipamento. A força específica de moagem exerce um papel fundamental na redução de tamanho (SCHÖNERT, 1985, 1988). A Figura 11 apresenta a fração passante em 1 mm em função da força específica de moagem aplicada.

Figura 11 - Influência da força específica de moagem na granulometria do produto

Fonte: Klymowsky et al., (2002). Adaptado pelo autor.

É importante destacar que a força específica de moagem influencia a granulometria do produto até um certo limite, a partir do qual não se observa nenhum ganho na redução de tamanho com um aumento da energia aplicada (SCHONERT, 1988). Tal limite, definido por Tondo (1997) como ponto de saturação de energia, representa a máxima quantidade de energia que pode ser efetivamente aplicada na fragmentação das partículas.

De acordo com Daniel (2002), a determinação da distribuição granulométrica do produto que representa o ponto de saturação de energia é de fundamental importância para definir a condição de operação que promova os maiores ganhos de redução de tamanho com um mínimo consumo de energia.

Ainda que a influência da força específica de moagem seja preponderante na distribuição granulométrica do produto, a abertura operacional entre os rolos impacta a faixa grosseira desta distribuição. Isto se justifica pelo mecanismo de quebra de partículas individuais presente na zonas de pré-britagem e de efeito de bordas (KLYMOWSKY et al., 2002).

Fuerstenau e Abouzeid (1998) e Saramak e Kleiv (2013) demonstraram que a granulometria do produto também é influenciada pela umidade do material. Segundo Saramak e Kleiv (2013), o excesso ou a ausência de umidade impede a formação de um leito coeso de partículas, o que influencia negativamente na aplicação da energia e, conseqüentemente, na cominuição. A partir desta premissa o autor propôs uma relação entre a umidade do material e o efeito de cominuição¹², conforme ilustrado na Figura 12. Tal relação depende das características do material e das condições de operação.

---

¹² Saramak e Kleiv (2013) definem o efeito de cominuição como a relação de redução do tamanho das partículas obtida.

Figura 12 - Relação entre a umidade do material de alimentação e o efeito de cominuição

Fonte: Saramak e Kleiv (2013). Adaptado pelo autor.

2.1.3.3. Parâmetros que influenciam a energia específica de cominuição

O entendimento dos parâmetros que governam a energia específica de cominuição em um HPGR é de fundamental importância para seu dimensionamento, controle e otimização. Neste sentido, verifica-se uma relação linear entre a energia específica de cominuição e força específica de moagem (SCHÖNERT, 1988; PATZELT et al., 2000). Esta relação é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Relação entre a energia específica e a força específica de moagem

Fonte: Klymowsky et al., (2002). Adaptado pelo autor.

Frente ao exposto, observa-se que a avaliação das relações entre as diversas variáveis presentes em um processo de cominuição via HPGR é indispensável para que se obtenha êxito no desempenho da operação e deve ser considerada de maneira criteriosa nos estudos de dimensionamento.

2.1.4. Modelagem matemática

Diversos modelos matemáticos de HPGR foram desenvolvidos nos últimos anos com o objetivo de prever a operação do equipamento para fins de escalonamento e otimização de processos, dentre os quais pode-se citar os modelos de: Austin *et. al.* (1993¹³ apud RASHIDI, RAJAMANI E FUERSTENAU, 2017); Liu e Schönert (1996), Klymowsky e Liu (1997), Morrell *et al.*, (1997); Torres e Casali (2009), Alves (2012), Dundar, Benzer e Aydogan (2013), Ensault, Zhou e Heitzmann (2015). No presente estudo, é utilizado o modelo de Morrell *et al.* (1997), empregado no simulador de processos *JKSimMet*®, para previsão do desempenho do HPGR em circuito fechado e para o escalonamento da unidade industrial.

2.1.4.1. Modelo de Morrell *et al.* (1997)

O modelo de Morrell *et al.*, (1997) inclui a previsão da granulometria do produto, da vazão mássica e do consumo de potência, conforme descrito a seguir. Esta metodologia baseia-se na energia específica de cominuição experimental obtida em ensaios de HPGR em unidades de laboratório e piloto e não requer a utilização da força específica de moagem (DANIEL, 2002). Tal fato é justificado pela relação linear entre estes dois parâmetros, conforme descrito anteriormente.

---

¹³ AUSTIN, L. G.; WELLER, R. LIM, I. L. Phenomenological modelling of high pressure grinding rolls. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 28., 1993, Sydney 1993. **Proceedings...** Sydney: Sydney, 1993. p. 87-96.

a) previsão da granulometria do produto

O modelo de Morrell et al. (1997) para previsão da distribuição granulométrica do produto do HPGR simulado é pautado em três pressupostos ou zonas de cominuição: zona de pré-britagem, zona de compressão e zona de efeito de bordas. As duas primeiras regiões foram descritas anteriormente.

A zona de efeito de bordas dos rolos é caracterizada, assim como a zona de pré-moagem, pelo mecanismo de quebra de partículas individuais. Esta particularidade é consequência do efeito de bordas já explicado anteriormente (MORRELL et al., 1997)

De acordo com Morrell et al. (1997), a interface que delimita as zonas de compressão e de efeito de bordas é definida pela fração do material da alimentação que é submetida à cominuição nas bordas dos rolos. Tal variável é representada pela Equação 8.

$$f = \gamma \cdot \frac{x_g}{L} \quad (8)$$

Onde:

f: é a fração do material de alimentação que é cominuído na zona de borda;

γ : é o fator de divisão específico do minério;

x_g : abertura operacional entre os rolos (m).

L: é o comprimento dos rolos (m).

As três zonas que constituem o processo de cominuição de um HPGR são modeladas isoladamente e, posteriormente agrupadas em um resultado final conforme exemplificado pela Figura 14.

Figura 14 - Modelo de Morrell et al. (1997) para distribuição do tamanho da partícula

Fonte: Daniel (2002). Adaptado pelo autor.

b) previsão da vazão mássica

Para a previsão da vazão mássica do HPGR simulado, o Modelo de Morrell et al. (1997) utiliza a versão padrão de fluxo livre, descrita pela equação da continuidade (Equação 3) apresentada no 2.1.2.1 deste estudo.

c) previsão da potência

Segundo Daniel (2002) no modelo de Morrell et al. (1997) o consumo de potência é calculado diretamente pelo produto entre a energia específica de cominuição (E_{cs}) medida experimentalmente em ensaios de HPGR¹⁴ e a vazão mássica do HPGR simulado (t/h).

A energia específica de cominuição experimental - E_{cs} (kWh/t) é calculada pela Equação 9.

---

¹⁴ Em escala de laboratório ou piloto.

$$E_{cs} = \frac{\text{Pot.moagem}}{M_{medida}} = \frac{(\text{Pot.vazio} + \text{Pot.eixo})}{M_{medida}} \quad (9)$$

Onde:

M_{medida} : vazão mássica medida (t/h);

Pot.moagem : potência de moagem (kW);

Pot.vazio : potência consumida em vazio (kW);

Pot.eixo : potência consumida no eixo dos rolos (kW).

A potência consumida em vazio corresponde à energia consumida pelo equipamento sem ser alimentado. A potência consumida no eixo dos rolos é calculada a partir do torque medido experimentalmente e da velocidade circunferencial dos mesmos conforme a Equação 10 (DANIEL, 2002).

$$\text{Pot}_{eixo} = \frac{2 \cdot \tau \cdot U}{D} \quad (10)$$

Onde:

τ : torque no eixo dos rolos (N.m);

U : velocidade circunferencial dos rolos (m/s);

D : diâmetro dos rolos (m).

d) Calibração do modelo

Os dados requeridos pelo modelo de Morrell et al. (1997) são categorizados em cinco grupos conforme apresentado na Tabela 2 (DANIEL, 2002).

Tabela 2 - Dados de entrada e saída do modelo de Morrell *et al.* (1997)

Grupos	Categoria dos dados	Dados ou parâmetros do modelo (medidos ou calculados)
1	Variáveis de entrada medidas	Massa da amostra Diâmetro, comprimento e velocidade do rolo Densidade do leito compactado (densidade do floco) Distribuição granulométrica da alimentação Função quebra (partículas individuais) - DWT Função quebra (leito comprimido) - CLP/DWT _{extrapolada}
2	Variáveis de saída medidas	Abertura operacional entre os rolos Espessura dos flocos Distribuição granulométrica do produto (medida) Tempo de processamento em batelada Pressão de operação Consumo de potência
3	Variáveis de saída calculadas	Vazão mássica medida Vazão mássica calculada Energia específica de cominuição Força específica de moagem Abertura crítica entre os rolos Distribuição granulométrica do produto calculada
4	Parâmetros padrão (<i>default</i>) fixos do modelo	Parâmetros da função de quebra para as zonas de pré-britagem e de efeito de bordas (t_{10p} e t_{10e}) Parâmetros do modelo para zona de pré-britagem (K_{1p} , K_{2p} , K_{3p}) Parâmetros do modelo para zona de efeito de bordas (K_{1e} , K_{2e} , K_{3e}) Parâmetros do modelo para zona de compressão (K_{1h} , K_{2h} , K_{3h}) Fator de divisão (γ) Coeficiente de potência na zona de bordas (K_p bordas)
5	Parâmetros críticos do modelo	Coeficiente de potência na zona de compressão (K_p compressão) Parâmetro da função de quebra na zona de compressão (t_{10h})

Fonte: Daniel (2002). Adaptado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 2, alguns dos parâmetros relacionados ao modelo podem ser fixos para propósito de simplificação do modelo (DANIEL, 2002; SALAZAR, 2014). De modo que, segundo Daniel (2002):

- K_{2p} equivale a abertura crítica entre os rolos (x_c);
- K_{2e} equivale a abertura operacional entre os rolos (x_g);
- K_{1e} e K_{1p} equivalem a uma fração de K_{2e} e K_{2p} (geralmente 0,64);
- K_{3e} e K_{3p} são fixos em 0,9;
- t_{10p} e t_{10e} são fixos em 11,43.

De acordo com Daniel (2002), as simplificações anteriormente citadas são provenientes de um extensivo trabalho experimental de Tondo (1997).

A calibração do modelo requer a entrada de dados provenientes de um ensaio de HPGR em escala piloto ou de laboratório (vazão mássica, granulometrias de alimentação e produto, energia específica de cominuição, as dimensões, abertura operacional e velocidade dos rolos) e dados provenientes de ensaios de caracterização física do material (funções quebra¹⁵, valores de energia específica de cominuição associados às funções de quebra e as densidades real e aparente).

O procedimento de calibração do modelo consiste em ajustar uma curva à distribuição granulométrica do produto determinada experimentalmente, de modo a se obter os parâmetros críticos do modelo, apresentados na Tabela 2. Estes, por sua vez, são utilizados para simular a distribuição granulométrica do produto, a vazão mássica e a potência consumida por uma unidade industrial operando com energia específica de cominuição similar à obtida experimentalmente (DANIEL, 2002; SALAZAR, 2014).

De acordo com Daniel (2002) quatro parâmetros podem ser ajustados no modelo:

- K_{1h} : parâmetro que pode variar em função do tipo de material, sendo suscetível ao ajuste quando a calibração produz um erro elevado¹⁶.
- t_{10h} : parâmetro que, em geral, situa-se numericamente em uma faixa entre 30 a 40%.
- Coeficiente de potência na zona de compressão (K_p compressão): parâmetro que representa a utilização da potência aplicada à redução de tamanho. Um elevado valor deste parâmetro indica uma pobre utilização de energia.
- Fator de divisão (γ): parâmetro que determina a fração de material que é cominuída nas bordas dos rolos, conforme demonstrado na Equação 8. Para fins de calibração e simulação, este valor deve ser ajustado de maneira que se obtenha 10% do material alimentado sendo cominuído nas bordas dos rolos. Isso

---

¹⁵ Tradução do termo em inglês *appearance function*. Neste trabalho utilizou-se o termo função quebra tendo como referência o estudo de Salazar (2014).

¹⁶ Em seu estudo Daniel (2002) usou um valor fixo (*default*) de 0 para este parâmetro.

é necessário para prevenir que excessivas quantidades de material na zona de efeito de bordas influenciem a previsão da granulometria do produto. Segundo o autor a Equação 8 não representa fielmente o efeito de bordas, uma vez que o mesmo ocorre independentemente das condições de processo e dimensões do equipamento, sendo uma consequência da abertura do leito comprimido para a atmosfera nas bordas dos rolos.

As funções quebra (*appearance functions*), requeridas pelo modelo para representar a quebra de partículas individuais (característica das zonas de pré-bitragem e de efeito de bordas) e a quebra por compressão de leitos (característica da zona de compressão) são, usualmente, obtidas por ensaios de *drop weight* (DWT) e de compressão de leito de partículas¹⁷ (CLP), respectivamente.

A entrada dos dados da função quebra para quebra de partículas individuais no *software JKSimMet*® é similar à utilizada pelo modelo de britadores de Whiten, utilizando-se valores de t_{10} iguais a 10, 20 e 30%, conforme apresentado na Tabela 3. Já na função de quebra de compressão de leito são utilizados valores de t_{10} iguais a 10, 30 e 50% (SALAZAR, 2014).

Tabela 3 - Valores *default* da função quebra para quebra de partículas individuais utilizado no modelo de britadores de Whiten

t_{10} (%)	Passante na malha 1/n do tamanho original ¹⁸ das partículas - t_n (%)				
	t_{75}	t_{50}	t_{25}	t_4	t_2
10	2,92	3,89	5,97	20,74	51,58
20	5,54	7,46	11,73	40,16	76,04
30	8,21	10,97	17,26	58,35	88,35

Fonte: Napier-Munn et al. (1999). Adaptado pelo autor.

Adicionalmente são determinados os valores de energia específica associados às funções quebra, tal como demonstrado na Tabela 4.

¹⁷ Em inglês este ensaio é denominado de *Piston Die Test*. No presente trabalho utilizou-se o termo compressão de leito de partículas, que é a nomenclatura utilizada por Oliveira (2015).

¹⁸ Representa o diâmetro geométrico médio das cinco faixas granulométricas utilizadas no ensaio *drop weight*: -63 +53; -45 +37,5; -31,5 +26,5; -22,4 +19; -16 +13,2 mm.

Tabela 4 - Valores de E_{cs} (kWh/t) associados a função quebra

t_{10} (%)	Tamanho original ¹⁹ (mm)		
	14,5	20,6	28,9
10	0,213	0,167	0,135
20	0,471	0,362	0,293
30	0,801	0,596	0,483

Fonte: Napier-Munn et al., (1999). Adaptado pelo autor.

De acordo com Daniel (2002) a função quebra para quebra de partículas individuais, também pode ser utilizada para representar a quebra por compressão de leitos, com a extrapolação destes dados até um t_{10} igual a 50%. Esta abordagem é fundamentada no estudo de Tondo (1997), cuja conclusão foi que a função quebra obtida pelo leito comprimido não diferia tanto da determinada pelo ensaio *drop weight*. Esta simplificação é particularmente útil para estudos de pré-viabilidade, nos quais as informações geralmente são restritas (SALAZAR, 2014). Adicionalmente, de acordo com Daniel (2002), podem ser utilizados valores padrão (*default*) de energia específica de cominuição associados à função quebra para quebra por compressão de leitos. Segundo o autor, as possíveis variações nestes valores não impactariam o desempenho do modelo, pois estas diferenças seriam absorvidas pelo coeficiente de compressão (K_p).

Além da obtenção das propriedades do material supracitadas, é de fundamental importância a determinação da abertura operacional entre os rolos e da densidade do leito compactado no decorrer da realização do ensaio de HPGR.

A abertura operacional entre os rolos pode ser determinada, diretamente, por sensores de deslocamento durante os ensaios de HPGR, ou, indiretamente, pela medição da espessura do floco gerado no produto. O último procedimento, no entanto, pode acumular erros provenientes do relaxamento do floco na zona de descompressão (DANIEL, 2002).

A densidade do leito compactado é representada pela densidade do floco, que, de acordo com Daniel (2002), possui um valor usualmente entre 80 e 85% da densidade real do material.

¹⁹ Representa o diâmetro geométrico médio de três faixas granulométricas utilizadas no ensaio *drop weight*: -31,5 +26,5; -22,4 +19; -16 +13,2 mm.

Para o escalonamento do HPGR, o modelo assume que a razão entre abertura operacional e diâmetro dos rolos (D/x_g) deve ser constante (Equação 11), o que implica, em uma dependência da abertura operacional, vazão mássica e consumo de potência do equipamento industrial em relação à medição da abertura operacional do ensaio piloto ou de laboratório (Daniel, 2002). Portanto, o escalonamento do HPGR é representado pela Equação 12.

$$\frac{D_{\text{(escala piloto/laboratório)}}}{x_{g\text{(escala piloto/laboratório)}}} = \frac{D_{\text{(escala industrial)}}}{x_{g\text{(escala industrial)}}} \quad (11)$$

$$x_{g\text{(escala industrial)}} = \frac{x_{g\text{(escala piloto/laboratório)}} \cdot D_{\text{(escala industrial)}}}{D_{\text{(escala piloto/laboratório)}}} \quad (12)$$

A razão constante entre a abertura operacional e o diâmetro dos rolos, durante o escalonamento HPGR, é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Procedimento de escalonamento que assume a razão diâmetro dos rolos/ abertura operacional entre os rolos como constante

Fonte: Daniel (2002). Adaptado pelo autor.

Daniel (2002) ressalta a dificuldade de se escalonar equipamentos de grande diâmetro a partir de ensaios em unidades de laboratório com revestimentos de

superfície pinada. Segundo o autor, o tamanho relativo do pino da unidade de laboratório pode estar superdimensionado e, conseqüentemente, influenciar na medição da abertura operacional, o que impactaria na previsão da vazão mássica e do consumo de potência da unidade industrial. Salazar (2014) analisa que este efeito pode ser minimizado através da execução de ensaios em escala piloto.

2.1.5. Fabricantes e suas metodologias de ensaios

As companhias alemãs Polysius (Thyssenkrupp), KHD e Koppers foram as pioneiras na fabricação de HPGRs logo após a negociação da patente do processo de cominuição interparticular com Professor Klaus Schönert (DANIEL, 2002).

Posteriormente, especialmente após os anos 2000, novos fabricantes entraram no mercado, dentre os quais destacam-se: a Metso, FLSmidth, Citic, MBE Coal & Minerals Technology, Weir e a Outotec. Os dois últimos através de acordo de tecnologia com a KHD e a Köppern, respectivamente.

Desde a primeira produção comercial do HPGR, em 1985, até meados da década de 2000, os projetos desenvolvidos pelos diferentes fabricantes eram relativamente similares, com pequenas alterações na relação L/D. O desenvolvimento tecnológico era restrito ao tipo de revestimento dos rolos.

A Metso introduziu no mercado um conceito de HPGR, o HRC™, que trouxe importantes inovações, que são, inclusive, patenteadas (OLIVEIRA, 2015):

- *Arch frame*: estrutura em arco, caracterizada por um mecanismo de conexão entre os mancais através de um tubo de torção. Esta particularidade mantém o alinhamento dos rolos e, conseqüentemente, elimina as paradas pelo desalinhamento destes componentes;
- Posicionamento dos pistões hidráulicos acima da região onde estão instalados os rolos. Conforme descrito anteriormente, esta particularidade, juntamente com a estrutura *Arch frame* impacta positivamente no projeto do sistema hidráulico de pressão, uma vez que implica na redução do tamanho e do número de cilindros hidráulicos;

- Flanges instalados nas extremidades laterais do rolo fixo, que melhoram a distribuição da pressão ao longo do rolo, reduzindo, assim, o efeito de bordas.

A Figura 16 ilustra o HRC™ da Metso.

Figura 16 - principais componentes do HRC™

Fonte: Oliveira (2015).

O HRC™ é comercializado em diferentes tamanhos, visando atender distintas aplicações da indústria de minerais metálicos e não metálicos, bem como outros tipos de materiais (OLIVEIRA, 2015). Atualmente, são 27 unidades instaladas em todo o Mundo com destaque para operação de Freeport-McMoRan Morenci (minério de cobre) no Arizona (EUA), onde foi comissionado o maior HPGR já fabricado, o HRC™ 3000 (HERMAN, 2015; ITO, 2017²⁰).

Outra importante contribuição da Metso foi a difusão do HPGR em operações de menor porte, na cominuição de minérios e materiais de baixo valor agregado. Este fabricante, ao identificar um potencial de utilização do HPGR no setor de minerais industriais, rapidamente, desenvolveu uma linha específica para atender este segmento, denominada de HRC™ *Aggregates*.

Inicialmente, o modelo HRC™ 800 foi aplicado em diversos circuitos de cominuição de agregados para construção civil e nas indústrias cerâmica e

---

²⁰ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

agromineral. Em seguida, desenvolveu-se um equipamento de baixo custo, o HRC™ 8, que é ainda mais atrativo do que o HRC™ 800 para as aplicações em circuitos de cominuição de minérios e materiais de baixo valor agregado. As especificações técnicas destes equipamentos são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações dos equipamentos da linha HRC™ *aggregates*

	HRC™ 800	HRC™ 8
Peso da máquina (kg)	16000	11000
Potência instalada (hp)	2 x 150	2 x 100
Diâmetro e comprimento dos rolos - D x L (mm)	800 x 500	800 x 500
Limite de força específica de moagem (N/mm²)	4,5	2,5
Velocidade nominal com 60 Hz de frequência (rpm)	32	32
Velocidade nominal periférica dos rolos (m/s)	1,21	1,21
Vazão mássica nominal para minério com densidade de 1,5 t/m³ (t/h)	100	100
Limite de <i>top size</i> de alimentação (mm)	32	32
Limite de desgaste do diâmetro do rolo (mm)	680	680
Dimensões externas comprimento x largura x altura (m)	2,6 x 4,3 x 2,5	2,4 x 3,5 x 1,6

Fonte: ITO (2017)²¹. Adaptado pelo autor.

Os principais diferenciais do HRC™ 8 em relação ao HRC™ 800 são (ITO, 2017²²):

- Menor peso;
- Menor potência instalada;
- Menor limite máximo de força específica de moagem;
- Menores dimensões externas;
- Menor custo dos componentes mecânicos;
- Menor custo de investimento (representa 30 a 35% do custo do HRC™ 800).

²¹ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

²² ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

Nos últimos anos, houve uma expressiva expansão do mercado da linha HRC™ *Aggregates*, sobretudo no Brasil, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Aplicações de HPGR em minerais industriais

	Minérios/ materiais	Brasil Unidades	México Unidades	Chile Unidades	Costa Rica Unidades	Aplicação comercial
HRC™ 800	Basalto	2	1	-	-	Areia manufaturada e brita
	Calcário	2	1	-	1	Areia manufaturada e corretivo agrícola
	Granito	1	-	-	-	Areia manufaturada e finos para cerâmica
	Gnaiss	2	-	-	-	Areia manufaturada e brita
	Seixos rolados	1	-	-	1	Areia manufaturada e brita
	Silicato	-	-	1	-	Areia manufaturada e brita
HRC™ 8	Seixos rolados	1	-	-	-	Areia manufaturada e brita

Fonte: Ito (2017)²³. Adaptado pelo autor.

Diante do exposto acima, observa-se que as aplicações do HPGR vêm superando os limites das indústrias que tratam minérios de alto valor agregado, ou que possuem elevadas receitas. Isto demonstra a quebra do paradigma de que este equipamento, devido ao seu elevado custo, é restrito a empreendimentos de grande porte.

Os fabricantes supracitados desenvolveram metodologias de trabalho para a determinação dos parâmetros chave da operação do HPGR, com o objetivo de dimensionamento das unidades industriais. Estes procedimentos são relativamente similares e compreendem a realização de ensaios em escala de bancada ou piloto. A Tabela 7 apresenta as características dos equipamentos utilizados nos ensaios de HPGR realizados pelos diferentes fabricantes, bem como as faixas de dimensões, vazão mássica e potência instalada das unidades comercializadas por eles.

²³ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

Tabela 7- Relação dos principais fabricantes: unidades comerciais e ensaios de HPGR

Fabricante	HPGR comerciais					Ensaio de HPGR			Referência
	D ¹ (m)	L ² (m)	L/D ³	Vazão mássica (t/h)*	Potência instalada (kW)	Equipamento (D x L- m)	Req. de massa ⁴ (kg)	Parâmetros de operação	
Thyssen_krupp	0,95	0,65	0,50	Máx. 3000	2 x 220	Labwall (0,25 x 0,10)	20-30	M _{dot} , E _{cs} Granulometria do produto	Klymow_sky et al. (2002), Thyssen_krupp (2018)
	-	-	-		-	Regro (0,71 x 0,21)	70-150 (C.A. ⁵)		
	3,00	2,00	0,83		2 x 5000	Magro (0,95 x 0,35)	-		
KHD Humboldt Wedag	1,00	0,40	0,40	-	2 x 140	RP 80/25 (0,80 x 0,25)		M _{dot} , E _{cs} e Granulometria do produto	KHD Humboldt Wedag (2012; 200?)
	-	-	-		-	RP 80/12 (0,80 x 0,12)			
Weir	0,80	0,25		200	-	RP 80/25 (0,8 X 0,25)	-	M _{dot} , E _{cs} e Granulometria do produto	Weir (2016), van der Meer (2018)
	-	-	-	-		RP 90/25 (0,9 x 0,25)			
Metso	0,80	0,50	0,59	72	2 x 110	D1000™	10 - 15 (C. A.)	Granulometria do produto	Oliveira (2015), Ito (2017) ²⁴
	-	-	-	-	-	HRC™ 300 (0,30 x 0,15)	200 (C.A.)	M _{dot} , E _{cs} e Granulometria do produto	
	3,00	2,00	0,75	5400	2 x 5700		1000 (C.F. ⁶)		
Köppern	1,00	0,25	0,25	50	2 x 132	Köppern (1,0 x 0,25)	150 -	M _{dot} , E _{cs} e Granulometria do produto	Köppern (2018)
	-	-	-	-	-		200 (C.A.)		
	2,54	2,31	0,91	4700	2 x 3000		600 -		
FLSmidth	0,50	0,30	0,44	35	-	F150 (0,5 x 0,3)	-	M _{dot} , E _{cs} e Granulometria do produto	FLSmidth (2016)
	-	-	-	-					
Citic Heavy Industries	3,00	2,00	0,69	4500					
	1,20	0,50	0,42	180	2 x 355	Citic	-	-	Citic Heavy Industries (2015)
-	-	-	-	-	-				
	2,40	1,80	1,00	2900	2 x 3150				

¹ Diâmetro dos rolos, ² comprimento dos rolos, ³ razão entre o comprimento e o diâmetro dos rolos, ⁴ requerimento de massa para realização do ensaio, ⁵ circuito aberto de cominuição; ⁶ circuito fechado de cominuição.

* Valores típicos variam conforme a aplicação, ** previsto pelo fabricante, não comissionado.

Obs.: A MBE Coal & Minerals Technology também possui uma linha de HPGR, denominada *Rollstar*, entretanto seus equipamentos são projetados de maneira exclusiva segundo as demandas específicas do cliente. As vazões mássicas típicas de seus equipamentos são de 50 a 3000 t/h (MBE COAL & MINERALS TECHNOLOGY, 2019).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em geral, as campanhas experimentais compreendem a realização de ensaios em circuito aberto e fechado, variando-se: pressão, umidade, granulometria e

²⁴ ITO, W.T. **HRC^{TM} - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

condições de alimentação (natural ou truncada) e a velocidade dos rolos (KLYMOWSKY et al., 2002; OLIVEIRA, 2015).

Ensaio adicionais também são conduzidos por alguns fabricantes para avaliar o desgaste dos revestimentos dos rolos, a resistência/ desaglomeração dos flocos e a potencial redução de consumo energético nas operações subsequentes.

O desgaste do revestimento dos rolos é caracterizado pelos fabricantes a partir de diferentes metodologias.

A Thyssenkrupp utiliza um HPGR de escala de laboratório, denominado de Atwal. Este equipamento é constituído por rolos de 100 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento (PATZELT et al., 2000). O procedimento consiste na realização de um ensaio a uma força específica de moagem de 4 N/mm². O índice de desgaste é determinado pela relação entre a perda de massa dos rolos e a quantidade de material processada no ensaio (KLYMOWSKY et al., 2002). Nesta metodologia são requeridos 100 kg de material abaixo de 3,35 mm (PATZELT et al., 2000).

A KHD utiliza um equipamento constituído, essencialmente, por um único rolo e por uma barra metálica padrão, que é substituída a cada ensaio. Determina-se o índice de desgaste a partir da perda de massa da barra metálica. Neste procedimento são requeridos 30 kg de material entre 1,18 e 0,5 mm (HUMBOLDT WEDAG COAL E MINERALS TECHNOLOGY GMBH, 2009).

A Metso caracteriza o desgaste dos revestimentos dos rolos a partir da realização dos ensaios de abrasividade de Bond (AI de Bond) e de LCPC. O procedimento deste último é descrito detalhadamente pela Norma francesa P18-579 (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2013).

Neste estudo, o potencial de desgaste do revestimento dos rolos foi avaliado a partir do ensaio de abrasividade de Bond (AI de Bond).

Em relação à avaliação da resistência e da desaglomeração dos flocos gerados no produto do HPGR, a KHD, Weir, Köppern utilizam a mesma metodologia baseada nos ensaios de: resistência do floco (*flake strenght test*), queda (*drop test*) e peneiramento a úmido (HUMBOLDT WEDAG COAL E MINERALS TECHNOLOGY GMBH, 2009; BERGERMAN, 2009a; VAN DER MEER, 2018). A Thyssenkrupp analisa qualitativamente estes parâmetros com base no peneiramento do ensaio de

HPGR em circuito fechado (POLYSIUS, 2009). A Metso não possui nenhuma metodologia para a caracterização destas variáveis (ITO, 2017²⁵).

O ensaio de resistência do floco, compreende a desintegração dos flocos em moinho tubular utilizando-se corpos moedores de borracha. Ao final deste procedimento, o produto é peneirado em uma malha de 1 mm, e partir deste resultado, define-se o índice de resistência do floco (*tumbling factor*). Este parâmetro varia entre 0 e 100%, em que 0% indica flocos de maior resistência e 100%, a desintegração total dos mesmos (HUMBOLDT WEDAG COAL E MINERALS TECHNOLOGY GMBH, 2009; BERGERMAN, 2009a).

O ensaio de queda, consiste em simular a desaglomeração dos flocos durante o seu manuseio, através da queda do produto do HPGR a partir de uma altura padrão. Neste procedimento utiliza-se um aparato constituído por uma calha (*chute*), um alimentador vibratório e um tubo vertical. A calha contém barras horizontais fixas que auxiliam na dispersão do fluxo inicial e na fragmentação de grandes aglomerados (HUMBOLDT WEDAG COAL E MINERALS TECHNOLOGY GMBH, 2009).

No peneiramento a úmido avalia-se a desaglomeração do floco com base na fração residual de finos no oversize da peneira. O resultado é definido como fator de peneiramento a úmido (*wet screening factor*) que também varia em uma escala de 0 a 100%. Novamente, 0% representa os flocos mais resistentes e 100% a desaglomeração total destes agregados de partículas (HUMBOLDT WEDAG COAL E MINERALS TECHNOLOGY GMBH, 2009).

Quanto à avaliação do potencial de redução do consumo de energia nas operações subsequentes, conforme mencionado anteriormente, os fabricantes, em geral, conduzem o ensaio de moabilidade de Bond (WI) na alimentação e no produto do HPGR e confrontam seus resultados. Deste modo, caso o WI do produto seja inferior ao da alimentação é possível inferir que o HPGR pode promover redução do consumo energético da operação de moagem subsequente (HUMBOLDT WEDAG COAL E MINERALS TECHNOLOGY GMBH, 2009; BERGERMAN, 2009a; POLYSIUS, 2009).

---

²⁵ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

2.2. CIRCUITO DE COMINUIÇÃO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO ELETROFUNDIDO DA ELFUSA GERAL DE ELETROFUSÃO

A Elfusa Geral de Eletrofusão é uma empresa de transformação mineral que produz uma ampla linha de óxidos fundidos que são utilizados na indústria cerâmica, abrasivos e refratários. Estes produtos resultam da eletrofusão de bauxita, ou alumina calcinada, com outros elementos aditivos.

A produção do óxido de alumínio eletrofundido compreende a fusão da bauxita com coque de petróleo, cavaco de ferro e outros elementos aditivos em fornos elétricos a arco²⁶. Ao término deste processo, o material é resfriado à temperatura ambiente, formando grandes lingotes sólidos. Estes, por sua vez, são submetidos à etapas sucessivas de cominuição e em seguida, à separação magnética, cujo objetivo é eliminar o ferro deletério do óxido de alumínio eletrofundido. Na sequência, o material segue para classificação final (peneiramento comercial), onde é separado conforme as especificações granulométricas exigidas pelos clientes (JACKSON; DAVIM, 2011; PASSOS, 2014). A Figura 17 ilustra o fluxograma geral de produção do óxido de alumínio eletrofundido, desde o recebimento da bauxita até a embalagem do produto final.

---

²⁶ Mais detalhes sobre o processo de eletrofusão podem ser consultados em Jackson e Davim (2011) e Passos (2014).

Figura 17- Fluxograma geral da produção do óxido de alumínio eletrofundido

Fonte: Elfusa²⁷ (2006 apud MENEGATTO, 2014). Adaptado pelo autor.

Um óxido de alumínio eletrofundido é constituído essencialmente por 93 a 99 % de óxido de alumínio e de 1 a 7% de impurezas. O teor dessas impurezas define o tipo de aplicação comercial. A principal característica influenciada pelas impurezas é a friabilidade do material (JACKSON; DAVIM, 2011; PASSOS, 2014).

O processo de cominuição do óxido de alumínio eletrofundido inicia-se com a redução de tamanho dos lingotes sólidos produzidos da eletrofusão através da utilização de rompedores hidráulicos. Os fragmentos produzidos nesta etapa são encaminhados para uma linha de britagem estagiada (britagem primária, secundária e terciária) seguida por dois circuitos paralelos de britadores de rolos, com um *layout* complexo que impõe desafios a sua operação e otimização. Neste estudo, estes circuitos são denominados BT e TB, em virtude da nomenclatura dos materiais amostrados. A Figura 18 ilustra este circuito.

²⁷ ELFUSA GERAL DE ELETROFUSÃO. **Produtos**. São João da Boa Vista. 2006.

Figura 18 - Rota tradicional de cominuição de óxido de alumínio eletrofundido

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados referentes aos equipamentos que constituem o circuito de cominuição de óxido de alumínio eletrofundido da Elfusa são apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Equipamentos da britagem estagiada

Etapa de britagem	Número de equipamentos	Modelo	Fabricante	Configuração do circuito
Primária	1	Mandíbulas 10060	Faço	Aberto
Secundária	1	Mandíbulas 9026	Faço	Aberto
Terciária	3	Mandíbulas 8013	Faço	Fechado
		Mandíbulas 8013	Faço	Fechado
		Cônico HP 100	Metso	Fechado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Equipamentos dos circuitos de britadores de rolos da Elfusa

Britadores de rolos	
Número de equipamentos	13
Diâmetro dos rolos (m)	0,5
Comprimento dos rolos (m)	0,4
Revestimento dos rolos	Lisos
Potência (hp)	25
Peneiras vibratórias circulares	
Unidades	14
Diâmetros das peneiras (m)	1,2 e 1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 19 ilustra os britadores de rolos e as peneiras circulares do circuito de cominuição da Elfusa.

Figura 19 - Britadores de rolos (A) e peneiras circulares (B)

Fonte: Menegatto (2014)

Apesar do número de equipamentos descrito na Tabela 9, a quantidade dos equipamentos em uso é comumente alterada²⁸, assim como as condições de operação e a disposição dos fluxos, isto é, o *layout* destes circuitos é frequentemente modificado em função das especificações de granulometria do produto requeridas pelos clientes.

²⁸ Mediante a ativação e o desligamento de fluxos.

Outras configurações dos circuitos de britadores de rolos abordados no presente estudo foram apresentadas por Menegatto (2014).

É importante ressaltar a complexidade da operação destes circuitos. São aproximadamente 30 fluxos entre alimentações novas, alimentações dos britadores, cargas circulantes e produtos finais. Os britadores de rolos usualmente estão configurados em circuitos fechados e híbridos. Um produto final grosso geralmente é coletado nas etapas iniciais de britagem, de maneira quase que artesanal, em pequenos silos, que ao serem preenchidos são trocados com o auxílio de uma empilhadeira. Já o produto fino segue para uma etapa de separação magnética, para retirar a parcela de ferro deletério (geralmente abaixo de 5%) e, em seguida, é encaminhado para um circuito de peneiramento comercial onde é classificado em diferentes faixas granulométricas.

Cada circuito de britadores de rolos possui um conjunto subsequente de peneiramento comercial, que é constituído por aproximadamente 25 peneiras circulares. A Figura 20 ilustra o circuito de peneiramento comercial do circuito de cominuição TB.

Figura 20 - Circuito de peneiramento comercial do circuito de cominuição TB

Fonte: Menegatto (2014).

É importante destacar que há um grande controle da eficiência do peneiramento comercial com o objetivo de prevenir possíveis contaminações de material de granulometria indesejada nas faixas granulométricas comerciais.

Frente ao exposto, há um grande potencial para simplificação do circuito convencional mediante a aplicação do HPGR. Como o circuito da Elfusa é caracterizado por uma vazão mássica consideravelmente baixa, 15 t/h (80 toneladas diárias por circuito de britadores de rolos), é possível que um único HPGR, com capacidade relativamente baixa, seja capaz de atender a demanda. Isso significa uma considerável redução do número de equipamentos, o que possivelmente implica na redução de custos de operação e de manutenção.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A presente pesquisa, que teve início a partir da identificação do potencial de simplificação de um circuito de cominuição de óxido de alumínio, foi desenvolvida em 4 etapas.

A primeira etapa pautou-se no planejamento e na execução da amostragem industrial e no levantamento de um histórico de produção de grãos de óxido de alumínio eletrofundido ao longo de um ano para determinação das especificações de granulometria do produto requerida pelo circuito. Neste período também foram obtidos dados de ensaios de HPGR piloto (HRC™ 300) realizados pela Metso em 2010, com uma amostra proveniente do circuito Elfusa.

A segunda etapa compreendeu a execução de ensaios de HPGR (em escala de laboratório) e caracterização física.

A terceira etapa consistiu na modelagem e simulação computacional, utilizando-se o software de simulação de processo *JKSimMet*®, com o objetivo de prever o desempenho do HPGR em circuito fechado e realizar o escalonamento da unidade industrial.

A quarta e última etapa envolveu uma análise conceitual do potencial de simplificação do circuito pela rota proposta destacando seus possíveis benefícios, bem como suas limitações.

Uma síntese das etapas do desenvolvimento deste estudo é apresentada na Figura 21.

Figura 21 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa

* Embora tenham sido realizados ensaios de densidade real e aparente, os valores considerados na modelagem foram os obtidos nos ensaios de densidade realizados pela Metso (2010).

Fonte: elaborado pelo autor

Em linhas gerais, as etapas ilustradas na Figura 21 compreendem:

- Avaliação do desempenho operacional do HPGR na cominuição do óxido de alumínio;
- Análise conceitual da aplicação do HPGR quanto ao atendimento às especificações de granulometria do produto e de vazão mássica requeridas pelo circuito de cominuição industrial da Elfusa.

3.2. AMOSTRAGEM E CIRCUITO DE COMINUIÇÃO PROPOSTO

O planejamento da amostragem consistiu no cálculo da massa mínima para obtenção de amostras representativas, segundo o critério de Pierre Gy (NAPIER-MUNN et al., 1999) e na definição dos pontos de amostragem, demonstrados na Figura 22.

Figura 22 - Pontos de amostragem na usina

Fonte: Elaborado pelo autor.

O produto da britagem secundária foi definido como o primeiro ponto de amostragem, tendo em vista uma avaliação preliminar da possibilidade do HPGR ser integrado ao circuito desde a etapa de britagem terciária e a necessidade de granulometria grosseira para realização do ensaio *drop weight* (-100 mm).

A escolha do segundo ponto de amostragem foi pautada na possibilidade da aplicação do HPGR em substituição ao circuito de britadores de rolos TB.

A Metso realizou em 2010 um estudo para avaliar a possibilidade de substituição do circuito de britadores de rolos BT pelo HPGR (METSO, 2010). Este estudo envolveu amostragem e a realização de ensaios de HPGR piloto. O local da amostragem realizada pela Metso está indicado no ponto 3 da Figura 22. Os dados deste estudo foram utilizados nesta pesquisa. O material amostrado pela Metso foi o óxido de alumínio BT.

A amostragem conduzida no presente estudo compreendeu a coleta manual de alíquotas do material na correia transportadora. As quantidades de material amostradas em cada ponto foram:

- Primeiro ponto: 200 Kg de óxido de alumínio eletrofundido BT;
- Segundo ponto: 214 de Kg de óxido de alumínio eletrofundido TB.

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTM EPUSP), onde foram homogeneizadas em pilhas alongadas e posteriormente quarteadas em alíquotas menores para realização de ensaios de HPGR (escala de laboratório) e caracterização física.

A partir dos ensaios de HPGR, tanto os realizados neste estudo quanto os que foram feitos pela Metso, e das simulações computacionais conduzidas no *JKSimMet*®, propõe-se um circuito de HPGR que substitua os dois circuitos de britadores de rolos, conforme ilustrado na Figura 22. A avaliação da alternativa proposta quanto ao atendimento das especificações requeridas pelo circuito industrial é apresentada adiante.

3.3. DETERMINAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO PRODUTO REQUERIDAS PELO CIRCUITO INDUSTRIAL A PARTIR DO HISTÓRICO DE DADOS DE PRODUÇÃO

Dada a complexidade dos circuitos de britadores de rolos é patente a dificuldade de realização de uma amostragem detalhada nos mesmos tendo em vista o cálculo de balanço de massas. Para realização de tal procedimento seria necessário uma equipe considerável de pessoas, dada a expressiva quantidade de fluxos. Além disso é difícil garantir a estabilidade (estado de regime) destes circuitos, devido às interrupções da produção para a troca dos silos que recebem o produto grosso.

Nesse sentido, optou-se por determinar as distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos de britadores de rolos a partir dos dados de produção de grãos. Conforme descrito anteriormente, estes são comercializados em função da massa retida em determinadas malhas de classificação (circuito de peneiramento comercial).

Foi realizado um levantamento de um histórico de produção ao longo de um ano, elaborando-se as distribuições granulométricas do produto com base na produção diária em cada faixa de tamanho. Foram selecionadas as distribuições granulométricas máxima (mais grosseira) e mínima (mais fina) ao longo do ano, bem

como a distribuição granulométrica média anual²⁹. As Tabelas 10 e 11 apresentam as malhas de classificação industrial e a nomenclatura dos produtos retidos para os circuitos BT e TB, respectivamente.

Tabela 10 - Malhas de classificação industrial e os seus respectivos produtos. Circuito de britadores de rolos BT

Malha (mm)	Produtos comerciais (retido nas malhas)
3,35	-
2,36	Grão 6/10
1,7	Grão 12
1,18	Grãos 12/16, 16, 20, 14
0,6	Grãos 24, 22 e 30
0,5	Grãos 36 e 40
0,354	Grãos 46 e 54
0,15	Grãos 60, 70, 80, 90 e 100
0,09	Grãos 120, 150, 180
Finos	Grãos 220, 240 e 320

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Malhas de classificação industrial e os seus respectivos produtos. Circuito de britadores de rolos TB

Malha (mm)	Produtos comerciais (retido nas malhas)
9,5	-
5,6	Grão 5/16 /4
2,36	Grãos 4/10 e 6/10
1,18	Grãos 10/20, 16, 20, 14
0,6	Grãos 24, 22 e 30
0,5	Grãos 36 e 40
0,354	Grãos 54, 50 e 46
0,15	Grãos 60, 70, 80, 90 e 100
0,09	Grãos 120, 150 e 180
Finos	Grãos 220, 240, 230, 280 e 325

Fonte: Elaborado pelo autor.

²⁹ Neste estudo, estas distribuições granulométricas do produto são denominadas como especificações máxima, mínima e média anual.

3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física do material compreendeu a realização dos seguintes ensaios: análise granulométrica, moabilidade de Bond (WI), abrasividade de Bond (AI), *drop weight* padrão, *drop weight* simplificado e densidade (real e aparente).

Os ensaios de WI e AI de Bond, densidades (real e aparente), foram realizados nas dependências do LTM PMI EPUSP. Já os ensaios *drop weight* foram conduzidos no laboratório da HDA Serviços Ltda.

3.4.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica das amostras tal qual foi realizado pelo peneiramento a seco, utilizando-se a seguintes malhas:

- Óxido de alumínio eletrofundido BT: 100; 76,2; 63, 50,4; 37,5; 25,4; 22,4; 19; 12,5; 9,5; 6,3; 3,35; 1,7; 0,85 e 0,425 mm;
- Óxido de alumínio eletrofundido TB: 19; 16; 12,5; 9,5; 6,3; 4,75; 3,35; 2,36; 1,70; 1,18; 0,850; 0,600; 0,425; 0,300; 0,150; 0,106 e 0,075 mm.

3.4.2. Densidade

As duas amostras de óxido de alumínio foram submetidas aos ensaios de densidade aparente e real.

A densidade aparente de ambas as amostras foi determinada a partir da utilização de um balde com um volume pré definido. O procedimento consistiu em:

- Tarar uma balança com o recipiente com volume pré definido;
- Preencher o recipiente com a amostra seca até 1/3 de seu volume;
- Elevar o recipiente a uma altura de 20 mm e soltá-lo sobre uma superfície de borracha por 20 vezes;
- Preencher o recipiente com a amostra seca até 2/3 de seu volume;

- Elevar o recipiente a uma altura de 20 mm e soltá-lo sobre uma superfície de borracha por 20 vezes;
- Preencher o recipiente com a amostra seca até seu volume total;
- Elevar o recipiente a uma altura de 20 mm e soltá-lo sobre uma superfície de borracha por 20 vezes;
- Medir o volume ocupado pela amostra;
- Medir a massa da amostra.

A densidade real da amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT foi determinada pelo método do deslocamento volumétrico utilizando-se uma balança hidrostática. Este procedimento foi realizado em partículas individuais e compreendeu:

- Medir a massa de uma partícula seca;
- Acoplar o conjunto hidrostático (plataforma e estrutura) em uma balança de precisão;
- Imergir uma partícula em um recipiente preenchido com água deionizada;
- Medir a massa da partícula submersa;
- Definir a densidade real (D_{real} - g/cm³) a partir da Equação 13.

$$D_{\text{real}} = \frac{m_{\text{seca}}}{(m_{\text{seca}} - m_{\text{imersa}})} \quad (13)$$

Onde:

m_{seca} : é a massa da partícula seca (g);

m_{imersa} : é a massa da partícula imersa em água deionizada (g).

Para garantir a representatividade da amostra o ensaio foi realizado em 50 partículas que foram selecionadas em 10 pontos ao longo de uma pilha alongada.

A densidade real da amostra de óxido de alumínio eletrofundido TB foi determinada pelo método de deslocamento volumétrico utilizando-se um tubo de Chapman segundo uma adaptação da NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987). Este procedimento consistiu em:

- Secar o material em estufa por 100° C, por um período suficiente para garantir a constância da massa;
- Medir a massa seca;
- Preencher o tubo com água deionizada em um volume pré definido;
- Registrar o volume inicial;
- Introduzir a alíquota de material no tubo preenchido com água;
- Registrar o volume final;
- Calcular a densidade real (D_{real} - g/cm³) a partir da Equação 14.

$$D_{\text{real}} = \frac{m_{\text{seca}}}{(v_f - v_i)} \quad (14)$$

Onde:

m_{seca} : é a massa da partícula seca (g);

v_f : é o volume final de água e sólidos (cm³);

v_i : é o volume inicial de água (cm³)

Os procedimentos descritos acima foram realizados em triplicata, com exceção do ensaio de densidade real da amostra de óxido BT e seus resultados são apresentados como média e desvio padrão.

3.4.3. WI de Bond

O *Work Index* é definido por Bond (1952) como a energia requerida para reduzir uma tonelada curta, com granulometria de alimentação teoricamente infinita até 80% passante em 100 µm. Este parâmetro é obtido a partir de ensaios realizados em moinhos de bolas ou de barras. A primeira metodologia é amplamente utilizada por pesquisadores e pela indústria para a comparação da tenacidade entre diferentes

minérios/materiais, dimensionamento e a avaliação da eficiência energética de moinhos de bolas industriais (ROWLAND; KJOS, 1978³⁰ apud BERGERMAN, 2009b).

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de WI em moinho de bolas para a avaliação da tenacidade dos óxidos de alumínio eletrofundidos.

O ensaio de WI conduzido em moinho de bolas, utiliza um equipamento com as seguintes características: diâmetro e comprimento de 305 mm, arestas arredondadas, revestimento liso e uma carga moedora de 285 bolas (20.125 g), cuja distribuição é apresentada na Tabela 12. O equipamento também possui um contador de revoluções (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1990).

Tabela 12 - Distribuição dos diâmetros das bolas da carga moedora

Diâmetro (mm)	Número de bolas
36,5	43
30,2	67
25,4	10
19,1	71
15,9	94
Total	285

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas(1990). Adaptado pelo autor.

O material submetido ao ensaio deve ser previamente britado de modo a se obter uma granulometria 100% passante na malha de 3,35 mm. Ressalta-se a necessidade de realizar uma britagem estagiada, minimizando a geração de finos. Em sequência, procede-se a homogeneização e o quarteamento do material. Uma alíquota é destinada à análise granulométrica para determinação da distribuição granulométrica de alimentação do ensaio. Uma outra parcela é introduzida, gradualmente, em uma proveta de 1000 mL, até que, através de sucessivas batidas, consiga-se 700 mL de material compactado. Determina-se a massa do material ocupado por esse volume e, então, realiza-se o cálculo da densidade aparente.

Define-se ainda a malha de controle do ensaio. Neste estudo utilizou-se 150 μm .

---

³⁰ ROWLAND, C.A. KJOS, D. M. Rod and ball mills, In: Mineral processing plant design. AIME, 1978. p. 239-278.

O primeiro ciclo de moagem é alimentado com a massa utilizada na proveta. Para este ciclo, utiliza-se 100 rotações. Ao finalizá-lo, realiza-se o peneiramento do material na malha de controle. O material passante é recolhido separadamente e o retido é acrescido por uma alíquota de alimentação nova com mesma quantidade de massa do passante, recompondo-se assim, a carga original do moinho.

Em sequência, calcula-se o número de rotações do próximo ciclo para que se atinja uma carga circulante de 250%. Os ciclos são repetidos até que o peso líquido da fração passante na malha de controle por revolução do moinho (Mob) se estabilize, isto é, quando os valores dos últimos três ciclos sejam similares.

O ensaio é concluído com a obtenção da distribuição granulométrica do produto passante na malha teste no último ciclo, obtendo-se a malha na qual passa 80% do produto (P_{80}). Com esse dado, a abertura na qual passa 80% da alimentação (F_{80}), a malha teste e a média dos últimos três pesos líquidos da fração passante na malha teste por revolução do moinho (moabilidade), é possível calcular o WI de Bond, empregando-se a Equação 15.

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} \cdot Mob^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \cdot 1,102 \quad (15)$$

Onde:

WI: é o índice de trabalho para moagem (kWh/t);

Am: é a abertura da malha de controle do ensaio (μm);

Mob: é a média dos últimos três valores do índice de moabilidade (g/rev)

P: é a abertura da peneira na qual passam 80% da massa do produto (μm);

F: é a abertura da peneira na qual passam 80% da massa da alimentação (μm);

1,102 é o fator que converte toneladas curtas para toneladas métricas;

3.4.4. Drop weight

O ensaio *drop weight*, desenvolvido pelo *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC), estabelece uma relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante. Este procedimento consiste em submeter partículas individuais ao impacto em três diferentes níveis de energia em cinco faixas granulométricas (NAPIER-MUNN et al., 1999):

- -63 +53 mm;
- -45 +37,5 mm;
- -31,5 +26,5 mm;
- -22,4 +19 mm;
- -16+13,2 mm.

O aparato utilizado no ensaio *drop weight* é constituído por um cilindro de aço acoplado a dois trilhos guias laterais enclausurados por uma proteção de acrílico. Sua estrutura é rígida, construída e soldada sobre uma base reforçada de concreto. Um guincho elétrico é responsável por elevar ou abaixar o cilindro conforme a altura determinada. O cilindro é liberado por interruptor pneumático, caindo devido à ação da gravidade, sobre uma partícula, localizada em uma plataforma metálica (NAPIER-MUNN et al., 1999). O equipamento é ilustrado nas Figura 23.

Figura 23 - Aparato DWT

Fonte: Chieregati e Delboni Júnior (2002).

Previamente à realização dos ensaios, são preparados 15 lotes de 30 partículas, sendo 3 lotes para faixa granulométrica. Em seguida, determina-se a

massa média de cada lote, a energia específica de entrada e altura inicial de queda do cilindro. Este último parâmetro é calculado pela Equação 16 (NAPIER-MUNN et al., 1999).

$$h_i = \frac{\bar{m} \cdot E_{is}}{0,0272 \cdot Md} \quad (16)$$

Onde:

h_i : é a altura inicial de onde o cilindro de aço é liberado (cm);

$\bar{m}$: é a massa média de cada lote de partículas a serem fragmentadas (g);

E_{is} : é a energia específica de entrada requerida para cada teste, igual a energia específica de cominuição E_{cs} (kWh/t);

Md : é a massa do cilindro de aço (kg).

Durante a realização do ensaio são tomados valores de altura residual dos fragmentos que permanecem sobre a base metálica após a queda do cilindro. Estes são utilizados no cálculo da energia real aplicada (E_{real}), descrito pela Equação 17 (NAPIER-MUNN et al., 1999).

$$E_{real} = \frac{0,0272 \cdot Md \cdot (h_i - h_f)}{\bar{m}} \quad (17)$$

Onde:

Md : é a massa do cilindro de aço (kg).

h_i : é a altura inicial de onde o cilindro de aço é liberado (cm);

h_f : é a altura residual da partícula quebrada (cm);

$\bar{m}$: é a massa média de cada lote de partículas a serem fragmentadas (g).

Os fragmentos produzidos pela quebra individual das 30 partículas que constituem cada lote, são reunidos e submetidos à análise granulométrica para determinação do parâmetro t_{10} (CHIEREGATI E DELBONI JÚNIOR, 2002). Este parâmetro representa a porcentagem passante na malha de um décimo do tamanho original da partícula.

A relação entre a energia aplicada (E_{cs}) e o parâmetro de granulometria (t_{10}) é representada pela Equação 18 (NAPIER-MUNN et al., 1999).

$$t_{10} = A \cdot (1 - e^{-b \cdot E_{cs}}) \quad (18)$$

Onde:

t_{10} : porcentagem passante em uma abertura equivalente a 1/10 do tamanho original da partícula;

A e b: parâmetros característicos do minério em relação à resistência ao impacto;

E_{cs} : energia específica de cominuição (kWh/t).

A relação expressa na Equação 18 pode ser representada graficamente conforme apresentado na Figura 24. A curva $t_{10} \times E_{cs}$, que caracteriza o fenômeno da fragmentação, exibe um rápido crescimento inicial, determinado pelo parâmetro b, seguido por um comportamento assintótico, determinado pelo parâmetro A. O significado prático deste comportamento é que há uma tendência de crescimento da fragmentação conforme a energia é aplicada até um certo limite, a partir do qual não há ganhos adicionais nos processos de fragmentação (NAPIER-MUNN et al., 1999).

Figura 24 - Relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante

Fonte: Napier-Munn et al. (1999) apud Oliveira 2015.

Devido à interação entre os parâmetros A e b, a resistência ao impacto é avaliada através do produto entre A e b. Quanto menor o valor deste parâmetro, maior a resistência da amostra ao impacto (CHIERAGATI E DELBONI JÚNIOR, 2002). Este parâmetro pode ser utilizado para comparar a resistência ao impacto entre diferentes materiais, conforme visualizado na Tabela 13 (DELBONI JÚNIOR, 2003).

Tabela 13 - Classificação da resistência ao impacto de acordo com o A x b

Intervalos de valores do parâmetro A x b		Resistência ao impacto	Sigla
Menor	Maior		
0	9,9	Excepcionalmente Alta	ETA
10	19,9	Extremamente Alta	EXA
20	29,9	Muito Alta	MTA
30	39,9	Alta	ALT
40	49,9	Moderadamente Alta	MDA
50	59,9	Média	MED
60	69,9	Moderadamente Baixa	MDB
70	89,9	Baixa	BAI
90	109,9	Muito Baixa	MTB
> 110		Extremamente Baixa	ETB

Fonte: Delboni Júnior (2003).

O ensaio *drop weight* também possibilita a determinação da função quebra que representa a quebra de partículas individuais e os valores de energia a ela associados. Estes dados são fundamentais para calibração do modelo matemático de HPGR de Morrell et al., (1997) contido *JKSimMet®*.

No presente estudo, o ensaio *drop weight* padrão pôde ser realizado somente com a amostra de óxido de alumínio BT. Para a amostra de óxido de alumínio TB, devido a indisponibilidade de granulometria, foi necessário a utilização do ensaio de *drop weight* simplificado desenvolvido por Chierigati e Delboni Júnior (2002), utilizando-se a fração mais fina do procedimento padrão: -16 +13,2 mm.

3.4.5. AI de Bond

O ensaio de abrasão desenvolvido por Bond permite a determinação do índice de abrasividade (AI). Este parâmetro determina o desgaste que um determinado material promove sobre uma superfície metálica e é utilizado para estimar o consumo de revestimento e de corpos moedores dos equipamentos de cominuição.

O ensaio utiliza um equipamento específico cujas características são descritas por Bergstrom (1985). O procedimento é realizado à seco e compreende:

- A preparação de quatro alíquotas de 400 g de material na granulometria padrão do ensaio (-19 +12,5 mm);
- Seleção de uma placa metálica nova;
- Pesagem da placa, que deve estar limpa e seca;
- Inserção e travamento desta placa no equipamento;
- Introdução de 400 g de material no equipamento e seu funcionamento por 15 minutos. Este procedimento deve ser reproduzido com as quatro alíquotas de material.

Ao termino do ensaio, a placa é retirada do equipamento, higienizada e submetida à medição da massa. A perda de massa da placa metálica é definida como o índice de abrasividade (AI) do material ensaiado.

Neste estudo, o ensaio de abrasividade de AI de Bond foi conduzido apenas com a amostra de óxido de alumínio BT, devido à indisponibilidade de granulometria da amostra de óxido de alumínio TB na faixa requerida pelo ensaio.

3.5. ENSAIO DE HPGR EM ESCALA PILOTO E DE BANCADA

Uma parcela dos óxidos de alumínio BT e TB foi enviada ao laboratório de processos da Metso, onde foram realizados ensaios de HPGR no equipamento D1000 de escala laboratorial.

Conforme mencionado anteriormente, em um período anterior também foram conduzidos ensaios de HPGR em escala piloto no HRC™ 300 da Metso.

A seguir são apresentadas as características destes equipamentos bem como as suas metodologias de ensaio.

3.5.1. Metso HRC™ 300

O HRC™ 300 foi desenvolvido pela Metso para realização de ensaios de HPGR em escala piloto. Este equipamento não apresenta a estrutura *Arch Frame* e os rolos flangeados como as unidades comerciais (OLIVEIRA, 2015). Entretanto como suas dimensões e a escala de operação do ensaio piloto são consideravelmente inferiores às industriais, avalia-se que os efeitos de descompressão nas bordas dos rolos e o seu desalinhamento são minimizados. A Figura 25 ilustra o HRC™ 300 e a Tabela 14 apresenta suas especificações técnicas.

Figura 25 - HRC™ 300

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 14 - Especificações técnicas do HRC™ 300

Diâmetro dos rolos (mm)	300
Largura dos rolos (mm)	150
Potência instalada (kW)	2 x 15
Faixa de velocidade dos rolos (rpm)	23-29
Velocidade do motor (rpm)	1100
Top size de alimentação (mm)	19
Faixa de força específica de moagem (N/mm ²)	0-8

Fonte: Oliveira (2015). Adaptado pelo autor.

O HRC™ 300 pode ser equipado com rolos com revestimento liso ou pinado. Os ensaios apresentados nesta pesquisa foram conduzidos utilizando-se rolos com revestimento liso.

Para garantir um regime de estabilidade durante a operação do HRC™ 300 (representado pela constância da pressão operacional, da abertura entre os rolos e do consumo de potência) são necessários aproximadamente 200 kg material para realização de um ensaio em circuito aberto e no mínimo 1000 kg para execução de um ensaio em circuito fechado. Estes requerimentos de massa, no entanto, variam conforme as características do material (densidade aparente, granulometria e umidade).

As condições operacionais dos ensaios realizados no HRC™ 300 apresentadas nesta pesquisa são demonstradas na Tabela 15.

Tabela 15 - Condições operacionais dos ensaios realizados no HRC™ 300

Ensaio	1	2	3	4
Óxido de alumínio eletrofundido	BT	BT	BT	BT
Força específica de moagem (N/mm ²)	1	2	3	4
Top size de alimentação (mm)	19	19	19	19
Condição de alimentação	natural ³¹	natural	natural	natural
Umidade da alimentação (%)	0	0	0	0
Massa (kg)	200	200	200	200

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 15, os ensaios executados no HRC™ 300 foram realizados em uma amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT, não escalpada e seca, em quatro diferentes níveis de força específica de moagem.

A ausência de umidade na alimentação dos ensaios é justificada pelo fato do circuito industrial cominuir o material seco que, como mencionado anteriormente, é proveniente de um processo de eletrofusão.

Adicionalmente, avaliou-se que o regime de alimentação com um determinado percentual de finos teria um maior benefício para o processo, sobretudo com relação ao desgaste dos revestimentos dos rolos. Conforme reportado pela literatura, uma alimentação escalpada potencializa o desgaste destes componentes. Tendo em vista que o óxido de alumínio eletrofundido é abrasivo e promove um considerável desgaste, uma alimentação desprovida de finos poderia acelerar ainda mais este processo.

3.5.2. Metso D1000

O D1000 foi projetado pela Metso para execução de ensaios em escala de bancada quando a disponibilidade de amostra é limitada. Este equipamento permite a obtenção da granulometria do produto, simulando a operação de ¼ de volta de uma

---

³¹ Refere-se a alimentação completa sem o peneiramento prévio para retirada da parcela de material fino.

unidade industrial com diâmetro de 1 m. Contudo, ele não possibilita a determinação da vazão mássica e o consumo de potência.

Outro aspecto positivo do D1000 é que ele minimiza o efeito da variação da granulometria de alimentação no escalonamento³². Isto se deve ao fato das superfícies que representam os rolos possuírem um diâmetro relativamente compatível com os das unidades industriais. Portanto, dado a relação entre o diâmetro dos rolos e o máximo *top size* de alimentação, este equipamento é capaz de prever a granulometria do produto a partir de granulometrias de alimentação relativamente grosseiras (40 mm para a metodologia de operação da Metso Brasil)³³.

O requerimento de massa dos ensaios realizados no D1000 varia, assim como no HRC™ 300, em função das características do material (densidade aparente, granulometria). Para cada ensaio é utilizada uma quantidade de massa suficiente para preencher o volume ocupado entre as seções cilíndricas que representam os rolos. Neste estudo, utilizou-se de 10 Kg de material. A Figura 26 ilustra o Metso D1000 e as superfícies que representam os rolos neste equipamento.

Figura 26 - Metso D1000 (A) e as suas superfícies que representam os rolos (B)

Fonte: Arquivo pessoal.

---

³² No caso do escalonamento baseado em um banco de dados (de propriedade da Metso).

³³ ITO, W.T. **HRC™ - Metso HPGR**. [informação pessoal] Reunião realizada em Sorocaba, 31 jan. 2017.

Foram realizados três ensaios em diferentes forças específicas de moagem para cada amostra. É importante ressaltar que amostra do óxido de alumínio BT teve seu tamanho reduzido a fim de se adequar ao *top size* de alimentação requerido pelo equipamento, que é de aproximadamente 40 mm.

O ensaio iniciou-se com o material sendo alimentado diretamente no espaço entre as superfícies que representam os rolos de 1 m de diâmetro. O material prensado no início e ao final do ensaio era descartado e somente o produto intermediário, submetido a pressão completa do sistema hidráulico, foi coletado para análise granulométrica. Esta estratégia é utilizada pelo fato do ensaio ser realizado em um regime de batelada que não possibilita que a operação entre em estado estacionário. Isto se deve ao projeto do equipamento, que não possibilita uma vazão contínua de material. Deste modo não é possível verificar a constância das variáveis de operação (abertura entre os rolos, consumo de potência).

As condições operacionais dos ensaios realizados com as amostras de óxidos de alumínio eletrofundido BT e TB são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Condições operacionais dos ensaios D1000

Óxido de alumínio eletrofundido	BT			TB		
Ensaio	1	2	3	1	3	4
Pressão de operação (N/mm ²)	2	3	4	1	3	4
Abertura inicial entre os rolos (mm)	19	19	12	12	12	12
Top size de alimentação (mm)	37,5	37,5	37,5	19	19	19
Condição de alimentação	natural	natural	natural	natural	natural	natural
Umidade (%)	0	0	0	0	0	0
Massa (kg)	10	10	10	10	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados na Tabela 16, demonstram que ambas as amostras de óxido de alumínio eletrofundido foram ensaiadas com uma alimentação natural e seca. Estas condições foram estabelecidas pelos mesmos motivos elencados na definição dos ensaios do HRC^{TM} 300.

A amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT foi submetida a dois ensaios em diferentes forças de moagem específica, com uma abertura inicial entre os rolos de 19 mm e a um ensaio com esta variável ajustada para 12 mm. Esta condição foi

estabelecida para avaliar qual seria o impacto da redução da abertura entre os rolos na granulometria do produto, quando o material era submetido ao limite máximo de força específica de moagem do equipamento.

Adicionalmente, definiu-se um *top size* de alimentação superior ao da alimentação do circuito industrial de britadores de rolos, para avaliar se o HPGR também poderia substituir a de etapa britagem terciária. Este *top size* (37,5 mm) foi determinado com base na relação entre a APF (abertura na posição fechada) e granulometria do produto do britador secundário Metso (Faço) modelo 9026³⁴. Esta análise teve caráter preliminar e não foi considerada como uma opção para o circuito de HPGR proposto. Avaliou-se que uma alimentação grosseira do HPGR poderia maximizar o desgaste do revestimento do rolo.

Os ensaios realizados com a amostra de óxido de alumínio eletrofundido TB, foram realizados em três diferentes níveis de força específica de moagem, todos ajustados com a mesma abertura inicial entre os rolos, 12 mm.

3.6. MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE HPGR

As simulações de HPGR realizadas nesta pesquisa utilizaram o simulador de processos *JKSimMet*® versão 6.0. O modelo de HPGR contido neste software foi anteriormente explicado neste estudo.

A calibração do modelo foi realizada a partir de dados de um ensaio de HPGR piloto (METSO, 2010) executado com uma amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT com características similares às amostras deste estudo e provenientes do mesmo circuito de cominuição analisado. Adicionalmente, foram introduzidas as funções quebra, e seus respectivos valores de energia específica, para representar a quebra de partícula individual e a quebra por compressão de leitos.

É importante ressaltar que o ideal seria a calibração do modelo utilizando-se dados dos ensaios de HPGR piloto e de caracterização física, provenientes de uma

---

³⁴ Dados obtidos no Manual de britagem da Metso (2005).

mesma amostra. No entanto, isto não foi possível, dada a restrição de massa das amostras frente à quantidade relativamente alta requerida pelo ensaio de HPGR piloto. Portanto, assume-se que há uma relativa homogeneidade dos óxidos de alumínio eletrofundidos, quanto à cominuição ao longo do tempo, conforme observado em estudos anteriores³⁵ e nos resultados apresentados no item 4.1.1 deste estudo. Adicionalmente, verifica-se que a prática de se adotar os dados de ensaios realizados com materiais com características similares ao de estudo, para propósito de simulação em projetos de pré-viabilidade, é realizada por outros autores, quando as informações são limitadas, tal como ilustrado por Salazar (2014).

As simulações, utilizadas para prever o desempenho do HPGR em circuito fechado e para o escalonamento da unidade industrial, foram realizadas com base nas dimensões e condições operacionais do menor equipamento comercial disponibilizado pela Metso, o HRC™ 800, devido à baixa vazão mássica requerida pelos circuitos de cominuição de industrial da Elfusa (80 toneladas diárias cada).

Em relação ao modelo de peneira utilizado nas simulações, avaliou-se que a metodologia de curva de eficiência descrita por Napier-Munn et al., (1999) seria suficiente para atender os propósitos deste estudo. Este modelo é baseado no parâmetro de nitidez da separação (α), na partição de água para os finos (C) e no diâmetro de corte corrigido, ou tamanho que a eficiência da separação é $C/2$ (d_{50C}).

---

³⁵ Bergerman (2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO MATERIAL

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização física do material amostrado no circuito de cominuição Elfusa incluem:

- Distribuição granulométrica dos fluxos amostrados;
- *Work Index* de Bond (WI de Bond);
- Densidade real e aparente;
- Parâmetros de resistência do minério ao impacto (A, b e A x b), obtido pelo ensaio *drop weight*;
- Função quebra para quebra de partícula individual e os valores de energia específica de cominuição a ela associados, determinados pelo ensaio *drop weight*;
- Função de quebra de compressão de leito (função quebra para quebra de partícula individual extrapolada), determinada pelo ensaio *drop weight*;
- Índice de abrasividade de Bond (AI de Bond).

4.1.1. Distribuições granulométricas dos fluxos amostrados

As distribuições granulométricas das amostras de óxidos de alumínio BT (produto da britagem secundária) e TB (alimentação do circuito de britadores de rolos TB), são apresentadas na Figura 27. Nesta ilustração também é demonstrado um histórico das distribuições granulométricas de alimentação dos circuitos de britadores de rolos, obtidas a partir de amostragens realizadas em estudos anteriores³⁶.

---

³⁶ Bergerman (2015) e Metso (2010).

Figura 27 - Distribuições granulométricas das amostras coletadas nesta pesquisa e histórico de distribuição granulométrica da alimentação do circuito de britadores de rolos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados na Figura 27 evidenciam uma relativa regularidade das distribuições granulométricas de alimentação dos circuitos de britadores de rolos ao longo do tempo, independentemente do material cominuído. Portanto, as distribuições granulométricas das amostras TB (presente estudo) e BT (2010), serão consideradas referências para granulometria de alimentação do HPGR industrial.

4.1.2. Densidade real e aparente

Os resultados dos valores de densidade real e aparente das amostras de óxido de alumínio eletrofundido são apresentados na Tabela 17, segundo a média e o desvio padrão relativo. Os resultados completos são apresentados no Apêndice A.

Tabela 17 - Densidades reais e aparentes das amostras de óxido de alumínio BT e TB

		Densidade aparente (g/cm ³)		Densidade real (g/cm ³)	
		Média*	Desvio padrão relativo (%)	Média**	Desvio padrão relativo (%)
Óxido de alumínio eletrofundido	BT	2,1	4,3	3,6	3,7
	TB	2,6	1,4	3,8	0,5

* n= 3 medidas, para ambos os óxidos de alumínio.

**n= 4 medidas para óxido de alumínio TB e n= 50 medidas (partículas individuais) para o óxido de alumínio BT.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 17 demonstram uma considerável diferença entre as densidades aparentes das amostras de óxido de alumínio BT e TB. Esta particularidade é justificada pela diferença entre as granulometrias dessas amostras. A granulometria mais grosseira da amostra de óxido BT (-100 μ m) produz um menor empacotamento das partículas e, conseqüentemente, um maior número de vazios do que a granulometria mais fina da amostra de óxido TB (-19 μ m) e isto, evidentemente reflete em uma menor densidade aparente da amostra de óxido BT em comparação a amostra de óxido TB.

4.1.3. WI de Bond

Foram realizados três ensaios para determinação do WI de Bond em moinho de bolas: um na amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT e dois na amostra de óxido alumínio eletrofundido TB. Os resultados são apresentados na Tabela 18. Mais detalhes dos resultados dos ensaios de moabilidade de Bond são apresentados no Apêndice B.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de WI de Bond

		WI (kWh/t)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Média
Óxido de alumínio eletrofundido	BT	-	28,9	28,9
	TB	25,8	26,2	26,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 18, demonstram a alta tenacidade dos óxidos de alumínio eletrofundidos, segundo o critério de classificação estabelecido por Napier-Munn et al., (1999).

4.1.4. Drop weight

Os resultados dos ensaios *drop weight* são apresentados segundo os parâmetros característicos da fragmentação por impacto (A , b e o $A \times b$) e as funções de quebra das partículas individuais.

Os parâmetros A e b são determinados a partir de uma regressão matemática entre os 15 pares de energia específica aplicada (E_{cs}) e a fragmentação resultante (t_{10}), utilizando-se a Equação 18.

As Figuras 28 e 29 apresentam a relação entre a energia específica aplicada e a fragmentação resultante para as amostras de óxidos de alumínio eletrofundido BT e TB, respectivamente. Mais detalhes dos resultados obtidos nos ensaios *drop weight*, em termos de energia específica versus t_{10} são apresentados no Apêndice C.

Os parâmetros de quebra por impacto obtidos para ambos os materiais são apresentados na Tabela 19.

Figura 28 - Curva paramétrica da relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante do ensaio *drop weight* com amostra de óxido de alumínio BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Curva paramétrica da relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante do ensaio *drop weight* simplificado com amostra de óxido de alumínio TB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 - Parâmetros de fragmentação para os óxidos de alumínio em estudo

Óxido de alumínio eletrofundido	A	b	A x b
BT	64,36	1,38	88,81
TB	63,11	0,60	37,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados na Tabela 19 evidenciam a baixa resistência do óxido de alumínio BT em relação ao mecanismo de quebra por impacto, segundo a classificação típica proposta por Delboni Júnior (2003). Os dados revelam ainda, que de acordo com este mesmo critério, o óxido de alumínio TB seria considerado de alta resistência ao impacto. Deve-se ressaltar, entretanto, que a metodologia simplificada utilizada no ensaio deste material tende a indicar uma resistência superior à obtida no procedimento padrão (CHIEREGATI e DELBONI JÚNIOR, 2002; TAVARES, 2007).

As funções quebra para quebra de partículas individuais das amostras de óxido de alumínio eletrofundido BT e TB foram determinadas a partir da família de curvas t_{10} versus t_n resultantes do ensaio *drop weight*, como apresentadas na Figura 30.

Figura 30 - curvas t_{10} versus t_n para óxido de alumínio eletrofundido BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

A função quebra para quebra de partículas individuais obtida para o óxido de alumínio eletrofundido BT e os valores de energia específica de cominuição a ela associados são apresentados nas Tabelas 20 e 21, respectivamente.

Tabela 20 - Função quebra para a quebra de partículas individuais para a amostra de óxido de alumínio BT

t_{10} (%)	Passante na malha 1/n do tamanho original ³⁷ das partículas - t_n (%)				
	t_{75}	t_{50}	t_{25}	t_4	t_2
10	2,26	3,05	5,14	23,76	50,75
20	4,52	6,09	10,28	45,19	78,66
30	6,78	9,14	15,41	63,71	92,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 - Valores de E_{CS} (kWh/t) associados à função quebra para a quebra de partículas individuais para a amostra de óxido de alumínio BT

t_{10} (%)	Tamanho original ³⁸ (mm)		
	14,5	20,6	28,9
10	0,213	0,167	0,135
20	0,471	0,362	0,293
30	0,801	0,596	0,483

Fonte: Elaborado pelo autor.

A função quebra para quebra de partículas individuais determinada para o óxido de alumínio TB e os seus respectivos valores de energia específica de cominuição são apresentados nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22 - Função quebra para a quebra de partículas individuais para amostra de óxido de alumínio TB

t_{10} (%)	Passante na malha 1/n do tamanho original das partículas - t_n (%)				
	t_{75}	t_{50}	t_{25}	t_4	t_2
10	2,04	2,80	5,05	22,34	47,42
20	4,07	5,64	10,10	41,85	73,74
30	6,22	8,62	15,27	59,73	93,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

³⁷ Representa o diâmetro geométrico médio das cinco faixas granulométricas utilizadas no ensaio *drop weight*: -63 +53; -45 +37,5; -31,5 +26,5; -22,4 +19; -16 +13,2 mm.

³⁸ Representa o diâmetro geométrico médio de três faixas granulométricas utilizadas no ensaio *drop weight*: -31,5 +26,5; -22,4 +19; -16 +13,2 mm.

Como a amostra de óxido de alumínio TB foi submetida ao ensaio *Drop weight* simplificado em uma única fração granulométrica (-16 +13,2 mm), os valores de energia específica de cominuição obtidos a partir desta faixa foram utilizados nos demais intervalos de tamanho.

Tabela 23 - Valores de E_{CS} (kWh/t) associados à função quebra para quebra de partículas individuais para a amostra de óxido de alumínio TB

t_{10} (%)	Tamanho original ³⁹ (mm)		
	14,5	20,6	28,9
10	0,287	0,287	0,287
20	0,635	0,635	0,635
30	1,075	1,075	1,075

Fonte: Elaborado pelo autor.

A função quebra para quebra por compressão de leitos foi determinada utilizando-se os mesmos dados da função quebra para quebra de partículas individuais, com o parâmetro t_{10} sendo extrapolado até 50%, conforme sugerido por Daniel (2002). As funções quebra para quebra por compressão de leitos dos óxidos BT e TB são apresentadas nas Tabelas 24 e 25, respectivamente.

Tabela 24 - Função quebra para quebra por compressão de leitos (extrapolada) para o óxido de alumínio BT

t_{10} (%)	Passante na malha 1/n do tamanho original das partículas - t_n (%)				
	t_{75}	t_{50}	t_{25}	t_4	t_2
10	2,26	3,05	5,14	23,76	50,75
30	6,78	9,14	15,41	63,71	92,08
50	11,30	15,23	25,69	89,64	99,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

³⁹ Representa o diâmetro geométrico médio de três faixas granulométricas utilizadas no ensaio *drop weight*: -31,5 +26,5; -22,4 +19; -16 +13,2 mm.

Tabela 25 - Função quebra para quebra por compressão de leitos (extrapolada) para o óxido de alumínio TB

t ₁₀ (%)	Passante na malha 1/n do tamanho original das partículas - t _n (%)				
	t ₇₅	t ₅₀	t ₂₅	t ₄	t ₂
10	2,04	2,80	5,05	22,34	47,42
30	6,22	8,62	15,27	59,73	93,11
50	12,56	16,67	27,63	84,22	99,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.5. AI de Bond

Os resultados dos ensaios de abrasividade de Bond (AI) realizados com a amostra de óxido BT são apresentados na Tabela 26. Mais detalhes dos ensaios de abrasividade de Bond, são apresentados no Apêndice D.

Tabela 26 - Índices de abrasividade de Bond para a amostra de óxido BT

	Ensaio		Média	Desvio padrão relativo (%)
	1º	2º		
Índice de abrasividade de Bond (g)	0,92	0,88	0,90	3,14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados na Tabela 26 evidenciam a elevada abrasividade do óxido de alumínio BT, o que era esperado uma vez que este produto é utilizado na produção de grãos abrasivos sintéticos (utilizados em lixas rebolos e jateamento). Embora esta particularidade seja considerada um ponto crítico para um circuito de HPGR, ressalta-se que este equipamento vem sendo aplicado na cominuição de minérios com elevada abrasividade como é o caso das usinas de *Argyle Diamond Mine* (AI de 0,6) e *Boddington Gold Mine* (AI de 0,5 - 0,7), tal como ilustrado por Daniel e Morrell (2009).

4.2. ENSAIOS DE HPGR

Os resultados dos ensaios de HPGR realizados no D1000 e no HRC™ 300 (estudo da Metso 2010) foram utilizados para avaliar o desempenho desta tecnologia na cominuição de óxido de alumínio eletrofundido e verificar o atendimento às especificações de granulometria do produto requeridas pelos circuitos de cominuição da Elfusa. Como os ensaios realizados no D1000 fornecem apenas resultados de granulometria do produto, o único parâmetro que é utilizado para avaliar seu desempenho é a relação de redução obtida. Já nos ensaios executados no HRC™ 300 o desempenho é avaliado em função da relação de redução, da energia específica de cominuição e da vazão mássica específica. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de HPGR realizados em ambos os equipamentos.

a) ensaios D1000 e HRC™ 300- distribuição granulométrica do produto

As distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos dos ensaios executados no D1000 e no HRC™ 300 com as amostras de óxido de alumínio BT são ilustradas na Figura 31. Seus respectivos parâmetros F_{80} , F_{50} , P_{80} , P_{50} ⁴⁰, assim como as relações de redução obtidas nestes ensaios são apresentados na Tabela 27.

---

⁴⁰ F_{80} e F_{50} são os diâmetros nos quais passam 80 e 50% das partículas, respectivamente, de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo da alimentação de um equipamento ou circuito de cominuição (mm). P_{80} , P_{50} são os diâmetros nos quais passam 80 e 50% das partículas, respectivamente, de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo do produto de um equipamento ou circuito de cominuição (mm).

Figura 31 - Distribuições granulométricas dos ensaios realizados com o óxido de alumínio BT no D1000 e no HRC™ 300 (estudo da Metso em 2010)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27 - Parâmetros granulométricos obtidos nos ensaios de HPGR realizados na amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT

Óxido de alumínio eletrofundido	Equipamento	Força específica de moagem (N/mm²)	Abertura inicial entre os rolos (mm)	F ₈₀ (mm)	F ₅₀ (mm)	P ₈₀ (mm)	P ₅₀ (mm)	Relação de redução (F ₅₀ /P ₅₀)
BT	D1000	2	19	32,2	23,6	6,3	2,3	10,3
		3	19	32,2	23,6	5,6	1,8	13,1
		4	12	32,2	23,6	4,6	1,2	19,7
	HRC™ 300 (Metso, 2010)	1	2	9,4	4,0	6,1	2,2	1,8
		2	2	9,4	4,0	5,5	2,0	2,0
		3	2	9,4	4,0	4,1	1,4	2,9
		4	2	9,4	4,0	3,3	1,0	4,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Figura 31, e na Tabela 27, revelam que os ensaios executados no D1000, pelo autor, e os ensaios conduzidos no HRC™ 300, pela Metso em 2010, apesar de terem sido realizados em equipamentos distintos e com granulometrias de alimentação diferenciadas, produziram distribuições granulométricas do produto relativamente similares para o mesmo nível de força específica de moagem. Isto sugere que a variação da granulometria de alimentação

exerce baixa influência na granulometria do produto. Este fato pode ser justificado pela relativa homogeneidade do material, que é produzido sob condições controladas na eletrofusão. O que vai ao encontro dos estudos de Tondo (1997) que demonstraram que a quebra de materiais homogêneos, como o quartzo e o mármore, não seria influenciada pela distribuição granulométrica de alimentação, velocidade e abertura inicial entre os rolos, mas sim pela quantidade de energia aplicada.

A fim de quantificar o desempenho dos ensaios de HPGR quanto a redução de tamanho, elaborou-se uma relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} ⁴¹ das distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos com as respectivas forças específicas de moagem aplicadas. Esta relação é ilustrada nas Figuras 32, 33 e 34 para os ensaios realizados com as amostras de óxido BT, conduzidos no D1000 e no HRC™ 300.

Figura 32 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem dos ensaios realizados com o óxido de alumínio BT no D1000 (abertura inicial de 19 mm)⁴²

Fonte: Elaborado pelo autor.

⁴¹ P_{30} é o diâmetro no qual passam 30% das partículas de uma determinada distribuição granulométrica do fluxo da alimentação ou do produto de um equipamento ou circuito de cominuição (mm).

⁴² Os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} da distribuição granulométrica da alimentação são indicados no eixo y (força específica de moagem é 0).

Figura 33 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem de um ensaio realizado com o óxido de alumínio BT no D1000 (abertura inicial de 12 mm)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem dos ensaios realizados com o óxido de alumínio BT no HRC™ 300 (estudo da Metso em 2010)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados nas Figuras 31, 32, 33 e 34 e na Tabela 27 demonstram que, conforme o esperado, há uma redução da granulometria do produto com o aumento da força específica de moagem. Observa-se que as maiores relações

de redução foram obtidas nos ensaios realizados no D1000, cujas granulometrias de alimentação eram consideravelmente mais grosseiras do que as dos ensaios conduzidos no HRC™ 300.

As distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos dos ensaios executados no D1000 com a amostra de óxido de alumínio TB são ilustradas na Figura 35. Os parâmetros F_{80} , F_{50} , P_{80} , P_{50} associados a elas, bem como as relações de redução obtidas nestes ensaios são apresentados na Tabela 28.

Figura 35 - Distribuições granulométricas dos ensaios realizados com a amostra de óxido de alumínio TB no D1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 - Parâmetros granulométricos obtidos nos ensaios de HPGR realizados com o óxido de alumínio eletrofundido TB

Óxido de alumínio eletrofundido	Equipamento	Força específica de moagem (N/mm²)	F_{80} (mm)	F_{50} (mm)	P_{80} (mm)	P_{50} (mm)	Relação de redução (F_{50}/P_{50})
TB	D1000	1	9,5	3,4	6,5	2,0	1,7
		3	9,5	3,4	4,7	0,9	3,8
		4	9,5	3,4	3,3	0,7	4,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} das distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos com a força específica de moagem é ilustrada na Figura 36.

Figura 36 - Relação entre os parâmetros P_{80} , P_{50} e P_{30} e a força específica de moagem dos ensaios realizados com o óxido de alumínio TB no D1000 (abertura inicial entre os rolos de 19 mm)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos ensaios realizados com a amostra de óxido de alumínio TB, apresentados nas Figuras 35 e 36 e na Tabela 28, também demonstram a redução da distribuição granulométrica do produto com o aumento da força específica de moagem.

As distribuições granulométricas dos produtos obtidos nos ensaios de HPGR em circuito aberto foram comparadas as especificações mínima; máxima e média anual de granulometria do produto requeridas pelos circuitos industriais BT e TB. Verificou-se que apenas a especificação máxima e a média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito de cominuição TB seriam atendidas por um HPGR configurado em circuito aberto. Para o atendimento da especificação máxima, o equipamento deveria operar com uma força específica de moagem de $1 N/mm^2$, enquanto que para atender a especificação média anual, requerer-se-ia uma força

específica de moagem de 3 N/mm², conforme apresentado nas Figuras 37, 38 e na Tabela 29.

Figura 37 - Distribuição granulométrica do produto do D1000 (1 N/mm²) e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Distribuição granulométrica do produto do D1000 (3 N/mm²) e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito aberto de HPGR e as especificações máxima e média anual de granulometria do produto requeridas pelo circuito industrial TB

	Granulometria do produto do HPGR circuito aberto D1000 F_{sp} : 1 N/mm ²	Especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	Diferença (mm)	Granulometria do produto do HPGR circuito aberto D1000 F_{sp} : 3 N/mm ²	Especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	Diferença (mm)
P ₈₀ (mm)	6,5	5,5	1,0	4,7	3,6	1,1
P ₅₀ (mm)	2,0	2,2	0,2	0,9	1,2	0,3
P ₃₀ (mm)	0,7	0,8	0,1	0,4	0,6	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 29 demonstram que os parâmetros F_{80} , P_{80} , P_{50} e P_{30} das especificações de granulometria do produto (máxima e média anual), requeridas pelo circuito de cominuição TB são relativamente similares aos obtidos nos ensaios de HPGR em circuito aberto, com as diferenças mais significativas na parcela grosseira da distribuição granulométrica do produto (P_{80}). Isso confirma que o HPGR configurado em circuito aberto é capaz de atender as especificações máxima e média anual de granulometria do produto requeridas pelo circuito industrial TB.

b) ensaios HRC^{TM} 300- vazão mássica e consumo de potência

Os resultados dos ensaios de HPGR piloto, realizados no HRC^{TM} 300 (METSO, 2010), em termos de vazão mássica e de consumo de potência são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Parâmetros de vazão mássica e de energia obtidos nos ensaios no HRC™ 300

Ensaio	Força específica de moagem (N/mm ²)	Vazão mássica (t/h)	Vazão mássica específica (t.s/h.m ³)	Consumo de potência (kW)	Energia específica de cominuição (kWh/t)
1	1,0	7,84	235,92	3,77	0,48
2	2,0	7,53	226,30	7,53	1,00
3	3,0	7,42	223,00	11,30	1,52
4	4,0	7,80	234,42	15,06	1,93

Fonte: Metso (2010). Adaptado pelo autor.

Os resultados de vazão mássica específica e de energia específica de cominuição obtidos nos ensaios foram plotados em função da força específica de moagem, conforme apresentado nas Figuras 39 e 40, respectivamente.

Figura 39 - Vazão mássica específica em função da força específica de moagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Energia específica de cominuição em função da força específica de moagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme demonstrado na Figura 39, o aumento da força específica de moagem promove uma pequena diminuição na vazão mássica específica.

Os dados apresentados pela Figura 40 ilustram que há uma forte relação linear entre a força específica de moagem e a energia específica de cominuição.

c) considerações sobre a umidade do material frente aos ensaios de HPGR

Foi observado, a partir dos ensaios de HPGR, que não houve a formação de flocos no produto. Isto se deve à ausência de umidade do material, que advém de uma etapa prévia de fusão. Em termos de projeto do circuito de HPGR isso é particularmente positivo, pois, evita a necessidade de um equipamento adicional para desaglomeração dos flocos.

d) escalonamento da vazão mássica e da potência via vazão mássica específica para a especificação máxima e média anual de granulometria do produto do circuito TB (HPGR configurado em circuito aberto)

Os dados dos ensaios realizados no D1000 comprovaram que o HPGR configurado em circuito aberto é capaz de atender as especificações máxima e média anual de granulometria do produto requeridas pelo circuito industrial TB. Como o D1000 não permite a obtenção da vazão mássica e do consumo de potência, realizou-se um escalonamento com base nas vazões mássicas específicas obtidas nos ensaios realizados no HRC™ 300 com a amostra de óxido de alumínio BT. Considerou-se como premissa que as duas amostras possuem comportamento similar frente a cominuição. Esta abordagem também é realizada na calibração do modelo no *JKSimMet®*, descrita na seção a seguir. Os resultados do dimensionamento da vazão mássica e do consumo de potência são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Dimensionamento da vazão mássica e do consumo de potência a partir da vazão mássica específica

Especificação de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB a ser atendida		Máxima anual	Média anual
Força específica de moagem (N/mm ²)		1	3
Vazão mássica específica (t.s/m ³ .h)		235,9	223,0
Vazão mássica (t/h)		80,2	80,3
Energia específica de cominuição (kWh/t)		0,5	1,5
Consumo de potência (kW)		38,5	122,0
HPGR selecionado	Metso HRC™ 800	Diâmetro dos rolos (m)	0,8
		Comprimento dos rolos (m)	0,5
		L/D (m)	0,63
		Velocidade dos rolos (m/s)	0,9
		Potência máxima (kW)	220
		Vazão mássica máxima (t/h) ⁴³	118

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 31, o HRC™ 800 configurado em circuito aberto poderia atender a especificação máxima e média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB com uma margem considerável de vazão

⁴³ Valor baseado no limite máximo de velocidade dos rolos para este equipamento (1,33 m/s).

mássica e de potência. Destaca-se ainda que, para a velocidade dos rolos ajustada (0,9 m/s), o equipamento supriria a demanda diária de produção (80 toneladas) em apenas 1 hora de operação.

4.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO HPGR

4.3.1. Calibração do modelo

O modelo do HPGR contido no simulador *JKSimMet*® (MORRELL et al., 1997) foi calibrado com os dados de um dos ensaios pilotos realizados pela Metso (2010), em uma amostra de óxido BT, com características similares às amostras deste estudo, e com os dados das funções quebra obtidas a partir dos ensaios *drop weight*. Estas, além de representar a quebra de partículas individuais, também foram utilizadas para descrever a quebra por compressão de leitos, com seus dados sendo extrapolados até um t_{10} igual a 50%. Adicionalmente, foram utilizados os valores padrão (*default*) de energia específica de cominuição associados à quebra de compressão de leitos e valores padrão (*default*) de outros parâmetros de quebra e classificação do modelo.

Os dados referentes a calibração do modelo são apresentados na Tabela 32 e nas Figuras 41 e 42.

Tabela 32 - Dados utilizados na calibração do modelo de Morrell et al. (1997)

Escala do ensaio		Piloto	Piloto
Equipamento		HRC™ 300	HRC™ 300
Fabricante		Metso	Metso
Diâmetro do rolo (m)		0,30	0,30
Comprimento do rolo (m)		0,15	0,15
Velocidade dos rolos (m/s)		0,74	0,74
Força específica de moagem(N/mm²)		3,00	3,00
Dados de entrada	Material processado	Óxido de alumínio eletrofundido	Óxido de alumínio eletrofundido
		BT	TB
	Densidade aparente (t/m³)	2,30	2,30
	Densidade real (t/m³)	3,87	3,87
	Densidade dos flocos (t/m³) ⁴⁴	3,10	3,10
	Umidade (%)	0	0
	Granulometria da alimentação (F ₈₀)	9,42	9,42
	Granulometria do produto (P ₈₀)	4,02	4,02
	Vazão mássica medida (t/h)	7,42	7,42
	Vazão mássica específica (t.s/m³.h)	223	223
	Abertura operacional entre os rolos (mm)	6	6
	Consumo de potência medido (kW)	11,30	11,30
	Consumo de potência em vazio (kW)	1,50	1,50
	Energia específica de cominuição (kWh/t)	1,52	1,52
	Energia específica de cominuição líquida (kWh/t)	1,32	1,32
Dados de saída	Vazão mássica calculada (t/h)	7,42	7,42
	Abertura crítica entre os rolos (mm)	8,13	8,13
	Consumo de potência calculado (kW)	11,29	11,29
	Fração de material de alimentação encaminhado as bordas dos rolos (%)	10	10
Parâmetros do modelo	Fator divisão	2,50	2,50
	K _{1h}	0,00	0,00
	K _{3p}	0,90	0,90
	K _{3e}	0,90	0,90
	t _{10p}	11,43	11,43
	t _{10e}	11,43	11,43
	t _{10h}	66,64	63,16
	K _p compressão	3,66	4,40
Erro <i>model fit</i> (SDs)		1,80	1,84

Fonte: Elaborado pelo autor.

⁴⁴ Assumido como 80% do valor da densidade real do material.

Figura 41 - Distribuições granulométricas experimentais e ajustadas⁴⁵ para amostra de óxido de alumínio eletrofundido BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Distribuições granulométricas experimentais e ajustadas para amostra de óxido de alumínio eletrofundido TB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à indisponibilidade do dado de abertura operacional entre os rolos do ensaio de HPGR utilizado para calibração do modelo, este parâmetro foi calculado a partir da Equação 19 (KLYMOWSKY et al., 2002).

⁴⁵ Do termo em inglês *fit*.

$$x_g = \frac{\dot{m}_{alim.} \cdot D}{\rho_{flococo} \cdot 3,6} \cdot \frac{\dot{m}_{flococo}}{\dot{m}_{alim.}} \quad (19)$$

Onde:

x_g : abertura operacional entre os rolos (mm);

$\dot{m}_{alim.}$: vazão mássica específica obtida a partir da vazão de alimentação (t.s/m³.h);

$\dot{m}_{flococo}$: vazão mássica específica calculada a partir da relação entre abertura operacional e o diâmetro dos rolos (t.s/m³.h);

$\rho_{flococo}$: densidade do floco (t/m³).

No cálculo considerou-se que a vazão mássica específica obtida a partir da vazão de alimentação ($\dot{m}_{alim.}$) seria igual a vazão mássica específica obtida pela relação entre a abertura operacional e o diâmetro dos rolos ($\dot{m}_{flococo.}$), entretanto, de acordo com Klymowsky et al., (2002), estes valores podem diferir em muitas situações, por exemplo, quando há extrusão ou *bypass* ($\dot{m}_{flococo.}/\dot{m}_{alim.} < 1$), ou quando há restrição do fluxo de material ao longo de todo o comprimento do rolo ($\dot{m}_{flococo.}/\dot{m}_{alim.} > 1$). Esta última relação também indica escorregamento.

Na presente pesquisa, desconsiderou-se os efeitos de extrusão e de escorregamento do material no decorrer da realização dos ensaios, uma vez que, de acordo com Campos et al. (2017), em escala laboratorial estes efeitos são minimizados, devido ao maior controle da operação, quando comparado à escala industrial. Apesar dos ensaios realizados no HRC™ 300 serem denominados pilotos, suas dimensões e condições operacionais são classificadas como escala de laboratório.

4.3.2. Simulações e verificação do atendimento das especificações de granulometria do produto

A partir da calibração do modelo, foram realizadas simulações de HPGR para avaliar o atendimento as especificações de granulometria do produto e de vazão mássica requeridas pelos rotas de cominuição industrial da Elfusa (BT e TB). Foram estipulados oito cenários de simulações de HPGR em circuito fechado, que estão descritos a seguir.

Devido à indisponibilidade do valor real da eficiência de peneiramento para um circuito fechado de HPGR, uma vez que os ensaios piloto foram conduzidos em circuito aberto, assumiu-se estimativas de eficiência de 50 e 80%, representando o pior e o melhor caso, respectivamente. Ainda que se tenha em mente a dificuldade do peneiramento em malhas finas e a seco, que é o caso das alternativas avaliadas neste estudo, pressupõe-se que valores de eficiência de peneiramento inferiores a 50% são inaceitáveis sob o ponto de vista operacional.

Além disso é de conhecimento que existem tecnologias atuais (*Rhewum*®, *Derrick*® e *Haver & Boecker*) capazes de realizar o peneiramento fino e a seco com níveis de eficiência relativamente altos. As peneiras da *Rhewum*® GmbH já possuem este tipo aplicação em indústrias de óxidos de alumínio fundidos (HENDRICH, 2018)⁴⁶ e há registros de uma aplicação industrial das peneiras *Derrick*® em um circuito de HPGR, em duplo estágio, no qual utiliza-se malhas de 1,16; 0,25 e 0,074 mm (VAN DER MEER, 2018). Esta aplicação compreende um circuito de cominuição de feldspato.

Destaca-se ainda que a ausência de umidade do óxido de alumínio eletrofundido facilita o peneiramento, mesmo em malhas consideravelmente finas. Estudos de eficiência realizados pela Elfusa em suas peneiras circulares, em malhas inferiores à 1 mm, indicaram eficiências de peneiramento entre 80 e 95%.

Um resumo dos cenários das simulações realizadas neste estudo é apresentado Tabela 33.

---

⁴⁶ HENDRICH, S. **Rhewum screen applications**. [informação pessoal] Mensagem recebida por: <franciscopedrosa23@hotmail.com> em 18 out. 2018.

Tabela 33 - Cenários estabelecidos para as simulações realizadas

Circuito de cominuição	Especificações requeridas		Circuito fechado HPGR simulado				HPGR selecionado (D x L - m)
	Granulometria do produto	Vazão mássica diária (t)	Cenário	Vazão do circuito-alimentação nova (t/h)	Malha da peneira (mm)	Eficiência (%)	
BT	Máxima	80	1	30	3,35	50	HRC™ 800 (0,8 x 0,5)
	Máxima	80	2	30	3,35	80	
	Mínima	80	3	15	0,5	50	
	Mínima	80	4	15	0,5	80	
	Média anual	80	5	20	1,4	50	
	Média anual	80	6	20	1,4	80	
TB	Mínima	80	7	20	1,4	50	
	Mínima	80	8	20	1,4	80	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 33, para atender a produção diária requerida por ambos os circuitos, foi necessário estabelecer diferentes cenários de vazão mássica horária (alimentação nova), devido à limitação do *range* de velocidade dos rolos do equipamento selecionado e à grande variação da carga circulante em função da malha utilizada na peneira para o fechamento do circuito.

Em todas as simulações, o fator de divisão (γ) foi ajustado de modo a se obter 10% do material alimentado na região das bordas dos rolos, seguindo-se a recomendação de Daniel (2002). Os resultados das simulações e a verificação do atendimento às especificações de granulometria do produto e vazão mássica requeridas pelos circuitos industriais são apresentadas a seguir.

a) cenário 1: circuito (BT) HPGR fechado em uma malha de 3,35 mm-eficiência de peneiramento de 50%

O cenário 1 foi definido, considerando-se o atendimento da especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT. Estabeleceu-se uma vazão de alimentação nova de 30 (t/h), uma malha da peneira de 3,35 mm e uma eficiência de peneiramento de 50%. A Figura 43 ilustra o circuito simulado para esta alternativa. As distribuições granulométricas resultantes desta

simulação e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT são apresentadas na Figura 44.

Figura 43 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com malha de 3,35 mm (eficiência de 50%) e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

**b) cenário 2: circuito (BT) HPGR fechado em uma malha de 3,35 mm-
eficiência de peneiramento de 80%**

O cenário 2 é semelhante ao cenário 1, com exceção da eficiência de peneiramento utilizada, que é assumida como 80%. O circuito simulado para esta opção é apresentado na Figura 45. As distribuições granulométricas referentes à esta simulação e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT são apresentadas na Figura 46.

Figura 45 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm (eficiência de 80%) e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

c) síntese e discussão dos resultados das simulações dos cenários 1 e 2

Uma síntese dos resultados das simulações dos cenários 1 e 2 é apresentada na Tabela 34.

Tabela 34 - Resumo dos resultados das simulações para os cenários 1 e 2

Cenário simulado	1	2
Circuito industrial a ser atendido	BT	BT
Vazão mássica do circuito (t/h)	30	30
Equipamento selecionado	HRC™ 800	HRC™ 800
Fabricante	Metso	Metso
Número de equipamentos	1	1
Diâmetro do rolo (m)	0,8	0,8
Comprimento do rolo (m)	0,5	0,5
Relação L/D	0,63	0,63
Potência instalada (kW)	220	220
Abertura operacional entre os rolos (mm)	16	16
Abertura crítica entre os rolos (mm)	21,7	21,7
Velocidade dos rolos (m/s)	1,30	1,18
Vazão mássica do HPGR (t/h)	115,7	104,9
Abertura da malha da peneira (mm)	3,35	3,35
Eficiência de peneiramento (%)	50	80
Carga circulante (%)	285,7	249,7
P ₈₀ do circuito (mm)	1,84	2,15
Potência total consumida (kW)	154,2	140,0
Energia específica de cominuição (kWh/t)	1,33	1,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 34, evidenciam que, conforme o esperado, o aumento da eficiência de peneiramento se traduz na diminuição da carga circulante, da vazão de alimentação do HPGR, do consumo de potência e no “engrossamento” da granulometria do produto do circuito, representado pelo aumento de seu P₈₀.

As distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos de HPGR simulados para os cenários 1 e 2 são comparadas à especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT, através da análise dos dados apresentados nas Figuras 44 e 46 e na Tabela 35.

Tabela 35 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado com uma malha de 3,35 mm e a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 1	Especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	Diferença (mm)	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 2	Especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	Diferença (mm)
P ₈₀ (mm)	1,84	2,21	0,37	2,14	2,21	0,07
P ₅₀ (mm)	0,69	0,65	0,04	0,78	0,65	0,13
P ₃₀ (mm)	0,34	0,43	0,09	0,40	0,43	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados demonstram que um circuito de HPGR fechado com uma peneira com malha de 3,35 mm atende a especificação máxima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial. A distribuição granulométrica do produto do circuito simulado no cenário 2, no qual utiliza-se uma eficiência de peneiramento de 80%, é a que mais se aproxima da granulometria do produto exigida.

d) cenário 3: circuito HPGR (BT) fechado em uma malha de 0,5 mm- eficiência de peneiramento de 50%

O cenário 3 foi estabelecido tendo em vista o atendimento da especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT. Definiu-se uma vazão de alimentação nova de 15 (t/h), uma malha de peneira de 0,5 mm e uma eficiência de peneiramento de 50%. O circuito simulado para esta alternativa é apresentado na Figura 47. As distribuições granulométricas relativas a esta simulação e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT são apresentadas na Figura 48.

Figura 47- Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 0,5 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Distribuições granulométricas do circuito HPGR fechado com um peneira com abertura de malha de 0,5 mm (eficiência de 50%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

e) cenário 4: circuito HPGR (BT) fechado em uma malha de 0,5 mm- eficiência de peneiramento de 80%

O cenário 4 é similar ao cenário 3, entretanto, utiliza-se uma eficiência de peneiramento de 80%. O circuito simulado para esta opção é apresentado na Figura

49. As distribuições granulométricas referentes a esta simulação e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT são apresentadas na Figura 50.

Figura 49 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 0,5 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Distribuições granulométricas do circuito HPGR fechado com um peneira com malha de 0,5 mm (eficiência de 80%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

Fonte: Elaborado pelo autor.

f) Síntese e discussão dos cenários 3 e 4

Um resumo dos resultados das simulações dos cenários 3 e 4 é apresentado na Tabela 36.

Tabela 36 - Síntese das simulações dos cenários 3 e 4

Cenário simulado	3	4
Circuito industrial a ser atendido	BT	BT
Vazão mássica do circuito (t/h)	15	15
Equipamento selecionado	HRC™ 800	HRC™ 800
Fabricante	Metso	Metso
Número de equipamentos	1	1
Diâmetro do rolo (m)	0,8	0,8
Comprimento do rolo (m)	0,5	0,5
Relação L/D	0,63	0,63
Potência instalada (kW)	220	220
Abertura operacional entre os rolos (mm)	16	16
Abertura crítica entre os rolos (mm)	21,7	21,7
Velocidade dos rolos (m/s)	1,30	1,25
Vazão mássica do HPGR (t/h)	115,5	111,6
Abertura da malha da peneira (mm)	0,50	0,50
Eficiência de peneiramento (%)	50	80
Carga circulante (%)	669,7	643,9
P ₈₀ do circuito (mm)	0,40	0,43
Potência total consumida (kW)	153,9	148,8
Energia específica de cominuição (kWh/t)	1,33	1,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Tabela 36, assim como os resultados demonstrados na Tabela 34, evidenciam que o aumento da eficiência de peneiramento promove a redução da carga circulante, da vazão de alimentação do HPGR, do consumo de potência e o “engrossamento” da granulometria do produto do circuito, representado pelo aumento de seu P₈₀.

As distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos de HPGR dos cenários 3 e 4 são comparadas à especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT, a partir da análise dos dados ilustrados nas Figuras 48 e 50 e na Tabela 37.

Tabela 37 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado em uma malha de 0,5 mm e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 3	Especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	Diferença (mm)	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 4	Especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	Diferença (mm)
P ₈₀ (mm)	0,40	0,41	0,01	0,43	0,41	0,02
P ₅₀ (mm)	0,15	0,26	0,11	0,17	0,26	0,09
P ₃₀ (mm)	0,07	0,17	0,10	0,08	0,17	0,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados evidenciam o atendimento da especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT utilizando-se um HPGR em circuito fechado com uma peneira com uma malha de 0,5 mm. Apesar do P₈₀ requerido ser atendido, verifica-se uma significativa geração de finos, o que é uma característica intrínseca do HPGR em comparação às tecnologias de cominuição convencionais, tal como os britadores de rolos. Portanto, caso esta particularidade seja considerada uma limitação, deve-se avaliar uma campanha de ensaios de HPGR em circuito fechado, otimizando-se as variáveis de operação, de modo a se determinar as condições que melhor se adequem as necessidades do processo.

g) cenário 5: circuito HPGR (BT) fechado em uma malha de 1,40 mm- eficiência de peneiramento de 50%

O cenário 5, foi determinado com o objetivo de atender a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT. Estipulou-se uma vazão mássica de alimentação nova de 20 (t/h), uma malha de peneira de 1,40 mm e uma eficiência de peneiramento de 50%. A Figura 51 apresenta o circuito simulado para esta alternativa. As distribuições granulométricas relacionadas a esta simulação e a especificação média anual de granulometria do produto do circuito industrial BT são demonstradas na Figura 52.

Figura 51 - Circuito HPGR (BT) fechado com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 50%) e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

Elaborado pelo autor.

**h) cenário 6: circuito HPGR (BT) fechado em uma malha de 1,40 mm-
eficiência de 80%**

O cenário 6 assemelha-se ao cenário 5, no entanto, assume-se uma eficiência de peneiramento de 80%. O circuito simulado desta opção é apresentado na Figura 53. As distribuições granulométricas referentes a esta simulação e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT são apresentadas na Figura 54.

Figura 53 - Circuito HPGR fechado (BT) com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 80%) e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT.

Fonte: Elaborado pelo autor.

i) síntese e discussão dos resultados dos cenários 5 e 6

Uma síntese dos resultados das simulações dos cenários 5 e 6 é apresentada na Tabela 38.

Tabela 38 - Resumo das simulações dos cenários 5 e 6

Cenário simulado	5	6
Circuito industrial a ser atendido	BT	BT
Vazão mássica do circuito (t/h)	20	20
Equipamento selecionado	HRC™ 800	HRC™ 800
Fabricante	Metso	Metso
Número de equipamentos	1	1
Diâmetro do rolo (m)	0,8	0,8
Comprimento do rolo (m)	0,5	0,5
Relação L/D	0,63	0,63
Potência instalada (kW)	220	220
Abertura operacional entre os rolos (mm)	16	16
Abertura crítica entre os rolos (mm)	21,7	21,7
Velocidade dos rolos (m/s)	1,21	1,15
Vazão mássica do HPGR (t/h)	108	102,8
Abertura da malha da peneira (mm)	1,40	1,40
Eficiência de peneiramento (%)	50	80
Carga circulante (%)	439,9	413,6
P ₈₀ do circuito (mm)	0,94	1,02
Potência total consumida (kW)	144	137,1
Energia específica de cominuição (kWh/t)	1,33	1,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados da Tabela 38 demonstram que aumento da eficiência de peneiramento reflete na diminuição da carga circulante, da vazão de alimentação do HPGR, do consumo de potência e no “engrossamento” da granulometria do produto do circuito, representado pelo aumento de seu P₈₀. Este mesmo comportamento foi observado nas Tabelas 36 e 34.

As distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos dos cenários 5 e 6 são comparadas à especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT, por meio da análise dos dados das Figuras 52 e 54 e da Tabela 39.

Tabela 39 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado em uma malha de 1,40 mm e a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT

	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 5	Especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	Diferença (mm)	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 6	Especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT	Diferença (mm)
P ₈₀ (mm)	0,94	0,83	0,11	1,02	0,83	0,19
P ₅₀ (mm)	0,39	0,40	0,01	0,43	0,40	0,03
P ₃₀ (mm)	0,19	0,24	0,05	0,21	0,24	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados indicam o atendimento a especificação média anual de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial BT a partir da utilização de um HPGR em circuito fechado com uma peneira com uma malha de 1,40 mm. As distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos simulados nos cenários 5 e 6, nos quais utilizou-se eficiências de peneiramento de 50 e 80%, respectivamente, se adequam de maneira relativamente similar à demanda média anual de granulometria do produto.

**j) cenário 7: circuito HPGR (TB) fechado em uma malha de 1,40 mm-
eficiência de peneiramento de 50%**

O cenário 7 foi determinado tendo em vista o atendimento da especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB. Definiu-se uma vazão de alimentação nova de 20 (t/h), uma malha de peneira de 1,40 mm e uma eficiência de peneiramento de 50%. O circuito simulado para esta alternativa é apresentado na Figura 55. As distribuições granulométricas desta simulação e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB são apresentadas na Figura 56.

Figura 55 - Circuito HPGR (TB) fechado com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 50%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 50%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB.

Fonte: Elaborado pelo autor.

k) cenário 8: circuito HPGR fechado em uma malha de 1,40 mm- eficiência de peneiramento de 80%

O cenário 8 é semelhante ao cenário 7, com exceção da eficiência de peneiramento que é assumida como 80%. A Figura 57 ilustra o circuito simulado desta alternativa. As distribuições granulométricas referentes a esta simulação e a

especificação mínima de granulometria do produto requerido pelo circuito industrial TB são apresentadas na Figura 58.

Figura 57 - Circuito HPGR (TB) fechado com uma peneira com malha de 1,40 mm, assumindo-se uma eficiência de peneiramento de 80%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - Distribuições granulométricas do circuito de HPGR fechado com um peneira com malha de 1,40 mm (eficiência de 80%) e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB

Fonte: Elaborado pelo autor.

I) Síntese e discussão dos resultados dos cenários 7 e 8

Um sumário dos resultados das simulações dos cenários 7 e 8 são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Resumo das simulações dos cenários 7 e 8

Cenário simulado	7	8
Circuito industrial a ser atendido	TB	TB
Vazão mássica do circuito (t/h)	20	20
Equipamento selecionado	HRC™ 800	HRC™ 800
Fabricante	Metso	Metso
Número de equipamentos	1	1
Diâmetro do rolo (m)	0,8	0,8
Comprimento do rolo (m)	0,5	0,5
Relação L/D	0,63	0,63
Potência instalada (kW)	220	220
Abertura operacional entre os rolos (mm)	16	16
Abertura crítica entre os rolos (mm)	21,7	21,7
Velocidade dos rolos (m/s)	1,14	1,08
Vazão mássica do HPGR (t/h)	101,6	96,4
Abertura da malha da peneira (mm)	1,40	1,40
Eficiência de peneiramento (%)	50	80
Carga circulante (%)	408,0	381,7
P ₈₀ do circuito (mm)	0,99	1,06
Potência total consumida (kW)	135,6	128,7
Energia específica de cominuição (kWh/t)	1,33	1,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados da Tabela 40 reafirmam os resultados apresentados nas Tabelas 38, 36 e 34 demonstrando que o aumento da eficiência de peneiramento ocasiona a redução da carga circulante, da vazão de alimentação do HPGR, do consumo de potência e o engrossamento da granulometria do produto do circuito, caracterizado pelo aumento de seu P₈₀.

As distribuições granulométricas dos produtos dos circuitos dos cenários 7 e 8 são comparadas à especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo

circuito industrial TB, mediante a análise dos dados apresentados nas Figuras 56 e 58 e na Tabela 41.

Tabela 41 - Comparação entre as granulometrias do produto do circuito de HPGR fechado em uma malha de 1,40 mm e a especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB

	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 7	Especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	Diferença (mm)	Granulometria do produto do circuito fechado HPGR cenário 8	Especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB	Diferença (mm)
P ₈₀ (mm)	0,99	0,98	0,01	1,06	0,98	0,08
P ₅₀ (mm)	0,42	0,50	0,08	0,47	0,50	0,03
P ₃₀ (mm)	0,19	0,26	0,07	0,22	0,26	0,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados demonstram o atendimento da especificação mínima de granulometria do produto requerida pelo circuito industrial TB mediante ao emprego de um HPGR em circuito fechado com uma peneira com uma malha de 1,40 mm. A distribuição granulométrica do produto do circuito simulado no cenário 8, em que se utilizou uma eficiência de peneiramento de 80%, é a que melhor se adequa a granulometria do produto exigida.

4.4. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SIMPLIFICAÇÃO DO CIRCUITO

O atendimento das especificações de granulometria do produto e da vazão mássica do circuito demonstram o potencial da tecnologia HPGR como uma alternativa à rota convencional de cominuição de óxido de alumínio eletrofundido da Elfusa. A Tabela 42 apresenta uma comparação entre estas duas alternativas, em termos de equipamentos de cominuição.

Tabela 42 - Comparação entre as rotas tradicional e HPGR, em termos de equipamentos de cominuição

Rota de cominuição	Equipamento de cominuição	Número de unidades	Dimensões D x L (m)	Fabricante	Potência instalada (kW)
Tradicional	Britadores de rolos	13	0,55 x 0,4	Tavmac	239,0
HPGR	HPGR	1	0,8 x 0,5	Metso	220,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados apresentados na Tabela 42 demonstram um grande potencial para simplificação do circuito. Em relação ao número de equipamentos de cominuição, a rota HPGR propõe uma redução de 13 para 1 (diminuição de *footprint*). Isto impacta significativamente na redução dos custos operacionais.

Outro aspecto positivo da simplificação do circuito é a facilidade e o maior controle da operação. Com a redução do número de equipamentos e, conseqüentemente, dos fluxos, os procedimentos de amostragem tornam-se mais exequíveis, podendo ser realizados com uma maior frequência, de modo a se avaliar o melhor cenário de operação para uma determinada demanda. Como a operação do circuito não é fixa e se adapta às especificações de granulometria do produto e de produção requeridas pelos clientes, a rota HPGR tem a vantagem de alterar estes parâmetros de maneira mais simples e mais rápida do que a rota convencional, através do ajuste da velocidade dos rolos, da pressão de operação e da alteração da malha da peneira que fecha o circuito. No circuito de britadores de rolos, a vazão mássica e granulometria do produto são alteradas mediante a ativação ou desligamento dos equipamentos e fluxos e, assim como no HPGR, pela alteração das malhas das peneiras, no entanto, em um número consideravelmente superior.

A rota HPGR também facilita a automação do circuito, uma vez que estes equipamentos geralmente possuem softwares específicos de controle de processo. Isto é particularmente importante pois minimiza o contato direto dos colaboradores no ajuste manual dos equipamentos, o que é particularmente positivo sob a ótica da segurança do trabalho.

Do ponto de vista de projeto, embora esta pesquisa seja uma análise conceitual, deve ser avaliada a instalação de silos para armazenar produção diária de alimentação nova dos circuitos BT e TB e que permitam um controle de vazão

conforme a demanda do processo. Isso é necessário pois, conforme descrito anteriormente, não é possível manter uma vazão mássica constante para as diferentes demandas de processo devido à grande variação da carga circulante em função da malha utilizada para o fechamento do circuito e a limitação de vazão mássica do HPGR selecionado.

Dois pontos que merecem atenção e carecem de estudos futuros são o impacto da elevada abrasividade do óxido de alumínio eletrofundido no desgaste do revestimento dos rolos e a avaliação do enfraquecimento do produto, aspectos estes que não estão no escopo deste trabalho.

A alta abrasividade do óxido de alumínio eletrofundido ($AI = 0,9$) aparentemente não é um fator limitante para a aplicação do HPGR, uma vez que existem aplicações deste equipamento para a cominuição de materiais tão abrasivos quanto a alumina eletrofundida. Karimi e Djokoto (2012) citaram a aplicação do HPGR na cominuição de carvão de silício para a produção de grãos abrasivos.

Uma análise econômica da rota HPGR *versus* a rota convencional, com britadores de rolos, se faz necessária para verificar se a alternativa com o HPGR é economicamente atrativa. Esta análise deve englobar custos de capital e de operação (principalmente com relação a troca dos revestimentos dos rolos).

5. CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica deste estudo demonstrou a tecnologia HPGR em termos descritivos, funcionamento, mecanismo de cominuição envolvido dentre outras particularidades. Conclui-se que este equipamento vem sendo utilizado em diferentes indústrias (cimenteira e minérios de diamante, cobre, ouro, ferro, platina) que identificaram nesta tecnologia diferentes ganhos potenciais, dentre os quais destaca-se a eficiência energética.

A Metso recentemente introduziu esta tecnologia no setor de minerais industriais, através do desenvolvimento do HRC™ 800 e do HRC™ 8. Este último apresenta excelente custo benefício para tratar minérios/materiais de baixo valor agregado e tem permitido que empreendimentos que possuem pequenas receitas tenham acesso ao HPGR. Isso representa uma grande evolução, pois até alguns anos atrás este equipamento era restrito à indústrias de minérios de alto valor agregado e de grande porte.

O presente estudo também apresenta uma metodologia simplificada para realização de ensaios de HPGR através do Metso D1000. Este equipamento prevê a granulometria do produto com quantidades de massa relativamente reduzidas, o que é de grande valia para estágios iniciais de desenvolvimento de projetos onde a disponibilidade de amostra é limitada.

Em relação ao atendimento das especificações de granulometria do produto requeridas pelos circuitos de cominuição industrial da Elfusa pelo HPGR, concluiu-se que:

- O HPGR configurado em circuito aberto é capaz de atender as especificações máxima e média anual de granulometria do produto do circuito de cominuição TB operando com forças específicas de moagem de 1 e 3 N/mm², respectivamente;
- Para o atendimento da especificação mínima de granulometria do produto do circuito de cominuição TB é necessário o fechamento do circuito de HPGR com uma peneira com malha de 1,40 mm;
- A especificação máxima de granulometria do produto do circuito de cominuição BT é atendida pelo HPGR disposto em circuito fechado com malha de 3,35 mm;

- O atendimento da especificação mínima de granulometria do produto do circuito de cominuição BT requer o fechamento do circuito de HPGR em uma malha de 0,5 mm.
- A especificação média anual de granulometria do produto do circuito de cominuição BT é atendida pelo circuito de HPGR fechado com uma malha de 1,40 mm.

Quanto ao atendimento da vazão mássica, o HRC™ 800 é capaz de atender a demanda diária de vazão mássica nos diferentes cenários avaliados neste estudo.

Frente ao exposto, conclui-se que a aplicação do HPGR como uma rota alternativa para cominuição do óxido de alumínio eletrofundido apresenta-se operacionalmente promissora para o empreendimento foco deste estudo. Há um expressivo potencial de redução do número de equipamentos de 13 para 1, o que possivelmente implica na redução de custos operacionais, tais como manutenção e energéticos. Além disso, a simplificação do circuito facilita a operação e possibilita um maior controle do processo. No entanto, ressalta-se a necessidade da realização de estudos futuros que avaliem o impacto da elevada abrasividade do óxido de alumínio eletrofundido no desgaste do revestimento dos rolos e o enfraquecimento do produto.

É importante destacar também, que é fundamental uma análise econômica entre as rotas HPGR e convencional de britadores de rolos para verificar se a primeira é economicamente atrativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUZEID A. -Z. M., FUERSTENAU D. W. Grinding of mixtures in high-pressure grinding rolls. **International Journal of Mineral Processing**, v. 93, p. 59-65, 2009.

ALVES, V. K. **Metodologia para simulação e escalonamento de prensas de rolos**. 2012. 140 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-3253**: moinho de bolas-determinação do índice de trabalho. Rio de Janeiro, 1990. 4p.

_____. **NBR 9776**: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Norme Française P18-579**: granulats: détermination des coefficients d'abrasivité et de broyabilité. Paris; 2013.

AYDOGAN, N. A.; ERGÜN, L.; BENZER, H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. **Minerals Engineering**, v. 19, p.130-139, 2006.

BALLANTYNE, G. R.; HIDEN, M.; VAN DER MEER, F. P. Improved characterization of ball milling energy requirements for HPGR products. **Minerals Engineering**, v. 116, p. 72-81, 2018.

BALLANTYNE, G. R.; PEUKERT W., POWELL, M. S. Size specific energy (SSE) - Energy required to generate minus 75 micron material. **International Journal of Mineral Processing**, v.136, p. 2-6, 2015.

BARRIOS, G. P.; TAVARES, L. M. A preliminary model of high pressure roll grinding using the discrete element method and multi-body dynamics coupling. **Minerals Engineering**, v.156, p. 32-42, 2016.

_____. Simulation of a laboratory scale using DEM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 6., 2015, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: University of British Columbia, 2015. p. 1-13.

BENZER, H. et al. HPGR simulation from piston-die tests with an itabirite ore. **REM - International Engineering Journal**, v. 70, n. 1, p. 99-107, 2017.

BERGERMAN, M. G. **Estudo de otimização da seleção A da Elfusa**. Poços de Caldas: Unifal, 2015. 92 p. (Relatório Interno):

_____. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego**. 2009. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009b.

_____. **Relatório técnico acompanhamento ensaios Polysius e visitas aos fabricantes Mbe e Köppern**. Belo Horizonte: Vale, 2009a. 13 p. (Relatório Interno)⁴⁷.

BERGSTROM, B. H. Abrasiveness. In: WEISS, N. L. **SME mineral processing Handbook**. New York: SME, 1985. p. 30-70.

BOND, F.C. The third theory of comminution. **Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, v. 193, n. 5, p. 484-494, 1952.

BURCHARDT, E.; PATZELT, N.; KNECHT, J.; KLYMOWSKY, R. HPGR's in minerals: what do existing operations tell us for the future? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 5., 2011, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: University of British Columbia, 2011. p. 1-17.

CAMPOS, T. M.; BARRIOS, G. P.; SALAZAR J. S.; MAZZINGHY, D. B. RUSSO, J. F. C.; TAVARES, L. M. Comparação de modelos matemáticos na prensagem de rolos de minério de ferro itabirítico. In: 46º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 17º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO E 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 2016, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2016.

CAMPOS, T.M.; BARRIOS, G.K.P.; BUENO, G.; TAVARES, L.M. Desafios na modelagem da capacidade e potência consumida da prensa de rolos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 27., 2017, Belém. **Anais...** Belém: IFPA, 2017.

CHIEREGATI, A. C.; DELBONI JÚNIOR, H. Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 19., 2002, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2002. p. 95-102.

---

⁴⁷ Documento de acesso restrito, mediante autorização da empresa.

CITIC HEAVY INDUSTRIES. **High pressure grinding rolls**. Luoyang, 2015. 10 p. Disponível em: <<http://www.citic-hic.com/data/upload/2015-07/20150728090549194043.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2018.

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

DANIEL, M. J.; MORLEY, C. Can Diamonds Go All The Way With HPGRs? In: THE 4TH COLLOQUIUM ON DIAMONDS - SOURCE TO USE, 4., 2010, Gaborone. **Proceedings...** Johannesburg: **The Southern African Institute Of Mining and Metallurgy**, p. 201-214, 2010.

DANIEL, M.; MORRELL, S. HPGR application in Australia - status and future directions. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING SEMINAR (PROCEMIN), 2009, Santiago. **Proceedings...** Santiago: Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas de la Universidad de Chile, 2009. p.179-189.

DELBONI JÚNIOR, H. Cominuição. In: FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C. **Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil e Centro de Tecnologia Mineral, 2007. p. 103-131.

_____. **Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003. Apostila da disciplina PMI-5004: Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação.

DUNDAR H.; BENZER H.; AYDOGAN N. Application of Population Balance Model to HPGR Crushing. **Minerals Engineering**, v. 50-51, p. 114-120, 2013.

ENSAULT, V.P.B; ZHOU, H. HEITZMANN D. New population balance model for predicting particle size evolution in compression grinding. **Minerals Engineering**, 73, p. 7-15, 2015.

FLSMIDTH. **HPGR - High pressure grinding roll for the minerals industry**. Midvale, 2016. 11 p.

FUERSTENAU, D.; ABOUZEID, A. M. The performance of the high pressure roll mill: effect of feed moisture. **Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii**, 32, p. 227-241. 1998.

FUERSTENAU, D.; VAZQUEZ-FAVELA, J. On assessing and enhancing the energy efficiency of comminution processes. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 14, n. 1, p. 41-48. 1997.

GODOY, M. L. S.; BERGERMAN M. G.; GODOY, P. H; ROSA, M. A. N. Development of Salobo Project. In: CIM CONFERENCE AND EXIBITION, 2010, Vancouver. **Proceedings...** Westmount: CIM, 2010.

HERMAN, V. KNORR, B. WHALEN, D. HRC™: taking HPGR efficiency to next level by reducing edge effect. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONFERENCE, 10., Santiago, Chile. **Proceedings...**Santiago: Gecamin, 2013.

HERMAN, V. S.; HARBOLD, K. A.; MULAR, M. A.; BIGGS, L. J. Building the world's largest HPGR – the HRC™3000 at the Morenci Metcalf concentrator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 6., 2015, Vancouver. **Proceedings...**Vancouver: University of British Columbia, 2015. p. 1-21.

HUMBOLDT WEDAG COAL e MINERALS TECHNOLOGY GMBH. **HPGR test work description for Vale's Cristalino copper ore project**. Cologne: HUMBOLDT WEDAG COAL&MINERALS TECHNOLOGY GMB, 2009. 12 p. (Relatório Interno)⁴⁸.

JACKSON, J. M. DAVIM, P. J. Abrasive tools and bonding systems machining with abrasives. In: JACKSON J. M. DAVIM, P. J. **Machining with abrasives**. New York: Springer. 2011. p. 1-72.

KARIMI, H. R.; DJOKOTO, Instrumentation and modeling of high-pressure roller crusher for silicon carbide production. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, p. 1107-1113, 2012.

KHD. **High Pressure Grinding Roller Presses**. Cologne, 2012. 4 p. Disponível em: < http://www.khd.com/tl_files/downloads/products/grinding-technology/grinding/roller-presses-cement/KHD_ROLLER_PRESS_April_2012.pdf >. Acesso em: 15 set. 2018.

_____. **KHD Test Center**. Cologne, 200?. Disponível em: <<http://www.khd.com/test-center.html>>. Acesso em: 15 set. 2018.

KLYMOWSKY I.; LIU, J. Modelling of comminution in a roller press. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 20, 1997, Aachen.

---

⁴⁸ Documento de acesso restrito, mediante autorização da empresa.

Proceedings... Clausthal-Zellerfeld: GMD, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff und Umwelttechnik, 1997. p. 141-154.

KLYMOWSKY, R.; PATZELT, N.; BURCHARDT, E. Selection and sizing of High Pressure Grinding Rolls. In: MULAR, A. L.; HALBE, D. N.; BARRATT, D. J. **Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings**. Littleton: SME, 2002. p. 636-668.

KOPPERN. **High Pressure Grinding Roller Presses for Minerals Processing**. Hattingen, 2018. 24 p. Disponível em: <http://www.koeppern-international.com/fileadmin/user_upload/downloads/Comminution/Brochure_Ore_Grinding.pdf>. Acesso em: 15 set. 2018.

LIU, J.; SCHÖNERT K. Modelling of interparticle Breakage. **International journal of Mineral Processing**, v. 44-45, p. 101-105, 1996.

LUBJUH, U.; SCHÖNERT, K. Material flow in the acceleration zone and throughput of High Pressure Roller Mills. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS (IMPC), 28., 1993, Sydney. **Proceedings...** Sydney: Carlton, Vic.: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1993. p. 161-168.

MAZZINGHY, D. B.; TURRER, H. G.D. RUSSO J.F.C SCHNEIDER C. L. Ramp up da maior instalação de moinhos Vertimill do mundo. **Holos**, v. 7, p. 51-58, 2015.

MBE COAL & MINERALS TECHNOLOGY GMBH. **Rollstar® Roller Press**. Cologne, 2018. Disponível em: <<https://www.mbe-cmt.com/index.php?id=65>>. Acesso em: 15 set. 2018.

MENEGATTO, M. B. S. **Otimização do circuito de cominuição da Elfusa Geral de Eletrofusão**. 2014. 42 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

METSO MINERALS. **Estudo de moagem da Elfusa**. Sorocaba: Metso Minerals, 2010. 7 p. (Relatório Interno) ⁴⁹.

_____. **Manual de britagem. 6ª Edição**. Sorocaba: Metso Minerals, 2005.

---

⁴⁹ Documento de acesso restrito, mediante autorização da empresa.

MORLEY, C. High pressure grinding rolls: a technology review. In: Kawatra, S. K. **Advances in comminution**. Littleton: SME, 2006. p. 15-39.

_____. **The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 110, pp. 107-115, 2010.

MORRELL, S.; SHI, F.; TONDO, L. A. 1997. Modelling and scale-up of high pressure grinding rolls. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS (IMPC), 20., **Proceedings...** Aachen, 1997. Clausthal-Zellerfeld: GMD, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff und Umwelttechnik, 1997. p. 129-140.

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

NAPIER-MUNN, T. J.; MORRELL S.; MORRISON R.D., KOJOVIC T. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization**. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1999. 413 p.

OBERHEUSER, G. Wear protection of surfaces from high pressure grinding rolls: possibilities and limits. **International Journal of Mineral Processing**, v. 44-45, p.561-568, 1996.

OLIVEIRA, R. N. M. **Análise do desempenho do HRC™ HPGR em circuito piloto**. 2015. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OUTOTEC. **Outotec® HPGR Comminution solutions**. Espoo, 2013. 4 p.

PASSOS, E. R. **Compreendendo a influência da titânia no processamento da alumina eletrofundida marrom e sua caracterização para aplicações abrasivas**. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

PATZELT, N.; KNECHT, J.; BURCHARDT, E.; KLYMOWSKY, R. Challenges for High Pressure Grinding in the New Millennium. In: MILL OPERATORS CONFERENCE, 7., 2000, Kalgoorlie. **Proceedings...** Kalgoorlie: Carlton, Vic.: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2000. p. 47-55.

POLYSIUS. **High Pressure Grinding, screening e grindability tests**. Beckum: POLYSIUS, 2009. 37 p. (Relatório Interno)⁵⁰.

RASHIDI, S.; RAJAMANI, R. K.; FUERSTENAU, D. A Review of the modelling of high pressure grinding rolls. **Kona Powder and Particle Journal**, n. 134, p. 125-140, 2017.

ROSARIO, P.; HALL, R.; GRUNDY, M.; KLEIN B. A preliminary investigation into the feasibility of a novel HPGR-based circuit for hard, weathered ores containing clayish material. **Minerals Engineering**, v. 24, p. 290-302, 2011.

SALAZAR. J. S. **Comparação de rotas de cominuição de minério de ferro itabirítico usando conceitos de sustentabilidade e eficiência energética**. 2014. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

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. Advances in comminution fundamental and impacts on technology. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 17., 1991, Dresden. **Proceedings...** Freiberg: Bergakademie Freiberg, 1991b. p. 1-21.

_____. Energetische aspekte des zerklemerns sprodes stoffe. Zement. **Zement-Kalk-Gips**, v 32. p. 1-9, 1979.

_____. 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**, n. 9, p. 149-158, 1991a.

_____. Sizing of high pressure twin roll mills. **Zement-Kalk-Gips**, v. 38 n. 12, p. 728-730, 1985.

SCHÖNERT, K. FLÜGEL, F. Zerkleinerung spröder Materialien im hochkomprimierten Gutbett. In: EUROPEAN SYMPOSIUM OF PARTICLE TECHNOLOGY, 1980, 5., Amsterdam. **Proceedings...** Frankfurt am Main: Dechema, 1980. p. 82–95.

---

⁵⁰ Documento de acesso restrito, mediante autorização da empresa.

SCHÖNERT, K.; LUBJUHN, U. Throughput of high compression roller mills with plane and corrugated rollers. In: EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMMINUTION, 7., 1990, Ljubljana. **Proceedings...** Ljubljana: Fakulteta za Naravoslovje in Tehnologijo-Vtozd Montanistika, 1990. p. 747-763.

SESEMANN, Y.; BROECKMANN, C.; HÖFTER, A.. Wear in high pressure grinding rolls subjected to the composition of heterogeneous abrasive materials. In: COMMINUTION, 2014, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town: MEI, 2014. p. 1-12.

SHI, F.; LAMBERT, S.; DANIEL, M. A study of effects of HPGR treating platinum ores. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS SEMI-AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 4., 2006, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: University of British Columbia, 2006. p. 1-18.

TAVARES, L. M. Breakage of single particles: quasi-static. In: SALMAN, A. D.; GHADIRI, M.; HOUNSLOW, M. J. **Handbook of Powder Technology**. Amsterdam: Elsevier B.V., 2007. p. 3-68.

_____. Particle weakening in high-pressure roll grinding. **Minerals Engineering**, v. 18, p. 651-657, 2005.

THEISEN, W. A novel PM-wear protection method to meet high comminution demands. **Wear**, 250, p. 54-58, 2001.

THYSSENKRUPP. **POLYCOM® high-pressure grinding roll**. Beckun, 2018. 11p.

TONDO, L. A. **Phenomenological modelling of a high pressure roll mill**. 1997. 219 f. Thesis (Master's degree) - University of Queensland, Brisbane, 1997.

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

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

_____. Weir HPGR seminar Brazil. Belo Horizonte, Hotel Caesar Business, 18 abr. 2018. **Seminário** de apresentação do HPGR da Weir, Belo Horizonte, 2018⁵¹.

---

⁵¹ Documento de acesso restrito, mediante autorização da empresa.

VAN DER MEER, F. P.; MAPHOSA W. High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 112, p. 637-647, 2012.

VAN DER MEER, F. P; GRUENDKEN, A. Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls. **Minerals Engineering**, v. 23, p. 663-669, 2010.

WEIR. **Enduron® HPGR High Pressure Grinding Roll**. Venlo, 2016. 8 p. Disponível em:<<https://www.global.weir/assets/files/product%20brochures/brochure%20Enduron%20High%20Pressure%20Grinding%20Rolls.pdf>>. Acesso em: 05 de jun. de 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Resultados completos dos ensaios de densidade aparente e real para as amostras de óxido de alumínio BT e TB

A Tabela A.1 apresenta os resultados dos ensaios de densidade aparente obtidos com as amostras de óxido de alumínio BT e TB.

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de densidade aparente para as amostras de óxido de alumínio BT e TB

alumínio BT e TB					
Densidade aparente (g/cm³)					Desvio padrão relativo (%)
Ensaaios					
Amostra	1	2	3	Média	
Óxido de alumínio BT	1,98	2,13	2,14	2,08	4,30
Óxido de alumínio TB	2,57	2,64	2,63	2,61	1,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela A.2 ilustra os resultados dos ensaios de densidade real de partículas individuais obtidos a partir da amostra de óxido de alumínio BT, utilizando-se uma balança hidrostática.

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de densidade real obtidos a partir da amostra de óxido de alumínio BT

(continua)

Partícula	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	densidade real (g/cm ³)
1	20,42	14,79	3,63
2	11,43	8,24	3,58
3	38,67	28,42	3,77
4	9,97	7,09	3,46
5	10,37	7,50	3,61
6	15,40	11,07	3,56
7	38,36	27,96	3,69
8	19,87	14,57	3,75
9	19,15	13,72	3,53
10	43,46	32,17	3,85
11	79,80	57,99	3,66
12	67,68	49,07	3,64
13	146,21	106,94	3,72

(conclusão)			
Partícula	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	densidade real (g/cm ³)
14	89,25	62,69	3,36
15	76,86	54,69	3,47
16	113,65	82,89	3,69
17	77,25	57,12	3,84
18	48,55	35,15	3,62
19	47,33	34,65	3,73
20	60,37	42,96	3,47
21	43,36	31,00	3,51
22	81,46	59,19	3,66
23	50,14	36,45	3,66
24	62,53	45,93	3,77
25	41,60	30,22	3,66
26	53,80	39,36	3,73
27	37,60	26,99	3,54
28	57,71	41,26	3,51
29	104,33	76,60	3,76
30	64,51	46,71	3,62
31	48,90	35,96	3,78
32	39,32	29,02	3,82
33	12,59	9,11	3,62
34	67,39	49,14	3,69
35	48,54	35,16	3,63
36	47,48	33,78	3,47
37	34,30	25,09	3,72
38	56,98	41,26	3,62
39	48,27	35,61	3,81
40	42,80	30,45	3,47
41	32,52	23,85	3,75
42	17,20	12,51	3,67
43	34,39	24,67	3,54
44	18,67	13,64	3,71
45	50,15	34,45	3,19
46	65,65	47,60	3,64
47	37,88	27,54	3,66
48	43,91	31,59	3,56
49	31,72	22,99	3,63
50	49,98	37,00	3,85
51	33,80	25,08	3,88
Densidade real média (g/cm ³)			3,64
Desvio padrão relativo (%)			3,68

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela A.3 apresenta os resultados dos ensaios de densidade real obtidos a partir das amostra de óxido de alumínio TB, utilizando-se o tubo de Chapman.

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de densidade real para a amostra de óxido de alumínio TB

	Ensaio			
	1	2	3	4
Massa de sólidos (g)	271,8	150,7	205,91	249,54
Volume de sólidos (cm ³)	71,5	39,5	54,5	65,5
Densidade real (g/cm ³)	3,80	3,82	3,78	3,81
Densidade real média (g/cm ³)	3,80			
Desvio padrão relativo (%)	0,43			

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B - Resultados completos dos ensaios de WI de Bond para as amostras de óxido de alumínio BT e TB

A Tabela A.4 apresenta os resultados do ensaios de WI de Bond para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.

Tabela A.4 – Resultados do ensaios de WI para as amostras de óxido de alumínio BT e TB

	Ensaio	F ₈₀ (µm)	P ₈₀ (µm)	Moabilidade (g/rev)	WI (kWh/t)	WI médio (kWh/t)
Óxido de alumínio BT	1	2284,9	116,9	0,701	28,9	28,9
Óxido de alumínio TB	1	2042,9	104,0	0,750	25,8	26,0
	2	1874,9	124,3	0,864	26,2	

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C - Resultados complementares dos ensaios *drop weight* (relação E_{cs} versus t_{10}) para as amostras de óxido de alumínio BT e TB.

A Tabela A.5 apresenta os resultados do ensaio *drop weight* completo para a amostra de óxido de alumínio BT, segundo a relação entre a energia específica aplicada (E_{cs}) e o parâmetro de granulometria (t_{10}).

Tabela A.5 - Resultados do ensaio *drop weight* completo para amostra de óxido de alumínio BT em termos de E_{cs} versus t_{10}

Lote	Tamanho (mm)	E_{cs} (kWh/t)	t_{10} (%)
1	63,0 x 53,0	0,40	39,7
2	63,0 x 53,0	0,24	19,9
3	63,0 x 53,0	0,10	8,6
4	45,0 x 37,5	1,01	57,8
5	45,0 x 37,5	0,25	23,5
6	45,0 x 37,5	0,10	9,4
7	31,5 x 26,5	2,51	69,4
8	31,5 x 26,5	1,00	47,8
9	31,5 x 26,5	0,25	18,9
10	22,4 x 19,0	2,51	66,4
11	22,4 x 19,0	1,00	43,8
12	22,4 x 19,0	0,25	13,5
13	16,0 x 13,2	2,51	54,0
14	16,0 x 13,2	1,00	35,0
15	16,0 x 13,2	0,25	11,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela A.6 ilustra os resultados do ensaio *drop weight* simplificado para a amostra de óxido de alumínio TB.

Tabela A.6 - Resultados do ensaio *drop weight* simplificado para a amostra de óxido de alumínio TB, em termos de E_{cs} versus t_{10}

Lote	Tamanho (mm)	E_{cs} (kWh/t)	t_{10} (%)
13	16,0 x 13,2	2,50	49,0
14	16,0 x 13,2	1,00	28,5
15	16,0 x 13,2	0,25	8,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D - Resultados completos dos ensaios de AI de Bond para a amostra de óxido de alumínio BT

A Tabela A.7 apresenta os resultados do ensaios de AI de Bond realizados com a amostra de óxido de alumínio BT.

Tabela A.7 - Resultados dos ensaios de AI de Bond para a amostra de óxido de alumínio BT

	Ensaio	
	1	2
Massa inicial da placa metálica (g)	95,3842	95,7388
Massa final da placa metálica (g)	94,4622	94,8611
AI (g)	0,92	0,88
AI médio (g)	0,90	
Desvio padrão relativo (%)	3,14	

Fonte: Elaborado pelo autor.