



SIMULAÇÃO EM REGIME ESTACIONÁRIO E DINÂMICO COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO DE USINA DE BRITAGEM DE AGREGADOS

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

SIMULAÇÃO EM REGIME ESTACIONÁRIO E DINÂMICO COMO FERRAMENTA
PARA OTIMIZAÇÃO DE USINA DE BRITAGEM DE AGREGADOS

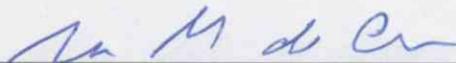
Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

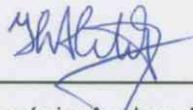
Examinada por:



Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.



Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.



Dr. Horácio Andres Petit, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2019

Parreira, Hayla Miceli Tavares Bastos

Simulação em regime estacionário e dinâmico como ferramenta para otimização de usina de britagem de agregados / Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 134 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 127-130.

1. Simulação. 2. Britagem. 3. Agregados. I. Tavares, Luís Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha família. Sem o apoio e suporte diário nada teria sido possível. Gostaria de agradecer também ao meu marido, Flávio, que foi fundamental em todos os aspectos para a conclusão deste trabalho, estando sempre ao meu lado e não medindo esforços para que tudo ocorresse da melhor forma possível.

Expresso minha enorme gratidão e admiração ao Prof. Luís Marcelo, que muito mais que um orientador foi sempre uma pessoa que soube enxergar o potencial de cada um de seus alunos, desenvolvendo da melhor forma possível suas habilidades, mesmo que o caminho não fosse o mais simples. É um grande exemplo de profissional no qual irei sempre me espelhar.

Muito obrigado ao Prof. Rodrigo M. de Carvalho que me ajudou muito não só durante a execução deste trabalho como durante todo o meu período no Laboratório de Tecnologia Mineral, sempre me dando valiosas dicas e ensinamentos.

Obrigada ao Gauti Asbjörnsson, da Chalmers University of Technology, pelo pontapé inicial ao compartilhar seus modelos e prontamente me ajudar com qualquer dúvida.

Agradeço ao Thales Gama, que aceitou o desafio de estagiar neste trabalho e foi muito importante para o desenvolvimento do mesmo, me auxiliando e contribuindo de forma positiva.

Aos grandes amigos que o Laboratório de Tecnologia Mineral me proporcionou, cada um sabe a grande importância que tem em minha vida. Foram os responsáveis para que o LTM se tornasse a minha segunda casa e todos os momentos ficassem muito mais leves, sempre compartilhando conhecimentos, ajuda e memórias.

Agradeço à toda equipe da Mineração Santa Luzia que sempre esteve disposta a ajudar com todo o tipo de informação e suporte técnico.

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Processo 153128/2016-0) e a FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – Processo E-26/200.730/2018), pelas bolsas de estudo e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação e conclusão deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO EM REGIME ESTACIONÁRIO E DINÂMICO COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO DE USINA DE BRITAGEM DE AGREGADOS

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

Setembro/2019

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Depois que uma usina de britagem é comissionada e está operando, existem boas oportunidades para aumentar a capacidade, o rendimento do produto e/ou reduzir seu consumo de energia. Tais modificações podem ser tão pequenas quanto mudanças no ajuste de britadores e em aberturas de tela de peneiras, que envolvem custo insignificante, ou maiores, como a introdução de correias transportadoras, polias magnéticas e sistemas de controle de toda a usina. O trabalho analisa a aplicação da simulação, inicialmente realizada em regime estacionário no software JKSimMet[®] comparando com simulação dinâmica realizada em plataforma Matlab-Simulink, em uma usina produtora de agregados no Rio de Janeiro. As diferentes plataformas de simulação foram usadas em cenários hipotéticos que incluíssem mudanças no ajuste de britadores em diferentes estágios de britagem e aberturas de telas. O uso de simulação dinâmica permitiu abordar as limitações encontradas em simulações em regime estacionário, como a previsão dos desbalanços de fluxos mássicos e a previsão de paradas devido a problemas na usina. Para o caso da usina em questão, observou-se que aumentos moderados a substanciais poderiam ser alcançados na produtividade, sem alterar o número de horas de trabalho, a custos de energia específicos reduzidos. O trabalho também valida os modelos em Matlab-Simulink com base em modelos comparáveis em JKSimMet[®], discutindo os benefícios da dinâmica em contraste com as simulações de estado estacionário deste tipo de circuitos. O trabalho aborda a necessidade da implementação de modelos que representem com fidedignidade o comportamento observado no dia-a-dia da operação de uma usina.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STEADY-STATE AND DYNAMIC SIMULATION AS A TOOL FOR OPTIMIZATION OF AGGREGATE CRUSHING PLANT

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

September/2019

Advisor: Luís Marcelo Marques Tavares

Department: Metallurgical and Material Engineering

After a crushing plant is commissioned and is operating, good opportunities often exist to increase capacity, product yield and/or reduce its energy consumption. Such modifications can be as small as changes in crusher setting and screen apertures, that involve negligible cost, or larger, such as introduction of conveyor belts, magnetic pulleys and plant-wide control systems. The work analyses the application of simulation, initially performed in steady-state in the JKSimMet[®] software comparing with the dynamic simulation performed in Matlab-Simulink platform, in a crushing plant producing aggregates in Rio de Janeiro. The different simulation platforms have been used in what-if scenarios that included changes in closed-side setting of crushers in different crushing stages and screen openings. The use of dynamic simulation allowed us to address the limitations found in steady state simulations, such as the prediction of mass flow imbalances and the prediction of shutdowns due to plant problems. For the case the plant in question, it was observed that moderate to substantial increases could be reached in throughput, without changing the number of working hours, at reduced specific energy costs. The work also validates the models in Matlab-Simulink on the basis of comparable models in JKSimMet[®], discussing the benefits of dynamic in contrast to steady-state simulations of this type of circuits. The work addresses the need for the implementation of models that reliably represent the behavior observed in the day-to-day operation of a plant.

Sumário

Agradecimentos.....	iv
Lista de figuras	x
Lista de tabelas.....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Objetivo	4
3. Revisão Bibliográfica	5
3.1. Agregados	5
3.2. Britagem	6
3.3. Classificação	8
3.4. Ensaio de caracterização.....	9
3.4.1. Ensaio de queda de peso	10
3.4.2. Ensaio de abrasão Los Angeles	10
3.5. Modelos Matemáticos.....	11
3.5.1. Modelagem da britagem	15
3.5.2. Modelagem do peneiramento	23
3.6. Controle e Automação de Circuitos	25
3.7. Otimização e Simulação de Circuitos.....	28
3.7.1. Simulação estacionária.....	31
3.7.2. Simulação dinâmica.....	33
4. Metodologia	38
4.1. Objeto de estudo	38
4.2. Experimental.....	40
4.2.1. Amostragem industrial	40
4.2.2. Análise granulométrica das amostras	42
4.2.3. Caracterização da rocha.....	42
4.2.3.1. Ensaio de queda de peso	42
4.2.4. Ensaio de abrasão Los Angeles	43
4.3. Modelagem e simulação computacional	44

4.3.1.	Simulador JKSimMet®.....	45
4.3.1.1.	Balanço de massas	46
4.3.1.2.	Ajuste de parâmetros.....	47
4.3.2.	Simulador Bruno	48
4.3.3.	Simulador Matlab-Simulink	48
4.3.3.1.	Subsistema alimentação.....	51
4.3.3.2.	Subsistema britador.....	53
4.3.3.3.	Subsistema peneira	56
4.3.3.4.	Subsistema transportador de correia	57
4.3.3.5.	A lógica de controle	58
5.	Resultados e Discussões.....	61
5.1.	Caracterização da rocha.....	61
5.2.	Resultados das amostragens	65
5.2.1.1.	Amostragem do britador secundário	68
5.2.1.2.	Amostragem do britador terciário.....	70
5.2.1.3.	Amostragem dos britadores quaternários	74
5.3.	Ajuste do balanço de massas	80
5.4.	Modelagem matemática do circuito	86
5.4.1.	Modelagem das Peneiras PV-03/PV-04, PV-05/PV-06, PV-07	86
5.4.2.	Modelagem do britador terciário HP300.....	87
5.4.3.	Modelagem do britador quaternário HP200	90
5.4.4.	Modelagem da Peneira PV-08 e do britador secundário S4000.....	92
5.4.5.	Modelagem do britador VSI	96
5.5.	Validação dos modelos de quebra no Matlab-Simulink.....	99
5.6.	Validação do modelo de potência no Matlab-Simulink	104
5.7.	Verificação do modelo de curva de eficiência para peneiramento no Matlab-Simulink	104
5.8.	Simulação no JKSimMet®	107
5.8.1.	Caso base: Cenário 1 (C1)	109

5.8.2. Cenário 2 (C2).....	112
5.8.3. Comparação entre cenários simulados.....	116
5.9. Simulação no Matlab-Simulink: Dinâmica de pilhas	118
5.10. Simulação no Matlab-Simulink: Comparação com a simulação otimizada – cenário 2	122
6. Conclusões	125
7. Sugestões para trabalhos futuros	126
Referências Bibliográficas	127
Anexo	131

Lista de figuras

Figura 1.1 - Circuito de britagem comumente utilizado em usinas de agregados (Adaptado de ASBJORNSSON, 2015)	1
Figura 3.1 - Mecanismos de quebra (a) impacto ou compressão (b) cisalhamento (c) abrasão (Adaptado de WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).....	6
Figura 3.2 - Diagrama esquemático ilustrando as condições aberta (APA) e fechada (APF) de um britador de mandíbulas (Adaptado de KING, 2001)	7
Figura 3.3 - Diagrama esquemático do processo de separação por tamanhos em uma peneira vibratória (Adaptado de WILLS & NAPIER-MUNN, 2006)	9
Figura 3.4 - Diagrama esquemático do aparato utilizado para realização do ensaio de queda de peso (Adaptado de TAVARES, 2007)	10
Figura 3.5 – Perfil de deformação típico de uma partícula de 4,0–4,75 mm de mármore (TAVARES, 2009).....	13
Figura 3.6 - Relação entre energia de cominuição e granulometria do produto (Adaptado de HUKKI, 1961).....	15
Figura 3.7 – Funções Classificação e Quebra no processo de britagem (Adaptado de NAPIER-MUNN <i>et al.</i> , 1996).....	16
Figura 3.8 - Representação esquemática do modelo de britagem desenvolvido por Whiten (Adaptado de NAPIER-MUNN <i>et al.</i> , 1996).....	16
Figura 3.9 - Forma da função classificação de Whiten (Adaptado de KING, 2001).	18
Figura 3.10 – Distribuição granulométrica obtida a partir de ensaio de quebra de partícula unitária para (A) Santa Luzia e (B) Vigné plotadas na forma normalizada. As linhas pontilhadas em (A) representam os pontos em que os tamanhos de partículas são menores que o tamanho de inflexão, caracterizando o comportamento bimodal da rocha (Adaptado de TAVARES & NEVES, 2008)	20
Figura 3.11 – Esquema da metodologia comumente utilizada para otimização de circuitos (Adaptado de NAPIER-MUNN <i>et al.</i> , 1996).....	29
Figura 3.12 - Diagrama esquemático de causa e efeito dos fatores que podem influenciar o desempenho da usina (Adaptado de ASBJORNSSON, 2015).....	34
Figura 3.13 - Desenho esquemático das diferentes origens da dinâmica de funcionamento da usina durante sua operação (Adaptado de ASBJÖRNSSON <i>et al.</i> , 2016)	34
Figura 4.1 – Diagrama esquemático apresentando a metodologia utilizada no presente trabalho.....	38
Figura 4.2 - Fluxograma da usina de britagem da Mineração Santa Luzia	40
Figura 4.3 - Moinho padronizado para o ensaio de Abrasão Los Angeles.....	44

Figura 4.4 - Interface do simulador de processos JKSimMet® versão 6.1	45
Figura 4.5 - Diagrama do sistema de hierarquia adotado na plataforma Matlab-Simulink	48
Figura 4.6 - Interface do simulador de processos instalado na plataforma Matlab-Simulink com o fluxograma da usina de agregados da Mineração Santa Luzia	50
Figura 4.7 - Diagrama explicativo sobre o funcionamento das pilhas implementados no Matlab-Simulink sem o efeito de sequenciamento (1 único misturador perfeito) e com o efeito do sequenciamento (4 misturados perfeitos).....	51
Figura 4.8 – Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de alimentação	52
Figura 4.9 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de britagem para britadores do tipo cônico e giratório	55
Figura 4.10 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de britagem para britadores do tipo VSI.....	56
Figura 4.11 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de peneiramento.....	57
Figura 4.12 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de transportador de correias.....	58
Figura 4.13 - Diagrama lógico do controle dinâmico de pilhas, onde a cor vermelha representa a pilha do britador HP300, a cor azul a pilha dos britadores HP200/VSI, S1 representa o sinal que o britador S4000 recebe, S2 o sinal que o britador HP300 recebe e S3 o sinal que o britador HP200/VSI recebe	60
Figura 5.1 - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas para a energia de 0,25 kWh/t. A área em vermelho corresponde aos tamanhos de partículas inferiores ao ponto de inflexão da função quebra	62
Figura 5.2 - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas para a energia de 0,25 kWh/t ou conforme indicado. A área hachurada corresponde aos tamanhos de partículas inferiores ao ponto de inflexão da função quebra (Adaptado de TAVARES & NEVES, 2008)	62
Figura 5.3 - Curvas $t_{10} - t_n$ para o caso normalizável da rocha da Santa Luzia	63
Figura 5.4 - Curvas $t_{10} - t_n$ para o caso não-normalizável da rocha da Santa Luzia ..	64
Figura 5.5 – Comparação das curvas $t_{10} - t_n$ para o caso normalizável (linhas cheias) com o caso não normalizável (linhas pontilhadas) da rocha da Santa Luzia	64
Figura 5.6 - Produtos do circuito de rebitagem da Santa Luzia obtidos durante amostragem.....	66
Figura 5.7 - Análise granulométrica dos fluxos em torno do britador secundário S4000	69

Figura 5.8 - Produção específica de material <1,7 mm (t/kWh) para britador secundário operando com diferentes aberturas de posição fechada	70
Figura 5.9 - Distribuições granulométricas dos fluxos das amostragens feitas com o britador terciário HP300 para diferentes aberturas de posição fechada	71
Figura 5.10 - Produção específica de material <1,7 mm (t/kWh) para britador terciário em função da abertura de posição fechada	72
Figura 5.11 - Relação entre capacidade e abertura de posição fechada para o britador terciário, onde as linhas pontilhadas representem a capacidade teórica pelo manual e os pontos representam as vazões experimentais Os pontos em vermelho (abertura de 30 mm) representam a operação do britador na condição afogado, enquanto os pontos em azul e verde (40 e 50 mm, respectivamente) exemplificam a operação do britador não afogado.....	73
Figura 5.12 - Modelagem da capacidade máxima relativa ao britador HP300, onde os dados experimentais são os pontos em amarelo, os dados gerados pelo <i>software</i> Bruno os pontos em azul e a curva de capacidade simulada os pontos em verde	73
Figura 5.13 - Distribuições granulométricas das amostragens no entorno do britador quaternário HP200 em função da abertura de posição fechada.....	74
Figura 5.14 - Produção específica de material <1,7 mm (t/kWh) em função da abertura de posição fechada para o britador quaternário HP200	75
Figura 5.15 - Relação entre capacidade com abertura para o britador quaternário HP200 onde as linhas pontilhadas representem a capacidade teórica pelo manual e os pontos representam as vazões experimentais. Os pontos em vermelho (abertura de 15 mm) representam a operação do britador na condição afogado, enquanto os pontos em azul e verde (20 e 30 mm, respectivamente) exemplificam a operação do britador não afogado.....	76
Figura 5.16 - Modelagem da capacidade máxima relativa ao britador HP200, onde os dados experimentais são os pontos em amarelo, os dados gerados pelo <i>software</i> Bruno os pontos em azul e a curva de capacidade simulada os pontos em verde. As linhas pontilhadas representam aquelas nominais do manual do fabricante	76
Figura 5.17 - Distribuições granulométricas das amostragens feitas com o britador quaternário VSI com alimentação de brita 3 e 2, operando em diferentes frequências	77
Figura 5.18 - Distribuições granulométricas das amostragens feitas com o britador quaternário VSI com alimentação de brita 2, operando em diferentes frequências	77
Figura 5.19 - Produção específica <1,7 mm (t/kWh) para britador quaternário VSI com diferentes alimentações e frequências de rotação	78
Figura 5.20 - Relação entre capacidade amostrada (pontos) e capacidade gerada pelo <i>software</i> Bruno (linhas sólidas) para diferentes porcentagens de cascadeamento	79

Figura 5.21 - Potência dos principais equipamentos da usina de rebitagem em trabalho e em vazio	80
Figura 5.22 - Distribuição da potência em operação dos principais equipamentos da usina de rebitagem	80
Figura 5.23 - Esquema do balanço de massas realizado nas peneiras.....	82
Figura 5.24 - Comparação dos fluxos experimentais (pontos) e balanceados (linhas) associados à PV3/PV4	83
Figura 5.25 - Comparação dos fluxos experimentais (pontos) e balanceados (linhas) associados à PV5/PV6	84
Figura 5.26 - Comparação dos fluxos experimentais (pontos) e balanceados (linhas) associados à PV7	84
Figura 5.27 - Comparação entre as curvas de partição experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) associadas à PV3/PV4	85
Figura 5.28 - Comparação entre as curvas de partição experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) associadas à PV5/PV6.....	85
Figura 5.29 - Comparação entre as curvas de partição experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) associadas à PV7.....	86
Figura 5.30 - Previsão (ajuste) da distribuição granulométrica do produto do britador terciário HP300 operando sob diferentes aberturas de posição fechada e comparação aos dados balanceados, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados	88
Figura 5.31 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de K1, K2 e t10 para o britador HP3000.....	89
Figura 5.32 - Regressão linear para encontrar o parâmetro G que descreve a equação de potência para o britador HP300	90
Figura 5.33 - Previsão (ajuste) da distribuição granulométrica do produto do britador quaternário HP200 operando sob diferentes aberturas de posição fechada, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados	91
Figura 5.34 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de K1, K2 e t10 para o britador HP200.....	92
Figura 5.35 - Regressão linear para encontrar o parâmetro G que descreve a equação de potência para o britador HP200	92
Figura 5.36 - Comparação da <i>appearance function</i> do material da Santa Luzia (linhas pontilhadas) em relação ao material da usina de referência (linhas contínuas).....	93
Figura 5.37 - Previsão (ajuste) da distribuição granulométrica do produto do britador secundário S4000 operando sob diferentes aberturas de posição fechada, onde os	

pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados	95
Figura 5.38 - Previsão da distribuição granulométrica do produto do britador quaternário VSI com alimentação de brita 3 e 2 operando sob diferentes frequências, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados	96
Figura 5.39 - Previsão da distribuição granulométrica do produto do britador quaternário VSI com alimentação de brita 3 e 2 operando sob diferentes frequências, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados	97
Figura 5.40 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de K3 para o britador VSI.....	98
Figura 5.41 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de t_{10} para o britador VSI.....	99
Figura 5.42 - Regressão linear para estimação do parâmetro G que descreve a equação de potência para o britador VSI	99
Figura 5.43 - Validação dos modelos de quebra para o britador secundário S4000 com diferentes APF, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSimMet®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink	101
Figura 5.44 - Validação dos modelos de quebra para o britador terciário HP300 com diferentes APF, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSimMet®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink	102
Figura 5.45 - Validação dos modelos de quebra para o britador quaternário HP200 com diferentes APF, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSimMet®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink	102
Figura 5.46 - Validação dos modelos de quebra para o britador quaternário VSI com diferentes frequências de operação e alimentação de brita 3 e 2, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSimMet®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink.....	103

Figura 5.47 - Validação dos modelos de quebra para o britador quaternário VSI com diferentes frequências de operação e alimentação de brita 2, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSimMet®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável	103
Figura 5.48 - Comparação dos valores de potência (kW) para os dados experimentais (azul), dados simulados pelo JKSimMet® (laranja) e dados simulados pelo Matlab-Simulink (cinza)	104
Figura 5.49 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-08, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink	105
Figura 5.50 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-03/PV-04, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink	106
Figura 5.51 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-05/PV-06, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink	106
Figura 5.52 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-07, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink	107
Figura 5.53 - Pilha de brita 3, ilustrando o ângulo de repouso referentes às britas da Mineração Santa Luzia	108
Figura 5.54 - Vazões simuladas dos fluxos da usina de rebitagem do cenário original (C1) durante a operação de todos os britadores, com destaque para o acúmulo de material na pilha de brita 4 (em vermelho)	110
Figura 5.55 - Variação da disponibilidade de material nas pilhas de brita 3 e 4 ao longo de um dia hipotético de operação do circuito na condição original (C1), onde as faixas em verde indicam a operação do britador secundário e, as faixas em vermelho, os períodos no qual o mesmo se encontra ocioso	111
Figura 5.56 - Comparação entre as distribuições granulométricas experimentais e simuladas para a condição original do circuito (cenário 1)	112
Figura 5.57 - Vazões simuladas dos fluxos da usina de rebitagem do cenário otimizado (C2) durante a operação de todos os britadores, com destaque para o acúmulo de material na pilha de brita 4 (em vermelho)	114
Figura 5.58 - Variação da disponibilidade de brita 3 e 4 ao longo de um dia de operação do circuito otimizado (C2), onde as faixas em verde indicam a operação do britador	

secundário e as faixas em vermelho representam os períodos no qual o mesmo se encontra ocioso	115
Figura 5.59 - Comparação entre granulometrias experimentais e simuladas para o cenário 2.....	116
Figura 5.60 - Produção específica <1,7 mm (t/kWh) do circuito de rebitagem para cada cenário simulado considerando a operação dos equipamentos ociosos em vazio e desligados	117
Figura 5.61 - Comparação entre os produtos simulados da usina no cenário otimizado utilizando regime de simulação estacionário e dinâmico, onde as linhas representam resultados do JKSimMet® e os símbolos resultados do Simulink para o cenário 1....	119
Figura 5.62 – Comparação da variação do volume útil de rocha na pilha de brita 4 e pilha de brita 3 para doze horas de operação no cenário 1 considerando a granulometria da alimentação fixa para a simulação no Simulink (linhas cheias) e no JKSimMet® (linhas pontilhadas).....	120
Figura 5.63 - Variação do volume útil de rocha na pilha para seis horas de operação nos cenários considerando a granulometria da alimentação fixa e considerando a variação da granulometria nas pilhas pulmão dos britadores através da adoção de um misturador perfeito	121
Figura 5.64 - Função classificação dos britadores da usina de rebitagem	121
Figura 5.65 - Variação do P80 da alimentação do britador HP300 ao longo das duas primeiras horas de operação do circuito para as diferentes configurações da pilha adotando misturadores perfeitos. Em vermelho está indicado o início da perturbação na granulometria da pilha de brita 4.....	122
Figura 5.66 - Variação do volume útil de rocha na pilha para doze horas de operação no cenário otimizado utilizando simulação em regime dinâmico	123
Figura 5.67 - Comparação entre os produtos simulados da usina no cenário otimizado utilizando regime de simulação estático e dinâmico, onde as linhas representam resultados do JKSimMet® e os símbolos resultados do Simulink para o cenário 2...	124

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Classificação das britas quanto a dimensão (NBR7211).....	5
Tabela 3.2 - Valores usuais de t_{10} utilizados na britagem (Adaptado de NAPIER-MUNN <i>et al.</i> , 1996).....	21
Tabela 3.3 - Variáveis de controle e sensores utilizados da britagem primária (Adaptado de NETO, 2007).....	27

Tabela 3.4 - Variáveis de controle e sensores utilizados da rebitagem (Adaptado de NETO, 2007)	27
Tabela 4.1 - Variações de APF do britador secundário, terciário e quaternário.....	41
Tabela 4.2 - Relação de ensaios realizados para o britador VSI.....	41
Tabela 4.3 - Configuração do computador utilizado na realização das simulações	45
Tabela 4.4 - Modelos matemáticos utilizados no simulador JKSimMet® para calibrar os equipamentos de cominuição e classificação	47
Tabela 4.5 - Diferentes lógicas possíveis de ocorrerem durante operação com as respectivas ações a serem tomadas.....	59
Tabela 5.1 - Parâmetros de caracterização do gnaiss Santa Luzia.....	61
Tabela 5.2 - Função quebra de partículas individuais usada na modelagem dos britadores para a rocha em estudo	65
Tabela 5.3 - Valores de E_{cs} (kWh/t) para diferentes t_{10} na quebra de partículas individuais, usados na modelagem dos britadores para a rocha em estudo.....	65
Tabela 5.4 - Dados dos britadores que compõem a rebitagem.....	66
Tabela 5.5 - Dados dos produtos coletados na primeira amostragem.....	67
Tabela 5.6 – Comparação entre vazões de alimentação e produtos amostrados	68
Tabela 5.7 - Ponderações e qualidade do ajuste do balanço de massa para o circuito de peneiras.....	81
Tabela 5.8 - Parâmetros calibrados para o modelo das peneiras (equação (3.29))	87
Tabela 5.9 - Parâmetros gerados a partir do ajuste individual para cada uma das aberturas do HP300.....	89
Tabela 5.10 - Parâmetros gerados a partir do ajuste individual para cada uma das aberturas do HP200.....	91
Tabela 5.11 - Comparação das propriedades entre as rochas da Santa Luzia e da usina de referência.....	94
Tabela 5.12 - Ajuste dos coeficientes de regressão para o modelo do britador secundário	95
Tabela 5.13 - Ajuste individual dos coeficientes de regressão para o modelo do britador VSI.....	97
Tabela 5.14 - Parâmetros utilizados na função quebra não normalizada para os diferentes britadores em suas condições de operação	101
Tabela 5.15 - Comparação das vazões mássicas (t/h) para o modelo de eficiência do JKSimMet® e o implementado no Matlab-Simulink.....	107
Tabela 5.16 - Comparação entre os tempos de operação do britador secundário e a quantidade de material processada na usina ao longo do dia para os cenários simulados	116

Tabela 5.17 - Proporção dos produtos gerados para cada cenário de simulação	117
Tabela 5.18 - Proporção dos produtos gerados para o cenário otimizado utilizando os regimes estacionário e dinâmico.....	124

1. Introdução

A produção de agregados não é uma operação que apresenta elevado grau de complexidade, todavia costuma apresentar-se como uma atividade bastante desafiadora em virtude dos baixos preços associados ao produto final e dos elevados custos decorrentes da operação da usina. A busca por condições de operação otimizadas que resultem em uma maior produção sem acarretar em aumentos proporcionais no custo operacional do processo pode ser auxiliada pelo uso de simuladores de usinas de britagem.

O propósito de uma usina de britagem é a redução do tamanho de partícula por meio de sua cominuição e posterior classificação com base nas dimensões das partículas. A cominuição industrial é tipicamente ineficiente em relação ao uso da energia, uma vez que demanda quantidade de energia superior a necessária para realizar a quebra das partículas (TAVARES, 2004). JESWIET & SZEKERES (2016) estimam que este processo corresponde a 50% do consumo energético em uma usina típica de processamento mineral.

Segundo ASBJORNSSON (2015), os diferentes equipamentos de cominuição são organizados em circuitos próprios e suas unidades de produção e layout são escolhidos conforme o produto que deseja-se obter. As usinas de agregados têm o circuito normalmente composto por unidades de produção como britadores, peneiras, transportadores de correia, alimentadores e pilhas, conforme exemplo da Figura 1.1, consistindo normalmente de britagem primária, secundária e terciária para produzir diversos produtos em diferentes faixas granulométricas, cada um dos quais com diferentes aplicações (BHADANI *et al.*, 2018).

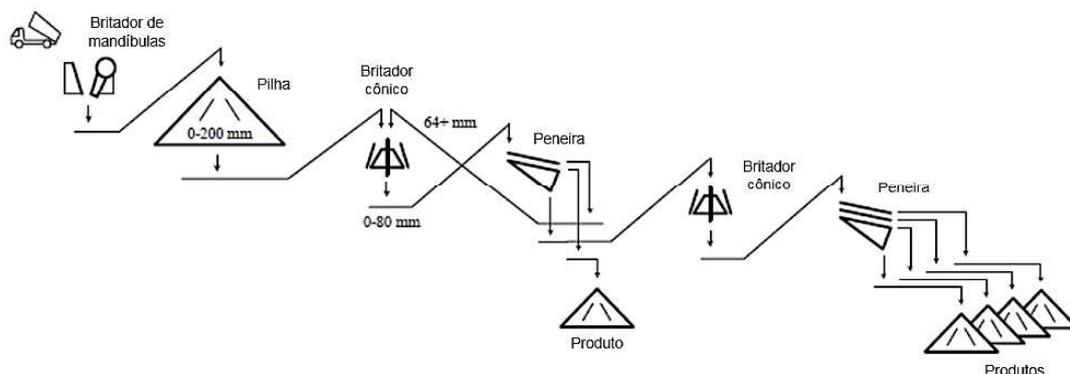


Figura 1.1 - Circuito de britagem comumente utilizado em usinas de agregados (Adaptado de ASBJORNSSON, 2015)

A britagem é o primeiro processo de fragmentação em uma usina de processamento mineral e é também considerada um dos processos mais importantes tendo em vista seu consumo energético e por ser responsável por grande parte da redução do tamanho de partículas processadas. Por ser uma etapa fundamental em diferentes usinas, se faz necessário o correto estudo de seus parâmetros de operação visando maximizar o seu funcionamento, especialmente pelo fato de britadores possuírem restrições relativas à sua capacidade e à vida útil de seus revestimentos. Desta forma, apresenta-se como uma etapa na qual pode-se alcançar grandes benefícios ao ser associada a ferramentas de simulação, pois permite antecipar a existência de possíveis gargalos e deficiências ocasionadas pela operação não otimizada de seus parâmetros e equipamentos periféricos.

Os modos de simulação atualmente existentes podem ser classificados em dois grupos. O primeiro diz respeito às simulações estacionárias, que representam o estado de um processo em um determinado instante, sem considerar o tempo como influenciadora do processo. Este modo de simulação é usualmente adotado na simulação de usinas, porém está limitado a apresentar o desempenho das mesmas em uma situação de funcionamento ideal ou instantânea, desconsiderando variações naturais no funcionamento de equipamentos e a introdução de perturbações estocásticas. O segundo grupo é denominado de simulação dinâmica, na qual a formulação do modelo leva em consideração as alterações que ocorrem no processo durante o tempo de simulação, introduzindo parâmetros referentes ao controle, ligamento e desligamento das operações simuladas.

A simulação dinâmica foi elaborada para complementar as lacunas de informações que a análise estacionária não é capaz de avaliar. O desafio da simulação é identificar os gargalos do processo e a real capacidade da usina e determinar os volumes do minério ROM e pilhas de produtos. Com a possibilidade de gerar vários cenários, muitas informações podem ser obtidas, informações estas que não seriam obtidas por meio da análise estacionária, como os fatores-chave que afetam a capacidade de processamento da usina. A simulação dinâmica tem como pilares tanto a modelagem quanto a simulação. A modelagem é definida como uma representação simplificada de um processo complexo enquanto a simulação é uma reprodução de algum equipamento ou de alguma usina (FRANKLIN & GERTENBACH, 2005).

Segundo CREMONESE (2014), a utilização da simulação dinâmica oferece boas oportunidades quando empregada na tomada de decisões, como por exemplo ao escolher os modos de transporte a serem utilizados, a forma de se utilizar os diferentes tipos de recursos e insumos disponíveis e na capacidade total de um sistema. Por não

ter a necessidade de ensaios em escala industrial, o modelo elaborado a partir da simulação dinâmica possui a capacidade de apresentar uma visão global do processo estudado, possibilitando a avaliação crítica rapidamente de diversas alternativas e com baixo custo que levam à maximização dos lucros de investimentos e a redução de riscos inerentes ao projeto.

2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é comparar resultados obtidos via simulação estacionária e dinâmica, utilizando diferentes plataformas de simulação e identificando os possíveis ganhos obtidos nas diferentes abordagens em uma usina produtora de agregados do Estado do Rio de Janeiro, identificando e quantificando ponto a ponto onde ganhos significativos de produção e redução de custo podem ser realizados sem o comprometimento à qualidade dos produtos gerados pela unidade. Além disso, propõe-se a implementação de plataforma Matlab-Simulink com modelos existentes em simuladores comerciais para a realização de simulação em regime dinâmico.

3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os conceitos envolvidos no processo de britagem e classificação em usinas de agregados, além de uma revisão bibliográfica referente aos modelos matemáticos aplicados, ao controle e automação das instalações de uma usina e aos tipos de ferramentas de simulações disponíveis para a otimização de usinas de beneficiamento de agregados

3.1. Agregados

Os agregados são materiais granulares inertes e sem forma e volume definidos que, quando apresentados nas dimensões e propriedades adequadas, podem ser utilizados pela indústria da construção civil em obras de engenharia, como por exemplo na composição de concreto, asfalto e argamassa, além de sua utilização *in natura* em base de pavimentos (MME, 2009). De acordo com sua origem os agregados são classificados em naturais ou artificiais.

O presente trabalho está focado na produção de agregados artificiais, ou seja, aqueles produzidos através de processos industriais, em especial através da britagem de blocos de rocha visando a sua adequação granulométrica. A NBR 7211 (ABNT, 2009) classifica os agregados de acordo com as dimensões das partículas em agregado miúdo, cujas partículas passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e agregado graúdo, cujas partículas passam pela peneira de abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de abertura de malha de 4,75 mm. Os agregados graúdos podem ser posteriormente classificados em diferentes faixas granulométricas, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação das britas quanto a dimensão (NBR7211)

Pedra Britada Numerada	Abertura de peneiras de malhas quadradas (mm)	
	Mínima	Máxima
0	4,75	12,5
1	9,5	25
2	19	31,5
3	25	50
4	37,5	75

3.2. Britagem

O propósito de uma usina de britagem é a redução do tamanho de partícula por meio de sua cominuição. A cominuição diz respeito ao ato de fragmentar minérios em tamanhos menores com o objetivo de viabilizar a liberação mineral ou a preparação de material com a granulometria desejada para processos a jusante ou até para a aplicação direta, de forma que é necessária a utilização de energia disponível para fraturar o minério por meio do emprego de forças trativas, compressivas e cisalhantes (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). Diferentes mecanismos de quebra podem ser empregados de acordo com a forma de aplicação das forças, como, por exemplo, compressão, impacto, lascamento e abrasão (Figura 3.1).

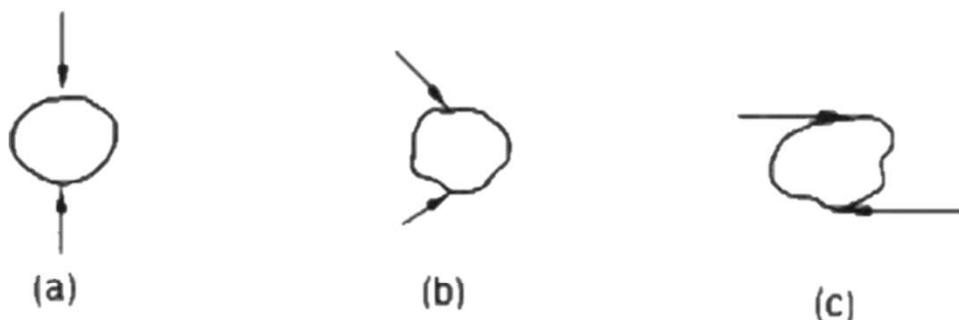


Figura 3.1 - Mecanismos de quebra (a) impacto ou compressão (b) cisalhamento (c) abrasão (Adaptado de WILLS & NAPIER-MUNN, 2006)

Diversos equipamentos de cominuição podem ser utilizados dependendo do tamanho das partículas da alimentação e do tamanho desejado para o produto. Os esforços tipicamente empregados em uma usina de produção de agregados podem ser classificados em compressão, aplicados através do deslocamento de superfícies em um britador (britador de mandíbulas, britador giratório, britador cônico) ou de impacto, aplicados através da transferência de energia cinética às partículas, propelinando-as contra uma superfície sólida ou um leito de partículas (britadores de impacto de eixo horizontal e vertical).

A britagem é usualmente o primeiro estágio de uma usina de beneficiamento de minérios e procede a extração de blocos de rocha na mina. No caso de usinas de processamento de agregados, apenas a etapa de britagem é comumente desempenhada. Os britadores são usualmente classificados de acordo com sua posição na usina de britagem. Britadores de mandíbulas e giratórios são frequentemente utilizados na britagem primária, devido à existência de uma maior abertura e capacidade

para lidar com grandes quantidades de material (KING, 2001). Na maioria das operações, a programação para realização da britagem primária segue a realização do desmonte com explosivos na mina (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

A britagem secundária tem a função de reprocessar o material oriundo da britagem primária, reduzindo a faixas menores de tamanho. Este processo geralmente é acompanhado de um peneiramento prévio, removendo material fino que pode afetar a eficiência do britador ou até mesmo causar danos devido ao empacotamento do material na câmara de britagem (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). A britagem secundária é usualmente realizada por meio da utilização de britadores cônicos e giratórios e suas capacidades e dimensões máximas de produto são determinadas majoritariamente pelas aberturas em posição aberta (APA) e fechada (APF). A Figura 3.2 ilustra o funcionamento de um britador de mandíbulas, indicando suas posições aberta e fechada.

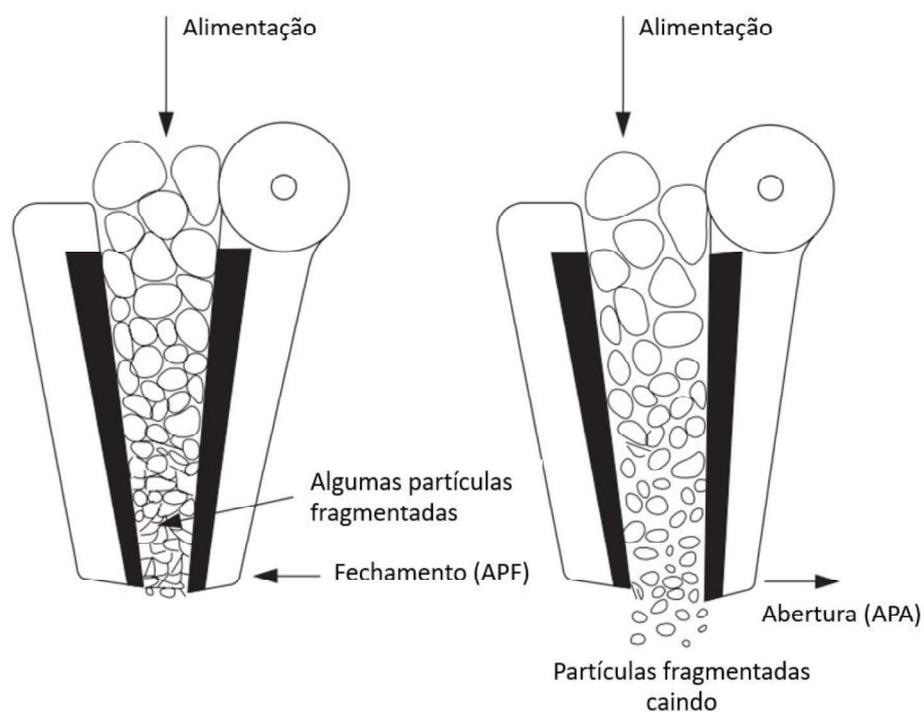


Figura 3.2 - Diagrama esquemático ilustrando as condições aberta (APA) e fechada (APF) de um britador de mandíbulas (Adaptado de KING, 2001)

Britadores de impacto, por sua vez, têm alcançado boa popularidade na indústria de agregados. O grande diferencial deste britador em relação aos demais é a quebra por impacto ao invés de compressão. Tal diferença é responsável por gerar partículas

que apresentam uma menor razão de aspecto em virtude da abrasão e quebra de partículas lamelares (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). Britadores de impacto geralmente são utilizados nos últimos estágios de britagem e, além de promover a redução do tamanho das partículas, são responsáveis por melhorias na forma das mesmas.

Os circuitos de britagem podem ser do tipo aberto ou fechado. Circuitos abertos funcionam com o direcionamento imediato ao próximo britador do material cominuído, sem classificá-lo. No caso de circuitos fechados, equipamentos de classificação acoplados com os de fragmentação fazem com que o material que esteja fora das dimensões adequadas seja recirculado até que suas especificações se enquadrem nos requisitos desejados. Circuitos complexos combinam as duas configurações para alcançar um produto desejado com menor investimento e custo de operação possível (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Usinas de britagem geralmente operam em circuito fechado em virtude da necessidade de se obter materiais em diferentes faixas granulométricas bastante restritas.

3.3. Classificação

Classificação consiste em separar partículas de acordo com suas características. No caso de usinas de britagem, o foco deste processo é a classificação do material em diferentes faixas de tamanho de acordo com sua destinação. Adota-se usualmente no processo de classificação de partículas grosseiras peneiras vibratórias que irão separar o fluxo de material em diferentes frações de tamanho. O processo ocorre por meio da inclinação do deque da peneira que, em conjunto com o movimento vibratório, promove a movimentação das partículas e eventual classificação dos finos através das aberturas da tela da peneira. A Figura 3.3 ilustra o processo de peneiramento em um deque inclinado de peneira.

Alimentação com partículas grossas e finas

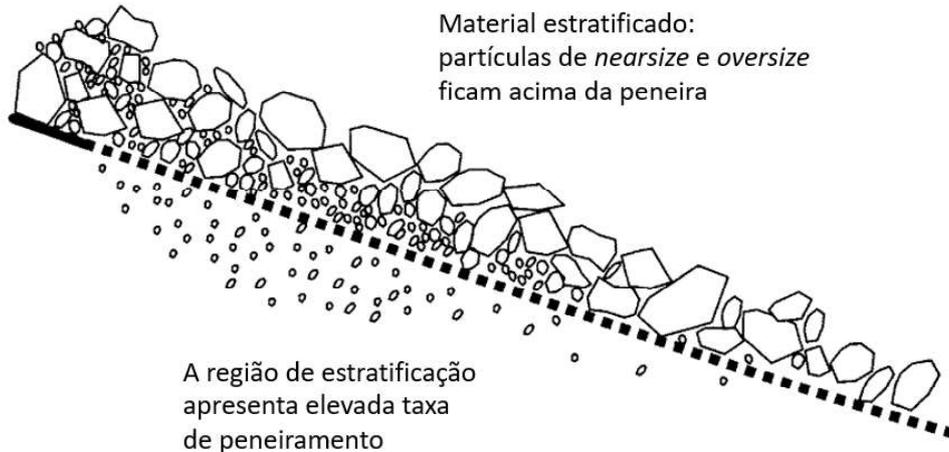


Figura 3.3 - Diagrama esquemático do processo de separação por tamanhos em uma peneira vibratória (Adaptado de WILLS & NAPIER-MUNN, 2006)

Diferentes condições de operação influenciam o desempenho do peneiramento. De acordo com WILLS & NAPIER-MUNN (2006), o ângulo da peneira influencia diretamente o tamanho de partícula máximo que pode passar pelas aberturas da peneira, uma vez que a partícula que maiores inclinações promovem um afinamento no produto classificado. Além disso, a forma da partícula também afeta o desempenho do processo, uma vez que partículas de formato lamelar cujos tamanhos sejam próximos ao da abertura de tela da peneira dificilmente atingirão a posição ideal para garantir sua passagem pela abertura. Além disso, vibração insuficiente dos deques da peneira e umidade excessiva do material poderão acarretar no cegamento das aberturas pelo material, reduzindo a eficiência do processo (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

3.4. Ensaios de caracterização

Ensaios de caracterização de partículas individuais têm como objetivo descrever propriedades físicas de uma população de partículas de um certo material, correlacionando a quantidade de energia aplicada com o grau de fragmentação das partículas. Por outro lado, ensaios de moagem em batelada permitem estimar a resposta de uma faixa de tamanho de um material quando sujeitos a certas condições. Esta seção descreve os ensaios de queda de peso (*drop weight test*) e de abrasão Los Angeles, ambos utilizados no presente trabalho.

3.4.1. Ensaio de queda de peso

Ensaio de partículas individuais permitem estimar a função quebra de um material por meio da quebra controlada de partículas e apresentam como grande vantagem em relação a ensaios de moagem em batelada o fato de desacoplar a influência do ambiente de moagem na resposta do material, relacionando a energia aplicada ao grau de fragmentação das partículas (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

Ensaio de queda de peso (DWT) são amplamente utilizados na indústria mineral para descrever a quebra de vários materiais (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996) e consistem na queda de um peso de massa conhecida em uma partícula em repouso sobre uma superfície metálica (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). A variação da energia aplicada nas partículas é realizada por meio da variação da altura de queda do peso ou da massa do peso. A Figura 3.4 ilustra o aparato utilizado no ensaio de queda de peso.

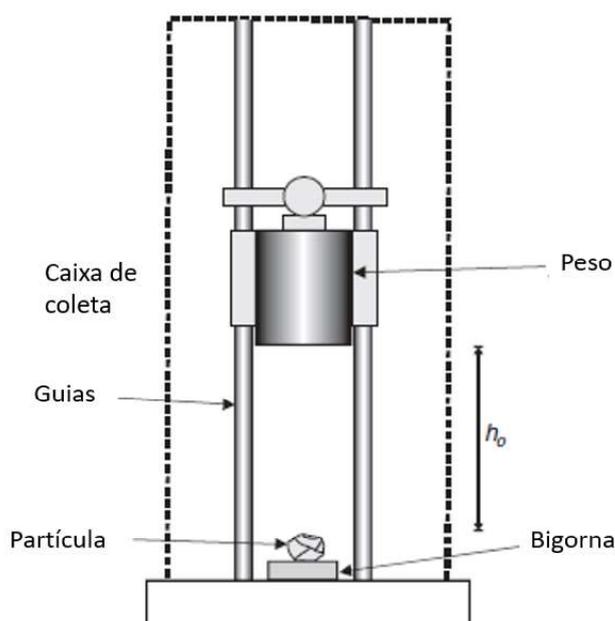


Figura 3.4 - Diagrama esquemático do aparato utilizado para realização do ensaio de queda de peso (Adaptado de TAVARES, 2007)

3.4.2. Ensaio de abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles (ABNT, 2001) é comumente realizado em agregados como forma de estimar a tenacidade e resistência à fragmentação por abrasão do material. O teste consiste em aplicar esforços cisalhantes em partículas de agregado com o auxílio de corpos moedores em uma certa distribuição de tamanho em

um tambor de dimensões específicas e com velocidade de rotação e número de revoluções pré-determinado. A porcentagem de desgaste e fragmentação do agregado devido a abrasão provocada pelas bolas de aço é denominada de índice de abrasão Los Angeles e permite verificar a adequação de um material como agregado para construção civil.

3.5. Modelos Matemáticos

Modelos expressam a relação entre a realidade e uma solução matemática, permitindo a correta descrição de processos (ARIS, 1991). Modelos são empregados para descrever matematicamente diversos fenômenos que ocorrem na atividade humana, como engenharia, química, biologia, física e economia, podendo ser usados qualitativamente ou quantitativamente.

O modelo matemático é definido como um conjunto de equações que representam quantitativamente hipóteses utilizadas para sua criação e a sua resolução é executada por meio de valores conhecidos ou previstos, sendo validadas comparativamente com os dados adquiridos a partir da modelagem (SODRÉ, 2007). Tais equações não possibilitam a explicação científica específica do modelo, apenas interpretam as hipóteses de forma quantitativa criando-se assim as condições necessárias para inferir consequências e indicar quais são as hipóteses que poderão ser aceitas ou refutadas.

Segundo CONCHA (1995) os modelos aplicados à cominuição podem ser classificados como empíricos, fenomenológicos ou mecanicistas, tendo seu valor prático dependendo de qual é a natureza do problema em questão, do trabalho desenvolvido pelo pesquisador e do próprio modelo escolhido. Ademais, a cominuição é um dos campos nos quais estes modelos são estudados de forma independente ou integrada ao sistema de cominuição.

Os modelos empíricos são aqueles que se baseiam essencialmente na experiência e na observação. São o tipo de modelo mais simples, sendo definidos como a teoria do conhecimento fundamentada entre o senso comum e a hipótese científica de forma a analisar dados e criar correlações de maneira inteligente. Os modelos empíricos não permitem a extrapolação de dados, tendo seu uso restrito na faixa estudada uma vez que são baseados em regressão linear (CUNHA, 2014, WILLS & NAPIER-MUNN, 2006).

Modelos fenomenológicos na cominuição são definidos como aqueles que buscam a representação do fenômeno de quebra ao invés de considerar os princípios fundamentais envolvidos no processo (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). São modelos poderosos e fundamentados na mecânica estática aplicada em um conjunto de partículas, apresentando muito boa acurácia e permitindo a realização de extrapolações (CONCHA, 1995). O Modelo do Balanço Populacional (MBP) é um dos modelos fenomenológicos mais utilizados em simulações de circuitos de cominuição.

Um modelo mecanicista assume que um sistema complexo pode ser entendido ao se analisar o funcionamento de suas partes individuais e a maneira como elas são acopladas. Modelos mecanicistas tipicamente têm um aspecto físico tangível, em que os componentes do sistema são reais, sólidos e visíveis. A modelagem de uma operação simples como a moagem em um moinho de bolas carregado com corpos moedores e polpa é um ótimo exemplo do nível de complexidade que este tipo de modelagem pode encontrar, onde a aplicação da mecânica newtoniana é desafiadora. Desta forma, a demanda computacional necessária para este tipo de modelagem é considerável (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

Historicamente os primeiros modelos empregados na cominuição foram desenvolvidos com o objetivo de relacionar a razão de redução com a energia consumida, selecionando assim o tamanho de redução nos equipamentos (CONCHA, 1995). Este fato é especialmente relacionado com o poder computacional existente na época ser ínfimo ou inexistente, fazendo com que simplificações nos problemas fossem encontradas, como considerar um moinho de bolas como dois círculos com massas equivalentes (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

A fratura de uma partícula ocorre por meio de equipamentos de cominuição como britadores e moinhos. Estes equipamentos são considerados os maiores consumidores de energia dentro das operações, podendo alcançar até 50% de consumo energético em usinas típicas de processamento mineral (WILLS & NAPIER-MUNN, 2006). A grande necessidade de energia consumida para fraturar a partícula se deve ao fato de que ocorre um processo de alta deformação que é acumulado como energia elástica e dissipada durante a fragmentação, conforme mostra a Figura 3.5 (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

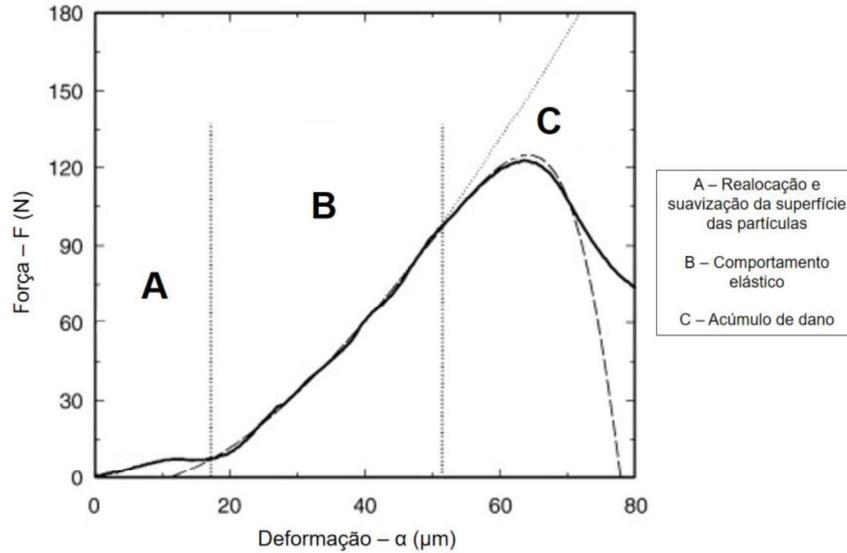


Figura 3.5 – Perfil de deformação típico de uma partícula de 4,0–4,75 mm de mármore (TAVARES, 2009)

Os modelos empregados precisam descrever as propriedades de quebra do minério em função da energia específica aplicada, bem como das características dos equipamentos de cominuição, como a quantidade de energia aplicada para a fratura e dissipada pelo equipamento.

Os modelos empíricos de cominuição utilizados inicialmente foram desenvolvidos por pesquisadores como Kick, Rittinger e Bond (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Considerando dE como o incremento de energia necessário para realizar um incremento de mudança dx em uma certa classe de tamanho passante x , a energia e a quebra foram relacionadas pela equação:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{K}{x^n} \quad (3.1)$$

na qual K é uma constante e n a potência da expressão.

Rittinger propôs a primeira lei da cominuição ao integrar a equação (3.1) e considerar n igual a 2 de forma a expressar que a energia consumida é proporcional à área superficial gerada das partículas:

$$E = K \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (3.2)$$

Kick, por sua vez, enunciou que a energia consumida por unidade de massa é constante e proporcional à razão de redução. Desta forma ele integrou a equação (3.1) considerando $n = 1$ e teve como resultado a equação (3.3), ficando conhecida como a segunda lei da cominuição:

$$E = K \cdot \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \quad (3.3)$$

A terceira lei da cominuição foi postulada por Bond dando origem a equação (3.4) (utilizando $n = 1,5$), que é baseada na suposição de que a energia introduzida é proporcional ao novo comprimento da trinca que resulta na fratura do material.

$$E = K\left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}}\right) \quad (3.4)$$

Na Figura 3.6 é ilustrada a relação entre a energia de cominuição e a granulometria do produto para as três leis da cominuição.

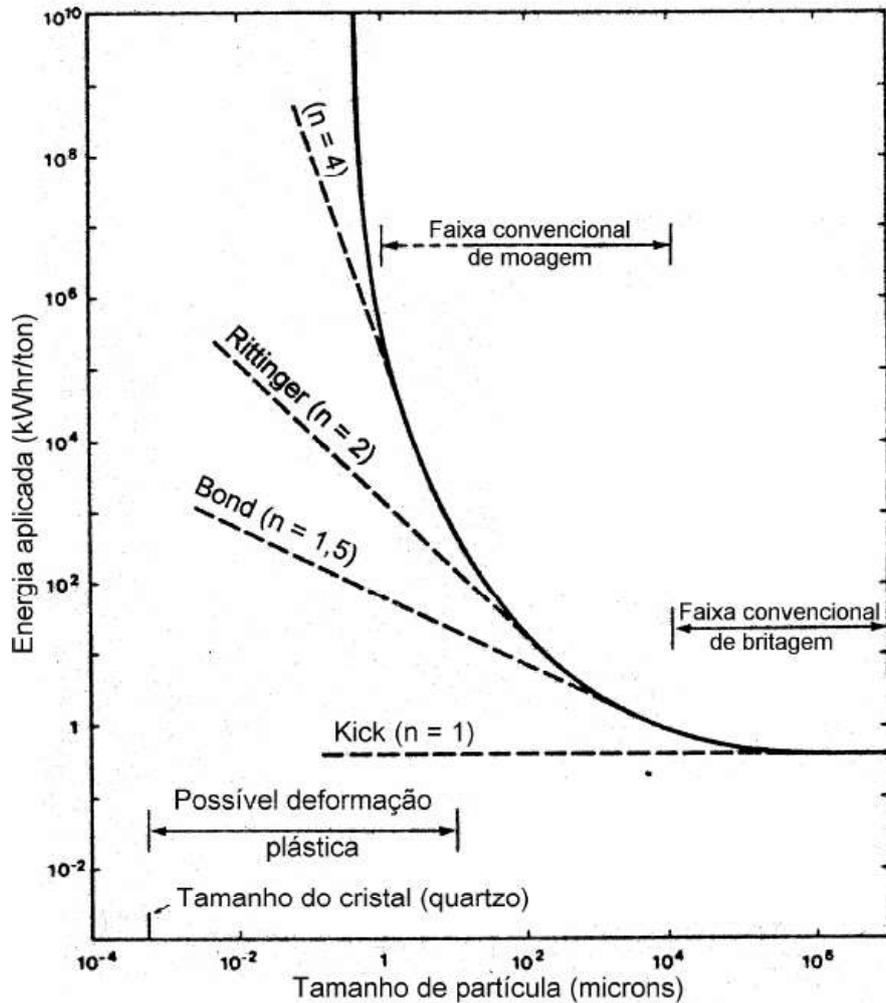


Figura 3.6 - Relação entre energia de cominuição e granulometria do produto (Adaptado de HUKKI, 1961)

3.5.1. Modelagem da britagem

Diversos britadores são normalmente utilizados durante o processo de cominuição em uma usina de agregados de rochas duras, desde os de mandíbulas, passando pelo giratórios, cônicos e os de impacto de eixo vertical. A britagem pode ser descrita como uma sequência consecutiva de quebras em conjunto com o processo de classificação (Figura 3.7).

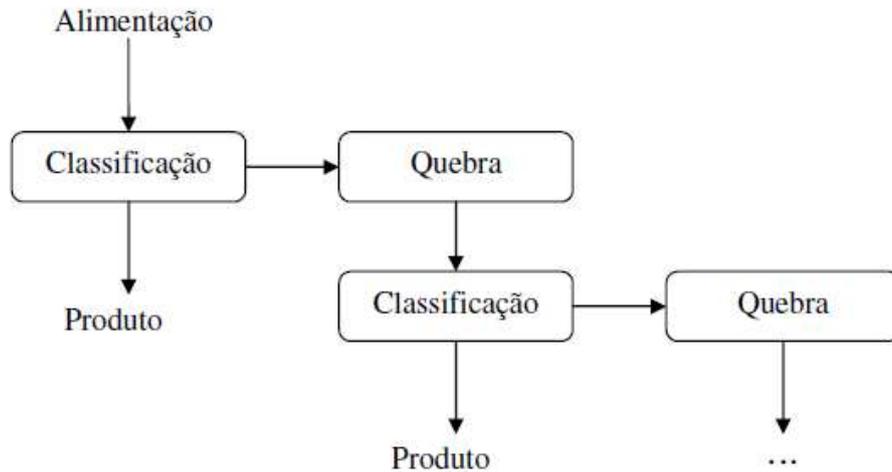


Figura 3.7 – Funções Classificação e Quebra no processo de britagem (Adaptado de NAPIER-MUNN *et al.*, 1996)

O modelo de WHITEN (1972a) é amplamente conhecido e será detalhado neste trabalho. O modelo atua nos fenômenos que ocorrem em uma população de partículas ao descrever a redistribuição das partículas fragmentadas após o evento de quebra, dependendo assim de duas funções empíricas conhecidas por função classificação e função quebra e que têm seus parâmetros ajustados com dados obtidos a partir do circuito de britagem (Figura 3.8).

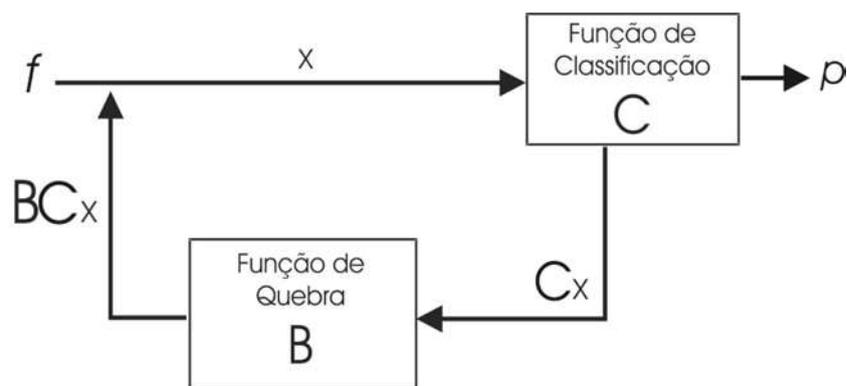


Figura 3.8 - Representação esquemática do modelo de britagem desenvolvido por Whiten (Adaptado de NAPIER-MUNN *et al.*, 1996)

A quebra e a classificação de partículas ocorrem pelo movimento periódico e constante de aproximação e distanciamento entre o manto e o côncavo do equipamento, de forma que ao entrar na câmara de britagem a partícula é escolhida pela função classificação C para sofrer a quebra ou não. Se possuir tamanho inferior à abertura do

britador a partícula será reportada diretamente ao produto, caso contrário ela seguirá para a quebra, representada pela função B , que será responsável por descrever a fragmentação desta população de partículas. O processo se repete até a completa descarga de todo o material da câmara de britagem.

Considerando que o modelo é baseado no modelo do balanço populacional, descrevendo os estágios para cada classe de tamanho de partícula, é possível realizar sua modelagem em termos de balanço de massa de um estado estacionário, conforme as equações (3.5) e (3.6):

$$x = f + B \cdot C \cdot x \quad (3.5)$$

$$x = p + C \cdot x \quad (3.6)$$

nas quais x é um vetor que representa a quantidade de material em cada fração de tamanho que entra no britador, f é o vetor da distribuição da alimentação, p é o vetor da distribuição do produto, C é a função classificação representada por uma matriz diagonal que descreve a proporção de partículas em cada intervalo de tamanho selecionado para entrar na área de britagem e B é a função quebra representada por uma matriz triangular inferior que descreve a distribuição relativa de cada intervalo de tamanho após a quebra.

Reordenando as equações (3.5) e (3.6) chega-se à equação (3.7), que representa o modelo de britagem de WHITEN (1972a), ou seja, a distribuição de tamanhos do produto da britagem:

$$p = (I - C) \cdot (I - BC)^{-1} f \quad (3.7)$$

na qual I é uma matriz identidade.

A classificação das partículas para os eventos de quebra é fortemente dependente de sua fração e com a probabilidade de classificação aumentando para partículas que tenham tamanho maior que a abertura do britador (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Desta forma, a função classificação C pode ser representada pelas equações (3.8) a (3.10):

$$C(x) = 0, \text{ para } x < K_1 \quad (3.8)$$

$$C(x) = 1 - \left(\frac{K_2 - x}{K_2 - K_1} \right)^{K_3}, \text{ para } K_1 < x < K_2 \quad (3.9)$$

$$C(x) = 1, \text{ para } x > K_2 \quad (3.10)$$

nas quais K_1 representa o menor tamanho de partícula selecionado para a quebra, K_2 representa o maior tamanho de partícula que será reportado para a quebra e K_3 descreve a forma da função classificação definindo qual é a probabilidade de partículas intermediárias sofrerem o evento de quebra. K_3 é comumente utilizado como uma constante igual a 2,3. Os parâmetros da função classificação devem ser ajustados de acordo com dados experimentais da britagem e ajustados por técnicas de regressão não-linear.

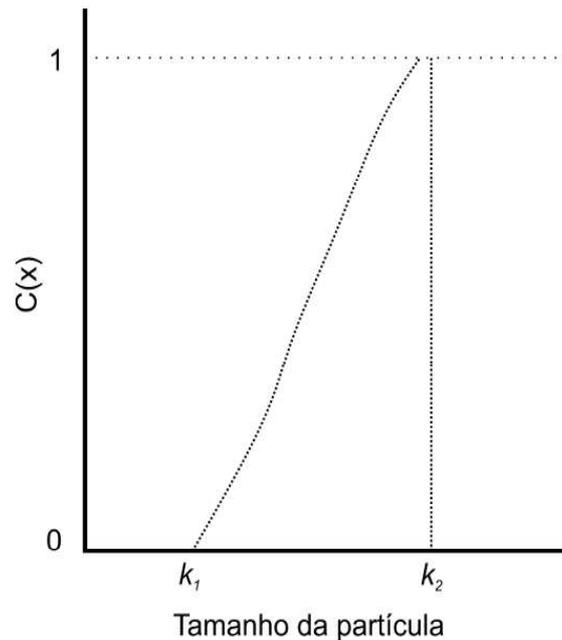


Figura 3.9 - Forma da função classificação de Whiten (Adaptado de KING, 2001).

Os parâmetros da função classificação, K_1 e K_2 além de dependerem fortemente das condições de operação dos britadores como da *APF* (abertura de posição fechada, em mm), também são funções da distribuição granulométrica da alimentação, da taxa de alimentação e das características de seu revestimento.

A função classificação é então relacionada às condições operacionais a partir das relações estabelecidas por ANDERSEN (1988) e ANDERSEN & NAPIER-MUNN (1990) apresentadas nas equações (3.11) a (3.12):

$$K_1 = A_0 + A_1APF - A_2Q + A_3d_{80} + A_4L_{len} \quad (3.11)$$

$$K_2 = B_0 \pm B_1APF + B_2Q + B_3d_{80} - B_4L_{hr} + B_5E_t \quad (3.12)$$

$$K_3 = C_0 \text{ (normalmente 2,3)} \quad (3.13)$$

nas quais A_n e B_n são parâmetros de ajuste da função, Q é a taxa de alimentação de sólidos no britador (t/h), L_{len} é o comprimento do revestimento (mm), L_{hr} é o nível de desgaste do revestimento (h) e E_t o deslocamento do excêntrico do britador (mm).

A função quebra $B(x:y)$ é definida como a proporção de partículas menores que o tamanho x resultantes da fratura de partículas de tamanho y , sendo uma função de grande importância na definição quantitativa dos processos de cominuição. A forma desta função quando é utilizada para a quebra individual de partículas pode ser feita de forma empírica. Foi proposta por AUSTIN *et al.* (1984), sendo descrita pela equação (3.14):

$$B(x:y) \propto \left(\frac{x}{y}\right)^{n_i} \quad (3.14)$$

na qual n_i é a potência da equação e descreve o como será o comportamento do material r em função do tipo de tensão aplicada a fratura.

Cada n_i é equivalente a uma população de partículas equação (3.15):

$$B(x:y) = K \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1-K) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2} \quad (3.15)$$

na qual K representa a fração em massa das partículas finas resultante do evento de quebra.

A equação 3.15 independe do tamanho de partícula para a partícula mãe e, desta forma, depende somente da razão $\left(\frac{x}{y}\right)$, sendo possível ser utilizada para qualquer tamanho de partícula mãe. Assim, sua distribuição é dita como normalizável em relação à partícula mãe. Entretanto, se os dados experimentais não são normalizáveis, a fração K deve ser determinada como função da partícula mãe (equação (3.16)) (KING, 2001):

$$K = K_0 \left(\frac{x}{d_{\min}}\right)^{n_3} \quad (3.16)$$

na qual d_{\min} representa o tamanho da partícula mãe.

Conforme as partículas mãe aumentam de tamanho para serem capturadas pelas partículas do meio, elas sofrem lascamento ao invés da quebra volumétrica e sua função quebra passa a ter um comportamento bimodal (Figura 3.10).

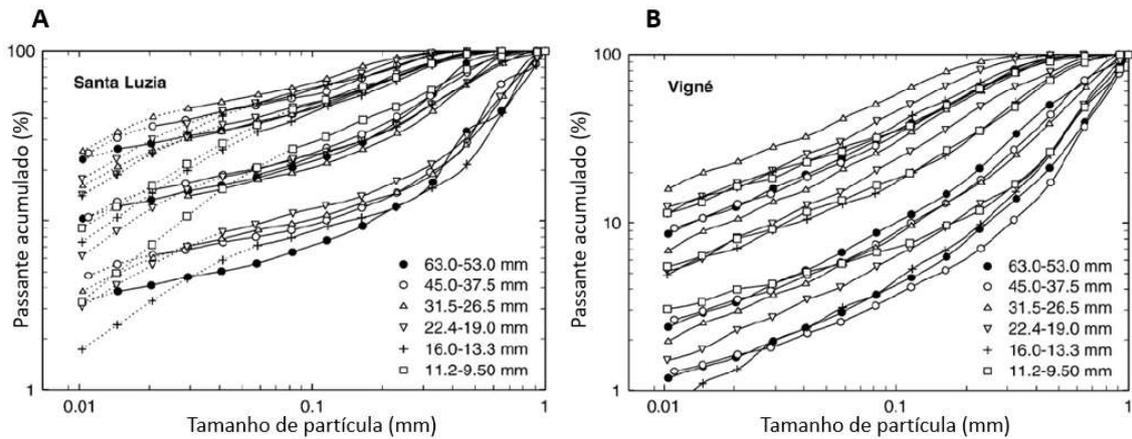


Figura 3.10 – Distribuição granulométrica obtida a partir de ensaio de quebra de partícula unitária para (A) Santa Luzia e (B) Vigné plotadas na forma normalizada. As linhas pontilhadas em (A) representam os pontos em que os tamanhos de partículas são menores que o tamanho de inflexão, caracterizando o comportamento bimodal da rocha (Adaptado de TAVARES & NEVES, 2008)

Assim, o comportamento não normalizável da função quebra pode ser modelado pelas equações (3.17) e (3.18),

$$B(x:y) = K \left(\frac{x}{d_{\min}}\right)^{n_3} \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1-K) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2} \quad \text{para } x < d_{\min} \quad (3.17)$$

$$B(x:y) = K \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1-K) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2} \text{ para } x \geq d_{\min} \quad (3.18)$$

O uso de resultados obtidos a partir de ensaios de quebra, como o *DWT* (*drop weight test*) e o pêndulo duplo, possibilitam que ocorra a relação no modelo entre a energia específica de cominuição (*Ecs*) e a distribuição granulométrica do produto, ou seja, descreve qual é a energia necessária para que a partícula atinja uma certa intensidade de quebra. Essa intensidade de quebra pode ser representada pelo parâmetro t_{10} (equação (3.19)):

$$t_{10} = A [1 - e^{(-b \cdot Ecs)}] \quad (3.19)$$

na qual t_{10} é a porcentagem passante na malha de 1/10 de tamanho inicial da partícula, *Ecs* é a energia específica de cominuição, em kWh/t, e A e b são os parâmetros de quebra por impacto do minério em questão. Valores típicos de t_{10} utilizados nos diferentes estágios da britagem estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores usuais de t_{10} utilizados na britagem (Adaptado de NAPIER-MUNN *et al.*, 1996)

Britagem (estágio)	t_{10} (%)
Primária	5 – 10
Secundária	10 - 15
Terciária	15 - 25

O cálculo da potência em operação de um britador (P_c) é realizado a partir da relação entre a potência em vazio do britador (P_n) e a potência necessária para fraturar as partículas no ensaio de pêndulo (P_p). conforme equação (3.20) (ANDERSEN & NAPIER-MUNN, 1990):

$$P_c = G P_p + P_n \quad (3.20)$$

na qual G é um parâmetro adimensional obtido do ajuste da equação, e todas as potências são dadas em kW.

A potência de pêndulo é a energia total necessária para reduzir a distribuição de tamanhos da alimentação na distribuição relativa ao produto, considerando que todas as partículas sofreram fragmentação a partir dos ensaios de pêndulo ou, mais recentemente, de *DWT* (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996):

$$P_p = \sum_{i=1}^j Ecs_{t_{10}i} \cdot C_i \cdot x_i \quad (3.21)$$

na qual $Ecs_{t_{10}i}$ é a energia específica para a classe de tamanho i com um valor específico de t_{10} , C_i é a probabilidade de quebra (função classificação) para a classe i e x_i é o fluxo de massa da classe i .

A modelagem de britadores de impacto vertical (*VSI*) também tem sido realizada utilizando o modelo de Whiten, mas tem sido adaptada ao se considerar que as partículas adquirem energia cinética como consequência de serem aceleradas até atingirem a velocidade periférica na ponteira do rotor do *VSI* (equações (3.22) e (3.23)), ou seja, a Ecs da partícula é equivalente a energia cinética adquirida (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996, KOJOVIC *et al.*, 1998)

$$Ecs = \frac{1}{2} \cdot v^2 \quad (3.22)$$

$$v = \frac{2\pi \cdot N \cdot R}{60} \quad (3.23)$$

na qual v é a velocidade periférica na ponteira do rotor, R é o raio do rotor, em metros, N é a velocidade do rotor, em rpm.

Como os britadores do tipo *VSI* apresentam mecanismo de quebra diferente dos britadores que agem por compressão, considera-se que todas as partículas da alimentação apresentam probabilidade de quebra, desta forma o parâmetro K_1 da função classificação deve ser considerado como sendo igual a zero.

SEGURA-SALAZAR *et al.* (2017) propuseram um novo modelo para britadores do tipo *VSI* baseado no modelo de WHITEN (1972a). Nesta nova abordagem, além do ajuste do parâmetro t_{10} também ajusta-se o parâmetro K_3 , responsável pela forma da curva, segundo as equações (3.24) e (3.25):

$$t_{10} = 53,9 \left[1 - \exp \left(-5,28 \cdot \sqrt{\frac{z_1}{\bar{z}_1}} + 3,78 \cdot \frac{z_2}{\bar{z}_2} \right) \right] \quad (3.24)$$

$$K_3 = 2,38 - 1,72 \left[\exp \left(- \left(\frac{z_1}{\bar{z}_1} \right)^{-4} \cdot \left(\frac{z_2}{\bar{z}_2} \right)^{-14,9} \right) \right] \quad (3.25)$$

na qual z_1 corresponde ao fluxo de massa (t/h), z_2 a velocidade do rotor (rpm) e \bar{z}_1 e \bar{z}_2 são os valores de referência para o fluxo de massa e a velocidade do rotor, respectivamente.

Observou-se que o parâmetro t_{10} aumenta proporcionalmente com o aumento do fluxo de massa até um certo limite próximo ao valor de A (equação (3.19)), enquanto o valor de K_3 diminui com o aumento do fluxo de massa e mantém-se variando entre 0,6 e 2,4. Ademais, o parâmetro G (equação (3.20)) que parte de um submodelo utilizado para a previsão do consumo energético dos britadores, também foi adaptado, visto que existe uma clara correlação deste com a velocidade do rotor e sendo independente do fluxo de massa. Desta forma os valores de G são manualmente ajustados em função da velocidade do rotor.

3.5.2. Modelagem do peneiramento

O objetivo da cominuição é realizar a fragmentação de partículas de forma controlada. Desta forma, peneiras e grelhas são equipamentos que apresentam papéis fundamentais para garantir que o controle de tamanhos das partículas nos circuitos ocorra de forma correta.

A modelagem do peneiramento depende basicamente da distribuição granulométrica e da vazão mássica da alimentação, de parâmetros do material e de características do tipo de peneira que está sendo utilizada. Os diferentes modelos de peneiramento podem ser classificados em quatro grandes grupos, segundo NAPIER-MUNN *et al.* (1996).

Primeiro existem os modelos probabilísticos que incorporam a probabilidade de uma partícula atravessar a malha de uma peneira. Em segundo, existem os modelos cinéticos que assumem que o peneiramento é comparado a um processo cinético de certa ordem. Em seguida, tem-se os modelos empíricos, que são baseados em equações regressivas com dados obtidos experimentalmente para determinar a sua

curva de partição; e, por último, os modelos de capacidade. Estes são utilizados para o dimensionamento das peneiras e não, a rigor, para a sua simulação de funcionamento.

O modelo de WHITEN (1972b) para peneiras utiliza um único parâmetro, que é o número de vezes que uma partícula entra em contato com a peneira, sendo relacionado com a vazão da alimentação e as condições de operação. A equação (3.26) de WHITEN & WHITE (1979) exemplifica o modelo:

$$E_i = \exp \left[-N \cdot f_0 \cdot \left(1 - \frac{x_i}{k} \right)^k \right] \quad (3.26)$$

na qual E_i é a fração de partículas da alimentação de certo tamanho x_i que reporta ao produto grosso, h é a abertura da peneira, f_0 é a fração de área aberta, k é um parâmetro para um ajuste mais preciso a dados experimentais e normalmente é igual a 2, e N é o parâmetro de eficiência análogo ao número de contatos entre partícula e peneira.

KARRA (1979) propôs um modelo empírico baseado na curva de eficiência normalizada que prevê a porcentagem do material que reporta ao produto grosso (E_i) em função do tamanho de partícula (x_i):

$$E_i = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{x_i}{x_{50}} \right)^{5,846} \right] \quad (3.27)$$

O tamanho de partículas correspondente a 50% de material sendo reportado para o *oversize* é definido por:

$$x_{50} = h_t \cdot \left(\frac{m/A_{\text{peneira}}}{\text{ABCDEFG}} \right) \quad (3.28)$$

na qual h_t é a abertura efetiva da peneira, m é a quantidade de material reportada para o undersize, A_{peneira} é a área da peneira, A é o fator de capacidade básica, B é o fator de oversize, C é o fator de finos, D é o fator de posição no deque, E é o fator de peneiramento a úmido, F é o fator de densidade aparente e G é o fator de near-size. Esses fatores são calculados por meio de equações empíricas, muitas das quais

dependentes de parâmetros da curva de distribuição granulométrica da alimentação (KING, 2001).

O modelo de curva de eficiência (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996) também é bastante utilizado para representar o processo de peneiramento. Este modelo não considera o efeito da vazão na eficiência do peneiramento, reportando uma curva constante para diferentes vazões da peneira. O modelo pode ser expresso por

$$E_{oa}=C \left[\frac{\exp(\alpha) - 1}{\exp(\alpha x) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (3.29)$$

na qual E_{oa} é a curva de partição real de Whiten para o overflow, x é a razão entre o tamanho da partícula e o diâmetro de corte corrigido, α é um parâmetro de eficiência e C corresponde à partição de água para o produto fino.

3.6. Controle e Automação de Circuitos

O controle e a automação aplicados a circuitos de processamento mineral iniciaram na década de 1960 com o objetivo de aprimorar o rendimento do processo (VALE, 2017). O correto funcionamento de um sistema de controle necessita que se tenha recursos para a operação e a supervisão dos sistemas. Quando associados à condição operacional da usina são capazes de garantir ganhos significativos de produção e, sempre que possível, minimizar a quantidade de interferências realizadas pelo operador.

NETO (2007) exemplifica os diferentes objetivos que a automação apresenta em uma instalação de britagem, como:

- Aumentar a segurança das pessoas envolvidas na operação;
- Aumentar a proteção dos equipamentos;
- Maximizar a produção de uma determinada faixa granulométrica, seja do produto de um equipamento, de uma etapa do processo ou de toda a instalação;
- Alcançar a capacidade máxima de produção do circuito;
- Alcançar a razão de redução máxima do circuito ou, equivalentemente, maximizar a produção de finos;
- Reduzir a demanda de mão de obra;

- Reduzir a variação dos produtos (manutenção do processo em regime estacionário);
- Reduzir o consumo de energia elétrica;
- Reduzir o consumo dos revestimentos dos britadores, telas de peneiras, etc.

O desenvolvimento do controle da usina se baseia no entendimento completo do processo sendo necessário a existência de sistemas de instrumentação com o uso de sensores, transdutores e atuadores, de sistemas de controles básicos que têm o objetivo de manter uma condição do processo, de sistemas de supervisão que são os responsáveis pela interface entre o usuário e o processo e de sistemas de otimização.

As principais variáveis de controle e sensores utilizados na britagem primária e na rebitagem são apresentados na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4, respectivamente. O controle destas variáveis se dá pela política de operação da usina, ou seja, basicamente pela regulação dos britadores pertencentes à usina e deve-se levar em consideração tanto o tipo de critério de produção, como maximização da produção e redução de finos, como as restrições do circuito, dadas por exemplo pela área de peneiramento, capacidade dos transportadores de correias e potência consumida pelos equipamentos.

Tabela 3.3 - Variáveis de controle e sensores utilizados da britagem primária (Adaptado de NETO, 2007)

Variável	Sensor	Uso
Nível da moega do alimentador	Ultrassônico Nuclear Capacitivo	Alarme Evitar avaria no alimentador e britador
Potência	Wattímetro	Evitar avaria no alimentador e britador
Nível alto ou baixo em pilhas pulmão	Ultrassônico Nuclear Capacitivo	Alarme Evitar avaria no alimentador e britador
Rasgos em correias	Mecânicos Magnéticos	Alarme
Correias patinando	Capacitivo (gerador de pulsos montado na cabeça do TC)	Alarme
Produção	Balança integradora	Totalização
Monitoramento remoto	Monitores de TV Computadores com placas de vídeo	Monitoramento

Tabela 3.4 - Variáveis de controle e sensores utilizados da rebitagem (Adaptado de NETO, 2007)

Variável	Sensor	Uso
Produção/Carga	Balança integradora	Totalização de produção Malha de controle
APF	Detector de posição do manto	Proteção do equipamento Malha de controle
Potência	Wattímetro Pressão do sistema hidráulico Amperímetro	Proteção do equipamento Malha de controle
Nível de câmara	Ultrassônico ou nuclear	Malha de controle

3.7. Otimização e Simulação de Circuitos

A simulação e a otimização de processos dentro de circuitos de cominuição andam juntas. A otimização pode ser definida como o processo de aprimorar o funcionamento de uma usina de beneficiamento, por meio do refinamento das condições operacionais baseando-se em critérios pré-estabelecidos como a capacidade de operação da usina ou um produto com especificação que não pode ser alterada.

Para a otimização ocorrer de forma satisfatória, o processo necessita de dois elementos. São eles o real conhecimento sobre o funcionamento dos equipamentos presentes no circuito, utilizando modelos matemáticos implementados em simuladores, bem como através da teoria e da experiência prática e a necessidade de uma metodologia estabelecida (Figura 3.11) para se alcançar o objetivo final da otimização empregando o conhecimento previamente agregado (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Essencialmente a otimização necessita seguir a teoria do processo de otimização que enuncia que ela somente ocorrerá caso a estrutura (*layout* da usina e unidade de produção), os parâmetros (as variáveis das unidades de produção) e as tolerâncias (variáveis dos parâmetros, como nível de desgaste de revestimentos) sejam otimizadas simultaneamente para se alcançar a condição ótima do processo (MONTGOMERY, 1996).

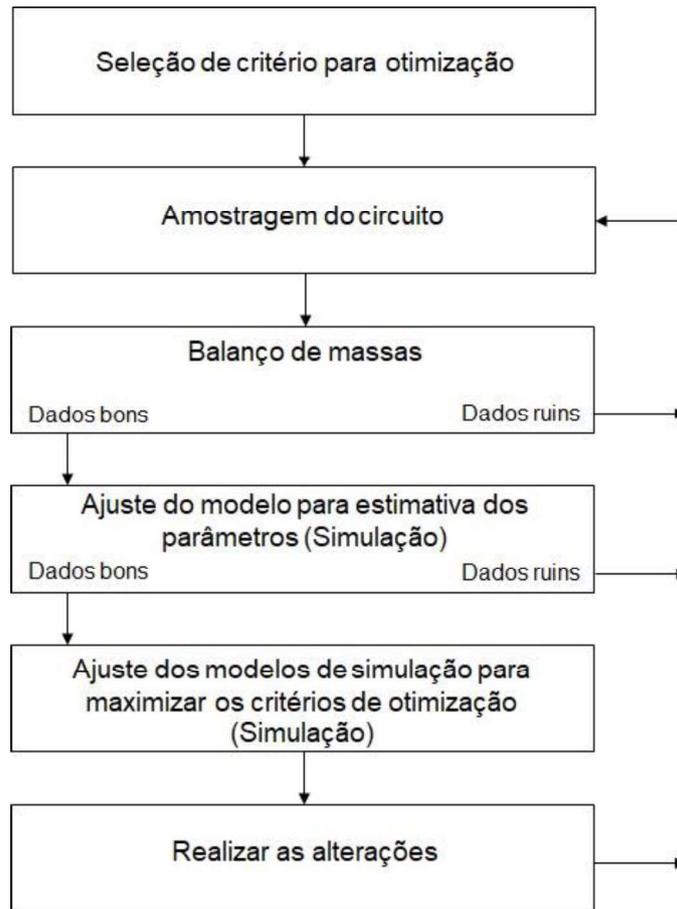


Figura 3.11 – Esquema da metodologia comumente utilizada para otimização de circuitos (Adaptado de NAPIER-MUNN *et al.*, 1996)

O principal objetivo ao se realizar a otimização em circuitos de cominuição é garantir que os equipamentos instalados estejam funcionando de forma mais eficiente possível, ou seja, os equipamentos precisam ter as condições operacionais bem estabelecidas de forma a garantir a minimização da energia consumida e balancear os diferentes estágios existentes no circuito, evitando o possível descompasso entre as unidades de produção.

CRAIG & MACLEOD (1995) propuseram a existência de objetivos específicos com a finalidade de otimizar o desempenho econômico da usina, sendo eles a melhorar da qualidade do produto atingindo a granulometria desejada ou diminuindo as possíveis flutuações de tamanho, maximizando a produção, minimizando o consumo de revestimentos por tonelada de produto, minimizando a energia consumida por tonelada de produto e, por último, maximizando a vida útil dos equipamentos.

Desta forma, as rotinas de otimização deveriam ser adotadas regularmente nas usinas. Entretanto o mais usual é tratar a otimização como um exercício isolado

realizado para melhorar a eficiência do circuito, elevando-o de um patamar a outro. Segundo NAPIER-MUNN *et al.* (1996) a otimização se torna requisito para o correto desenvolvimento do controle de processos, visto que o sistema de controle não pode garantir que a usina esteja operando em seu estado ótimo se não se conhece o melhor ponto de operação de seus equipamentos.

É importante ressaltar que após a definição dos critérios utilizados para a otimização do circuito deve-se identificar os locais em que estas melhorias devem ser realizadas, bem como qual é o tipo de melhoria a ser realizada e como ela irá impactar o circuito. As alterações propostas podem ter um baixo custo de implementação e garantir melhoras significativas na eficiência do processo ou podem ser de alto custo e apresentar um baixo impacto na usina.

A simulação tem a função de reproduzir a operação de processos que ocorram durante o funcionamento de uma usina, por meio da utilização de modelos matemáticos. Segundo MULAR & HERBST (1980), os simuladores podem ser empregados para avaliar a viabilidade de uma usina proposta, para analisar o efeito de modificações realizadas em circuitos já existentes, para adquirir novas informações sobre o comportamento de um circuito completo e, para gerar um banco de dados para a realização de otimização offline do desempenho de um circuito. Ademais, servem de mesmo modo para auxiliar na comparação de modos alternativos de controle dos processos e no orçamento de custos, como custos de investimento de equipamentos utilizados (CAPEX).

As simulações podem ser descritas por três modelos. O primeiro as classifica em simulações estáticas, representando um único instante do sistema, ou dinâmicas, representando as alterações do sistema ao longo do tempo decorrido. A segunda classificação define os modelos de simulação em determinísticos, não dependentes de variáveis probabilísticas, e em modelos estocásticos que podem apresentar uma ou mais variáveis aleatórias. Por último, em modelos discretos ou contínuos, nos quais os modelos discretos o avanço da contagem do tempo ocorre na forma de incrementos definidos e nos modelos contínuos este avanço ocorre continuamente, sendo possível determinar os valores das variáveis a qualquer momento.

Um simulador de usina de beneficiamento precisa adotar os seguintes conceitos fundamentais (KING & SCHNEIDER, 2004):

- As usinas são grupos de operações unitárias conectadas por correntes de fluxo do processo que conduzem material de uma unidade para a próxima, seguindo a estrutura de seu fluxograma;

- Cada operação unitária processa sua própria alimentação de materiais e os separa ou transforma-os, de acordo com o objetivo específico da unidade;
- O comportamento da usina depende das características de cada operação unitária, bem como da natureza do material que é processado;
- A função do simulador é reduzir as operações da usina para uma sequência de equações matemáticas lógicas.

A resolução das equações matemáticas das operações respeitando os diversos fluxos de cada operação unitária e seguindo a lógica estabelecida pelo fluxograma caracteriza um processo de otimização, ou seja, a busca por uma estrutura ótima do sistema simulado.

3.7.1. Simulação estacionária

A simulação em regime estacionário é bastante conhecida e é a técnica de simulação mais utilizada atualmente, possuindo um número enorme de *softwares* disponíveis, como *PlantDesigner* (Sandvik), *MODSIM* (Mineral Technologies), *Bruno* (Metso Minerals), *JKSimMet*[®] (JKMRC), *IES* (CRC ORE), *Aggflow* (BedRock Solution) e *UsimPac* (Caspeo). Neste tipo de simulação, os sistemas são simulados considerando-se um certo instante, no qual o circuito encontra-se balanceado e todas as variáveis dependentes do tempo são consideradas iguais a zero. Este tipo de simulação é muito fácil de ser feita e o resultado é obtido de forma rápida, exemplificando uma situação de na qual os circuitos estão plenamente balanceados na usina.

MORRISON & RICHARDSON (2002) definem a análise de dados, a otimização de usinas e o projeto das mesmas como sendo as três principais áreas de aplicação da simulação estacionária. Porém, ao utilizar simuladores de estado estacionário, não se considera as informações que o controle e a automação da operação podem oferecer ao processo. Desta forma é possível que apareçam etapas frustrantes de implementação da otimização, visto que as melhorias sugeridas serão realizadas manualmente nos equipamentos e não se terá o controle de como obter o melhor desempenho durante a operação, dado que as alterações sofridas ao longo do tempo não foram consideradas durante o processo de simulação estacionária.

O *software* JKSimMet[®] é bastante utilizado para a realização da simulação estacionária, sendo composto por basicamente três módulos. Os demais simuladores comerciais apresentam lógica semelhante. O primeiro módulo do JKSimMet[®] é a

reconciliação do balanço de massas dos dados obtidos experimentalmente via amostragens industriais. A ferramenta computacional utilizada permite, por meio de um algoritmo robusto, reconciliar o balanço de massas do circuito sempre que exista uma inconsistência ou redundância nos dados fornecidos, isto é, nas vazões mássicas e nas distribuições granulométricas das correntes do processo. Para o fechamento do balanço de massas deve-se atribuir diferentes pesos a cada uma das correntes do processo em função da precisão dos dados, que pode ser influenciada por diferentes fatores como a faixa granulométrica a ser analisada (material grosso ou fino), o erro experimental, entre outros (JKTECH PTY LTD., 2015).

O segundo módulo ocorre após a reconciliação dos fluxos presentes no circuito da usina de agregados através do balanço de massas, onde se realiza as calibrações e ajustes dos parâmetros necessários para serem usados nos modelos matemáticos implementados no *software*. Estes parâmetros têm o objetivo de representar o comportamento dos equipamentos presentes no circuito (britadores e peneiras), em cada uma das seções do circuito e com as diferentes configurações possíveis. Desta forma, os modelos utilizados nesta etapa correspondem aos modelos apresentados na seção 3.5.

O último módulo implementado no JKSimMet® é a simulação da operação. Primeiro realiza-se a simulação do estado inicial da usina, buscando validar os modelos ajustados e garantindo que o *software* está entregando o resultado compatível com as amostragens. Depois, realizam-se as simulações de diferentes cenários com o objetivo de aumentar a eficiência do processo, implementando principalmente observações que foram realizadas previamente e analisando-se também o consumo energético de cada um destes cenários para os equipamentos em condições ideais de operação, em vazio ou desligados conseguindo avaliar e quantificar os diferentes ganhos em eficiência que a usina pode alcançar.

O uso da simulação estacionária como ferramenta de otimização em usinas de britagem foi estudado por KING (1990). Através do *software MODSIM* foi realizada a simulação de uma usina produtora de minério de urânio demonstrando os benefícios alcançados através de modelos confiáveis e disponíveis das unidades de operação. Avaliou-se a condição inicial do circuito de quatro estágios de britagem para identificar estratégias para o aumento da produção de produtos finos e para identificar os gargalos presentes e indicar as modificações necessárias na usina para a obtenção dos produtos de forma mais eficiente e rentável. Observou-se que haviam oportunidades de otimização pelo aumento da vazão dos britadores quaternários, bem como a introdução de peneiras no circuito secundário de britagem.

3.7.2. Simulação dinâmica

A simulação dinâmica permite avaliar o desempenho de um sistema levando em consideração que o sistema se encontra em diferentes condições de operação devido a mudança de suas variáveis em função do tempo. Por ser um tipo de simulação mais complexa e que demanda uma quantidade maior de cálculos e de esforço computacional, o resultado não é tão rápido como na simulação estacionária. Entretanto ela fornece resultados mais poderosos, justificando o uso da simulação dinâmica para solucionar problemas pertinentes à operação da usina, como a utilização de britadores que não estejam afogados, o desbalanço presente em pilhas, equipamentos que não estejam em equilíbrio com o restante da usina, entre outros. Alguns *softwares* comerciais disponíveis são o *SysCAD* (Kenwalt), *ProSim* (Metso Minerals), *Simulink* (Mathworks), *Aspen Dynamics* (Aspentech), *Dymola* (Dassault Systèmes) e *Dyssl* (German Research Foundation) sendo que para a aplicação em circuitos de cominuição somente o *SysCAD* e o *ProSim* contêm uma biblioteca dedicada às operações utilizadas (ASBJÖRNSSON *et al.*, 2013).

Sendo o objetivo da otimização de usinas conseguir alcançar a maior eficiência do circuito, a simulação dinâmica é o modelo ideal para ser utilizado, pois a eficiência do sistema de cominuição é diferente daquela prevista pela simulação estacionária, já que o circuito está sob influência de eventos estocásticos e determinísticos, como variações naturais da rocha, paradas para manutenção de equipamentos previstas ou não previstas e situações como metais na linha ou pilhas muito cheias ou vazias.

MIRANDA *et al.* (2016) explica que a simulação dinâmica é uma referência na otimização de circuitos minerais em razão de possuir uma gama de aplicações no conhecimento dos processos, possibilitando seu entendimento e controle operacional. Isto se deve ao fato de existir a viabilidade de simulações contendo diferentes eventos estocásticos e determinísticos, gerando resultados que exibem toda a perspectiva de operação da usina, além de permitir a alteração de parâmetros que demonstram a eficiência dos equipamentos, seu desgaste com o tempo e até mesmo a retomada de valores normais de funcionamento após paradas de manutenção (Figura 3.12). Pode-se identificar, por exemplo, variáveis como a APF em britadores, velocidade de transporte, dureza e umidade do material de alimentação, estratificação em peneiras e segregação em pilhas como cruciais para o desempenho da usina.

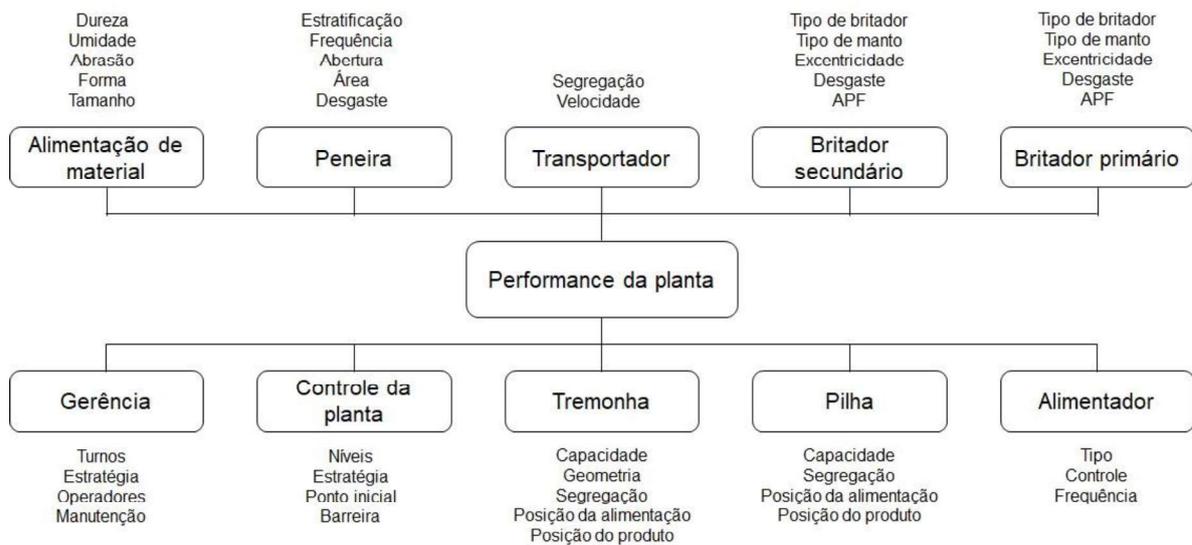


Figura 3.12 - Diagrama esquemático de causa e efeito dos fatores que podem influenciar o desempenho da usina (Adaptado de ASBJORNSSON, 2015)

Outro fator importante obtido por meio da simulação dinâmica é a análise no decorrer do tempo de operação dos custos operacionais, da comunicação entre os equipamentos da usina, da quantidade de paradas previstas e emergenciais realizadas e da lucratividade da mesma. Basicamente a dinâmica de funcionamento de uma usina é sensível a eventos discretos, segregação e manuseio incorreto de materiais, desgaste de equipamentos, variações naturais e todo o tipo de evento que pode ocorrer durante sua operação (Figura 3.13). Assim, deve-se considerar além dos três etapas utilizadas na simulação estacionária, aspectos como manuseio de materiais, controles e controladores, desgastes, ocorrência de eventos discretos e estocásticos, como a manutenção de equipamentos, para determinar o comportamento da operação ao passar do tempo e a eficiência do sistema (ASBJÖRNSSON *et al.*, 2012).

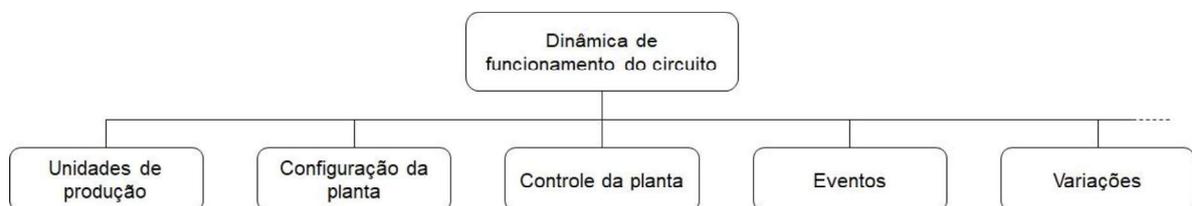


Figura 3.13 - Desenho esquemático das diferentes origens da dinâmica de funcionamento da usina durante sua operação (Adaptado de ASBJÖRNSSON *et al.*, 2016)

É importante observar que a simulação dinâmica não visa descrever somente a operação de britadores e peneiras ao longo do tempo, mas sim o comportamento da

usina como um todo, levando em consideração a presença de outros equipamentos que também fazem parte do circuito, como transportadores de correias, alimentadores, silos, detectores de metal na linha e outros. Silos e tremonhas, por exemplo, podem ter geometrias irregulares e volumes mortos, tendo a capacidade de alterar os fluxos de massa e a reposta da alimentação. Já a segregação e o transporte inadequado de material podem reduzir o desempenho da usina bem como a qualidade do produto.

Na área da simulação dinâmica é possível citar o trabalho de NETO (2007). Neste trabalho, o autor realizou a modelagem de uma plataforma de simulação dinâmica voltada para a indústria de agregados usando Matlab/Simulink. Foram implementados modelos de processos que permitem a criação de modelos discretos ou contínuos no tempo, determinísticos ou estocásticos, podendo se basear inclusive em dados catalogados pela indústria. A plataforma é composta por blocos que representam as diversas operações unitárias possíveis ou que realizam uma função útil para outro bloco, como é o caso de equipamentos periféricos.

O *Simulink* é uma plataforma muito utilizada para a realização de simulações dinâmicas e o *software* desenvolvido pela *Chalmers University of Technology* descrito na tese de doutorado de ASBJORNSSON (2015) faz uso desta plataforma desenvolvendo um Toolbox considerando o processo como sendo contínuo e afetado por mudanças discretas e graduais que alteram o desempenho do sistema como um todo. A abordagem do modelo foi resumida no trabalho de BHADANI *et al.* (2018) e é descrita a seguir. Cada um dos modelos implementados possui diferentes equações diferenciais junto com equações estacionárias que reproduzem o funcionamento dinâmico de uma única operação unitária. Cada modelo inclui derivadas para a massa m e para as propriedades do material γ em relação ao tempo t , conforme equações (3.30) e (3.31).

$$\frac{dm(t)}{dt} = (\dot{m}_{i,in}(t) - \dot{m}_{j,out}(t)) \quad (3.30)$$

$$\frac{d\gamma_i(t)}{dt} = \frac{d\dot{m}_{i,in}(t)}{m(t)} \cdot (\gamma_{i,in}(t) - \gamma_i(t)) \quad (3.31)$$

O atraso e resposta do sistema causado por alimentadores e transportadores são representados pelas equações (3.32) e (3.33) respectivamente, onde o ganho K_p , o operador τ , o tempo de atraso θ e o parâmetro de entrada u caracterizam a resposta do sistema.

$$\tau \cdot \frac{dy}{dt} + y(t) = K_p u(t) \quad (3.32)$$

$$y(t) = u(t - \theta) \quad (3.33)$$

Devido à necessidade da conservação de massa e às características da simulação dinâmica, o atraso e as diferentes respostas das unidades do circuito (pilhas de material e fluxos mássicos, por exemplo) precisam ser controlados. Barreiras, definidas como sistemas de controle, estão incluídas para evitar sobrecarga nas diferentes unidades presentes, garantindo a segurança da operação.

Uma forma usual de controle é o controle do tipo *feedback*, que funciona manipulando e retroalimentando uma variável de saída e comparando-a com um valor pré-definido desejado de forma a minimizar o erro da mesma. O controlador regula o processo para compensar o efeito dos distúrbios presentes. O fluxo de material é regulado utilizando um controlador proporcional-integral (*PI*) (equação (3.34)) onde o ganho proporcional K_p , que é proporcional ao erro calculado, e o ganho integral K_i , que é proporcional à integral do erro, descrevem o desempenho do controlador. O uso do ganho proporcional K_p e ganho integral K_i em conjunto permite obtenção de um erro igual a zero.

$$u_{i,p}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3.34)$$

Os modelos de britagem e de peneiramento são baseados em modelos padrões para as simulações de processo do processamento de mineral. O modelo do britador é uma função seleção-quebra onde a quebra é representada pela matriz de quebra de Broadbent-Calcott (equação (3.35)) (BROADBENT & CALLCOTT, 1956; EVERTSSON, 2000) e o modelo de peneiramento é representado pela curva de eficiência de Reid-Plitt (equação (3.29)):

$$B = \frac{1 - e^{-\left(\frac{d_i}{d_j}\right)}}{1 - e^{-1}} \quad (3.35)$$

A caracterização da quebra específica de cada material é realizada através de testes de compressão utilizando um pistão. Os ensaios são realizados para a fratura simples e para fraturas interpartículas através de amostras de partículas com mono tamanho sujeitas a diferentes razões de compressão (LEE & EVERTSSON, 2008).

Assim, essa abordagem pode ser considerada como pseudo-dinâmica, pois considera o funcionamento das peneiras e britadores como uma sequência de estados estacionários e não consideram o funcionamento intrinsecamente dinâmico desses equipamentos.

Modelos para a adição de eventos discretos também foram incorporados ao *software* e são utilizados para simular sistemas que sofrem modificação em um instante discreto no tempo (ASBJÖRNSSON *et al.*, 2016). A estes eventos foram associadas probabilidades estocásticas ou deterministas de ocorrerem. A otimização deste processo é realizada utilizando-se um algoritmo evolucionário chamado de algoritmo genético. Este algoritmo é um algoritmo estocástico e possui uma elevada probabilidade de alocar a solução próxima do ótimo global.

A plataforma desenvolvida por NETO (2007) apresentou-se como uma ferramenta importante para obtenção de ganhos econômicos, além de possibilitar a determinação prévia das melhores estratégias de controle visando a otimização da usina. Além do mais, o trabalho demonstrou a importância de uma boa calibração de modelos matemáticos com base em dados experimentais e representativos. Por outro lado, a plataforma desenvolvida por ASBJÖRNSSON (2015) se apresenta como grande aliada no treinamento de operadores de usinas de agregados (ASBJÖRNSSON *et al.*, 2013; HULTHÉN *et al.*, 2015), de forma a garantir a alta produtividade e a operação de forma segura, além de apresentar grande poder na otimização tanto da performance quanto do lucro dos circuitos de britagem (BENGTSSON *et al.*, 2017).

4. Metodologia

Esta seção irá detalhar os procedimentos realizados durante as etapas experimentais e de modelagem dos britadores e da usina de britagem. Adotou-se a usina de agregados da Mineração Santa Luzia como base para avaliação das simulações realizadas. A Figura 4.1 apresenta sinteticamente a metodologia aplicada.

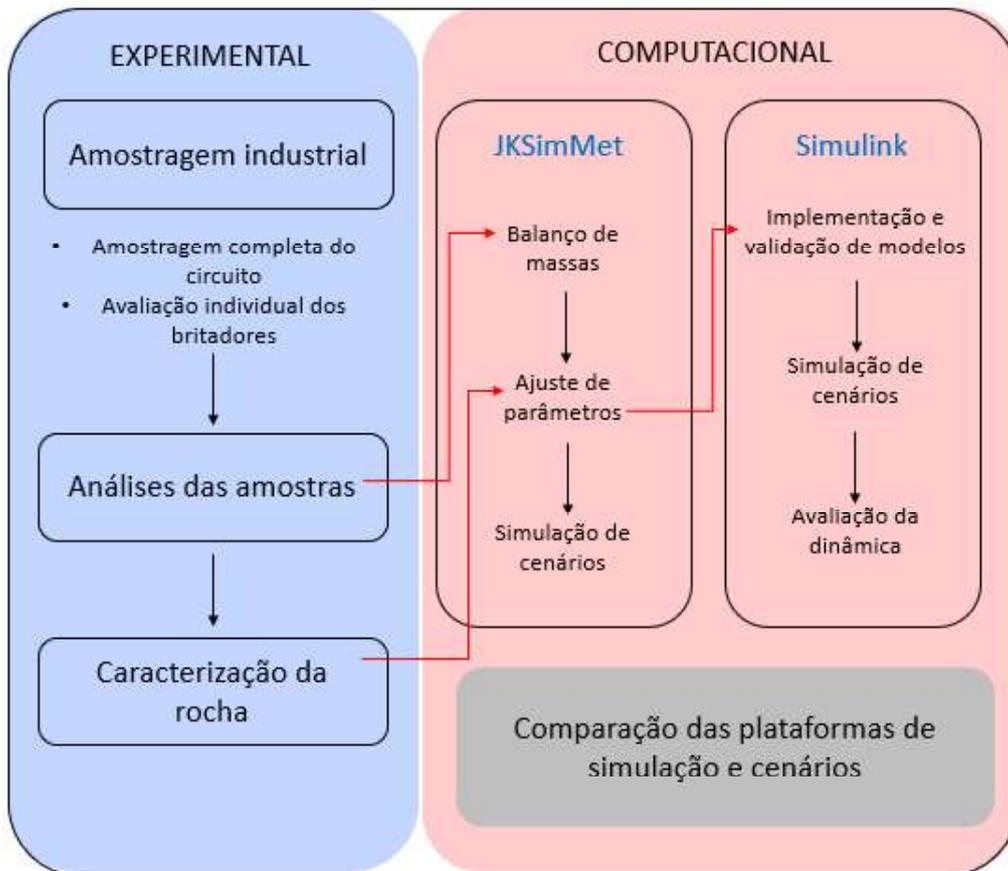


Figura 4.1 – Diagrama esquemático apresentando a metodologia utilizada no presente trabalho

4.1. Objeto de estudo

A Mineração Santa Luzia, localizada no município de Itaguaí – Rio de Janeiro, é uma empresa responsável pela produção e comercialização de agregados para a construção civil.

A usina de produção de agregados da Santa Luzia é composta de uma mina a céu aberto e uma usina de processamento. A unidade gera, como seus principais produtos, pó de pedra, brita 00, brita 0, brita 1, bica corrida (-45 mm do ROM) e rachinha (45 x 120 mm), além de produzir brita 2 e brita 3 por demanda. A matéria prima é obtida

pelo método de lavra a céu aberto, com bancadas de 12 a 15 metros de altura e prévia remoção do estéril. O desmonte da rocha é realizado com auxílio de explosivos, com posterior retomada por meio de uso de carregadeiras e caminhões fora de estrada até a alimentação do britador primário.

A fração fina do material é separada por meio da utilização de uma grelha, com abertura de 35 mm. A fração mais grossa do material segue para o britador primário de mandíbulas, enquanto o *undersize* (fração fina) da grelha alimenta a pilha de bica corrida. O produto da britagem primária alimenta uma peneira vibratória de dois deques com aberturas de 120 mm e 45 mm, nos quais a fração mais fina é direcionada à pilha de bica corrida, a fração intermediária, à pilha de rachinha e a fração mais grossa, à pilha pulmão que alimenta o circuito de rebitagem.

Previamente à britagem secundária, realiza-se o peneiramento do material oriundo da pilha pulmão através de uma peneira de um deque com abertura de 100 mm acoplada ao britador giratório, modelo S4000 da Metso, regulado tipicamente para abertura de 54 mm. A fração fina da peneira e o produto da britagem secundária são descarregados na mesma correia transportadora que alimenta duas peneiras vibratórias de três deques (utiliza-se atualmente apenas dois deques), ambas com tela de borracha e com dimensões de 2,45 m por 6,00 m e aberturas de tela de 50 mm no segundo deque e 24 mm no terceiro deque.

Do primeiro jogo de peneiras da unidade de processamento formam-se duas pilhas, uma oriunda da fração mais grossa da peneira, que alimenta o britador terciário cônico, modelo HP300 da marca Metso, e outra oriunda da fração intermediária da peneira, que alimenta os britadores quaternários, sendo um cônico (modelo HP200) e um britador VSI (modelo Barmac B7150SE), ambos de fabricação da Metso. Todos os três britadores descarregam na mesma correia transportadora que o britador secundário. A fração mais fina desta peneira alimenta duas peneiras vibratórias de telas de borracha, posicionadas em paralelo, com 2,40 m por 6,00 m (PV5) e 2,10 m por 6,00 m (PV6) e aberturas de tela de 23 mm no primeiro deque, 12 mm no segundo deque e 4 mm no terceiro deque, de onde são gerados britas 2, brita 1 e pó de pedra na faixa granulométrica de 0 a 4 mm. A faixa passante no segundo deque é retida no terceiro é direcionada à uma peneira de dois deques, com dimensões de 1,50 m por 4,00 m e aberturas de 8 mm no primeiro deque e 3,2 mm no segundo deque, onde são produzidos brita 0, brita 00 e pó de pedra na faixa granulométrica dedicada à produção de argamassa. O fluxograma da usina de rebitagem é ilustrado na Figura 4.2.

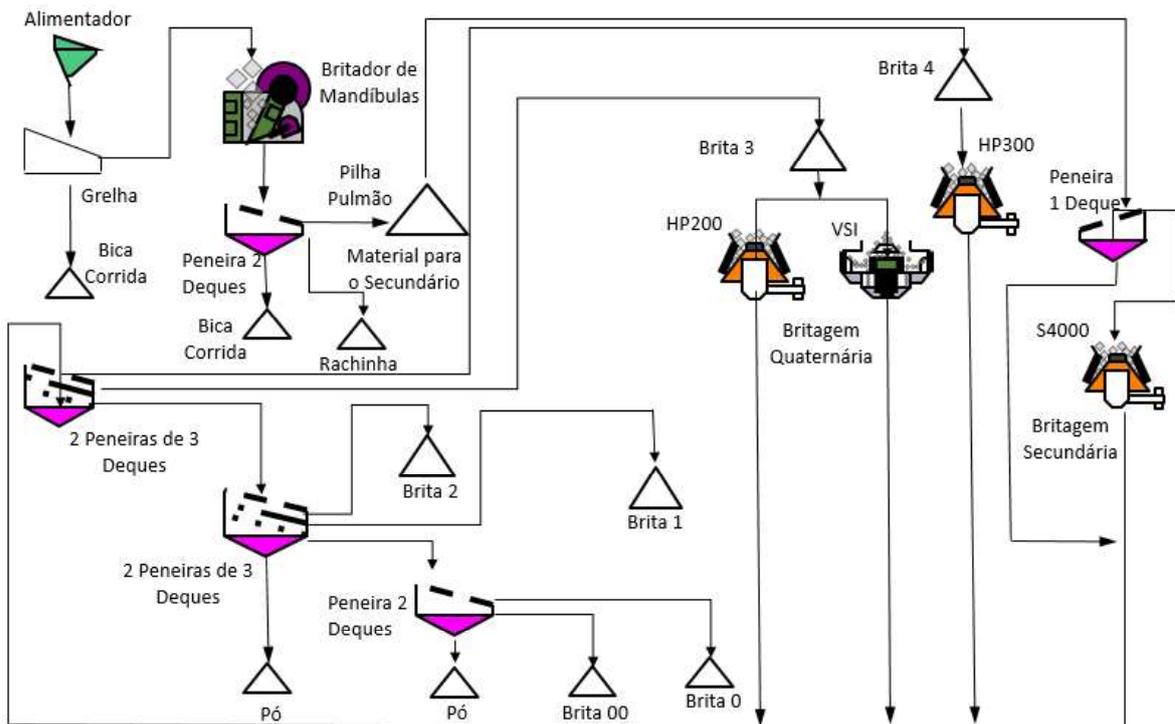


Figura 4.2 - Fluxograma da usina de britagem da Mineração Santa Luzia

4.2. Experimental

4.2.1. Amostragem industrial

O material em estudo foi coletado na usina de agregado em questão. As amostragens consistiram na coleta de dados do funcionamento dos equipamentos e de amostras do circuito de rebitagem, ou seja, após a britagem primária. As amostras foram coletadas de forma a serem representativas em relação à operação do circuito, garantindo que as partículas presentes no processo tivessem a mesma chance de serem selecionadas durante a amostragem. A fim de minimizar os erros amostrais as amostragens foram realizadas em duplicata.

Para os britadores secundário, terciário e quaternário avaliou-se a abertura de posição fechada (APF) para três posições diferentes. A Tabela 4.1 apresenta as medidas de APF avaliadas para os britadores secundário, terciário e quaternário durante as amostragens. Para o britador VSI foram realizados ensaios variando a granulometria de entrada e a frequência de rotação do rotor. A Tabela 4.2 lista os ensaios realizados com o britador VSI e utilizados na modelagem do britador.

Tabela 4.1 - Variações de APF do britador secundário, terciário e quaternário

Equipamento	Aberturas (mm)		
Britador Secundário	70	54	40
Britador Terciário	50	40	30
Britador Quaternário	30	20	15

Tabela 4.2 - Relação de ensaios realizados para o britador VSI

Granulometria de alimentação	Frequência do rotor (rpm)		
Brita 3 e 2	1500	1650	1800
Brita 2	1500	1650	1800

As amostragens foram realizadas segundo o padrão proposto pelo *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC) para corte de amostra em correia (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996), o qual preconiza que a paralisação deve ser feita após a estabilização do circuito para que não ocorra variação nos parâmetros utilizados durante a amostragem. Tal padrão consistiu das seguintes atividades:

1. Foram retiradas amostras das correias conforme a finalidade de cada amostragem, de modo que, para correias contendo material com dimensões superiores a 100 mm foi medida uma extensão de 10 m para coleta do material, enquanto que, para correias contendo material com dimensões inferiores a 100 mm, coletou-se de 3 a 5 m de material, dependendo da extensão da correia e de seu carregamento.
2. Foram considerados materiais grossos aqueles maiores que 100 mm, com base no gabarito utilizado pela equipe no momento da amostragem. Partículas superiores a esse tamanho foram classificadas também pelo uso de gabaritos de 125 mm, 150 mm, 175 mm, 200 mm, 225 mm, 250 mm e 275 mm e, em seguida, foram pesadas.
3. As intensidades de corrente, assim como a tensão de todos os equipamentos (correias, britadores, peneiras e alimentadores) foram determinadas a partir de leitura direta no equipamento por meio de voltímetro e amperímetro. Foram levados em consideração os valores para equipamentos operando carregados (cheio) e descarregados (vazio).

4.2.2. Análise granulométrica das amostras

Foram realizadas análises granulométricas de todas as amostras coletadas através da adoção de um padrão de aberturas de peneiras com razão igual a raiz quadrada de dois (1,414) para aberturas superiores a 2 mm e raiz quarta de dois (1,189) para aberturas inferiores a 2 mm, permitindo uma melhor suavização dos resultados na parcela mais fina dos materiais.

4.2.3. Caracterização da rocha

Previamente a execução da modelagem da usina de britagem da Mineração Santa Luzia foram realizados ensaios de caracterização da rocha para estimação de parâmetros necessários para os modelos empregados neste trabalho. Adotou-se o ensaio de *drop weight test* (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996) para correlacionar a energia teórica de cominuição com o grau de fragmentação do material e o ensaio de abrasão Los Angeles para estimar a susceptibilidade do material à abrasão.

4.2.3.1. Ensaio de queda de peso

Ensaio completos de fragmentação foram conduzidos seguindo o padrão adotado no JKMRC na caracterização da quebra de partículas por impacto (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996), incluindo alguns tamanhos adicionais de partículas. Esses ensaios foram realizados com o objetivo de fornecer subsídios para a modelagem matemática dos britadores.

O procedimento adotado nos ensaios consistiu das seguintes etapas:

1. Classificação do produto por peneiramento a seco manual nas faixas de 63 x 53 mm, 45 x 37,5 mm, 31,5 x 26,5 mm, 22,4 x 19 mm, 16 x 13,2 mm, 11,2 x 9,5 mm, 7,93 x 6,7 mm e 5,6 x 4,75 mm.
2. Determinação do peso médio de cada partícula.
3. Separação de 24 lotes, cada um dos quais contendo 10, 15, 30 ou 100 partículas para as diferentes frações de tamanhos.
4. Seleção dos níveis de energia específica de cominuição (Ecs) no intervalo de 0,1 kWh/t a 2,5 kWh/t, permitindo caracterizar adequadamente a variação da distribuição de tamanhos desde a fratura incipiente (clivagem) até o estilhaçamento da partícula.
5. Cálculo da altura de queda, por meio da equação:

$$h_i = h_f + \bar{m} \frac{E_{is}}{0,0272 M_d}$$

sendo h_i a altura de queda (em cm) a partir do qual o peso é solto, h_f a altura final de repouso do peso (em cm e estimada a partir de resultados anteriores), \bar{m} a massa média das partículas ensaiadas (em g), M_d a massa do peso a ser solto (em kg) e E_{is} é a energia específica de impacto aplicada (em kWh/t). Presumindo que a restituição do peso após o impacto pode ser ignorada, a energia específica de impacto aplicada é considerada como sendo equivalente à energia específica de cominuição (E_{is}).

6. Quebra de partículas, uma a uma, na Célula de Carga de Impacto (TAVARES & KING, 1998), coleta dos fragmentos e peneiramento a seco usando peneiras que seguem uma série com razão igual à raiz quadrada de dois.
7. Normalização da distribuição granulométrica dos produtos de cada ensaio em relação ao tamanho médio das partículas originais. Cálculo do t_{10} para cada energia específica de impacto. Estimação dos parâmetros A e b da equação (3.19).
8. Determinação da relação entre t_{10} e os diversos t_n s e identificação de quaisquer mudanças do padrão de fragmentação.

4.2.4. Ensaio de abrasão Los Angeles

Devido à importância da abrasão no processo de britagem, foi realizado o Ensaio de abrasão Los Angeles como forma de investigar o comportamento da rocha neste aspecto. Utilizou-se o padrão ASTM C535 (gradação C). As amostras de minério foram separadas em lotes de 5 kg do respectivo minério compostos por duas alíquotas, sendo a primeira com 2,5 kg no intervalo de tamanho entre 19 e 12,5 mm e a segunda com 2,5 kg no intervalo de tamanho entre 12,5 e 9,5 mm.

O experimento consiste no carregamento de um moinho padronizado com 700 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento, conforme a Tabela 4.3, equipado com uma barra de elevação de mesmo comprimento e 90 mm de largura. A carga do moinho consiste no lote de 5 kg da amostra e 11 esferas de aço de 48 mm de diâmetro.



Figura 4.3 - Moinho padronizado para o ensaio de Abrasão Los Angeles

A execução do ensaio se dá por meio da rotação do moinho por 500 revoluções numa velocidade entre 30 e 33 rpm (59 e 65% da velocidade crítica). Ao final, a amostra é retirada e é realizada a análise granulométrica. Como resultado obtém-se um índice de abrasão *LA* (%), que é a porcentagem de material do produto passante na peneira de 1,68 mm, ou seja, é a medida da quantidade relativa de finos gerados por meio de fragmentação. O cálculo deste índice é dado por:

$$p = 100 \frac{m - m_1}{m}$$

sendo m a massa da amostra seca inicial e m_1 a massa do material após o ensaio, ambos retidos na malha de abertura 1,68 mm.

4.3. Modelagem e simulação computacional

A modelagem e simulação computacional procedeu a etapa experimental e visou reproduzir os resultados obtidos experimentalmente através de modelos robustos. Utilizou-se para a realização do balanço de massas e a modelagem de parâmetros dos equipamentos de cominuição e classificação o simulador JKSimMet® (JKTECH PTY LTD., 2015). Os parâmetros encontrados por meio desta modelagem alimentaram os modelos em simulações estáticas através do JKSimMet® e simulações dinâmicas utilizando os modelos implementados na plataforma Matlab-Simulink. A Tabela 4.3

descreve a configuração do computador utilizado para realização das simulações do presente trabalho.

Tabela 4.3 - Configuração do computador utilizado na realização das simulações

Componente	Especificação
Sistema operacional	Windows 10 Pro
Processador	Intel® Core™ i7-8700K CPU @ 3.70 GHz
Memória RAM	32 GB DDR4 3200 MHz

4.3.1. Simulador JKSimMet®

O simulador de processos JKSimMet® versão 6.1 (JKTECH PTY LTD., 2015) (Figura 4.4) foi escolhido para reconciliação do balanço de massas da usina e calibração dos parâmetros utilizados nos diferentes modelos e simuladores ao longo deste trabalho. Além disso, o software serviu como base para simular o desempenho dos equipamentos de cominuição e classificação da usina de britagem da Mineração Santa Luzia.

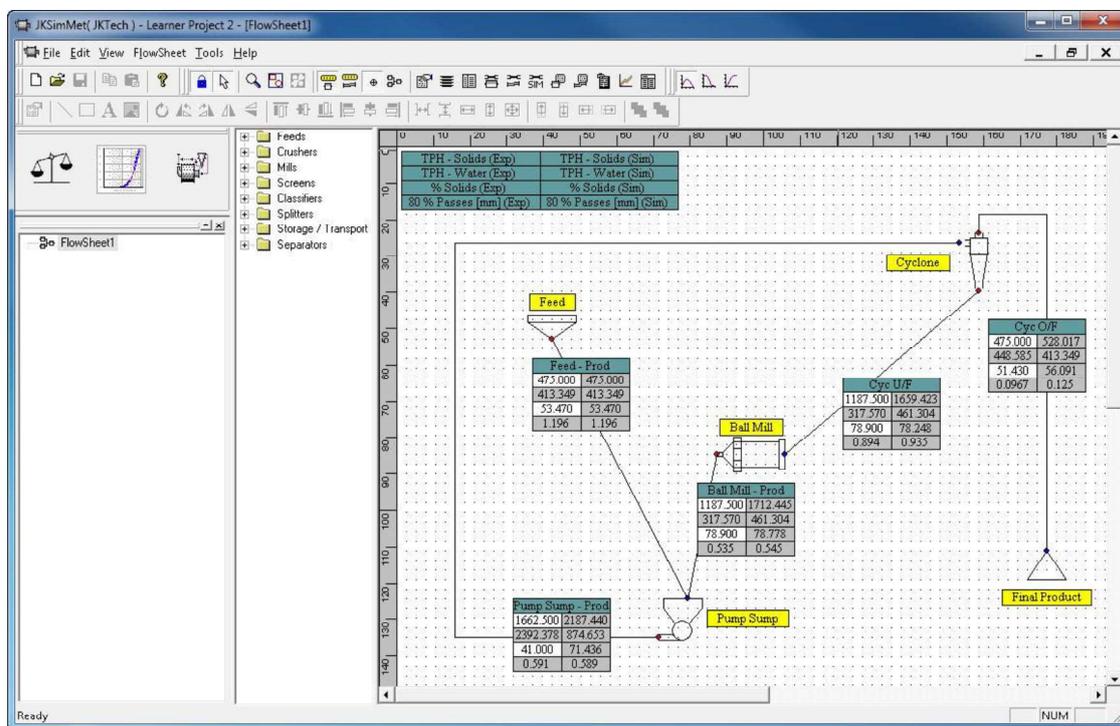


Figura 4.4 - Interface do simulador de processos JKSimMet® versão 6.1

4.3.1.1. Balanço de massas

A ferramenta de reconciliação de balanço de massas do simulador JKSimMet® desempenha um importante papel no cálculo da recuperação e distribuição dos fluxos máximos de correntes de processo em casos quando não é possível realizar uma determinação direta destes valores. A qualidade do balanço de massas depende fortemente da representatividade da amostragem, assim como da estimativa das correntes do processo (GUPTA & YAN, 2016).

O princípio básico para reconciliação do balanço de massas consiste na estabilidade do sistema, ou seja, seu estado estacionário. Um processo é considerado estável quando as propriedades mássicas e granulométricas dos diferentes fluxos de entrada e saída não variam ao longo do tempo. A existência de flutuações em um processo industrial é inevitável, sendo assim, a reconciliação do balanço de massas torna-se fundamental para correta determinação das propriedades das correntes.

Para realização do ajuste dos balanços de massa utilizando a ferramenta do simulador JKSimMet® é necessário garantir que os dados foram amostrados de maneira adequada e que ocorra a redundância dos mesmos, ou seja, a quantidade de dados necessários para a simulação deve ser inferior à quantidade de dados disponíveis para execução da mesma, garantindo maior fidelidade dos resultados obtidos.

Utiliza-se o quadrado das diferenças entre dados medidos e ajustados para indicar a qualidade do ajuste do modelo. O simulador é capaz de discriminar diferentes níveis de ajuste de uma corrente de acordo com os erros atribuídos a ela. Fluxos compostos majoritariamente por partículas grossas, por exemplo, estão sujeitos a uma maior variabilidade e por isso deve ser atribuído ao mesmo erros maiores do que em comparação com fluxos de partículas mais finas. O procedimento adotado para o ajuste dos balanços de massas foi realizado presumindo que as informações de ao menos um dos fluxos tenha alta precisão, a fim de obter a convergência do balanço e, além disso, visando minimizar o somatório dos erros quadrados ponderados (SSQ):

$$SSQ = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^L \left(\frac{X_{ij} - x_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2 + \sum_{i=1}^L \left(\frac{A_i - a_i}{\sigma_i} \right)^2$$

na qual N é o número de medições, L corresponde ao número de fluxos, X corresponde a uma medição, x é o valor ajustado dessa medição, A é a vazão medida e a é a vazão ajustada. σ_{ij} e σ_i correspondem às ponderações ou desvios padrão para as medições e

as vazões, respectivamente. Os valores adotados para σ_{ij} e σ_i foram determinandos de acordo com a granulometria do fluxo a ser ponderado. Foram aplicados quatro diferentes níveis de desvio padrão, sendo eles iguais a 2, 5, 10 e 20%. Fluxos de alta precisão, ou seja, aqueles que apresentam baixa variabilidade, como é o caso do produto mais fino produzido, tiveram o desvio padrão de 2% adotado. Por outro lado, fluxos que correspondem a alimentação de peneiras e/ou do circuito e apresentam alta variabilidade por não terem uma distribuição granulométrica estreita, tiveram o valor de 20% adotado.

4.3.1.2. Ajuste de parâmetros

Os modelos matemáticos disponíveis no simulador JKSimMet® para descrever diferentes equipamentos de cominuição e classificação permitem separar características do minério, obtidas em laboratório a partir de ensaios padronizados, dos parâmetros do equipamento, obtidos a partir das informações coletadas durante as amostragens. A ferramenta *Model Fit* do JKSimMet® permite ajustar esses parâmetros por meio da utilização de mínimos quadrados não lineares, compatibilizando os resultados modelados com os observados na amostragem.

O ajuste dos parâmetros de cada equipamento de classificação e cominuição deve ser realizado em circuito aberto, ou seja, desconsiderando qualquer influência externa na operação daquele equipamento. Apenas após a calibração desses parâmetros é possível a realização de simulações que descrevam com fidelidade os diferentes fluxos do circuito estudado. A Tabela 4.4 apresenta os modelos matemáticos utilizados para os diferentes equipamentos modelados utilizando o simulador JKSimMet®.

Tabela 4.4 - Modelos matemáticos utilizados no simulador JKSimMet® para calibrar os equipamentos de cominuição e classificação

Equipamento	Modelo matemático
Britador cônico	Modelo de Whiten (equação (3.7))
Britador giratório	Modelo de Whiten (equação (3.7))
Britador VSI	Modelo de Whiten (equação (3.7))
Peneira vibratória	Modelo de Curva de Eficiência (equação (3.29))

4.3.2. Simulador Bruno

O *software* Bruno, fabricado pela Metso, é um simulador de processos de britagem que possui uma ampla base de dados de diversos equipamentos, como britadores, peneiras e alimentadores e leva em consideração as características da rocha estudada, como densidade, umidade, granulometria, abrasividade e WI de Bond. O *software* foi utilizado para a realização da modelagem da capacidade máxima dos britadores HP300, HP200 e VSI.

4.3.3. Simulador Matlab-Simulink

A utilização da plataforma Matlab-Simulink como ferramenta de simulação dinâmica seguiu a mesma estruturação desenvolvida por ASBJÖRNSSON *et al.* (2013). Uma usina de agregados é considerada como sendo um sistema composto por diferentes unidades de produção conectadas entre si. Cada uma destas unidades de produção funciona como um subsistema com suas respectivas funções. Desta forma, existe uma hierarquia para a modelagem da usina, que funciona com uma abordagem de cima para baixo, de forma que o primeiro nível (nível da usina) é subdividido em outros níveis (níveis de equipamentos) e que por sua vez, podem ser também divididos de acordo com suas respectivas e diferentes funções (Figura 4.5). Cada subsistema é construído individualmente, de forma que seu manuseio seja isolado.

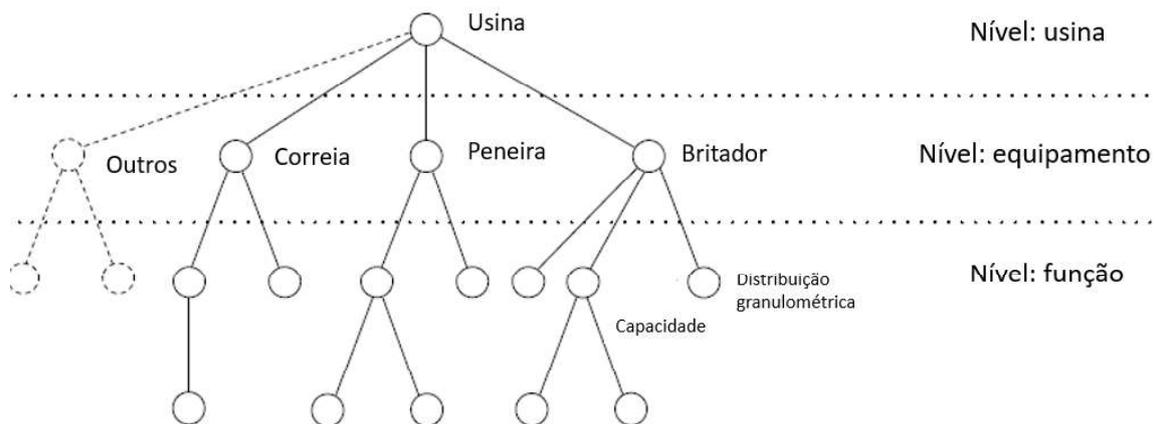


Figura 4.5 - Diagrama do sistema de hierarquia adotado na plataforma Matlab-Simulink

Apesar de cada subsistema ser individual, o fluxo de informações entre os diversos subsistemas precisa ocorrer de forma contínua e padronizada, visto que o *output* (saída) de um subsistema é o *input* (entrada) do subsistema seguinte. Para tanto,

cada subsistema recebe e devolve ao processo um vetor que contém as seguintes informações em função do tempo: distribuição granulométrica, vazão mássica e propriedades, como densidade e parâmetros A e b do material, entre outros. A Figura 4.6 apresenta a interface do simulador instalado na plataforma Matlab-Simulink.

Os subsistemas no Matlab-Simulink representam os processos unitários de britagem, peneiramento e manuseio (transporte, estoque e alimentação) considerando apenas operações secas e de materiais particulados. Na construção destes subsistemas considerou-se que os modelos para britagem e peneiramento são instantâneos (pseudo-dinâmicos), enquanto os modelos de transporte (implementados nos transportadores de correia) acrescentam apenas um atraso ao sistema, que é definido em função do comprimento e da velocidade do transportador de correia, e os modelos para as pilhas de alimentação consistem de integradores simples simulando misturadores perfeitos. Para emular a sequenciamento de material que ocorre nesta pilha, procedeu-se com a subdivisão da pilha em n misturadores perfeitos (NETO, 2007), representado por n camadas de material, conforme Figura 4.7. Nas pilhas ocorre a integração das vazões mássicas de cada intervalo granulométrico a cada passo de simulação para assim calcular a distribuição granulométrica final.

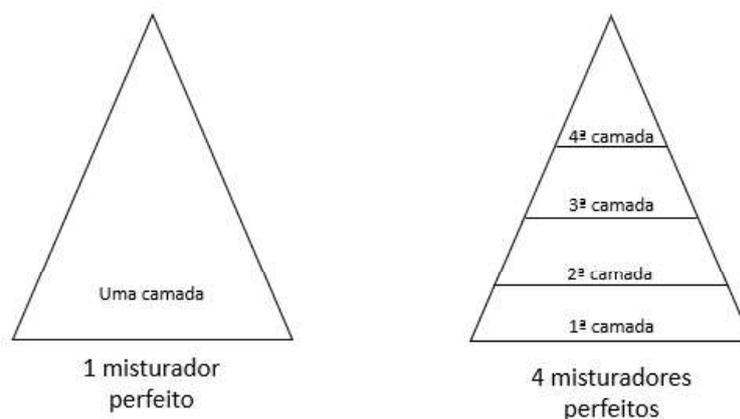


Figura 4.7 - Diagrama explicativo sobre o funcionamento das pilhas implementados no Matlab-Simulink sem o efeito de sequenciamento (1 único misturador perfeito) e com o efeito do sequenciamento (4 misturados perfeitos)

4.3.3.1. Subsistema alimentação

A Figura 4.8 apresenta uma janela de diálogo do subsistema alimentação, conforme criado pelo autor. Os parâmetros desse modelo, que devem ser introduzidos nesta janela são:

- *User screen size [mm]*: o usuário deve entrar com um vetor que representa as telas de peneiras utilizadas experimentalmente. A

plataforma interpola os valores do usuário para os valores *default* que ela utiliza.

- *Cumulative passing (%)*: o usuário deve entrar com o vetor dos passantes acumulado experimentalmente. A plataforma faz a conversão de passante acumulado para retido e utiliza os valores retidos em todos os cálculos.
- *Mass Flow [tph]*: o usuário deve entrar com a vazão mássica do fluxo em toneladas por hora.
- *A (%)*: o usuário deve entrar com o parâmetro A, obtido por meio de ensaio no DWT.
- *b*: o usuário deve entrar com o parâmetro b, obtido por meio de ensaio no DWT.
- *Water [tph]*: o usuário deve entrar com a vazão de água, em toneladas por hora, introduzida junto ao material.
- *Density [g/cm³]*: o usuário deve entrar com a densidade real do material em g/cm³.

Block Parameters: Material Source Constant flow2

Material Source (mask)

The properties of the rock material are described in the material model. The model contains the information needed to predict the output of the various production units.

Unit

User screen size [mm]: 0.3;0.212;0.15;0.106;0.075;0.053;0.038

Cumulative Passing [%]: 0.418709936;0.320807296;0.24970292

Mass Flow [tph]: 536.5

A: 65.09

b: 1.20

Water [tph] 15

Density [g/cm³]: 2.67

OK Cancel Help Apply

Figura 4.8 – Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de alimentação

4.3.3.2. Subsistema britador

A Figura 4.9 apresenta uma janela de diálogo do subsistema britador para britadores do tipo cônico e giratório, conforme criado pelo autor. Os parâmetros desse modelo, que devem ser introduzidos nesta janela, são:

- *Volume [m³]*: o usuário deve entrar com o volume útil interno do britador, em m³.
- *CSS [mm]*: o usuário deve entrar com o valor da APF utilizada pelo britador. A entrada correta deste valor é importante, pois é ele que vai definir a capacidade máxima de operação do britador.
- *A₀ e A₁*: o usuário deve entrar com os valores dos parâmetros para a equação de K₁.
- *B₀ e B₁*: o usuário deve entrar com os valores dos parâmetros para a equação de K₂.
- *C₀*: o usuário deve entrar com o valor do parâmetro para a equação de K₃.
- *D₀ e D₁*: o usuário deve entrar com os valores dos parâmetros para a equação de t₁₀.
- *A*: o usuário deve entrar com o valor do parâmetro G da equação para o cálculo do modelo de potência, aqui representado pela letra A.
- *P_n [kW]*: o usuário deve entrar com o valor da potência em vazio do equipamento, em kW.
- *dmin [mm]*: este parâmetro diz respeito à escolha do usuário pela utilização da função quebra não-normalizável. Caso o usuário opte por esta função, deve introduzir o tamanho relativo ao ponto de inflexão do material.
- *n3*: este parâmetro diz respeito à escolha do usuário pela utilização da função quebra não-normalizável. Caso o usuário opte por esta função, deve introduzir o valor do expoente que faz a correção da função quebra.

Para o subsistema britador, também está disponível um modelo dedicado aos britadores do tipo VSI. A Figura 4.10 apresenta uma janela de diálogo para este caso, conforme criado pelo autor. Os parâmetros desse modelo, que devem ser introduzidos nesta janela são:

- *Volume [m³]*: o usuário deve entrar com o volume interno do britador, em m³.

- *Frequency [Hz]*: o usuário deve entrar com a frequência, em Hz, utilizada pelo britador. A entrada correta deste valor é importante, uma vez que ele vai definir a capacidade máxima de operação do britador, além dos valores de K_3 e t_{10} .
- *Top Size [mm]*: o usuário deve entrar com o maior tamanho de partícula que pode ser britador por este equipamento. Este parâmetro corresponde ao valor da equação de K_2 .
- *A*: o usuário deve entrar com o valor do parâmetro G da equação para o cálculo do modelo de potência, aqui representado pela letra A.
- *P_n [kW]*: o usuário deve entrar com o valor da potência em vazio do equipamento, em kW.
- *dmin [mm]*: este parâmetro diz respeito à escolha do usuário pela utilização da função quebra não normalizável. Caso o usuário opte por esta função, deve introduzir o tamanho relativo ao ponto de inflexão do material.
- *n3*: este parâmetro diz respeito a escolha do usuário pela utilização da função quebra não normalizável. Caso o usuário opte por esta função, deve introduzir o valor do expoente que faz a correção da função quebra.

Block Parameters: S4000

Unit

Volume [m3]: 11

CSS [mm]: 54

A0: -16.365

A1: 2.02

B0: 84.177

B1: 0.727

C0: 2.3

D0: 14.73

D1: -0.071

A: 0.836

P_n [kW]: 44

dmin [mm]: 0.212

n3: 0

OK Cancel Help Apply

Figura 4.9 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de britagem para britadores do tipo cônico e giratório

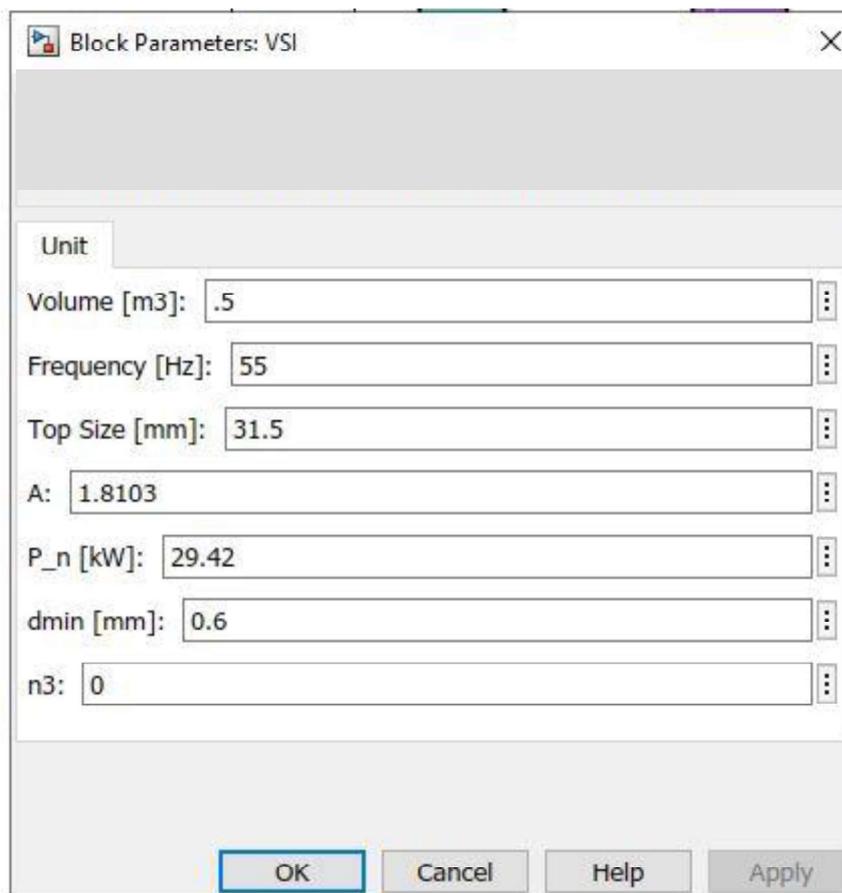


Figura 4.10 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de britagem para britadores do tipo VSI

4.3.3.3. Subsistema peneira

A Figura 4.11 apresenta uma janela de diálogo do subsistema das peneiras, conforme criado pelo autor. Os parâmetros desse modelo, que devem ser introduzidos nesta janela são:

- *d50 [mm]*: o usuário deve entrar com o valor do d50 para o deque da peneira. O índice diz respeito ao valor de d50 para cada um dos deques da peneira.
- *alfa*: o usuário deve entrar com o valor de alfa do modelo de Lynch (equação (3.29)) para o deque da peneira. O índice diz respeito ao valor de alfa para cada um dos deques da peneira.

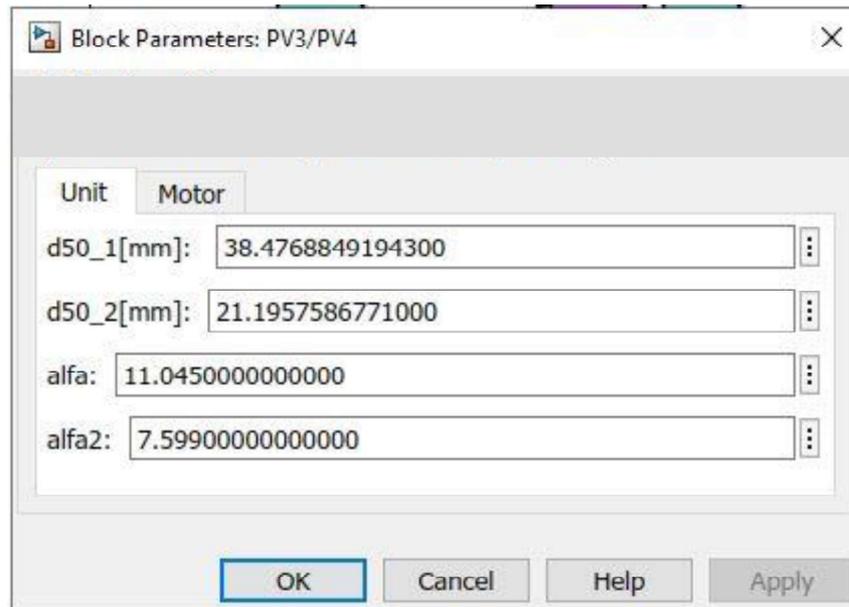


Figura 4.11 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de peneiramento

4.3.3.4. Subsistema transportador de correia

A Figura 4.12 apresenta uma janela de diálogo do subsistema transportador de correias, conforme criado pelo autor. Os parâmetros desse modelo, que devem ser introduzidos nesta janela são:

- *Conveyor length [m]*: o usuário deve entrar com o comprimento do transportador de correia, em metros.
- *Constant speed [m/s]*: o usuário deve entrar com a velocidade do transportador de correia, em metros por segundo.

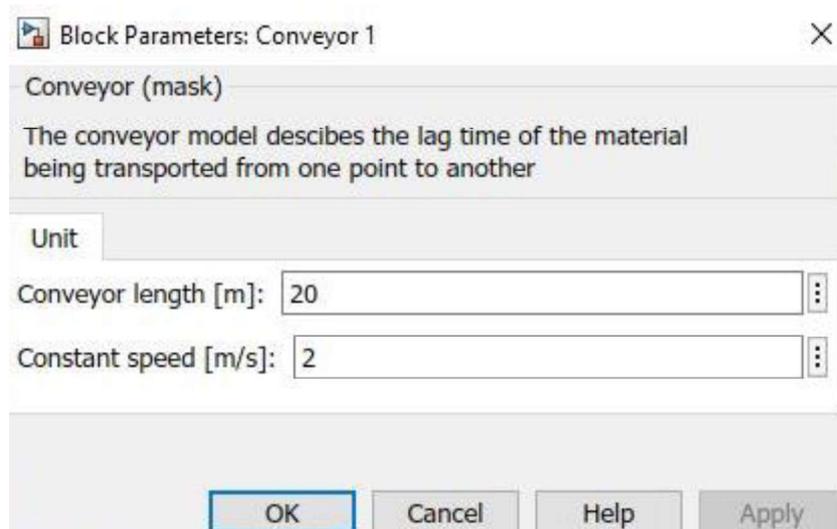


Figura 4.12 - Janela de diálogo para a especificação dos parâmetros do modelo de transportador de correias

4.3.3.5. A lógica de controle

Para o funcionamento da dinâmica do circuito, existe um controle geral na usina simulada que se baseia no nível das pilhas que alimentam os britadores terciários e quaternários. Essas pilhas quando atingem certos níveis, emitem sinais para os britadores, de forma que a alimentação seja interrompida. O controle instalado nas pilhas é do tipo ON/OFF, ou seja, quando o alimentador da pilha recebe um sinal igual a 0 a alimentação é interrompida e, quando o sinal é igual à 1 a alimentação reativada/continuada. Os diferentes cenários/lógicas possíveis de ocorrerem durante a operação estão apresentadas na Tabela 4.5. Os níveis da pilha para ação serem tomadas foram iguais a 0, 20, 50 e 100%. A Figura 4.13 apresenta de forma visual o diagrama lógico de controle. Neste diagrama é possível ver que todos os cenários apresentados na Tabela 4.5 foram cobertos pela lógica estabelecida, de forma que todos os sinais que os britadores podem receber para comandar sua operação estão definidos.

Por exemplo, considerando um evento hipotético que a pilha de alimentação do HP300 se encontre cheia, ou seja, com nível igual a 100% e a pilha de alimentação do HP200 e VSI com capacidade acima da metade, é necessário que a pilha do HP300 tenha seu volume de material reduzido, sendo necessário desligar o britador S4000, que é o responsável por gerar material para ambas. Desta forma, o circuito será esvaziado pois as pilhas serão consumidas (cenário A). Uma possível consequência deste primeiro caso seria o esgotamento total do material na pilha do HP300 (nível igual 0%), com a possibilidade de diferentes níveis na pilha do HP200 e VSI. Caso esta esteja com nível

acima de 20% (cenário C), o controle irá entender que todos os britadores podem ser acionados, de forma a encher o circuito. Caso o nível desta pilha seja inferior a 20% (cenário D), o controle irá entender que ambas as pilhas precisam ser completadas com novo material, assim será mantido o funcionamento do britador S4000 e HP300 (responsáveis por gerar material para as pilhas) e os britadores HP200 e VSI estarão desligados, para que o material desta pilha não seja consumido.

Tabela 4.5 - Diferentes lógicas possíveis de ocorrerem durante operação com as respectivas ações a serem tomadas

Cenário	Nível da pilha do HP300	Nível da pilha do HP200 e VSI	Condição	Ação
A	100%	$\geq 50\%$	Esvaziar o circuito	Desligar S4000
B	100%	$< 50\%$	Esvaziar pilha do HP300 e encher pilha HP200/VSI	Desligar S400, HP200 e VSI
C	0%	$\geq 20\%$	Operação completa	Tudo operando
D	0%	$< 20\%$	Encher pilha HP300 e HP200/VSI	Desligar HP200 e VSI
E	$\geq 50\%$	100%	Esvaziar o circuito	Desligar S4000
F	$< 50\%$	100%	Operação completa	Tudo operando
G	$\geq 20\%$	0%	Esvaziar pilha do HP300 e encher pilha HP200/VSI	Desligar S400, HP200 e VSI
H	$< 20\%$	0%	Encher pilha HP300 e HP200/VSI	Desligar HP200 e VSI

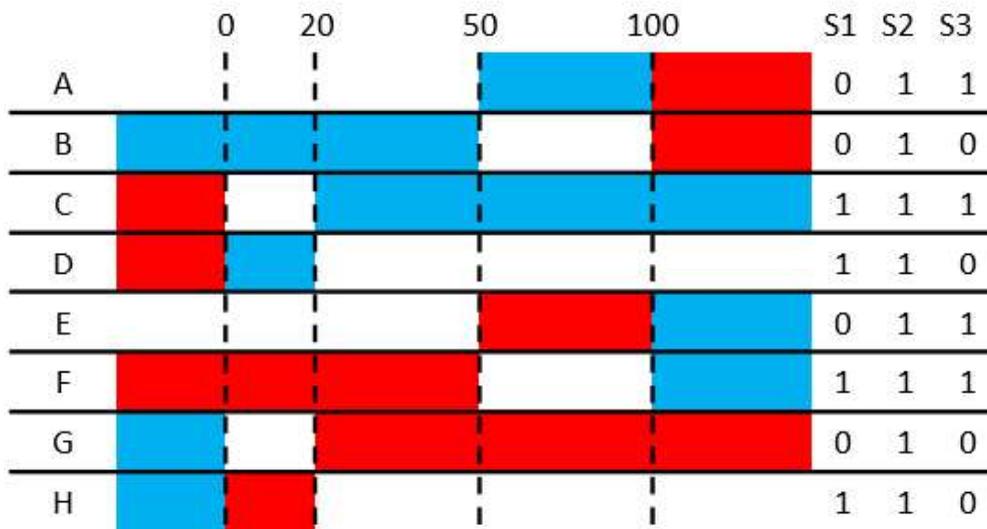


Figura 4.13 - Diagrama lógico do controle dinâmico de pilhas, onde a cor vermelha representa a pilha do britador HP300, a cor azul a pilha dos britadores HP200/VSI, S1 representa o sinal que o britador S4000 recebe, S2 o sinal que o britador HP300 recebe e S3 o sinal que o britador HP200/VSI recebe

5. Resultados e Discussões

5.1. Caracterização da rocha

A seguir são apresentadas, sinteticamente, as principais características da rocha presente na Mineração Santa Luzia. Os dados apresentados na Tabela 5.1 foram obtidos no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ.

Tabela 5.1 - Parâmetros de caracterização do gnaiss Santa Luzia

Parâmetro	Valor
Índice de Abrasividade de Bond, A_i [g]	0,19
Índice de Britabilidade de Bond [kWh/t]	12,1
Parâmetro de ensaio DWT, A [%] x b [-]	65,09 x 1,20 = 77,89
Abrasão Los Angeles [%]	53,3

Resultados dos ensaios de caracterização da fragmentação da rocha da Santa Luzia por impacto são ilustrados na Figura 5.1, para a energia de 0,25 kWh/t para diferentes tamanhos. Os demais resultados deste ensaio estão no Anexo. É possível identificar que a rocha possui um ponto de inflexão na parte fina da distribuição, para tamanhos de partícula inferiores a cerca de 1,0 mm (região em vermelho na Figura 5.1). A presença deste ponto de inflexão na distribuição cumulativa de tamanhos sugere que ocorre um acúmulo de partículas de tamanhos abaixo deste valor após a quebra e um esgotamento de material em tamanhos logo acima. Este ponto de inflexão é especialmente importante ao se considerar a modelagem, visto que ele representa o tamanho abaixo do qual a função quebra deixa de ser normalizável (KING, 2001). Esse efeito já havia sido observado em trabalho anterior com a mesma rocha (Figura 5.2) (TAVARES & NEVES, 2008).

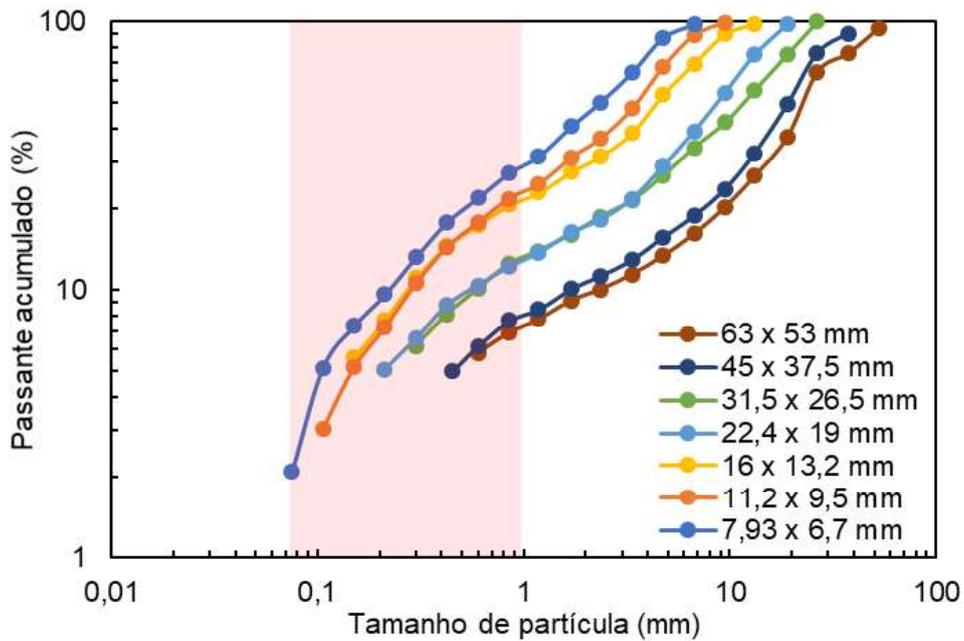


Figura 5.1 - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas para a energia de 0,25 kWh/t. A área em vermelho corresponde aos tamanhos de partículas inferiores ao ponto de inflexão da função quebra

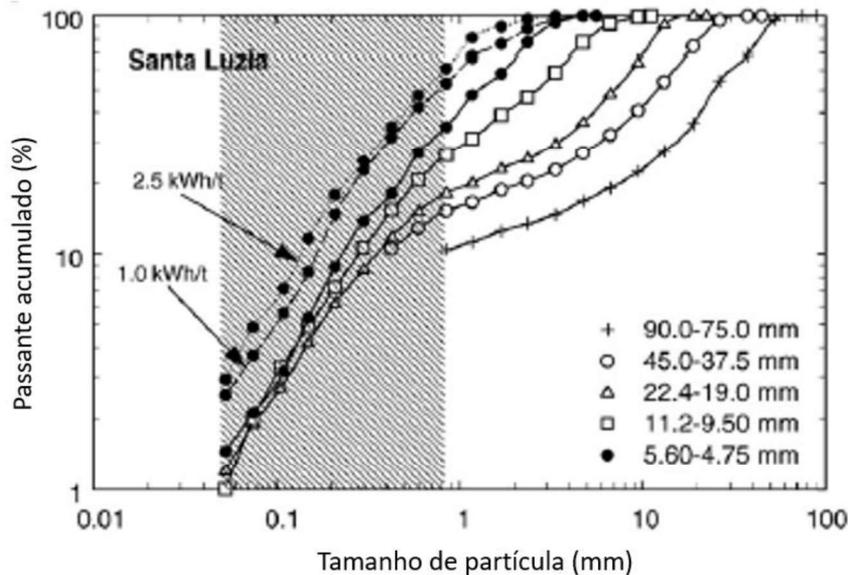


Figura 5.2 - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas para a energia de 0,25 kWh/t ou conforme indicado. A área hachurada corresponde aos tamanhos de partículas inferiores ao ponto de inflexão da função quebra (Adaptado de TAVARES & NEVES, 2008)

Desta forma, utilizaram-se os dados acima do ponto de inflexão (tamanho de partículas maiores que 1,0 mm) para a construção das curvas $t_{10} - t_n$, utilizados na modelagem e simulação dos britadores (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Esta estratégia

foi adotada para evitar a superestimação da proporção de material fino na distribuição da função quebra. A Figura 5.3 apresenta as curvas $t_{10} - t_n$ para o caso normalizável, enquanto a Figura 5.4 apresenta as curvas $t_{10} - t_n$ para o caso não normalizável. Já a Figura 5.5 apresenta uma comparação entre as curvas $t_{10} - t_n$ do caso normalizável e do caso não-normalizável (considerando-se apenas os dados acima do ponto de inflexão). O tamanho inicial de partícula foi 63 x 53 mm. É notável a diferença entre a utilização de dados normalizáveis e não normalizáveis para os valores de t_{ns} altos, que representam partículas menores, de forma a representar de forma mais fidedigna com os dados experimentais.

Os valores de $t_{10} - t_n$ bem como os valores de E_{cs} para diferentes t_{10} foram extraídos considerando-se a função quebra não normalizável e foram utilizados na modelagem dos britadores da usina da Santa Luzia. Os resultados, conforme são utilizados no JKSimMet[®], são apresentados na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3.

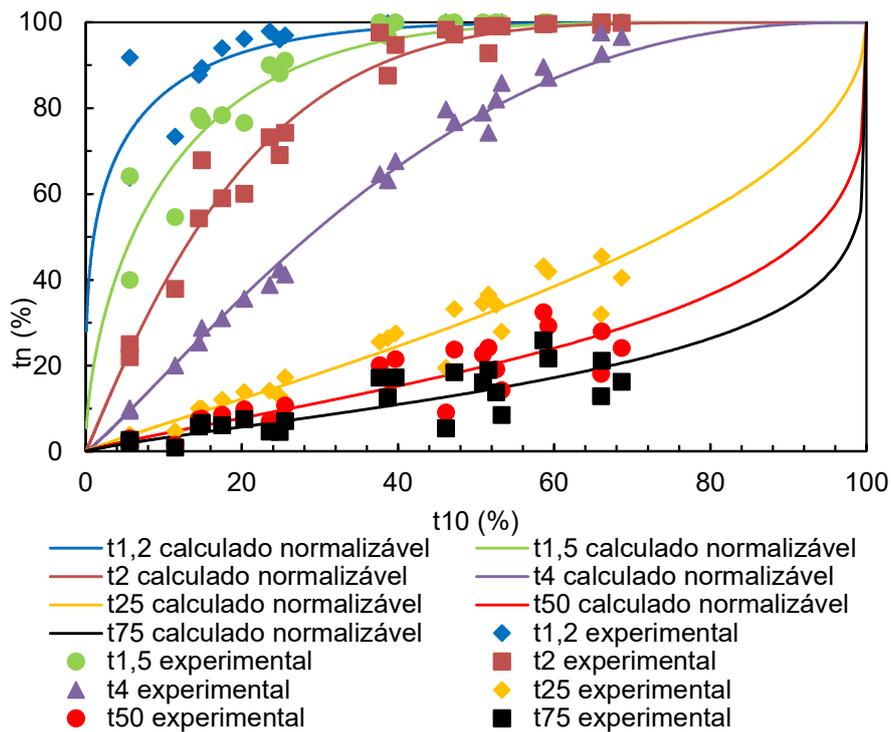


Figura 5.3 - Curvas $t_{10} - t_n$ para o caso normalizável da rocha da Santa Luzia

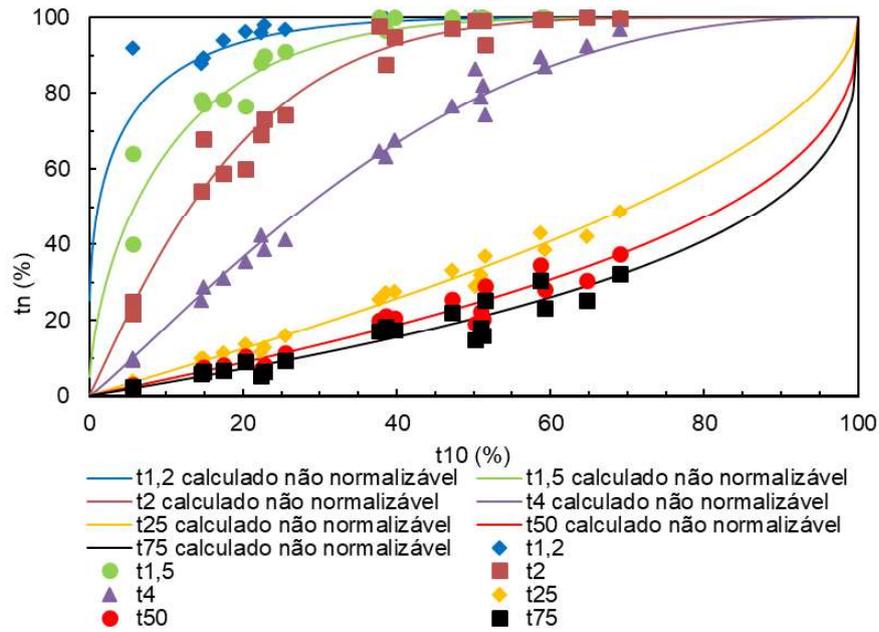


Figura 5.4 - Curvas $t_{10} - t_n$ para o caso não-normalizável da rocha da Santa Luzia

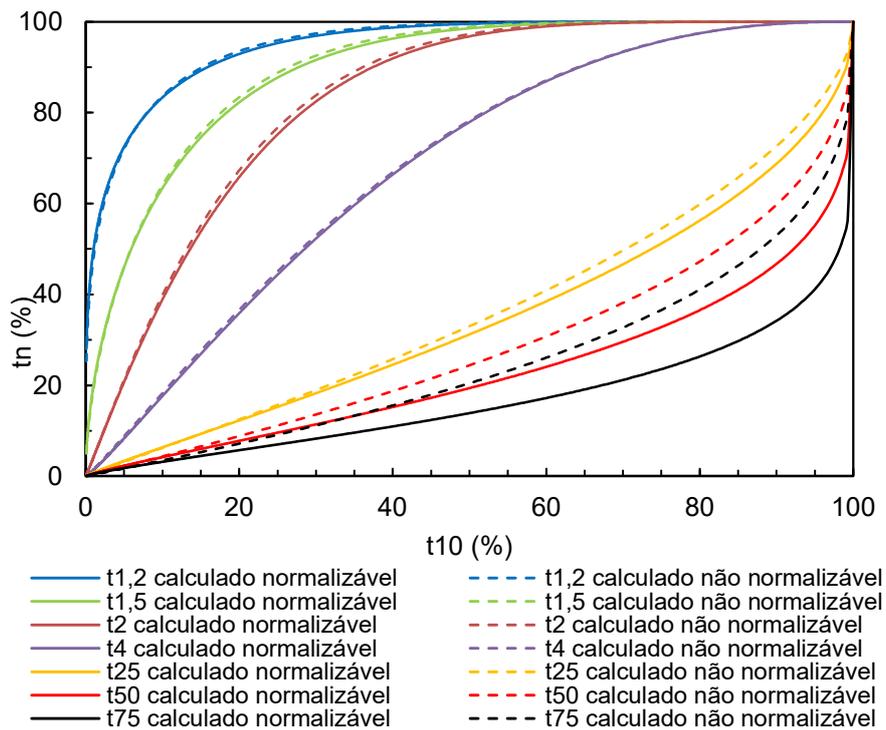


Figura 5.5 – Comparação das curvas $t_{10} - t_n$ para o caso normalizável (linhas cheias) com o caso não-normalizável (linhas pontilhadas) da rocha da Santa Luzia

Tabela 5.2 - Função quebra de partículas individuais usada na modelagem dos britadores para a rocha em estudo

Parâmetro de quebra t_{10} (%)	Tamanho relativo ao tamanho inicial (t_n)				
	t_{75}	t_{50}	t_{25}	t_4	t_2
10	3,48	4,35	6,26	18,29	39,88
20	7,18	8,83	12,49	36,61	67,28
30	11,18	13,59	18,95	52,96	83,78

Tabela 5.3 - Valores de E_{cs} (kWh/t) para diferentes t_{10} na quebra de partículas individuais, usados na modelagem dos britadores para a rocha em estudo

Parâmetro de quebra t_{10} (%)	Tamanho de partícula inicial (mm)		
	14,53	20,63	28,66
10	0,15	0,15	0,15
20	0,32	0,32	0,32
30	0,53	0,53	0,53

5.2. Resultados das amostragens

A usina pode ser dividida em dois estágios de britagem: britagem primária e rebritagem. A britagem primária é realizada por meio de um britador do tipo mandíbulas, gerando os produtos de bica corrida, rachinha e material para alimentar o estágio de rebritagem. A rebritagem engloba a britagem secundária (britador giratório), terciária (britador cônico) e quaternária (britador cônico e de impacto vertical), gerando os produtos brita 2, brita 1, brita 0, brita 00 e pó de pedra através de três jogos de peneiras. A Tabela 5.4 apresenta algumas características dos britadores, bem como os respectivos padrões de operação.

Tabela 5.4 - Dados dos britadores que compõem a rebitagem

Britador	Modelo	Tipo	Potência nominal (kW)	APF típica (mm)
Secundário	S4000	Giratório	220	54
Terciário	HP300	Cônico	220	40
Quaternário	HP200	Cônico	150	20
	B7150SE	VSI	300	-

As amostragens ocorreram sempre na área da rebitagem da usina e uma grande quantidade de amostras foi coletada, totalizando aproximadamente 20 toneladas de material. Os dados obtidos por meio das análises granulométricas a partir das amostragens e de suas réplicas mostraram-se coerentes e compatíveis com os ensaios conduzidos, evidenciando a diferença de granulometria entre os produtos com diferentes aberturas. A Figura 5.6 apresenta as curvas granulométricas dos produtos gerados a partir do circuito de rebitagem da Mineração Santa Luzia.

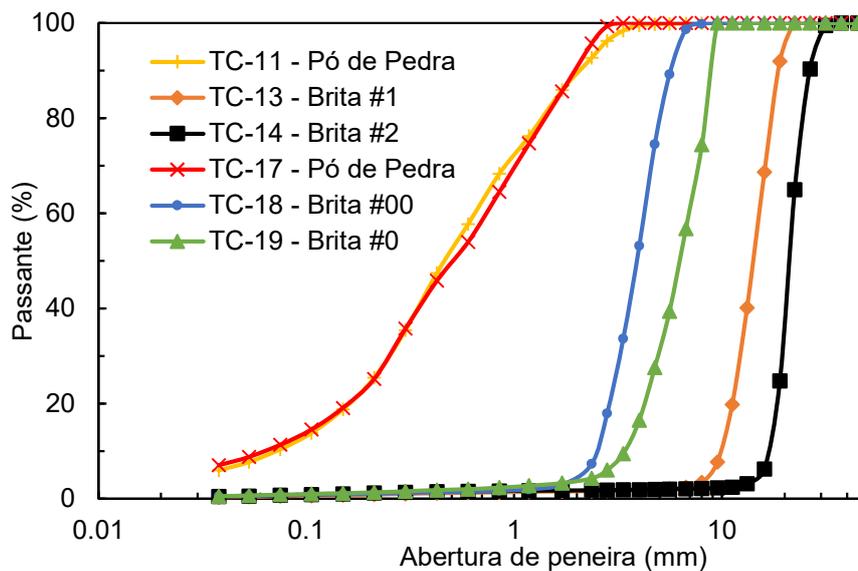


Figura 5.6 - Produtos do circuito de rebitagem da Santa Luzia obtidos durante amostragem

A Tabela 5.5 apresenta os dados brutos resumidos dos produtos. A partir da massa total de material retirado dos transportadores de correias e de seu comprimento total amostrado, obtém-se a quantidade de massa por cada metro de correia. Ao se multiplicar este valor pela velocidade de funcionamento do transportador de correia, é possível obter-se a vazão de operação.

Tabela 5.5 - Dados dos produtos coletados na primeira amostragem

Transportador de Correia	Massa total (kg)	Metragem (m)	Massa por metro	Velocidade Medida (m/s)	Vazão Medida (kg/s)	Vazão Medida (t/h)
TC-02	385,0	5	77,0	2,0	152,5	548,9
TC-03	785,9	5	157,2	1,9	295,5	1063,7
TC-04	231,7	5	46,3	1,8	83,4	300,3
TC-05	167,3	5	33,5	2,1	71,3	256,5
TC-07	171,8	5	34,4	2,0	69,7	251,1
TC-08	174,0	5	34,8	2,6	91,9	330,7
TC-10	274,5	5	54,9	2,2	121,9	438,7
TC-11	106,2	5	21,2	2,0	42,7	153,7
TC-13	106,2	5	21,2	1,7	35,9	129,2
TC-14	84,4	5	16,9	1,4	23,5	84,4
TC-16	53,1	5	10,6	2,2	22,8	82,2
TC-17	10,6	5	2,1	1,2	2,6	9,3
TC-18	7,6	5	1,5	2,0	3,1	11,0
TC-19	53,4	5	10,7	1,6	16,5	59,5

É possível perceber, em relação aos fluxos amostrados nos transportadores de correias, que a amostragem ocorreu de forma coerente. Uma simples comparação entre os valores de massa amostrados corrobora para demonstrar a veracidade dos dados, conforme os dados apresentados na Tabela 5.6. As pequenas variações nas vazões medidas não são significativas, sendo inerentes ao processo de britagem, classificação e coleta de amostras.

Tabela 5.6 – Comparação entre vazões de alimentação e produtos amostrados

	Transportadores de correias	Vazão medida (t/h)
Vazões britadores	TC-02/TC-05/TC-08	1136,1
	TC-03	1063,7
Vazões PV3 e PV4	TC-03	1063,7
	TC-04/TC-07/TC-10	990,1
Vazões PV5 e PV6	TC-10	438,7
	TC-11/TC-13/TC-14/TC-16	449,6
Vazões PV7	TC-16	82,2
	TC-17/TC-18/TC-19	79,9

5.2.1.1. Amostragem do britador secundário

Analisando-se as distribuições granulométricas obtidas a partir das amostragens para os britadores que compõe o circuito de rebitagem da Mineração Santa Luzia, onde o fluxo denominado “alimentação” corresponde à alimentação do conjunto peneira e britador secundário, é possível observar o impacto provocado pela alteração da abertura na posição fechada (APF) do britador. Na Figura 5.7 estão apresentados os resultados obtidos para o britador secundário. Nota-se que, conforme esperado, quanto menor a abertura, menor as dimensões de partícula no produto do britador. Durante o período das amostragens, o britador secundário se encontrava ajustado para a abertura de 54 mm, como é normalmente utilizado na usina. Para a maior abertura, nota-se uma influência nas faixas mais grossas do produto, enquanto as aberturas de 54 mm e 40 mm apresentam resultados próximos, embora a capacidade de produção seja superior para a abertura de 54 mm.

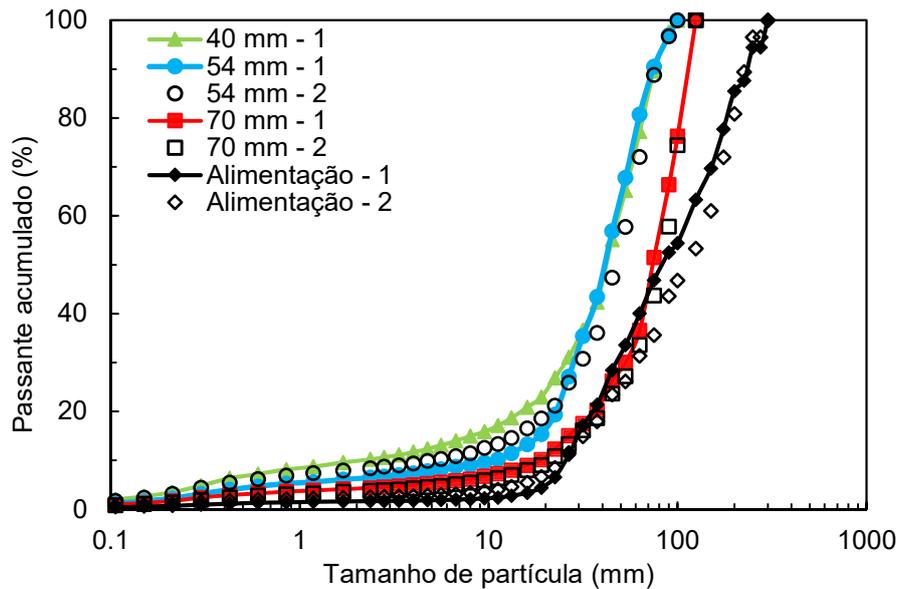


Figura 5.7 - Análise granulométrica dos fluxos em torno do britador secundário S4000

A análise da distribuição granulométrica dos produtos, em conjunto com o consumo energético, permite avaliar o desempenho do processo, gerando economia e maior produtividade. Adotou-se como referência a porcentagem de material gerado pelos britadores com dimensão de partícula inferior a 1,7 mm. A taxa de produção específica de um equipamento de cominuição pode ser definida como sendo a relação entre a quantidade de material produzido, cuja dimensão seja inferior ao tamanho adotado, em toneladas, e a energia específica utilizada no processo, em kWh.

Observando a taxa de produção específica para os diversos ensaios realizados com o britador secundário (Figura 5.8), é possível perceber que a abertura padrão de 54 mm produz uma maior quantidade de material para uma mesma energia específica quando comparada com a abertura de 40 mm. Por sua vez, ao se comparar a produção entre as aberturas de 54 e 70 mm, vê-se que a produção em t/kWh é exatamente a mesma. Entretanto, conforme expresso na Figura 5.7, não existe redução de tamanho para a abertura de 70 mm, ou seja, gasta-se muita energia para basicamente não britar o material.

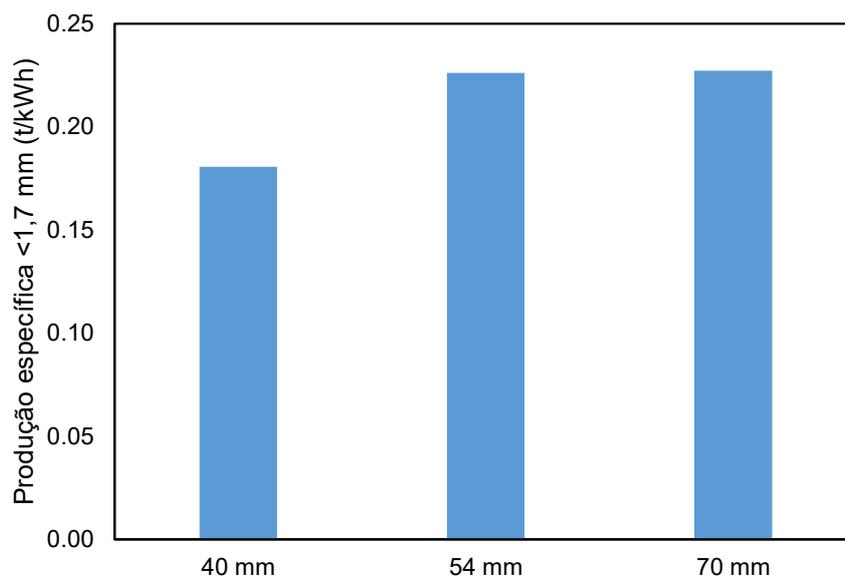


Figura 5.8 - Produção específica de material <1,7 mm (t/kWh) para britador secundário operando com diferentes aberturas de posição fechada

5.2.1.2. Amostragem do britador terciário

O britador terciário do circuito de rebitagem da Mineração Santa Luzia opera usualmente na abertura de 40 mm. Foram realizados ensaios com aberturas de 30 mm, 40 mm e 50 mm. As distribuições granulométricas obtidas, conforme Figura 5.9, indicam que o funcionamento do britador na atual condição de operação é ineficiente, resultando em uma elevada taxa de retorno de material. Todavia a abertura de 30 mm apresenta uma granulometria de produto adequada à britagem terciária da usina.

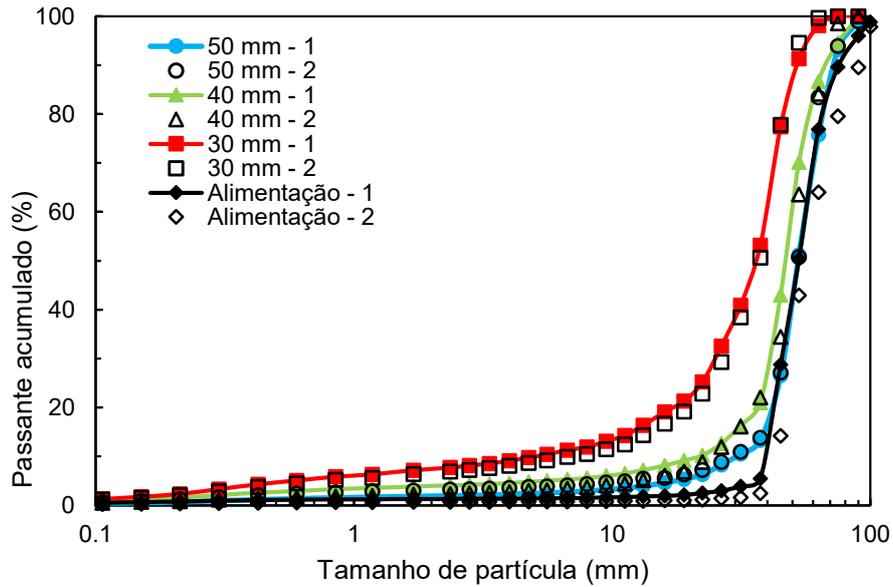


Figura 5.9 - Distribuições granulométricas dos fluxos das amostragens feitas com o britador terciário HP300 para diferentes aberturas de posição fechada

A ineficiência da utilização da abertura usual de 40 mm para o britador terciário pode ser verificada na Figura 5.10, onde é mostrada a relação entre a taxa de produção específica (t/kWh) e as diferentes aberturas utilizadas. É nítida a diferença entre os valores obtidos para a abertura de 30 mm e a abertura de 40 mm, onde a abertura usual tem uma taxa de produção consideravelmente inferior à taxa para uma APF de 30 mm. Isso pode evidenciar o fato do britador estar operando com câmara vazia nas maiores aberturas. O uso do britador terciário HP300 com uma menor abertura garante que o mesmo irá operar em uma condição otimizada, estando afogado, o que garante um melhor desempenho do mesmo. Essa condição não é alcançada quando do uso de aberturas maiores.

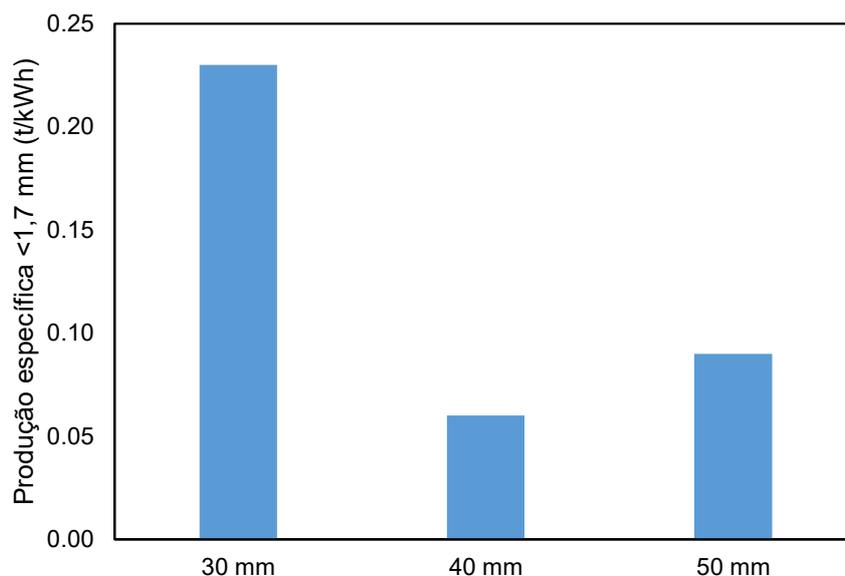


Figura 5.10 - Produção específica de material <1,7 mm (t/kWh) para britador terciário em função da abertura de posição fechada

A Figura 5.11 apresenta a relação entre a capacidade amostrada do britador, em t/h, com as diferentes aberturas possíveis, quando comparada com as curvas teóricas de capacidade fornecidas no manual do fabricante. Ao relacionarmos os dados obtidos nas amostragens com os limites estipulados pelo fabricante é possível ver que a abertura de 30 mm beneficia o processo, fazendo com que o britador opere na condição afogado, enquanto que ao utilizar abertura de 40 mm o britador apresenta, possivelmente, sua câmara vazia.

Sabe-se que as curvas de capacidade definidas pelo fabricante não levam em consideração as características intrínsecas do material, de forma que a capacidade apresentada não necessariamente corresponde à realidade para a rocha processada. Portanto, a capacidade máxima do britador HP300 foi ajustada utilizando informações do *software* Bruno, da Metso, que considera dados como o índice de abrasividade e britabilidade do minério, e possui uma vasta base de dados para gerar capacidades máximas condizentes com a realidade de cada minério. Nova amostragem foi feita apenas no britador HP300 para garantir que o mesmo se encontrava com o fluxo afogado.

A Figura 5.12 apresenta a relação entre os dados experimentais e os dados gerados pelo *software* Bruno, além de uma curva de capacidade simulada que descreve a relação entre a capacidade do britador HP300 em função da APF. A curva de capacidade simulada se encontra próxima tanto dos valores experimentais na condição

afogado quanto dos valores ajustados pelo Bruno, de forma a representar de maneira mais adequada a capacidade para este britador ao considerar-se a rocha utilizada.

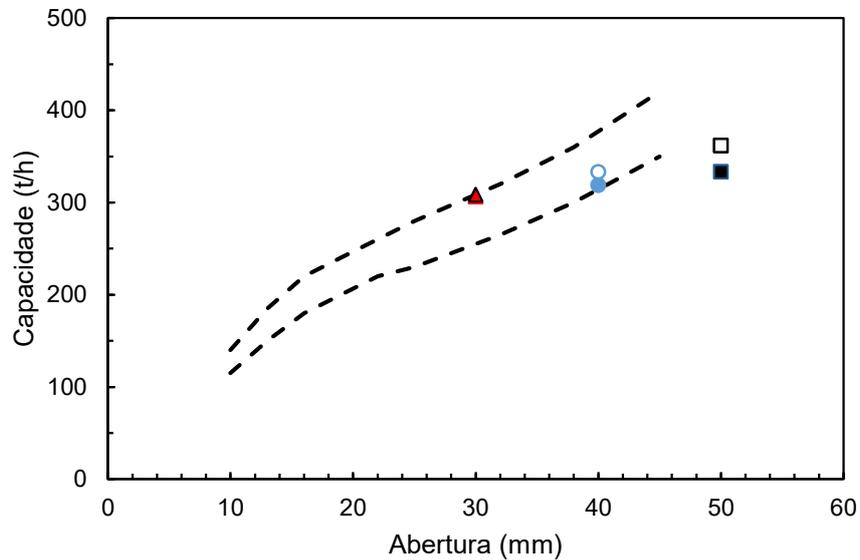


Figura 5.11 - Relação entre capacidade e abertura de posição fechada para o britador terciário, onde as linhas pontilhadas representem a capacidade teórica pelo manual e os pontos representam as vazões experimentais. Os pontos em vermelho (abertura de 30 mm) representam a operação do britador na condição afogado, enquanto os pontos em azul e verde (40 e 50 mm, respectivamente) exemplificam a operação do britador não afogado.

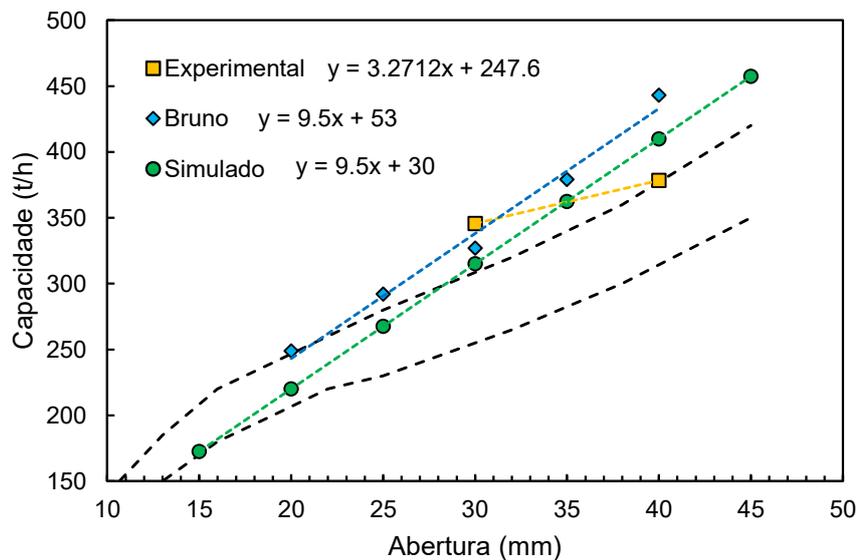


Figura 5.12 - Modelagem da capacidade máxima relativa ao britador HP300, onde os dados experimentais são os pontos em amarelo, os dados gerados pelo software Bruno os pontos em azul e a curva de capacidade simulada os pontos em verde.

5.2.1.3. Amostragem dos britadores quaternários

A usina de rebitagem da Mineração Santa Luzia opera com dois britadores quaternários em paralelo, um cônico e um britador VSI, ambos de fabricação da Metso. O britador cônico, em sua condição usual de trabalho, opera com a abertura de 20 mm. O excesso de alimentação deste britador é desviado para o britador VSI, que opera à frequência de rotor de 1650 rpm. Na Figura 5.13 é possível notar a variação na distribuição granulométrica do produto em relação à APF do britador cônico.

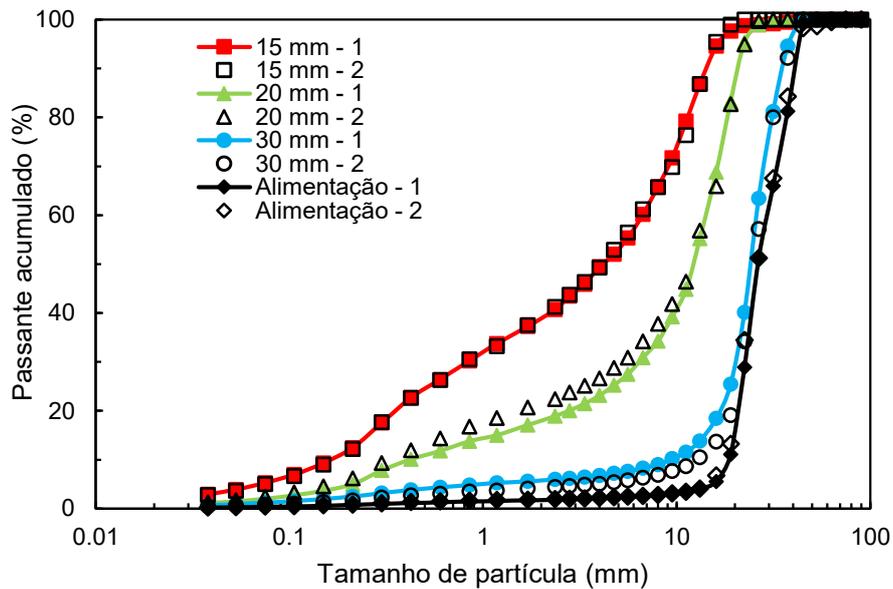


Figura 5.13 - Distribuições granulométricas das amostragens no entorno do britador quaternário HP200 em função da abertura de posição fechada

O britador quaternário HP200 foi o britador que apresentou melhor relação entre taxa de produção específica (t/kWh), abertura de posição fechada (mm) e granulometria dos produtos. Quanto menor a abertura utilizada, mais fino ficou o produto e maior foi a taxa de produção, ou seja, menor o consumo energético (Figura 5.14).

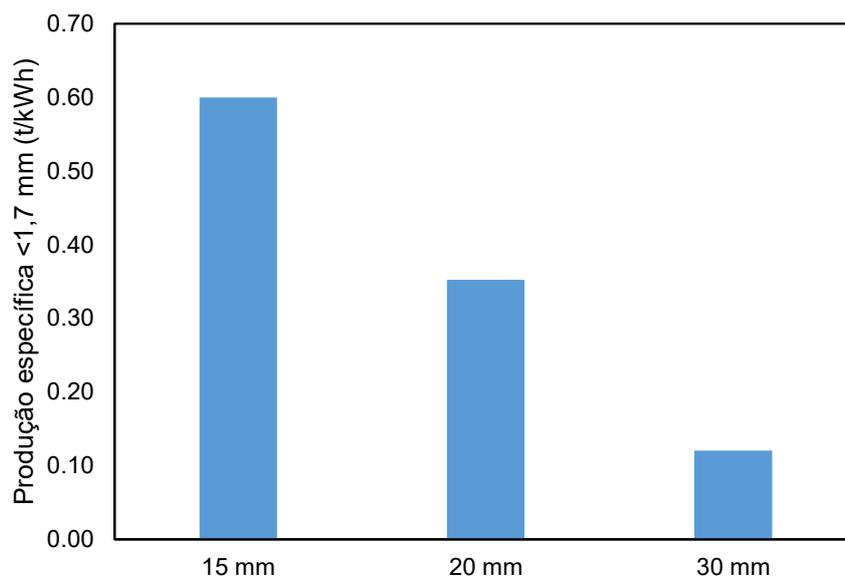


Figura 5.14 - Produção específica de material <1,7 mm (t/kWh) em função da abertura de posição fechada para o britador quaternário HP200

Seguindo o mesmo procedimento adotado para o britador terciário, a Figura 5.15 apresenta a relação entre a capacidade amostrada do britador HP200, em t/h, com as diferentes aberturas possíveis, quando comparada com as curvas nominais de capacidade fornecidas pelo manual do fabricante. O ajuste da capacidade máxima do HP200 foi também realizado com a ajuda do *software* Bruno. Nova amostragem foi feita apenas no britador HP200 com o objetivo de coletar dados adicionais de capacidade (t/h) sob condições nas quais a operação se encontrava com câmara cheia.

A Figura 5.16 apresenta a relação entre os dados experimentais com os dados gerados pelo *software* Bruno (em azul) e com a curva de capacidade simulada que descreve a relação entre a capacidade do britador HP200 em função de sua APF. Para este britador, os dados amostrados apresentam valores bem inferiores àqueles previstos pelo *software* Bruno. Como durante a coleta experimental destes dados foi possível observar, mesmo que de forma parcial, a câmara de britagem, leva-se a crer que para o HP200 os dados gerados pelo Bruno foram superestimados. Desta forma, a curva simulada para a relação entre a capacidade do HP200 com a APF foi escolhida como uma curva média entre aquela correspondente aos dados experimentais e a curva apresentada pelo *software* Bruno.

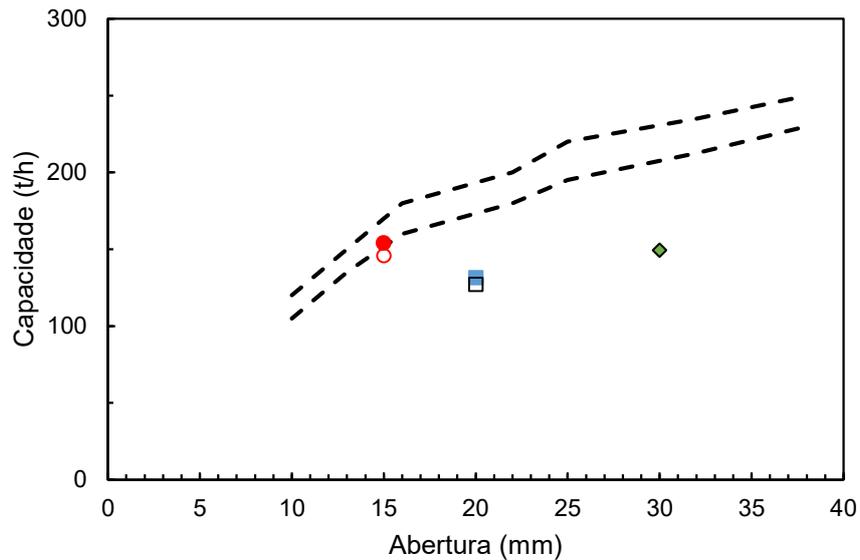


Figura 5.15 - Relação entre capacidade com abertura para o britador quaternário HP200 onde as linhas pontilhadas representam a capacidade teórica pelo manual e os pontos representam as vazões experimentais. Os pontos em vermelho (abertura de 15 mm) representam a operação do britador na condição afogado, enquanto os pontos em azul e verde (20 e 30 mm, respectivamente) exemplificam a operação do britador não afogado

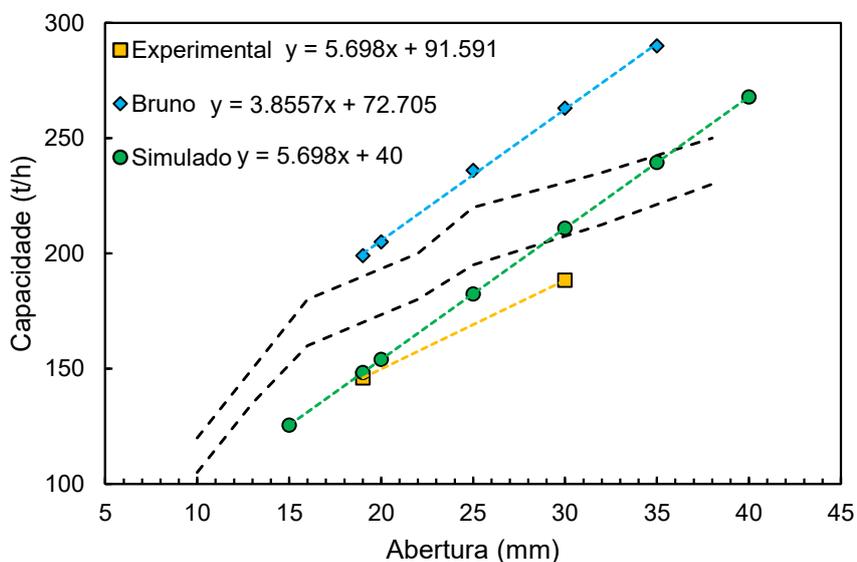


Figura 5.16 - Modelagem da capacidade máxima relativa ao britador HP200, onde os dados experimentais são os pontos em amarelo, os dados gerados pelo *software* Bruno os pontos em azul e a curva de capacidade simulada os pontos em verde. As linhas pontilhadas representam aquelas nominais do manual do fabricante

Devido à natureza do britador VSI, foi realizada uma série de ensaios visando compreender o funcionamento do equipamento variando-se a frequência do rotor e o

tipo de alimentação (brita 3 e 2 e somente brita 2). A Figura 5.17 apresenta os resultados do britador VSI para a granulometria de alimentação correspondente às britas 3 e 2, conforme utilizado usualmente na usina. no produto final. A Figura 5.18 apresenta os resultados para os ensaios com alimentação composta apenas por brita 2.

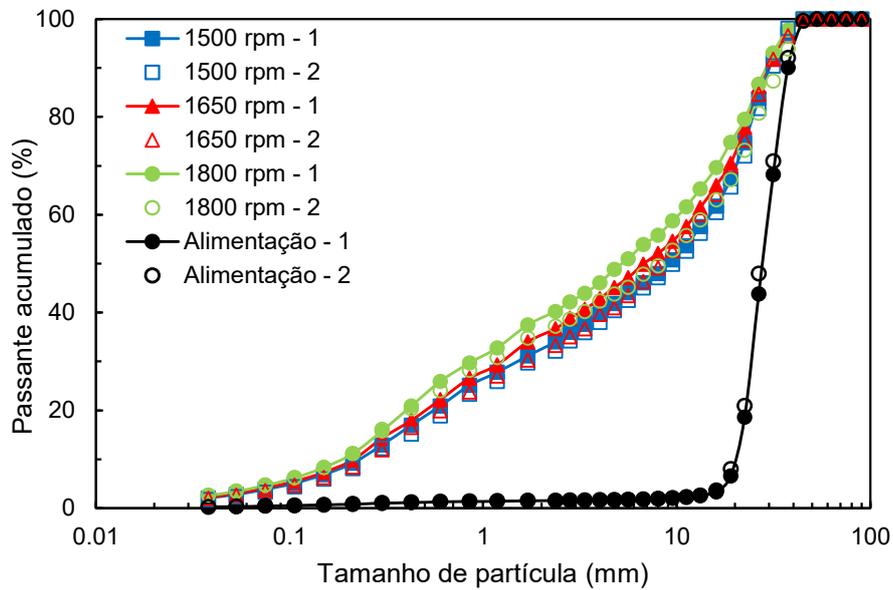


Figura 5.17 - Distribuições granulométricas das amostragens feitas com o britador quaternário VSI com alimentação de brita 3 e 2, operando em diferentes frequências

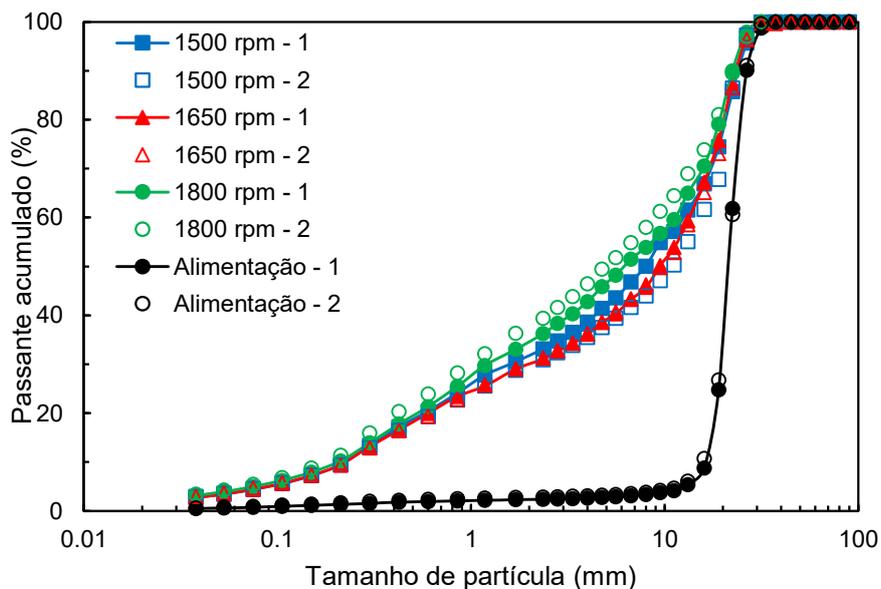


Figura 5.18 - Distribuições granulométricas das amostragens feitas com o britador quaternário VSI com alimentação de brita 2, operando em diferentes frequências

A produção específica (t/kWh) para as diversas granulometrias de alimentação e frequências se encontra apresentada na Figura 5.19. Nota-se, comparando as distribuições granulométricas, que não há diferenças entre os produtos gerados utilizando a frequência de 1500 e 1650 rpm. Entretanto a taxa de produção específica (t/kWh) é superior quando da utilização de frequência de 1500 rpm, indicando um melhor desempenho do britador VSI nessas condições, ou seja, um menor consumo energético. Para a alimentação de brita 2 observou-se o mesmo comportamento apresentado pela alimentação de brita 3 e 2, ou seja, quanto menor a frequência maior a taxa de produção específica.

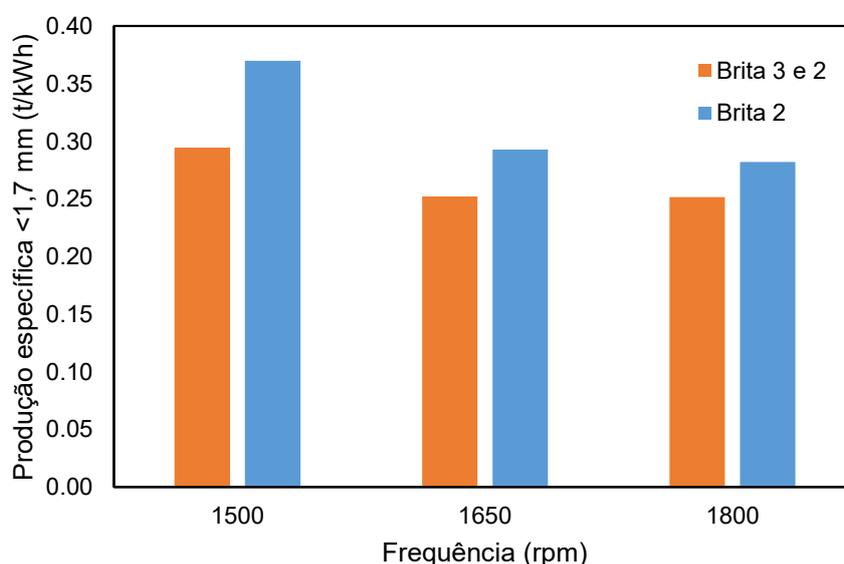


Figura 5.19 - Produção específica <1,7 mm (t/kWh) para britador quaternário VSI com diferentes alimentações e frequências de rotação

O *software* Bruno também foi utilizado para o britador VSI, na busca de estabelecer uma relação entre a capacidade e a frequência de operação. Na Figura 5.20 pode-se observar as diferentes curvas geradas pelo *software* que levam em consideração diferentes porcentagens de cascadeamento (de 0% a 35%), bem como os dados gerados pelas amostragens experimentais para as alimentações de brita 3 e 2 e brita 2. Os dados experimentais se encontram muito abaixo daqueles previstos pelo Bruno, porém é possível observar em ambos os casos a tendência da diminuição da capacidade com o aumento da frequência de operação. É possível ainda afirmar que durante os experimentos o VSI não apresentava cascadeamento. A introdução do

cascateamento irá influenciar significativamente a relação entre a capacidade de processamento e a razão de redução do britador.

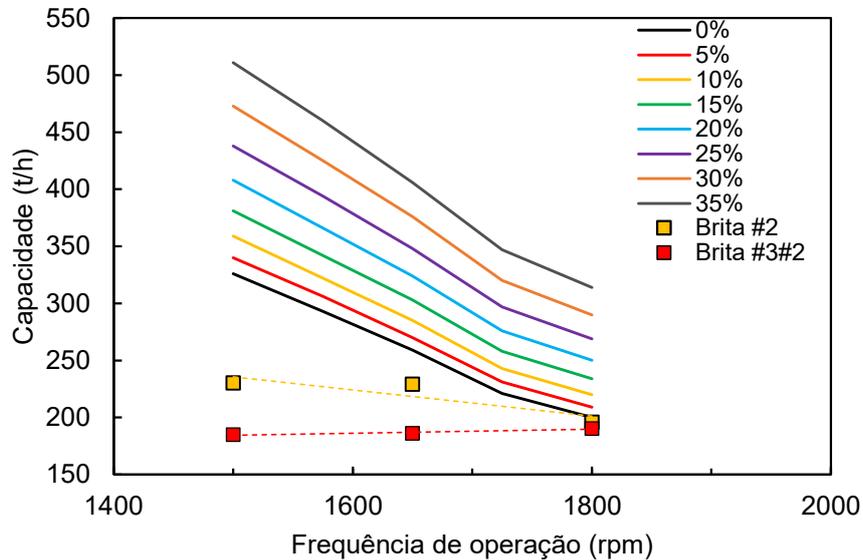


Figura 5.20 - Relação entre capacidade amostrada (pontos) e capacidade gerada pelo *software* Bruno (linhas sólidas) para diferentes porcentagens de cascateamento

Nas amostragens foram registrados os valores de potência em vazio e em operação dos equipamentos da usina. Uma síntese dos resultados de medida de potência dos equipamentos em operação e em vazio da usina é apresentada na Figura 5.21. Observa-se que a potência dos britadores em vazio é quase a metade do que em operação, enquanto que nas peneiras e nos transportadores de correia a diferença é consideravelmente maior, principalmente para as peneiras. Na Figura 5.22 são apresentadas as proporções de consumo energético dos equipamentos em operação, onde se torna evidente que os britadores são os maiores consumidores de energia da usina, sendo responsáveis por cerca de 60% do consumo de energia elétrica, sendo o britador VSI responsável por metade desse consumo. Vale ressaltar que os transportadores de correia também são responsáveis por uma parcela considerável da potência em operação da usina (aproximadamente 30%).

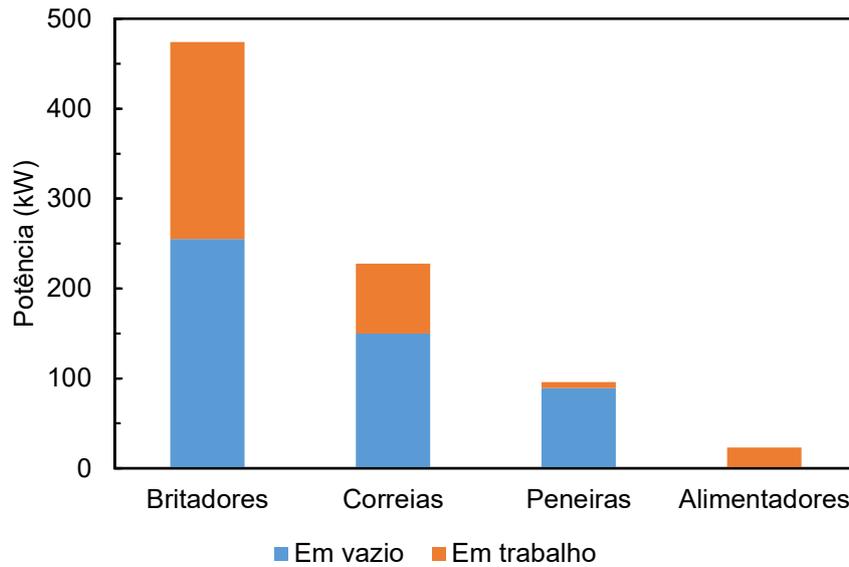


Figura 5.21 - Potência dos principais equipamentos da usina de rebitagem em trabalho e em vazio

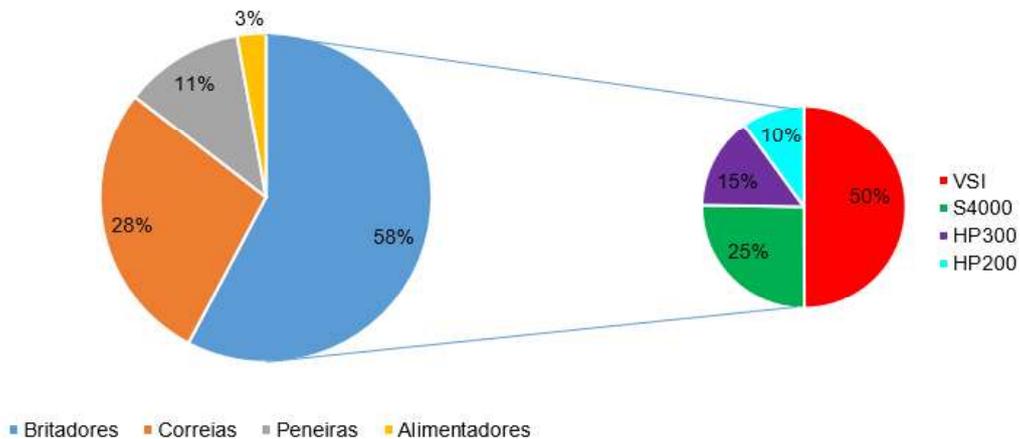


Figura 5.22 - Distribuição da potência em operação dos principais equipamentos da usina de rebitagem

5.3. Ajuste do balanço de massas

As informações obtidas experimentalmente a partir da amostragem forneceram subsídios suficientes para o ajuste do balanço de massas com a ajuda do módulo *Mass Balancing*, incorporado no *software JKSimMet®*.

Apesar de terem sido realizadas amostragens em toda a usina de rebitagem com diferentes objetivos, o balanço de massas foi realizado somente com os fluxos

relativos às peneiras PV-03/PV-04, PV-05/PV-06 e PV-07 (Figura 4.2), pois todos os britadores descarregam seus produtos em um mesmo transportador de correia (TC-03), dificultando a avaliação da contribuição de cada britador para o fluxo. Caso fosse ajustado o balanço de todos os fluxos não seria possível reconciliar o balanço de massas para o circuito completo.

Durante a amostragem foram realizadas réplicas das coletas de todos os fluxos amostrados, visando minimizar possíveis erros amostrais. Após uma avaliação preliminar da comparação da aparente validade dos resultados, adotou-se para a realização do balanço de massas a média aritmética das amostragens e suas respectivas réplicas. O balanço de massas da usina de rebitagem com as vazões experimentais e balanceadas é apresentado na Figura 5.23, enquanto os erros atribuídos a cada fluxo são resumidos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Ponderações e qualidade do ajuste do balanço de massa para o circuito de peneiras

Correias	Vazão experimental (t/h)	Vazão balanceada (t/h)	SD experimental (%)	SD experimental - granulometria	SSQ
TC-03	1138,5	1200,6	341,5	30	
TC-04	436,9	374,6	109,2	25	
TC-07	326,2	362,9	32,62	10	
TC-10	422,2	463,1	42,22	10	
TC-11	169,8	151,1	16,98	10	
TC-13	125,1	129,3	12,51	10	Modelo SD Whiten 31,68
TC-14	71,5	82,9	21,45	30	
TC-16	100,5	99,8	10,05	10	
TC-17	10,3	10,3	0,103	1	
TC-18	12,5	12,7	0,625	5	
TC-19	66,2	76,8	6,62	10	

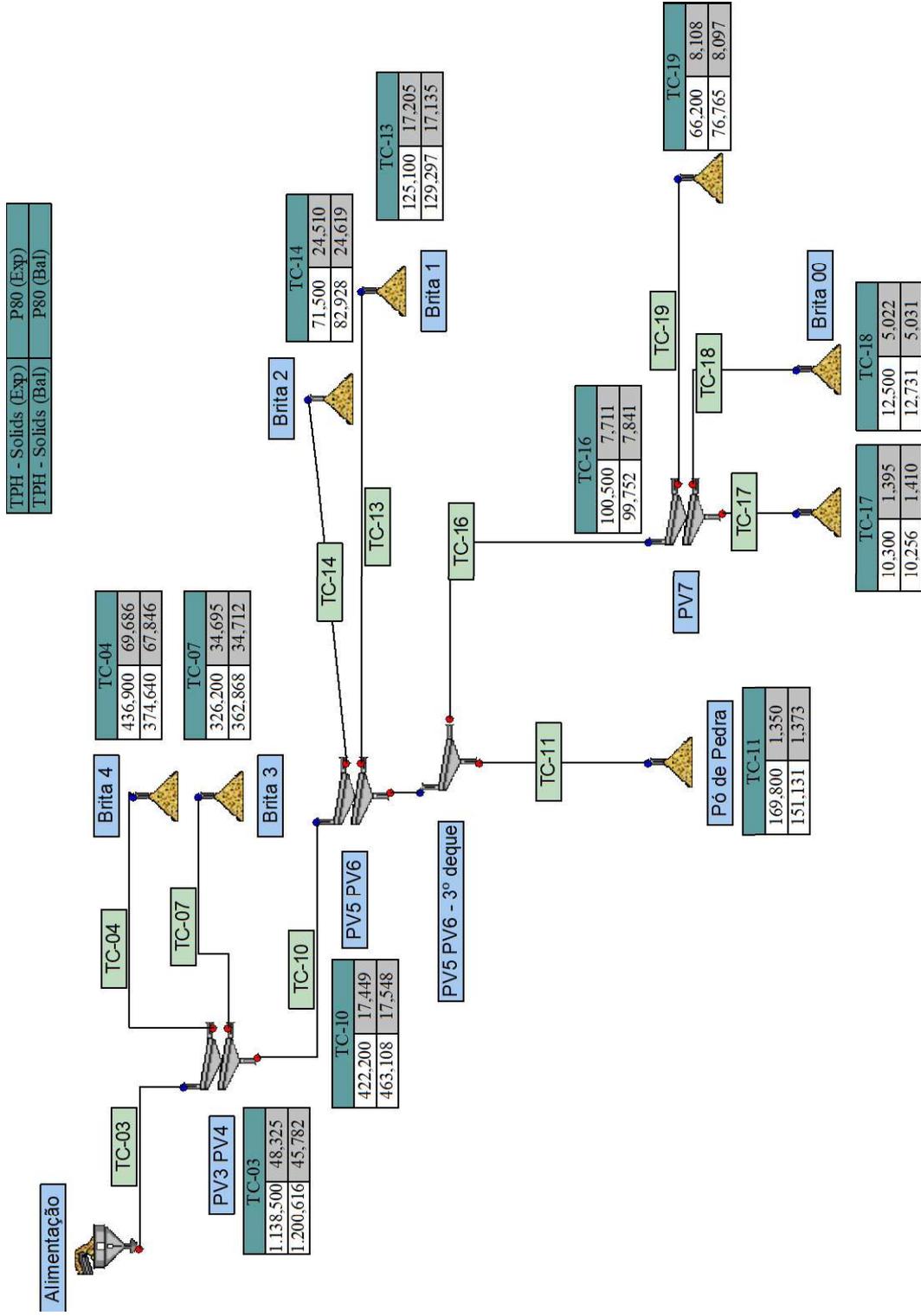


Figura 5.23 - Esquema do balanço de massas realizado nas peneiras

Após a realização do ajuste do balanço de massas, obtiveram-se as distribuições granulométricas balanceadas de cada fluxo. Comparando-as com os valores experimentais introduzidos no software *JKSimMet*[®] para a realização do balanço, é possível verificar se existem grandes discrepâncias entre os resultados experimentais e balanceados. A Figura 5.24, a Figura 5.25 e a Figura 5.26 apresentam as comparações das distribuições granulométricas experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) para cada um dos fluxos associados a cada conjunto de peneiras da usina de rebitagem da Mineração Santa Luzia. Nota-se que as distribuições granulométricas balanceadas encontram-se compatíveis com as obtidas experimentalmente.

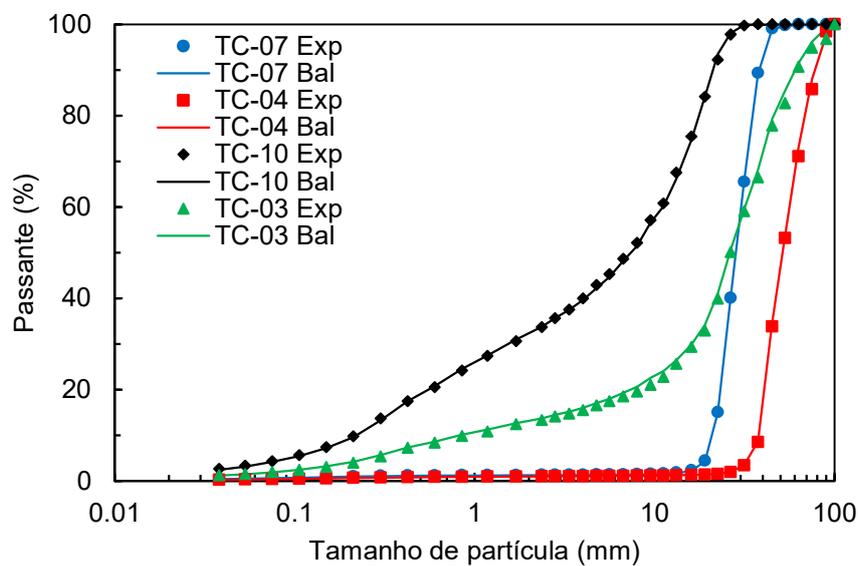


Figura 5.24 - Comparação dos fluxos experimentais (pontos) e balanceados (linhas) associados à PV3/PV4

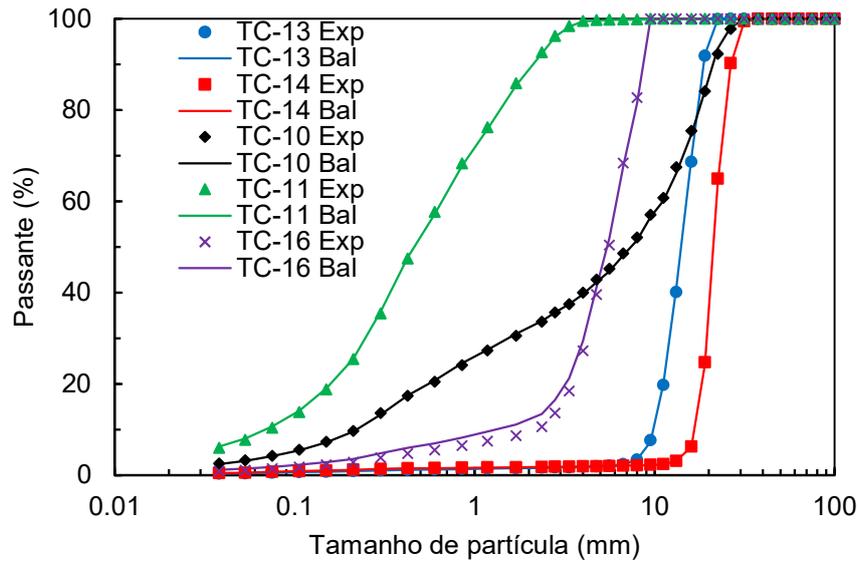


Figura 5.25 - Comparação dos fluxos experimentais (pontos) e balanceados (linhas) associados à PV5/PV6

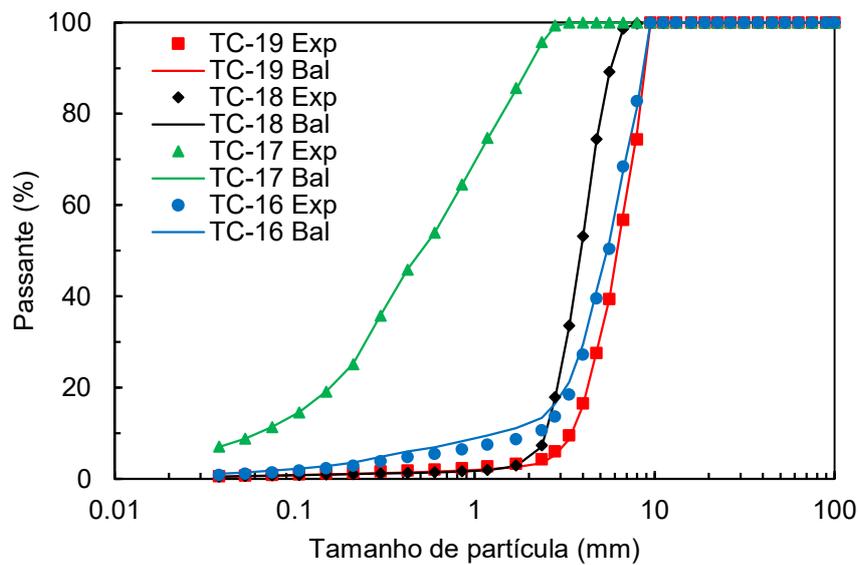


Figura 5.26 - Comparação dos fluxos experimentais (pontos) e balanceados (linhas) associados à PV7

A partir das informações reconciliadas foi possível estimar as curvas de partição dos conjuntos de peneiras, conforme a Figura 5.27, a Figura 5.28 e a Figura 5.29. É possível concluir, em conjunto com os valores apresentados na Tabela 5.7, que as peneiras PV3, PV4, PV5 e PV6 apresentam uma boa eficiência de classificação

(pouca inclinação da curva). Entretanto, a peneira PV7 não tem uma eficiência tão boa, principalmente em seu primeiro deque, com forte evidência de contaminação do produto grosso (brita 0) com partículas do material fino (pó-de-pedra).

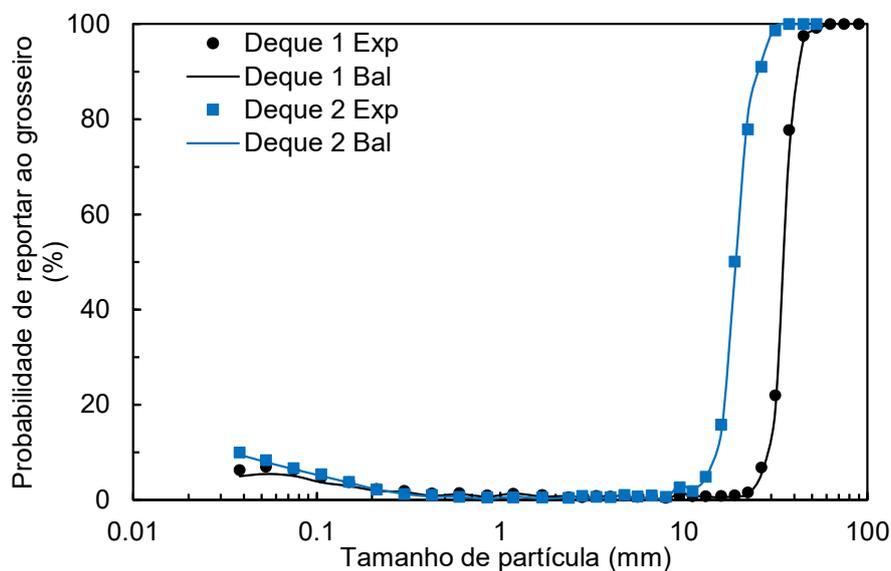


Figura 5.27 - Comparação entre as curvas de partição experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) associadas à PV3/PV4

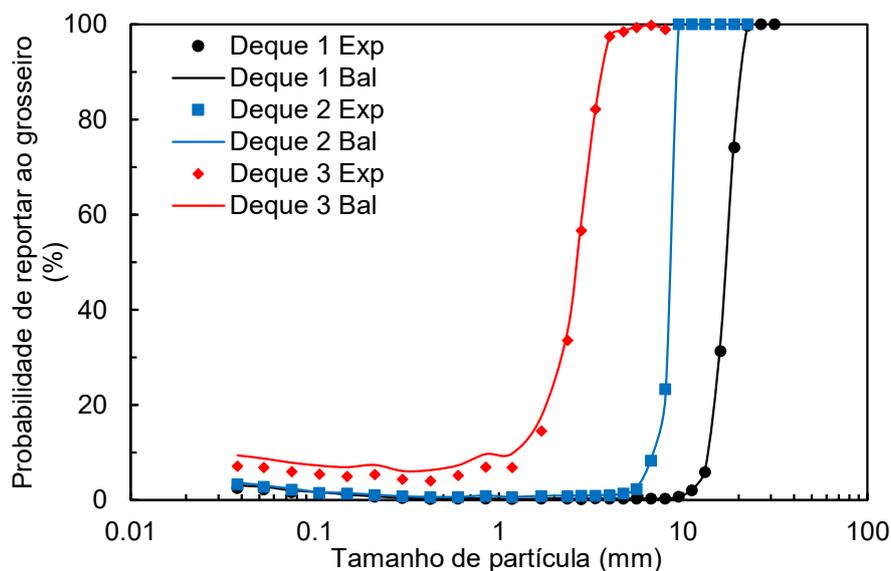


Figura 5.28 - Comparação entre as curvas de partição experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) associadas à PV5/PV6

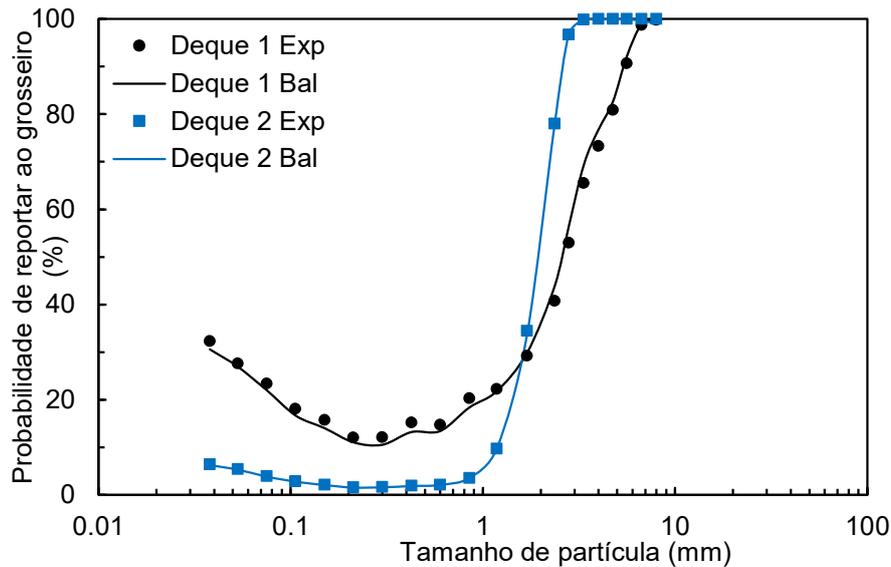


Figura 5.29 - Comparação entre as curvas de partição experimentais (pontos) e balanceadas (linhas) associadas à PV7

5.4. Modelagem matemática do circuito

Após a reconciliação dos fluxos presentes no circuito de rebitagem de agregados da usina através do balanço de massas, foi possível proceder com a calibração dos parâmetros necessários para serem usados nos modelos matemáticos, por meio do módulo *Model Fit* do simulador *JKSimMet*[®]. Estes parâmetros têm o objetivo de representar o comportamento dos equipamentos presentes no circuito, britadores e peneiras, em cada uma das seções do circuito e com as diferentes configurações possíveis.

Para os quatro britadores presentes na usina, o modelo adotado foi o modelo de Andersen-Awachie-Whiten e para as peneiras PV3, PV4, PV5, PV6 e PV7 foi adotado o modelo de Curva de Eficiência (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Devido à impossibilidade de acesso à corrente do *undersize* da PV8 foi proposta uma metodologia de modelagem em conjunto com o britador secundário, de forma a minimizar a limitação e obter-se uma representação adequada do comportamento do conjunto peneira-britador.

5.4.1. Modelagem das Peneiras PV-03/PV-04, PV-05/PV-06, PV-07

A calibração dos parâmetros para a modelagem das peneiras foi realizada utilizando os dados balanceados através do balanço de massas, ou seja, utilizando-se as vazões e distribuições granulométricas que melhor se ajustaram ao circuito. Desta

forma, foram obtido dois conjuntos de parâmetros, para cada deque de cada peneira, conforme mostra a Tabela 5.8. Observando os parâmetros ajustados, é possível perceber que as peneiras apresentam boa eficiência de classificação, representada pelo parâmetro *Alpha*, cujo valor encontra-se acima de 4 para quase todos os deques das peneiras. Por outro lado, as curvas de partição das peneiras, Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29, em conjunto com os parâmetros encontrados permite inferir que existe uma ineficiência no peneiramento principalmente no terceiro deque da PV-05/PV-06 e nos dois deques da PV-07, pois possuem um baixo valor para o parâmetro *Alpha*, onde um ajuste melhor de telas beneficiaria o circuito.

Tabela 5.8 - Parâmetros calibrados para o modelo das peneiras (equação (3.29))

	PV-03/PV-04		PV-05/PV-06			PV-07	
Parâmetro	Deque 1	Deque 2	Deque 1	Deque 2	Deque 3	Deque 1	Deque 2
Alpha	11,1	7,6	9,9	13,9	3,3	2,3	6,7
d50c (mm)	38,5	21,2	18,8	9,0	2,4	2,8	2,2
Error SDs	1,1	1,4	1,1	1,4	4,0	3,3	0,82

5.4.2. Modelagem do britador terciário HP300

Os dados utilizados para a modelagem do britador terciário HP300 dizem respeito a coletas específicas que foram dedicadas à exploração de seu funcionamento considerando a variação de parâmetros de operação. Assim, as informações operacionais coletadas de cada um dos britadores em conjunto com os resultados obtidos para a caracterização da quebra das partículas do minério forneceram subsídios para a calibração inicial de parâmetros no *JKSimMet*[®], a fim de obter uma estimativa inicial dos parâmetros do modelo de Andersen-Awachie-Whiten (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Foram consideradas duas diferentes APFs, sendo elas 20 e 30 mm, e utilizou-se a média dos dados (primeira coleta e sua réplica) gerados para cada uma destas aberturas. A modelagem dos parâmetros ocorreu para tamanhos maiores que 1,0 mm.

Primeiro, realizou-se o ajuste individual para cada uma das aberturas utilizadas (Figura 5.30). Na Tabela 5.9 são apresentados os valores encontrados para A_0 , B_0 , D_0 , bem como a potência simulada e a potência do pêndulo (DWT). A partir destes dados, realizou-se uma regressão linear múltipla em função da variável operacional APF (Figura 5.31), a fim de encontrar a melhor combinação de parâmetros do modelo que represente adequadamente o comportamento dos britadores, bem como a regressão

para encontrar o parâmetro G que descreve a equação para potência de britadores (Figura 5.32), em função da potência medida e da potência do pêndulo. Desta forma, as equações que modelam o britador HP300 foram:

$$K_1 = -45,392 + 4,2346 * APF$$

$$K_2 = -1,947 + 1,4333 * APF$$

$$K_3 = 2,3$$

$$t_{10} = 11,902 + 0,23 * APF$$

$$P_C = 0,4282 * P_P + P_n$$

sendo APF dada em mm.

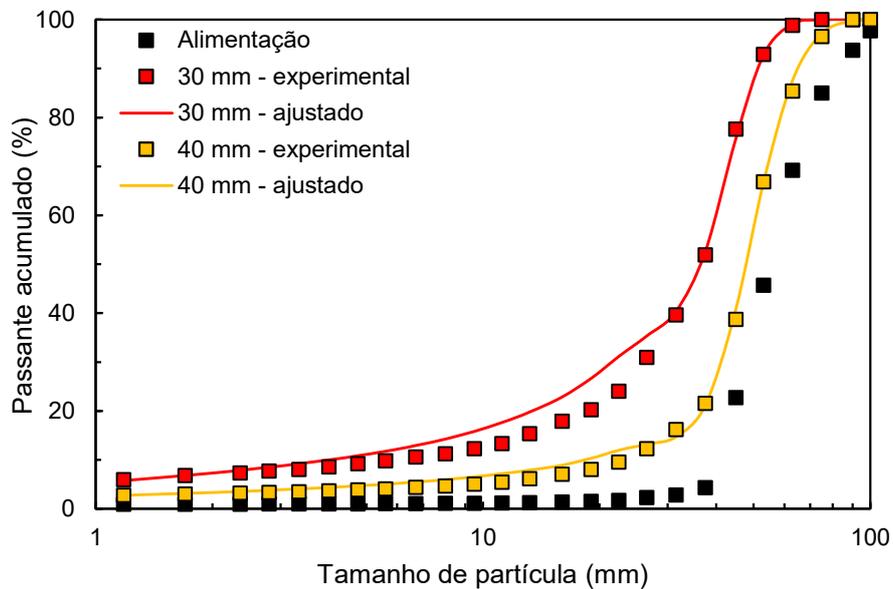


Figura 5.30 - Previsão (ajuste) da distribuição granulométrica do produto do britador terciário HP300 operando sob diferentes aberturas de posição fechada e comparação aos dados balanceados, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados

Tabela 5.9 - Parâmetros gerados a partir do ajuste individual para cada uma das aberturas do HP300

	APF (mm)	
	30	40
A₀	41,05	55,39
B₀	81,65	123,99
D₀	18,80	21,10
Potência simulada (kW)	132,1	92,0
Potência do pêndulo (kW)	24,6	55,5
Error Sd	2,64	2,04
Vazão (t/h)	307	326
Potência medida (kW)	84	70
Potência em vazio (kW)	60	60

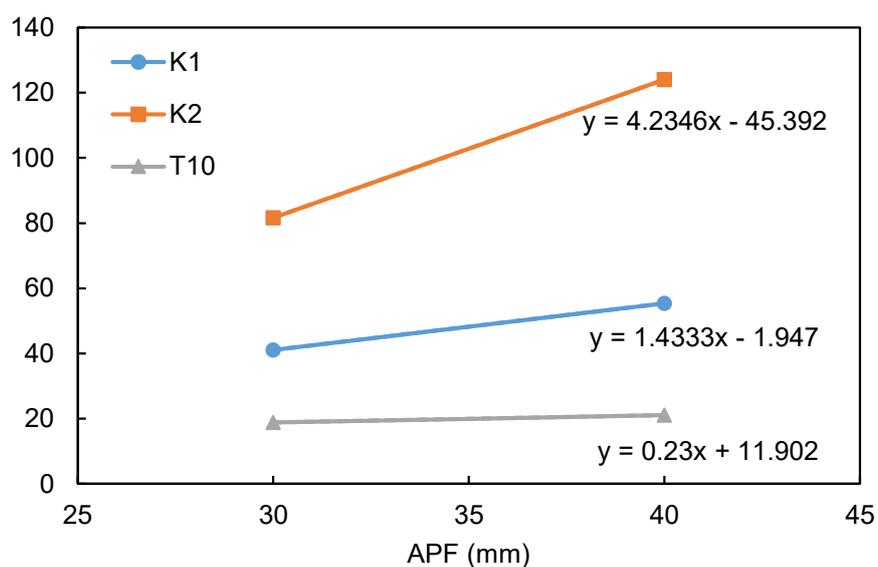


Figura 5.31 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de K1, K2 e t10 para o britador HP3000

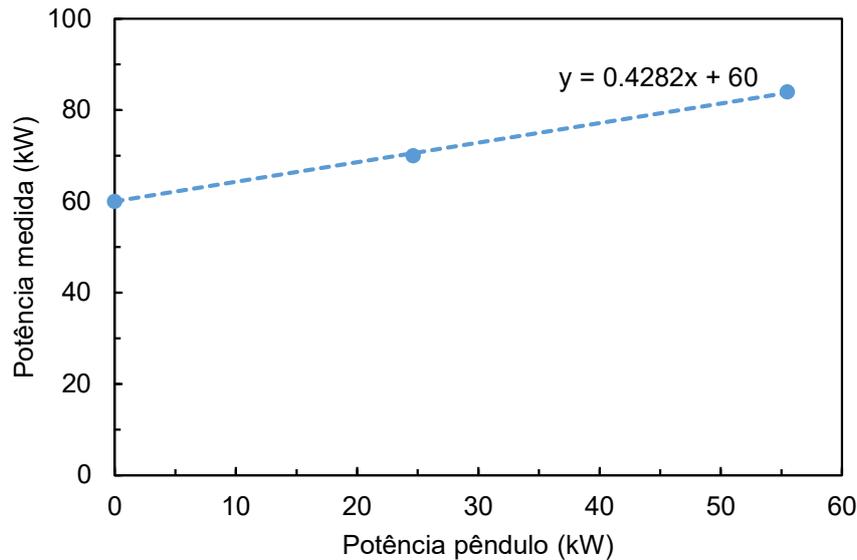


Figura 5.32 - Regressão linear para encontrar o parâmetro G que descreve a equação de potência para o britador HP300

5.4.3. Modelagem do britador quaternário HP200

O mesmo procedimento descrito para o britador HP300 foi utilizado para a modelagem no britador quaternário HP200. Na Figura 5.33 pode-se observar a comparação entre os dados experimentais e as curvas ajustadas individualmente para diferentes aberturas (para tamanhos maiores que 1,0 mm.) e, na Tabela 5.10, estão apresentados os valores encontrados para A_0 , B_0 , D_0 , bem como a potência simulada e a potência do pêndulo. A Figura 5.34 apresenta a regressão linear realizada para ajustar os parâmetros do modelo em função da APF, enquanto a Figura 5.35 mostra a regressão linear realizada para encontrar o parâmetro G que descreve a equação para potência de britadores em função da potência medida e da potência do pêndulo. Desta forma, as equações que modelam o britador HP300 são:

$$K_1 = -21,347 + 1,9138 * APF$$

$$K_2 = 13,722 + 0,9509 * APF$$

$$K_3 = 2,3$$

$$t_{10} = 14,086 + 0,1807 * APF$$

$$P_C = 1,2562 * P_P + P_n$$

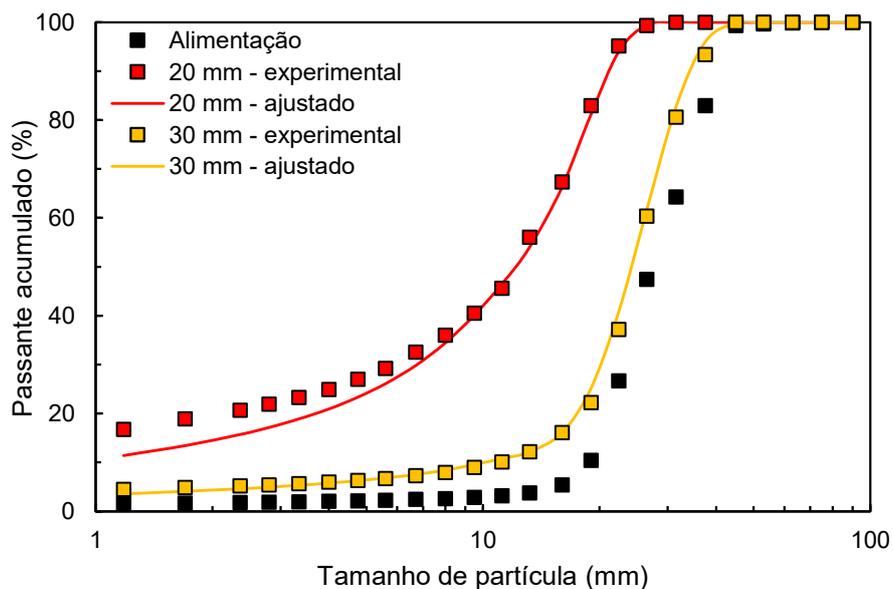


Figura 5.33 - Previsão (ajuste) da distribuição granulométrica do produto do britador quaternário HP200 operando sob diferentes aberturas de posição fechada, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados

Tabela 5.10 - Parâmetros gerados a partir do ajuste individual para cada uma das aberturas do HP200

	APF (mm)	
	20	30
A₀	16,93	36,07
B₀	32,74	42,25
D₀	17,70	19,51
Potência simulada (kW)	70,6	41,1
Potência do pêndulo (kW)	8,5	31,2
Error Sd	1,89	1,77
Vazão (t/h)	129,3	149,3
Potência medida (kW)	67,5	47,0
Potência em vazio (kW)	30,0	30,0

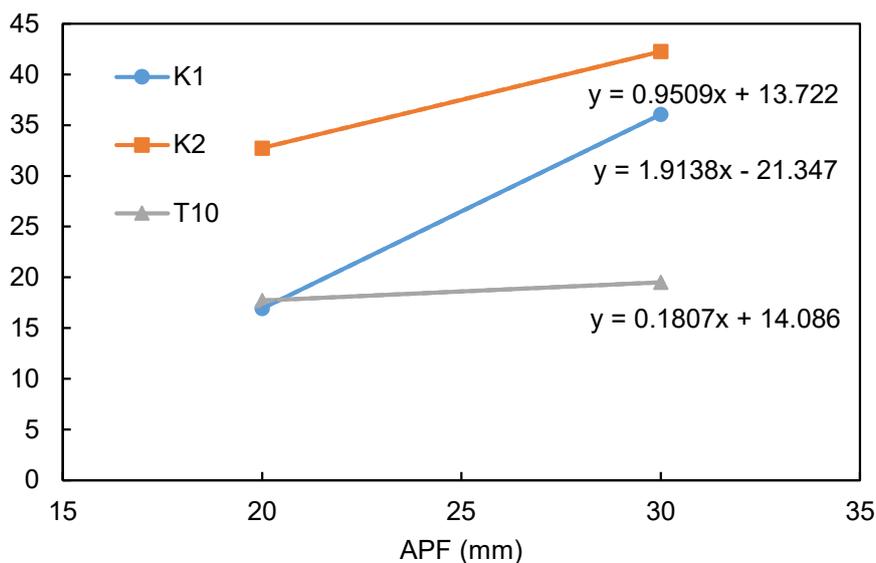


Figura 5.34 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de K1, K2 e t10 para o britador HP200

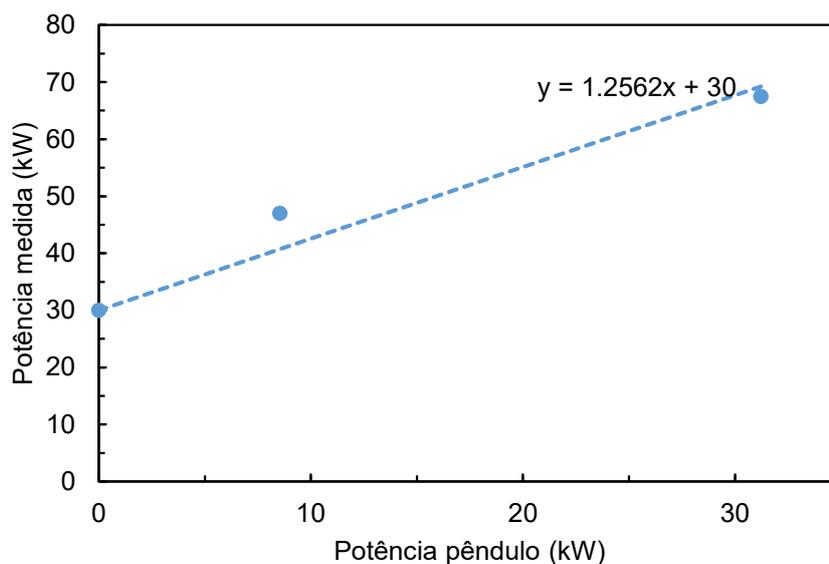


Figura 5.35 - Regressão linear para encontrar o parâmetro G que descreve a equação de potência para o britador HP200

5.4.4. Modelagem da Peneira PV-08 e do britador secundário S4000

Devido à dificuldade de coletar amostras do *undersize* da peneira PV-08 separadamente do produto do britador secundário S4000, não foi possível calibrar diretamente os parâmetros dos modelos para esses equipamentos a partir das informações obtidas experimentalmente. Neste caso, foi necessário adotar outra

metodologia que permitisse prever com um bom grau de confiabilidade o comportamento destes equipamentos dentro da operação.

A modelagem do britador secundário S4000 em conjunto com a peneira PV8 do circuito da Santa Luzia foi baseada em informações extraídas da base de dados do Laboratório de Tecnologia Mineral em relação a uma operação semelhante de produção de agregados, também localizada na região metropolitana do Rio de Janeiro, na qual o britador secundário opera da mesma forma que na Mineração Santa Luzia, ou seja, o produto grosso da peneira alimenta diretamente o britador, não existindo condições de amostrá-lo independentemente. O objetivo foi utilizar os parâmetros da peneira daquela operação para descrever o desempenho da peneira da Mineração Santa Luzia, buscando a correta modelagem do britador S4000.

Para que a metodologia acima citada fosse utilizada, inicialmente comparou-se as características de quebra das rochas alimentadas às duas usinas, tendo sido verificado que ambas apresentam comportamentos relativamente próximos em relação à *appearance function* (Figura 5.36), embora outras propriedades como o índice de trabalho de britagem, o índice de abrasão e o parâmetro A^*b sejam relativamente distintas. Mesmo assim, os dois materiais apresentam, de modo geral, baixa resistência ao impacto e baixa abrasividade, como é observado na Tabela 5.11.

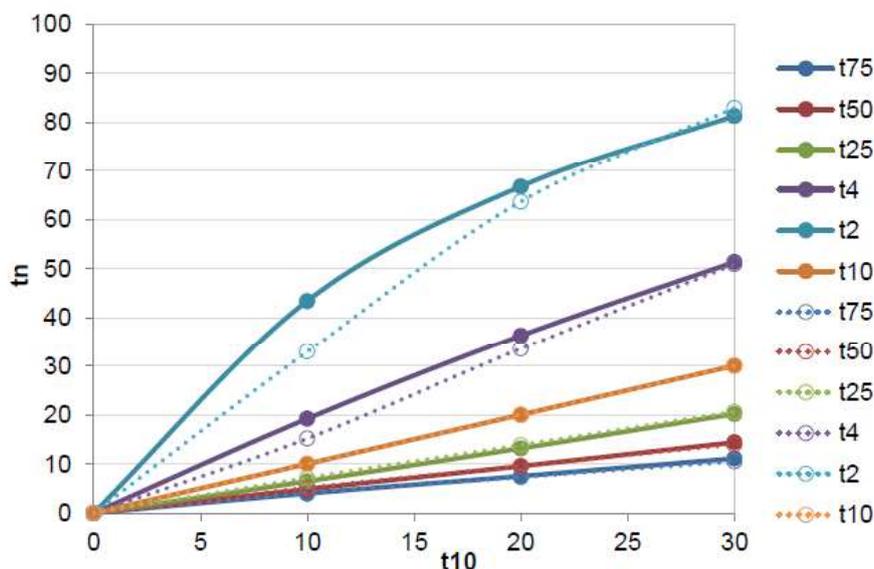


Figura 5.36 - Comparação da *appearance function* do material da Santa Luzia (linhas pontilhadas) em relação ao material da usina de referência (linhas contínuas)

Tabela 5.11 - Comparação das propriedades entre as rochas da Santa Luzia e da usina de referência

Operação	Wi (kWh/t)	Abrasão Los Angeles	A*b	Avaliação de resistência ao impacto
Santa Luzia	12,1	53,3	77,9	Baixa
Usina de referência	10,8	48,1	72,0	Baixa

Desta forma, os parâmetros do modelo da peneira PV8 foram *Alpha* igual a 3,4 e *d50c* igual a 93,7 mm. Assim, procedeu-se à calibração dos parâmetros do modelo de Andersen-Awachie-Whiten (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996) para o britador giratório S4000, considerando o efeito da APF, conforme Tabela 5.12, além de se ajustar também o parâmetro G da potência. Neste caso, os dados foram ajustados simultaneamente e foram utilizados os dados para as APFs de 40 e 70 mm, para tamanhos maiores que 1,0 mm. Os dados para 54 mm não foram considerados para o ajuste, pois o mesmo apresentava comportamento não condizente com as outras aberturas. A verificação dos parâmetros do modelo de regressão pode ser vista na Figura 5.37. Os resultados da simulação indicaram, em geral, boa previsibilidade em relação à granulometria do produto, dentro da faixa de condições operacionais testada. Desta forma, a utilização dos parâmetros da peneira da usina de referência não prejudicou a correta modelagem do britador giratório S4000 da Santa Luzia e a previsão do produto de acordo com a variação da APF. Desta forma, as equações que modelam o britador S4000 são:

$$K_1 = -16,365 + 2,02 * APF$$

$$K_2 = 84,177 + 0,7270 * APF$$

$$K_3 = 2,3$$

$$t_{10} = 14,73 - 0,071 * APF$$

$$P_C = 0,836 * P_P + P_n$$

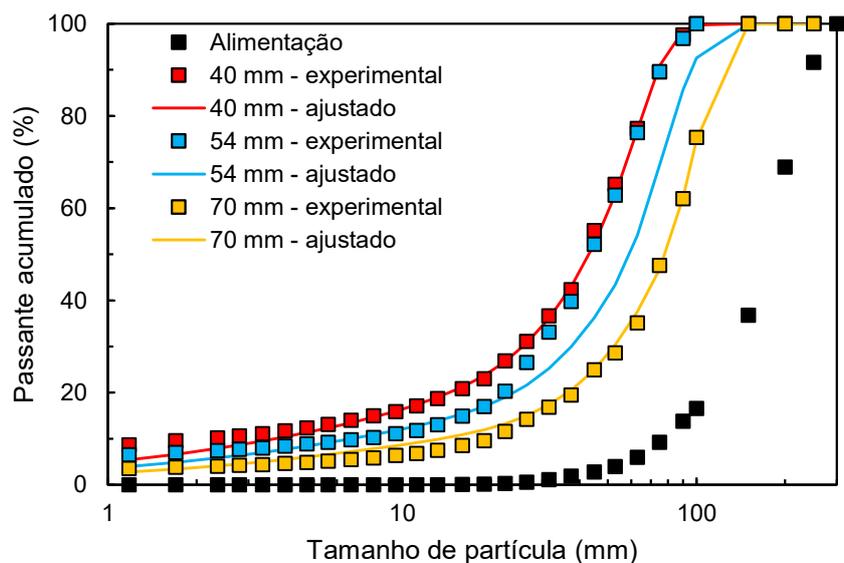


Figura 5.37 - Previsão (ajuste) da distribuição granulométrica do produto do britador secundário S4000 operando sob diferentes aberturas de posição fechada, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados

Tabela 5.12 - Ajuste dos coeficientes de regressão para o modelo do britador secundário

Variáveis principais do modelo	Coefficientes da regressão	Valor
K1	A ₀	-16,37
	A ₁	2,02
K2	B ₀	84,18
	B ₁	0,727
K3	C ₀	2,3
T10	D ₀	14,73
	D ₁	0,836
P _c	G	0,836
Error SDs		2,19

5.4.5. Modelagem do britador VSI

A modelagem do britador de impacto vertical (VSI) seguiu as orientações descritas no trabalho publicado por SEGURA-SALAZAR *et al.* (2017). No artigo, o modelo proposto para o VSI considera algumas modificações nas equações propostas por NAPIER-MUNN *et al.*, (1996), nas quais o parâmetro K1 é definido como sendo igual a 0, de forma que todas as partículas tenham chance de quebrar e o parâmetro K2 é definido como o *top size* do produto de britagem. Os parâmetros K3 e t10 são considerados, neste caso, como parâmetros de ajuste, em função da frequência de operação. O parâmetro G para a potência também foi ajustado.

Para o britador quaternário VSI faziam-se disponíveis dados experimentais considerando duas diferentes alimentações, brita 3 e 2 e somente brita 2. Para a primeira alimentação foram utilizadas três diferentes frequências: 1500, 1650 e 1800 rpm, enquanto que para a alimentação de brita 2 utilizou-se as frequências de 1500 e 1800 rpm. Primeiro realizou-se o ajuste individual para cada uma das frequências e alimentações utilizadas, sendo o valor de K2 para a alimentação de brita 3 e 2 igual a 37,5 e, para a alimentação de brita 2 igual a 31,5. A previsão da distribuição granulométrica para a alimentação de brita 3 e 2 encontra-se na Figura 5.38 e para a alimentação de brita 2 na Figura 5.39. Os valores para os parâmetros encontram-se na Tabela 5.13.

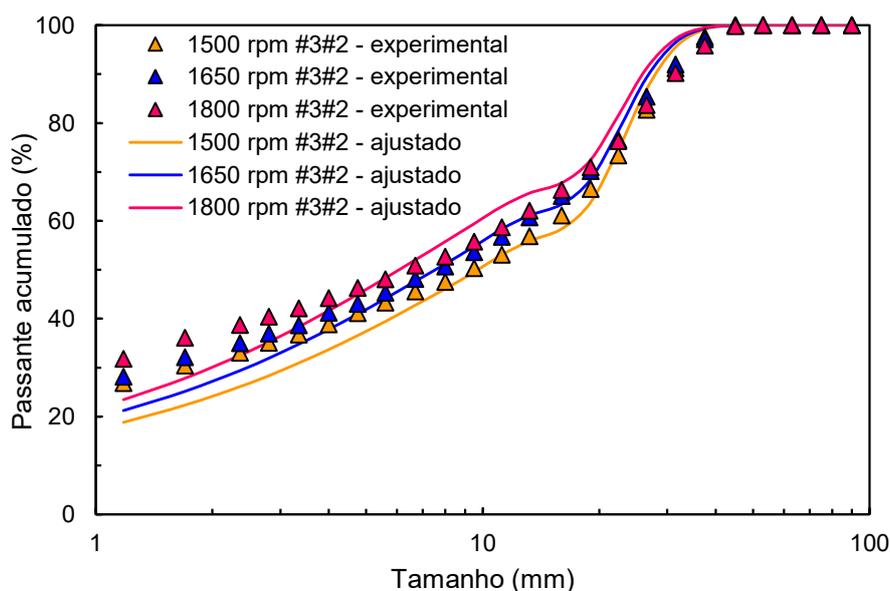


Figura 5.38 - Previsão da distribuição granulométrica do produto do britador quaternário VSI com alimentação de brita 3 e 2 operando sob diferentes frequências, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados

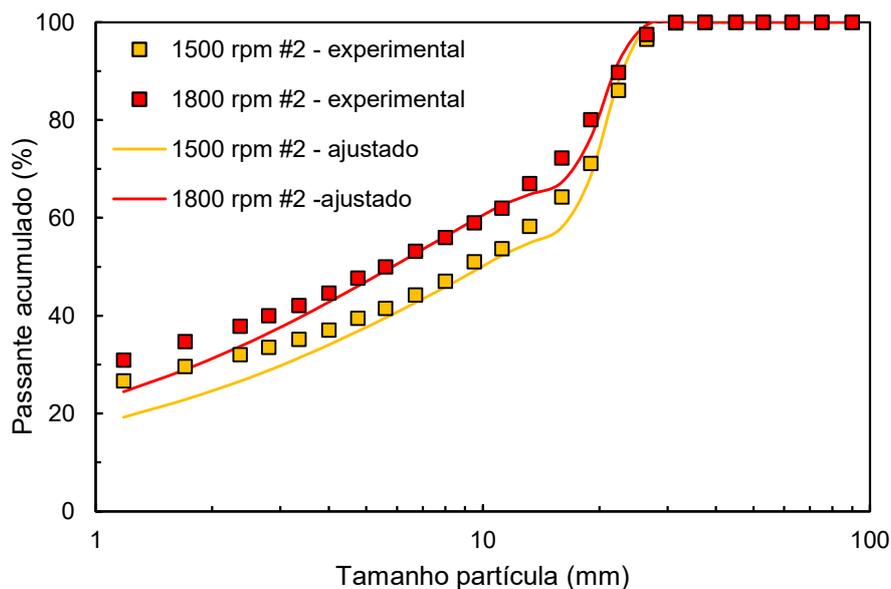


Figura 5.39 - Previsão da distribuição granulométrica do produto do britador quaternário VSI com alimentação de brita 3 e 2 operando sob diferentes frequências, onde os pontos correspondem aos dados experimentais (reconciliados) e as linhas aos dados ajustados

Tabela 5.13 - Ajuste individual dos coeficientes de regressão para o modelo do britador VSI

Alimentação	Brita 3 e 2			Brita 2	
	1500	1650	1800	1500	1800
Frequência (rpm)					
K2 (A₀)		37,5		31,5	
K3	0,55	0,67	0,72	0,61	0,88
t₁₀ (D₀)	40,7	39,6	41,9	37,3	39,6
Potência simulada (kW)	199,0	202,6	207,6	201,0	219,0
Potência do pêndulo (kW)	87,7	90,5	94,3	89,2	103,1
Error Sd	2,93	2,95	3,94	2,91	2,71
Vazão (t/h)	184,9	176,1	167,0	230,4	196,2
Potência medida (kW)	181,3	193,6	218,5	169,8	225,9
Potência em vazio (kW)			29,4		

Após a modelagem individual, procedeu-se com a modelagem conjunta, através de regressão linear, com o objetivo de gerar uma equação única para os parâmetros K3 (Figura 5.40) e t₁₀ (Figura 5.41) que funcionassem para as diversas alimentações e frequências. Desta forma, obteve-se a média dos valores obtidos individualmente. Para o parâmetro G da potência o mesmo procedimento foi adotado ao utilizar-se a média

dos valores encontrados para cada umas das alimentações (Figura 5.42). As equações para o britador VSI são:

$$K_1 = 0$$

$$K_2 = 37,5 \text{ (alimentação brita 3 e 2) ou } 31,5 \text{ (alimentação brita 2)}$$

$$K_3 = 0,0007 * \text{frequência} - 0,76$$

$$t_{10} = 0,0058 * \text{frequência} + 30,157$$

$$P_C = 1,8103 * P_P + P_n$$

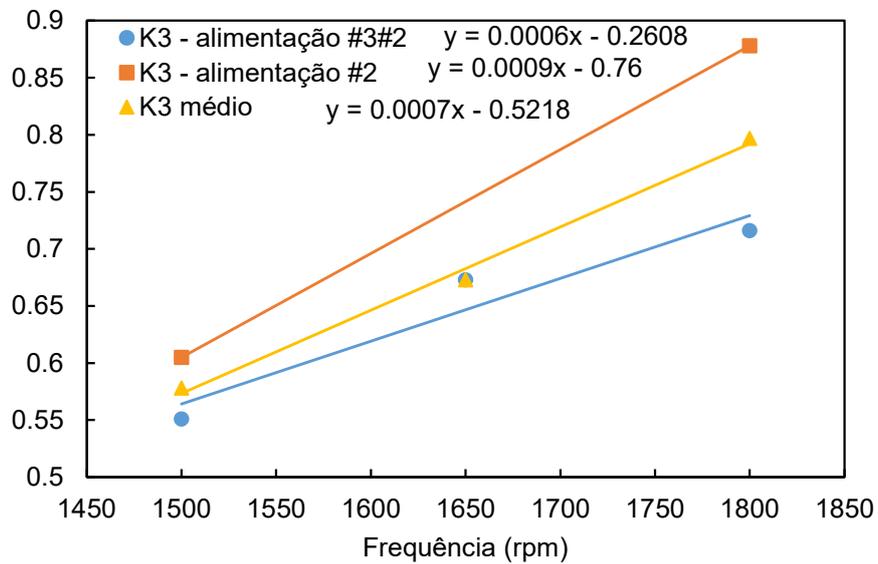


Figura 5.40 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de K3 para o britador VSI

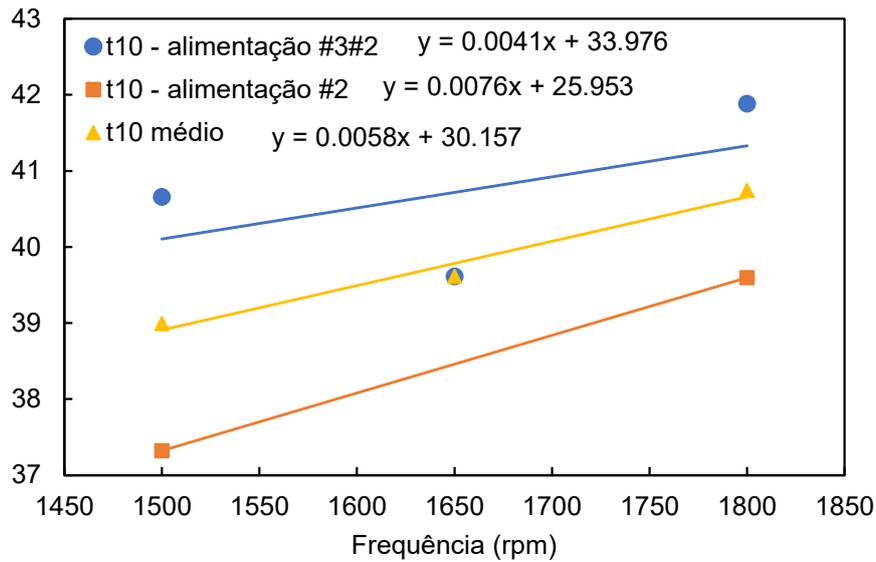


Figura 5.41 - Regressão linear para encontrar os coeficientes de regressão de t_{10} para o britador VSI

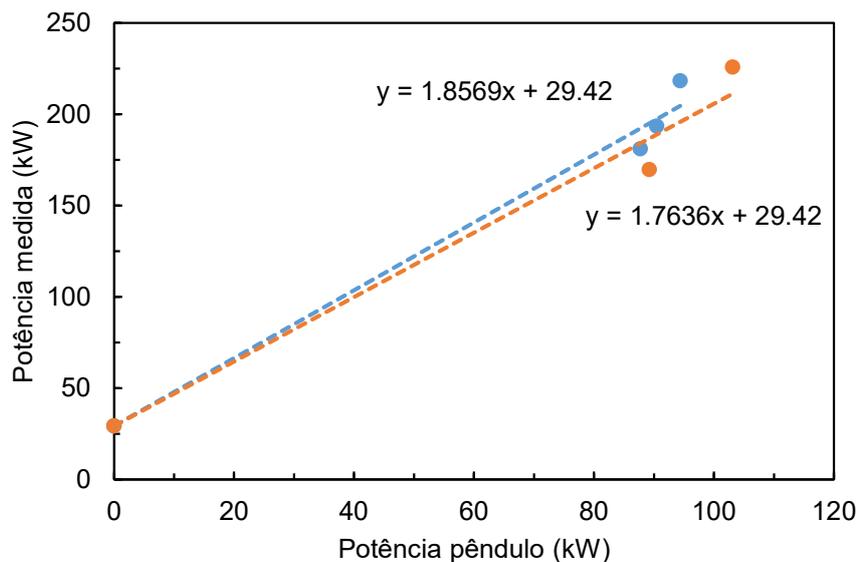


Figura 5.42 - Regressão linear para estimação do parâmetro G que descreve a equação de potência para o britador VSI

5.5. Validação dos modelos de quebra no Matlab-Simulink

As duas variantes de modelos de britagem implementadas na plataforma Matlab-Simulink foram validadas a partir dos dados experimentais obtidos em amostragem, e foram comparados aos dados simulados pelo JKSIMMET®. O primeiro modelo de quebra considera a função quebra como sendo normalizada, enquanto o segundo considera a

função quebra como sendo não-normalizável a partir de um certo tamanho mínimo de partícula. A validação foi feita para todos os britadores em todas as condições operacionais testadas (Figura 5.43 para o britador S4000, Figura 5.44 para o britador HP300, Figura 5.45 para o britador HP200, Figura 5.46 para o britador VSI com alimentação de brita 3 e 2 e Figura 5.47 para o britador VSI com alimentação 2) e estão apresentados no formato log-log para que seja possível analisar com maior precisão de detalhes as diferentes faixas granulométricas. A Tabela 5.14 resume os parâmetros utilizados para a correção da função quebra de forma que ela fique em sua forma não normalizada. A escolha dos parâmetros utilizados para o modelo de quebra não normalizável se deu de forma manual para que o melhor ajuste fosse encontrado para cada um dos casos.

É possível observar que os modelos implementados se ajustam bem aos dados experimentais. A previsão de distribuição granulométrica considerando a função quebra normalizável não é capaz de prever a distribuição correta dos finos, de forma a sobrestimar a proporção de material presente nesta faixa. O uso da correção da função quebra para que a mesma se encontre na forma não normalizável se mostra como ferramenta muito útil para caracterizar com o necessário nível de detalhe a distribuição granulométrica.

É importante observar que para que o ajuste dos finos ocorra da melhor forma, de maneira que os parâmetros d_{min} e n_3 variam de acordo com o britador e com a condição operacional. Além disso, existem algumas exceções como o caso do britador HP200 com APF igual a 20 mm, que mesmo com o uso da função quebra não normalizável não é possível fazer a correta previsão dos finos, de forma que a mesma não se faz necessária. Outro ponto de destaque é que para o britador VSI, o valor de t_{10} utilizado para a validação foi igual a 60, diferente do proposto pela seção 5.4.5. Como o modelo da forma como foi utilizado tem poucos graus de liberdade, principalmente pelo fato de K_1 ser igual a zero, e a modelagem ter sido feita levando em consideração o simulador JKSimMet®, o uso do t_{10} seguindo a equação proposta faz com que a previsão da distribuição granulométrica se aproxime daquela simulada, enquanto que o uso de t_{10} igual a 60 faz com que a previsão se aproxime da encontrada experimentalmente.

Desta forma, conclui-se que a função quebra implementada no Matlab-Simulink quando comparada a função seleção-quebra utilizada por ASBJÖRNSSON (2015) onde a quebra é representada pela matriz de quebra de Broadbent-Calcott (equação (3.35)) se apresenta de forma mais complexa.

Tabela 5.14 - Parâmetros utilizados na função quebra não normalizada para os diferentes britadores em suas condições de operação

Britador	S4000			HP300		HP200		VSI (3 e 2)			VSI (2)		
APF (mm) / Frequência (rpm)	40	54	70	30	40	20	30	1500	1650	1800	1500	1650	1800
d_{min} (mm)	0,21	0,21	0,33	0,33	0,33	0,21	0,21	0,60	0,60	0,43	0,60	0,60	0,60
n_3	0,45	0,65	0,67	0,25	0,25	0,18	0,10	0,47	0,50	0,50	0,35	0,43	0,40

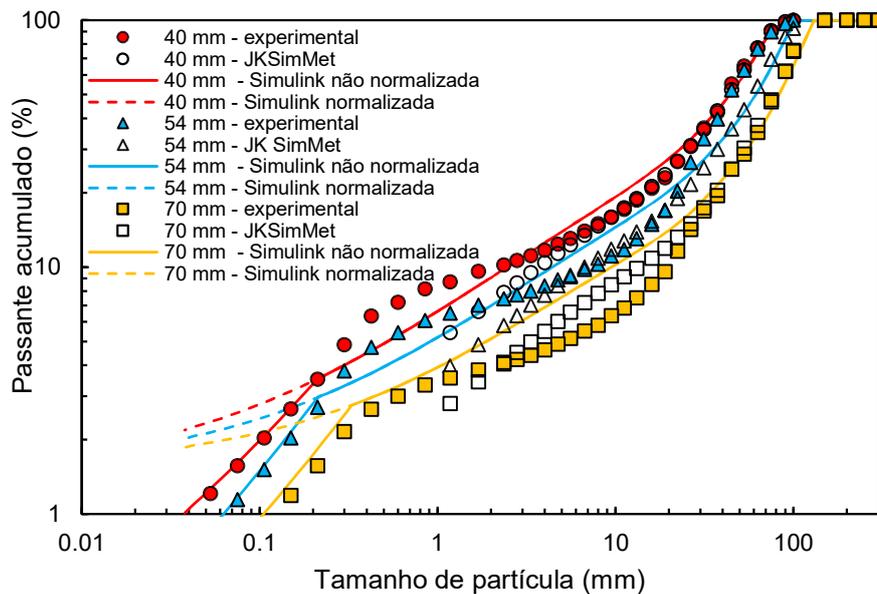


Figura 5.43 - Validação dos modelos de quebra para o britador secundário S4000 com diferentes APF, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSimMet®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink

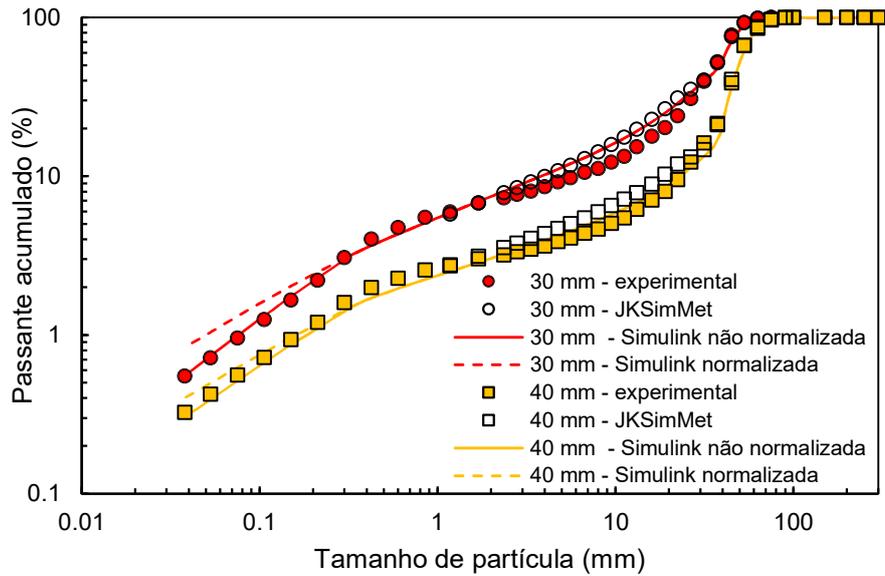


Figura 5.44 - Validação dos modelos de quebra para o britador terciário HP300 com diferentes APF, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSIMMET®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink

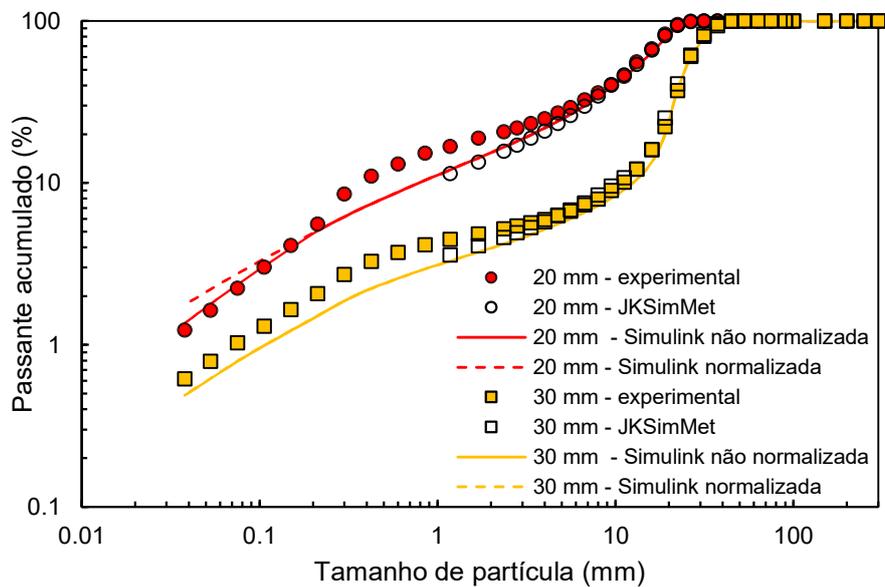


Figura 5.45 - Validação dos modelos de quebra para o britador quaternário HP200 com diferentes APF, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSIMMET®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink

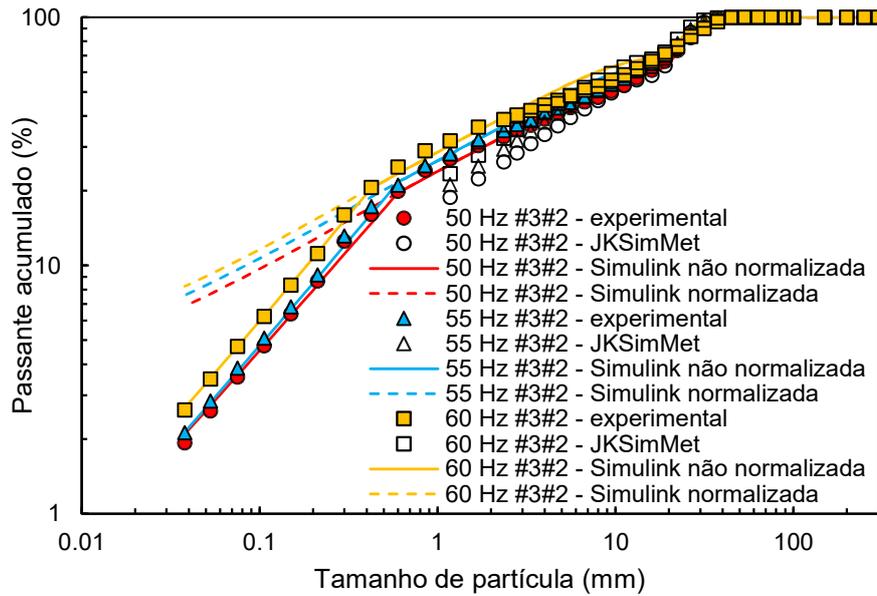


Figura 5.46 - Validação dos modelos de quebra para o britador quaternário VSI com diferentes frequências de operação e alimentação de brita 3 e 2, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSIMMET®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável implementada no Simulink

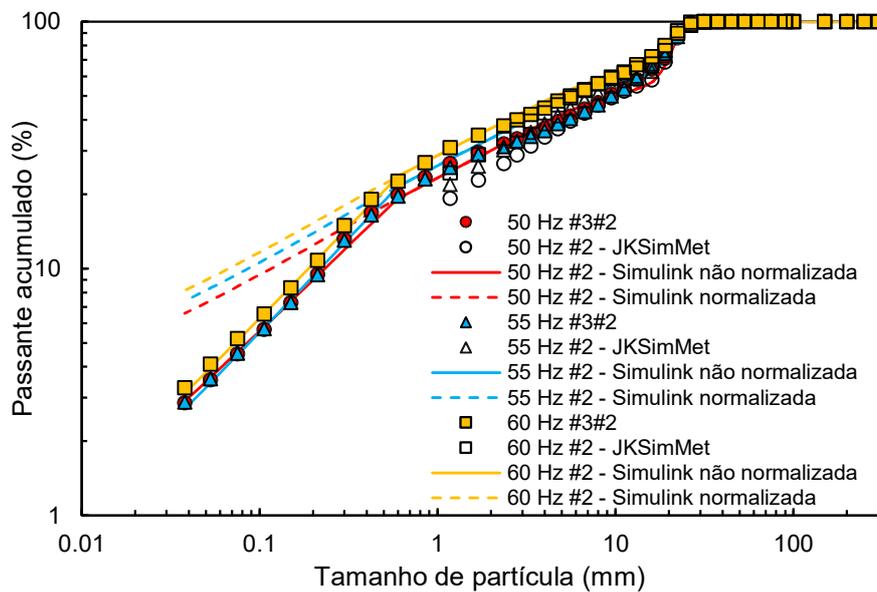


Figura 5.47 - Validação dos modelos de quebra para o britador quaternário VSI com diferentes frequências de operação e alimentação de brita 2, onde os marcadores cheios representam os pontos experimentais, os marcadores vazios os pontos simulados pelo JKSIMMET®, a linha contínua os dados para a função quebra não normalizável e a linha pontilhada os dados para a função quebra normalizável

5.6. Validação do modelo de potência no Matlab-Simulink

O modelo de potência implementado no Matlab-Simulink é o descrito pelas equações (3.20) (3.21) e depende dos parâmetros A e do B do material, definidos na seção 5.1.

A Figura 5.48 compara as potências experimentais com as potências definidas pelo JKSimMet® e pelo Matlab-Simulink. O modelo implementado apresenta boa concordância tanto com os valores experimentais quanto com os valores propostos pelo JKSimMet®. Algumas exceções a boa previsibilidade do modelo se dão, por exemplo, com o britador HP200 na abertura de 20 mm e com o britador VSI na alimentação de brita 3 e 2, onde o Matlab-Simulink apresentou uma tendência de superestimar os valores de potência. Por ser um modelo que depende diretamente dos valores de A e b, pequenas variações em relação aos valores experimentais são aceitáveis.

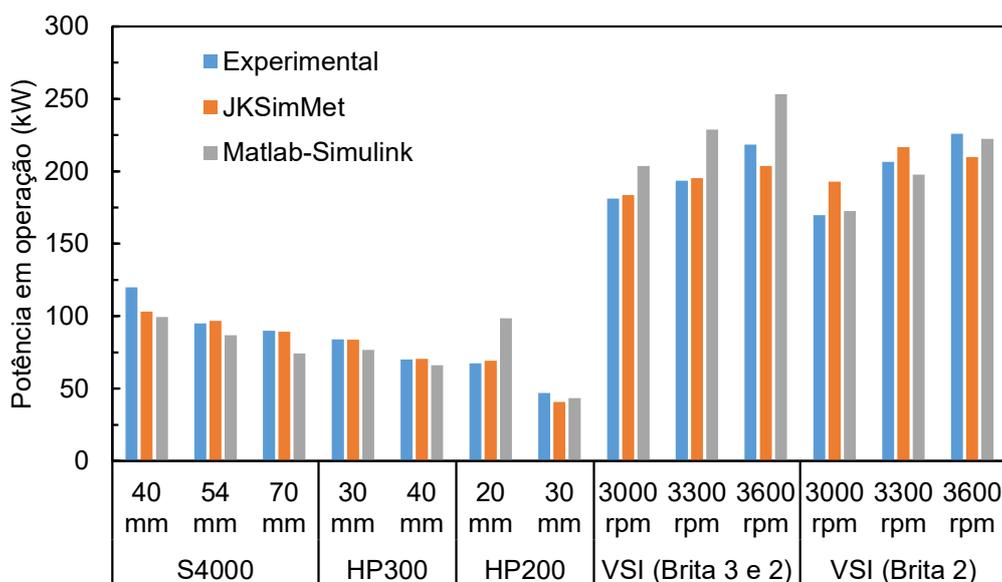


Figura 5.48 - Comparação dos valores de potência (kW) para os dados experimentais (azul), dados simulados pelo JKSimMet® (laranja) e dados simulados pelo Matlab-Simulink (cinza)

5.7. Verificação do modelo de curva de eficiência para peneiramento no Matlab-Simulink

O modelo de curva de eficiência implementado na plataforma Matlab-Simulink foi verificado a partir dos dados obtidos através da simulação realizada pelo JKSimMet®. Os parâmetros para cada uma das peneiras são exatamente os mesmos descritos na seção 5.4.1 para as peneiras PV-03/PV-04, PV-05/PV-06 e PV-07 e 5.4.4 para a PV-08

e estão apresentados entre a Figura 5.49 e a Figura 5.52, respectivamente. Na Tabela 5.15 é possível ver a comparação das vazões mássicas, em t/h, para cada um dos simuladores utilizados em cada um dos deques das peneiras.

O modelo implementado no Matlab-Simulink apresenta excelente correspondência aos dados simulados no JKSimMet® ao se comparar tanto a distribuição granulométrica quanto o balanço de massas de cada uma das peneiras, de forma que o seu uso se mostra como sendo bastante conveniente.

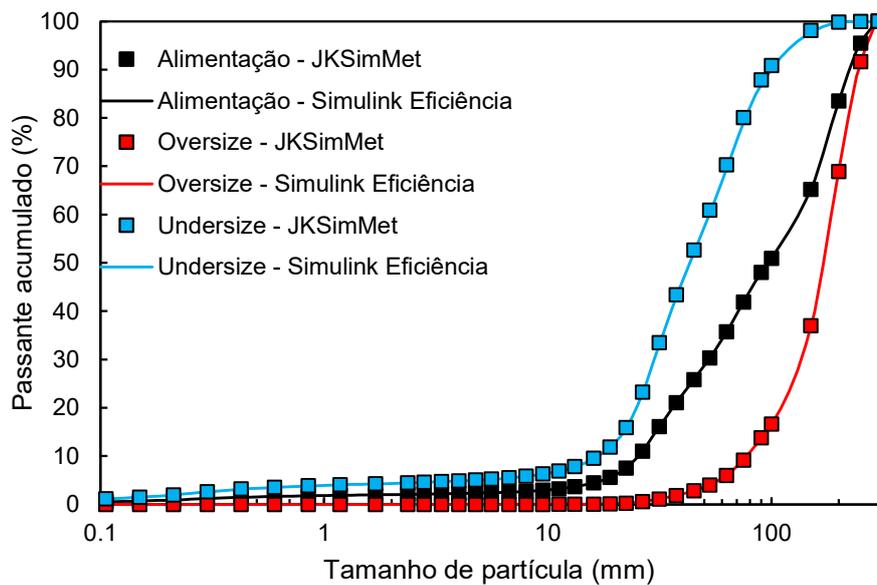


Figura 5.49 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-08, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink

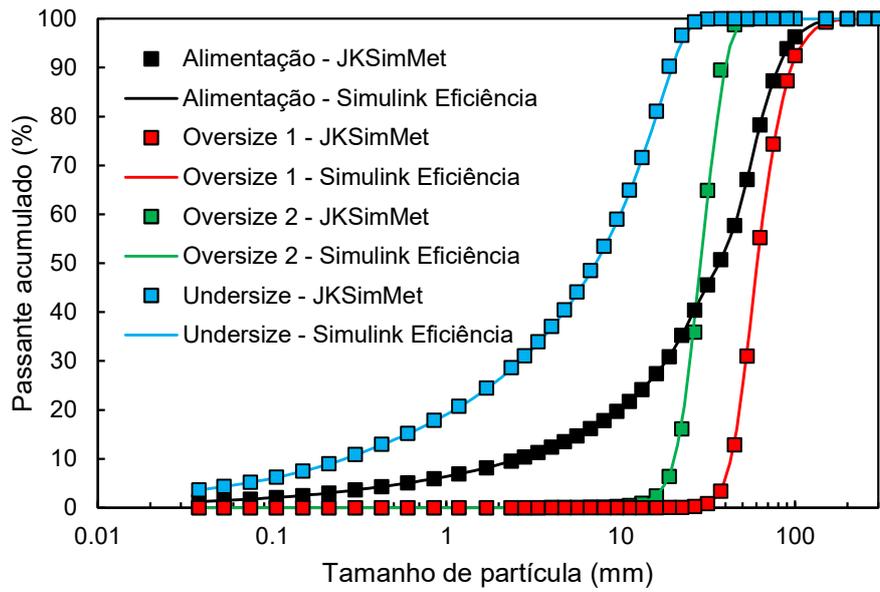


Figura 5.50 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-03/PV-04, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink

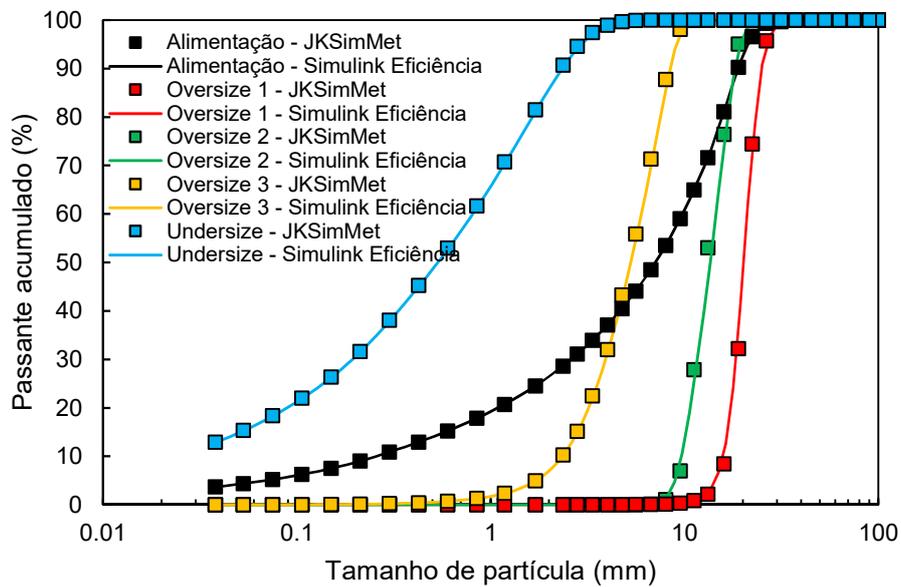


Figura 5.51 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-05/PV-06, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSimMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink

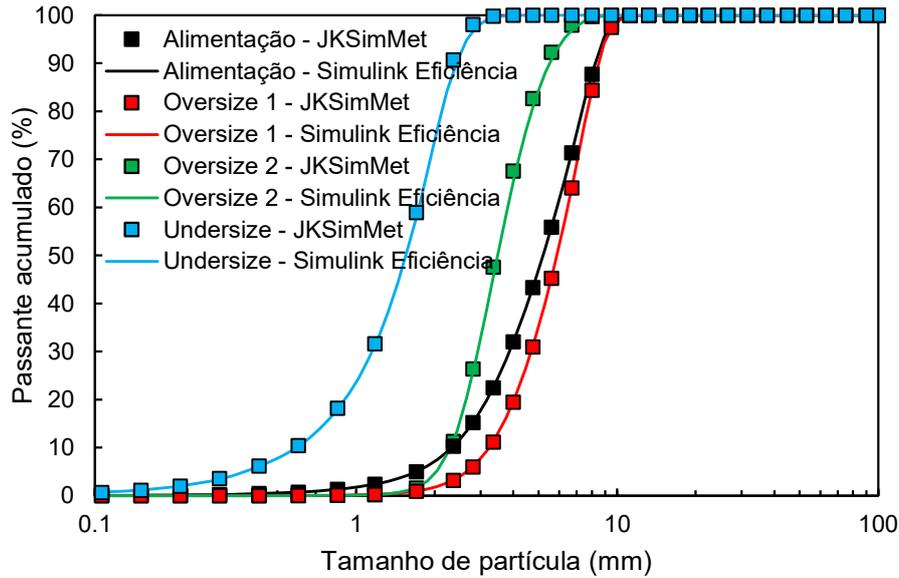


Figura 5.52 - Verificação do modelo de eficiência para a peneira PV-07, onde os marcadores representam os dados simulados pelo JKSIMMet® e as linhas contínuas os dados simulados pelo Matlab-Simulink

Tabela 5.15 - Comparação das vazões mássicas (t/h) para o modelo de eficiência do JKSIMMet® e o implementado no Matlab-Simulink

Peneira	PV-08		PV-03/PV-04		PV-05/PV-06		PV-07	
	JKSimMet	Simulink	JKSimMet	Simulink	JKSimMet	Simulink	JKSimMet	Simulink
Alimentação	536,5	536,5	1191,4	1191,4	397,0	397,0	112,0	112,0
Oversize 1	288,5	285,5	576,3	574,7	51,7	48,0	88,0	87,6
Oversize 2	-	-	218,2	216,0	120,7	122,1	16,5	16,8
Oversize 3	-	-	-	-	112,0	113,7	-	-
Undersize	248,1	251,0	397,0	400,7	112,5	113,2	7,6	7,7

5.8. Simulação no JKSIMMet®

A fim de melhor compreender o funcionamento da usina de rebitagem da Mineração Santa Luzia e identificar problemas passíveis de solução, realizou-se a simulação da operação da usina em sua configuração original. Além disso, outras simulações foram realizadas com base nas análises dos resultados obtidos nas amostragens. Essas simulações buscaram validar as observações realizadas,

umentando a eficiência do processo. As simulações utilizaram os parâmetros calibrados para cada equipamento operando em variadas condições. Realizou-se uma simulação como cenário base que descreve a operação na condição original do circuito (C1) e uma segunda simulação que descreve o cenário otimizado (C2).

Para viabilizar a realização das simulações foram fornecidas as alturas das pilhas que alimentam os britadores terciários e quaternários, permitindo a obtenção de seus volumes úteis e, com isso, estimar o tempo necessário para que as mesmas alcançassem suas capacidades mínimas e máximas. O ângulo de repouso adotado para a execução dos cálculos foi de 36° , conforme mostra a Figura 5.53. Considerou-se a altura “furada” de pilha como sendo igual à metade de sua altura máxima. Assim, a capacidade útil da pilha de brita 4, que alimenta o britador terciário, é estimada em 160 toneladas e a da pilha de brita 3, a qual alimenta o britador quaternário, é de 110 toneladas. Considerou-se o tempo de simulação como sendo igual a 12 horas de operação.



Figura 5.53 - Pilha de brita 3, ilustrando o ângulo de repouso referentes às britas da Mineração Santa Luzia

As vazões dos fluxos da usina de rebitagem foram obtidas para diferentes configurações de operação entre os britadores, simulando manobras que ocorrem em um dia típico de operação visando regular os volumes das pilhas de alimentação dos britadores. Para efeito de simplificação buscou-se simular o esvaziamento e enchimento completo das pilhas, uma vez que tal artifício não incorreria em variações no tempo total de parada dos britadores ao fim do período de simulação. Além disso considerou-se

todas as pilhas com metade de sua capacidade ao início da operação. Devido à capacidade superior, a pilha de brita 4 é responsável por controlar o funcionamento da usina, para isso estipulou-se o fim da operação quando a mesma atingisse metade de sua capacidade novamente.

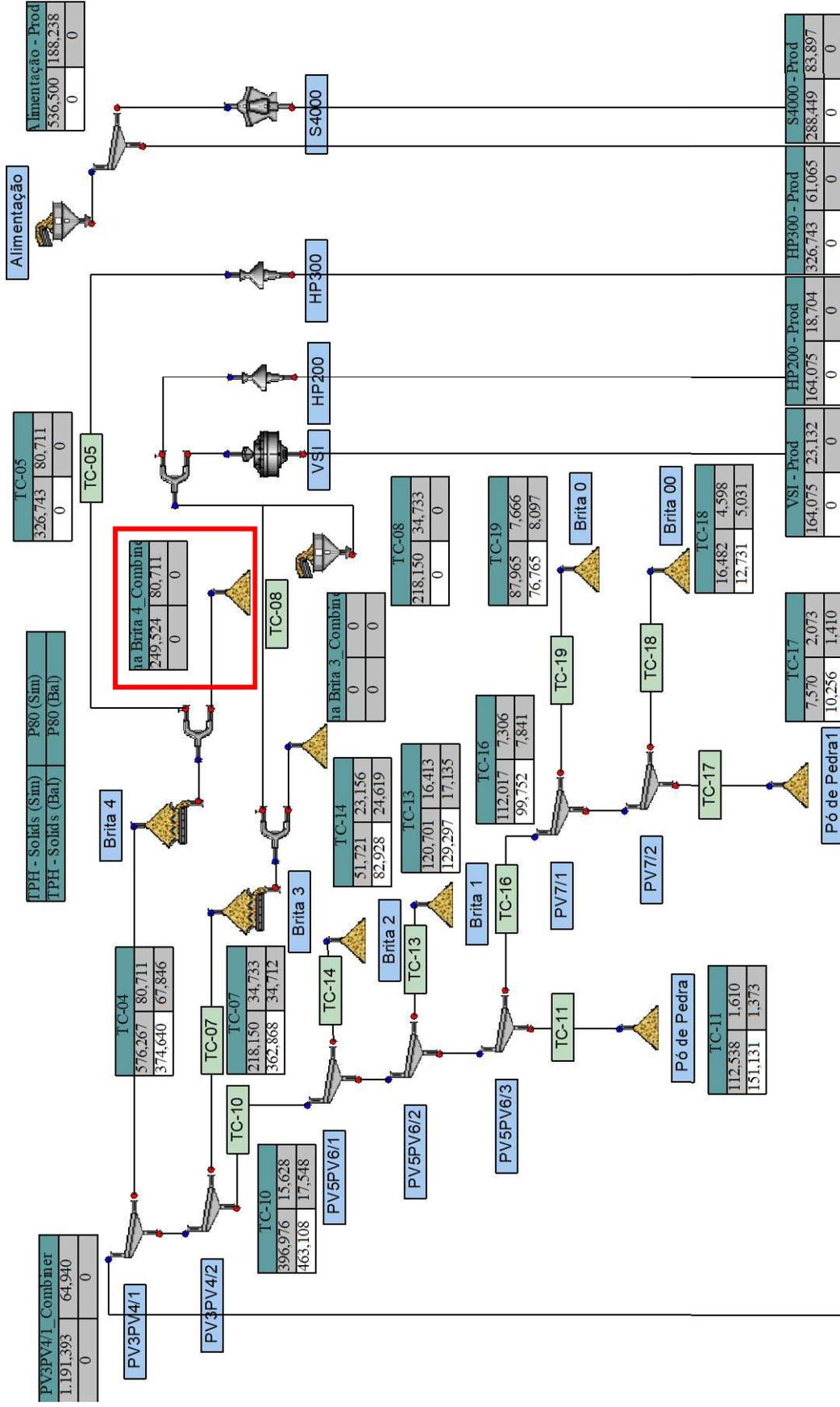
5.8.1. Caso base: Cenário 1 (C1)

O acompanhamento da operação do circuito de rebitagem durante as primeiras visitas à usina da Santa Luzia, ainda que por um período reduzido, sugeriu que o mesmo se encontrava fortemente desbalanceado, demandando ações frequentes do operador na interrupção da alimentação da rebitagem, bem como dos britadores quaternários. É importante destacar que, idealmente, um circuito de rebitagem de agregado deveria operar de forma mais balanceada possível, pois tais interrupções na alimentação nova do circuito implicam, na prática, em diminuição da sua eficiência, pois os equipamentos são usados nesse período para reprocessar material já alimentado.

Assim, a realização da simulação do cenário de operação do circuito de rebitagem na condição original visou analisar quantitativamente as paradas dos britadores em decorrência do desbalanço entre os fluxos de entrada e saída de material nas pilhas que alimentam os britadores que compõem a usina de rebitagem, além de servir como base para a análise dos resultados obtidos nas simulações de cenários otimizados. Assim, este cenário foi representado utilizando as seguintes considerações:

1. APF de 54 mm para o britador secundário, 40 mm para o britador terciário e 20 mm para o britador quaternário HP200. Para o britador VSI adotou-se a frequência do rotor de 1650 rpm. Essas foram as condições informadas pelo operador como as mais usuais em períodos recentes.
2. Vazão nominal de 536 t/h, obtida experimentalmente.
3. Vazões de alimentação dos britadores verificada durante a amostragem.
4. Condições de funcionamento das peneiras idênticas ao circuito atual.

Os resultados da simulação do cenário atual de operação confirmam a suspeita da existência de um gargalo na operação do britador terciário, devido majoritariamente à sua baixa capacidade de britagem quando regulado com a APF de 40 mm, o que resultou em um elevado reciclo de material e aumentando substancialmente o volume da pilha que alimenta o britador em questão. Na Figura 5.54 é possível observar que o acúmulo na pilha de brita 4 é de 250 t/h quando todos os britadores se encontram operando.



A Figura 5.55 demonstra a variação da disponibilidade de brita 4 e brita 3 para alimentação dos britadores terciário e quaternário, respectivamente, durante um dia típico de operação. O fundo em verde indica os períodos do dia no qual o britador secundário se encontra em operação, ou seja, está sendo introduzida alimentação nova na usina de rebitagem. Durante os períodos do dia ilustrados com o fundo em vermelho, o britador secundário encontra-se desligado, indicando que a usina se encontra apenas reprocessando a rocha que já se encontra nas pilhas que alimentam os britadores, ou seja, envolvida numa operação de retrabalho. Foram simulados 12 horas (720 minutos) de operação da usina de rebitagem, dos quais o britador secundário permaneceria ligado durante apenas 178 minutos, ou seja, 25% do tempo. Considerando a vazão do britador secundário de 536 t/h, conclui-se que durante 12 horas de funcionamento da usina seriam processadas apenas 1608 toneladas de rocha na rebitagem.

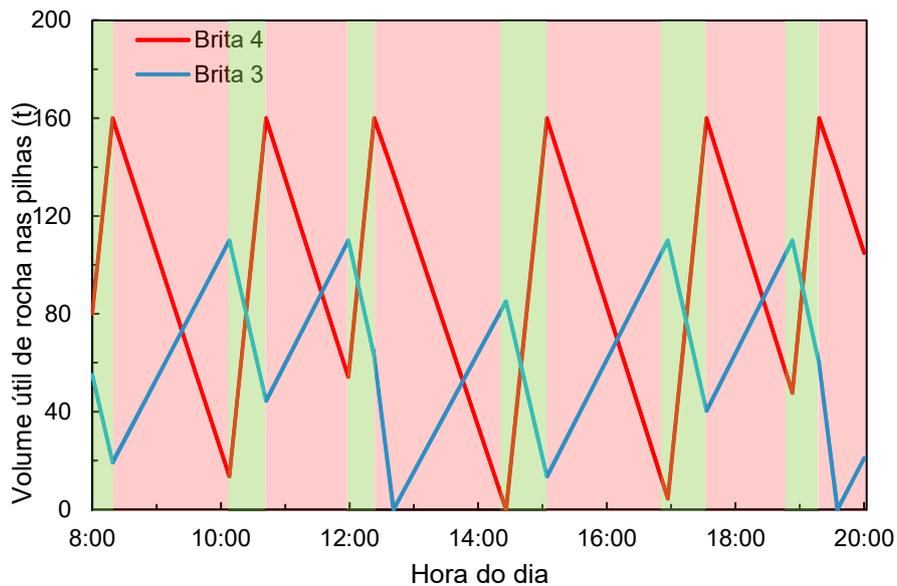


Figura 5.55 - Variação da disponibilidade de material nas pilhas de brita 3 e 4 ao longo de um dia hipotético de operação do circuito na condição original (C1), onde as faixas em verde indicam a operação do britador secundário e, as faixas em vermelho, os períodos no qual o mesmo se encontra ocioso

A fim de validar as simulações, ainda que apenas parcialmente, foram comparadas as distribuições granulométricas experimentais com as distribuições granulométricas simuladas. O resultado apresentado na Figura 5.56 aponta para uma simulação bastante realista, estando os valores simulados próximos dos valores experimentais. Neste cenário, as vazões médias para os produtos da usina foram de:

40,3 t/h de pó de pedra (30,7%), 5,1 t/h de brita 00 (3,9%), 27,2 t/h de brita 0 (20,8%), 40,9 t/h de brita 1 (31,2%) e 17,8 t/h de brita 2 (13,5%).

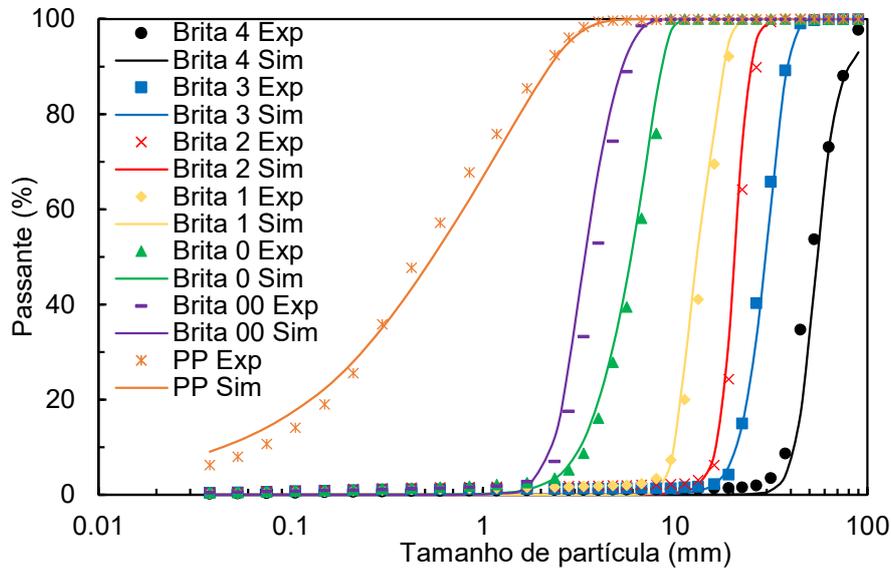


Figura 5.56 - Comparação entre as distribuições granulométricas experimentais e simuladas para a condição original do circuito (cenário 1)

5.8.2. Cenário 2 (C2)

A simulação do cenário de operação do circuito de rebitagem atual otimizado visou reduzir gargalos e paradas em operação, com o objetivo de aproveitar a máxima capacidade de britadores e peneiras, melhorar a eficiência energética global do circuito e maximizar a produção dos agregados. Este cenário consistiu de uma oportunidade de otimização de produção sem a necessidade da realização de obras civis ou aquisição de quaisquer equipamentos que demandassem tempo e investimento por parte da empresa, nem alterar quaisquer especificações dos produtos. As modificações adotadas no cenário em relação ao cenário 1 foram:

1. Redução de APF do britador terciário de 40 mm para 30 mm, visando o afogamento do britador para o aumento da produção de material, conforme observado na seção 5.2.1.2.
2. Alteração da frequência do rotor do britador VSI para 1500 rpm, visando o aumento da produção de material, conforme observado na seção 5.2.1.3.
3. Modificação de d_{50c} do primeiro deque da peneira PV3/PV4 de 38,5 mm para 42,0 mm, o que corresponde a alterar a abertura de 50 mm para 54 mm, com o objetivo de deixar o material levemente mais grosso para alimentar o britador HP300.

4. Vazões de alimentação dos britadores conforme capacidade máxima, objetivando o funcionamento dos britadores com câmara cheia.

Os resultados da simulação do cenário otimizado do circuito na condição original indicam a presença de um gargalo na operação do britador terciário, todavia em escala inferior ao apresentado no cenário de funcionamento atual (C1). Uma melhor razão de redução do britador terciário, devido à redução de sua APF, em conjunto com uma abertura de tela maior no primeiro deque da peneira PV3/PV4 resultou em uma melhor distribuição de vazões entre os britadores terciário e quaternários, totalizando um desbalanço de 146 t/h no fluxo de material da pilha de brita 4, conforme mostra a Figura 5.57.

Em razão das alterações propostas, o britador secundário seria capaz de operar durante um tempo superior em comparação ao cenário do caso base (C1). A Figura 5.58 apresenta a disponibilidade de brita 3 e brita 4 para alimentação dos britadores. Foram simulados 12 horas de operação do circuito de rebitagem, dos quais o britador secundário permanece operando durante 394 minutos, ou seja, 55% do tempo total de operação. Conclui-se, pelo tempo de operação do britador secundário, que, durante 9 horas de funcionamento da usina, são processadas 3538 toneladas de rocha.

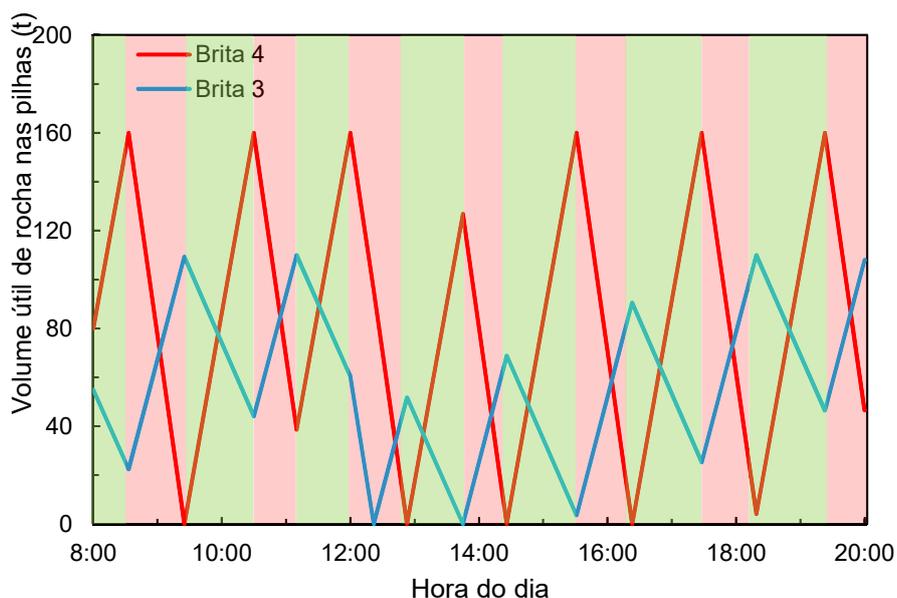


Figura 5.58 - Variação da disponibilidade de brita 3 e 4 ao longo de um dia de operação do circuito otimizado (C2), onde as faixas em verde indicam a operação do britador secundário e as faixas em vermelho representam os períodos no qual o mesmo se encontra ocioso

A comparação entre as distribuições granulométricas dos produtos medidas experimentalmente e aquelas correspondentes às simulações indica que as mudanças aplicadas na otimização do circuito não causaram mudanças substanciais nas distribuições granulométricas dos fluxos da usina, especialmente dos produtos finais, conforme apresentado na Figura 5.59. Neste cenário, as vazões médias para os produtos da usina foram de: 116,1 t/h de pó de pedra (31,1%), 14,5 t/h de brita 00 (3,9%), 77,4 t/h de brita 0 (20,7%), 115,0 t/h de brita 1 (30,8%) e 49,9 t/h de brita 2 (13,4%).

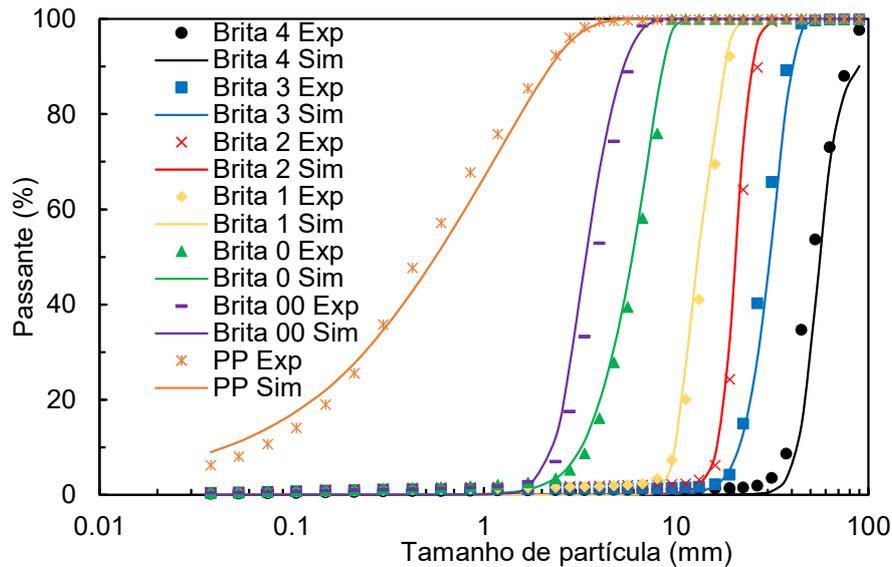


Figura 5.59 - Comparação entre granulometrias experimentais e simuladas para o cenário 2

5.8.3. Comparação entre cenários simulados

Na Tabela 5.16 é possível observar que a variação do tempo de operação do britador secundário entre os dois cenários simulados impacta diretamente a quantidade de material processado na usina de rebitagem da Mineração Santa Luzia, uma vez que durante os períodos em que o britador se encontra desligado para equalização das pilhas dos britadores terciário e quaternário, a usina de rebitagem apenas reprocessa a brita disponível nas pilhas, sem que nova alimentação seja introduzida no sistema. A comparação entre a produção dos cenários base (C1) e otimizado (C2) da configuração atual dos britadores apontou para um ganho de 120% da quantidade de material processado pela usina de rebitagem.

Tabela 5.16 - Comparação entre os tempos de operação do britador secundário e a quantidade de material processada na usina ao longo do dia para os cenários simulados

Cenário	Tempo de funcionamento do britador secundário ao longo de um dia (%)	Quantidade de material processada pela usina ao longo de um dia (t)
C1	25%	1608
C2	55%	3538

Em relação aos produtos gerados nos cenários, não ocorreu variação significativa em suas proporções entre o cenário base (C1) e o cenário atual otimizado (C2), embora a quantidade de material processado tenha se alterado (Tabela 5.17).

Tabela 5.17 - Proporção dos produtos gerados para cada cenário de simulação

Origem	Produto	Cenário 1	Cenário 2
Circuito de Rebritagem	Pó de Pedra	30,7	31,1
	Brita 00	3,9	3,9
	Brita 0	20,8	20,7
	Brita 1	31,2	30,8
	Brita 2	13,5	13,4

A Figura 5.60 apresenta os valores de produção específica (t/kWh) relativos ao material <1,7 mm do circuito de rebritagem, ou seja, a geração de produtos por consumo de energia, para os diferentes cenários, considerando os equipamentos ociosos operando em vazio ou desligados. Nota-se uma maior eficiência energética para o cenário otimizado do circuito atual (C2), especialmente quando comparado com o cenário base (C1).

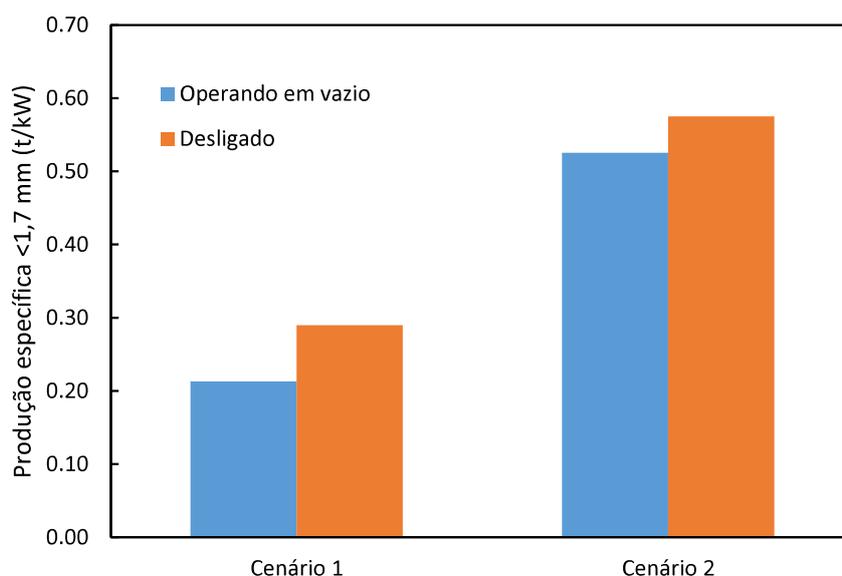


Figura 5.60 - Produção específica <1,7 mm (t/kWh) do circuito de rebritagem para cada cenário simulado considerando a operação dos equipamentos ociosos em vazio e desligados

5.9. Simulação no Matlab-Simulink: Dinâmica de pilhas

Diferentes abordagens no que diz respeito à granulometria das pilhas pulmões dos britadores foram simuladas utilizando o simulador dinâmico implementado na plataforma Matlab-Simulink. Ao contrário do que ocorre na simulação em regime estacionário realizada no simulador JKSimMet®, a simulação dinâmica pode e deve considerar a variação da granulometria do material contido na pilha de material de acordo com os equipamentos em operação.

Como forma de considerar a variação da granulometria na pilha, foram utilizados diferentes configurações de misturadores perfeitos, que realizam a integração da quantidade de material em cada faixa de tamanho ao longo do tempo. Todavia a representação da pilha como apenas um misturador perfeito desconsidera o efeito de estratificação observado na prática, uma vez que qualquer perturbação no material sendo lançado no topo da pilha já é automaticamente detectada no fundo da mesma. Como forma de minimizar esse efeito e aproximar o comportamento da pilha de material com a realidade, foram realizados testes com diferentes quantidades de misturadores perfeitos ao longo da pilha, imitando a existência de diferentes camadas de material. Além disso, realizou-se uma simulação considerando as alimentações dos britadores fixas, de forma a serem comparadas com os resultados encontrados no simulador JKSimMet®.

Como forma de verificar os resultados obtidos na simulação em regime dinâmico diante das simulações em regime estacionário, foram comparadas as distribuições granulométricas simuladas para ambos os casos. É possível observar na Figura 5.61 que existe excelente correspondência entre as granulometrias para ambos os regimes de simulação.

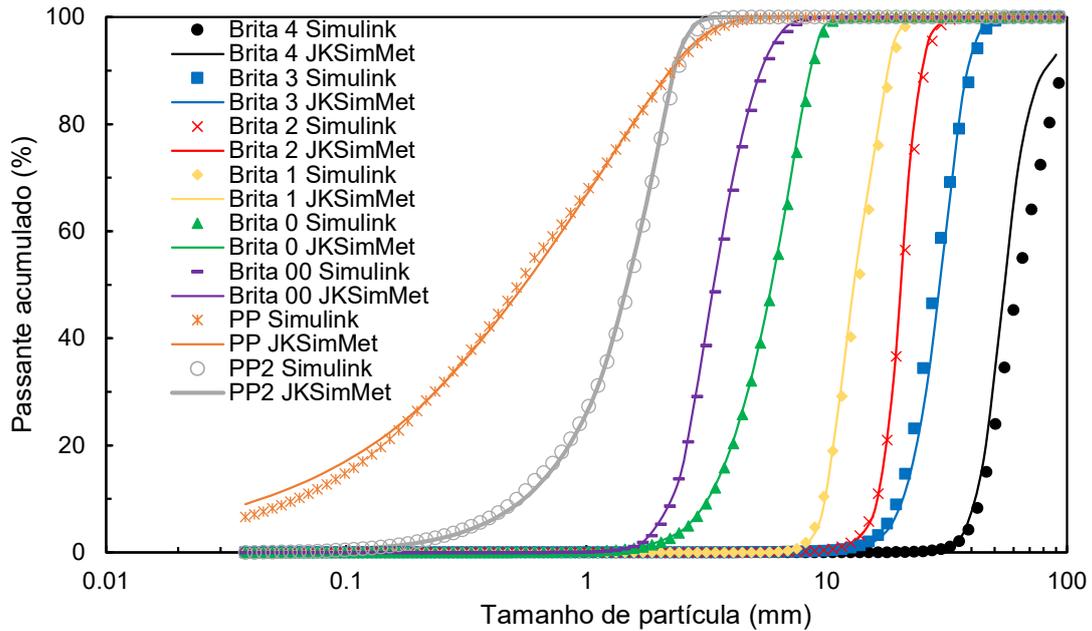


Figura 5.61 - Comparação entre os produtos simulados da usina no cenário otimizado utilizando regime de simulação estacionário e dinâmico, onde as linhas representam resultados do JKSimMet® e os símbolos resultados do Simulink para o cenário 1

A Figura 5.62 compara a variação do volume útil, para brita 4 e brita 3, ao longo de 12 horas de operação, entre os *softwares* JKSimMet® e Simulink considerando o último com a alimentação fixa, da mesma forma que o primeiro funciona. É possível observar o mesmo padrão de comportamento para ambos os *softwares*, porém o Simulink apresenta uma maior frequência de ocorrência dos picos de volume máximo e mínimo de pilhas, devido à implementação de uma dinâmica que se assemelha de forma mais realista ao processamento do material.

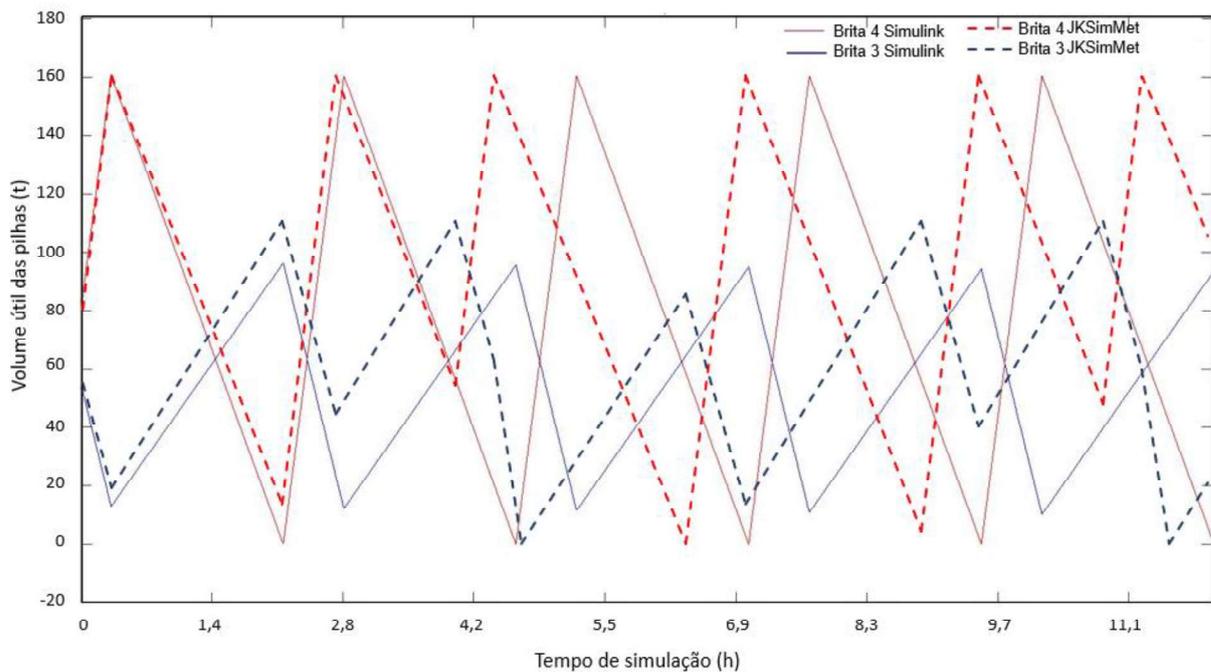


Figura 5.62 – Comparação da variação do volume útil de rocha na pilha de brita 4 e pilha de brita 3 para doze horas de operação no cenário 1 considerando a granulometria da alimentação fixa para a simulação no Simulink (linhas cheias) e no JKSimMet® (linhas pontilhadas)

A Figura 5.63 apresenta uma comparação da dinâmica dos volumes das pilhas de brita 3 e brita 4, utilizadas na alimentação dos estágios de britagem quaternário e terciário, respectivamente, ao longo de seis horas de operação do cenário 1, mantendo a alimentação dos britadores constante e variando ao longo do tempo por meio da representação da pilha como um misturador perfeito apenas. Como é possível observar, os resultados encontrados com a granulometria fixa apresentam muito boa correspondência com os obtidos por meio da simulação estática utilizando o software JKSimMet®, conforme mostra a Figura 5.55. Todavia a variação da granulometria da pilha ao longo do tempo é responsável por aumentar o tempo de parada do britador secundário S4000, uma vez que é observada a redução do *top size* da pilha de brita 4, o que torna o funcionamento do britador HP300 menos eficiente. O efeito dessa variação granulométrica na dinâmica das pilhas é visível a partir de uma hora de simulação, quando os resultados com a granulometria variável começam a destoar dos resultados com granulometria fixa. Este resultado é corroborado ao se observar a função classificação dos britadores presentes na usina de rebitagem (Figura 5.64). Os britadores S4000, HP300 e HP200 apresentam função classificação com formato bastante vertical, fazendo com que a diferença de tamanho de partícula seja pequena. Desta forma, com a adoção de um misturador perfeito, as partículas adquirem

rapidamente um tamanho de partícula que não consegue ser classificado para quebra, aumentando assim o tempo para encher e/ou esvaziar a pilha.

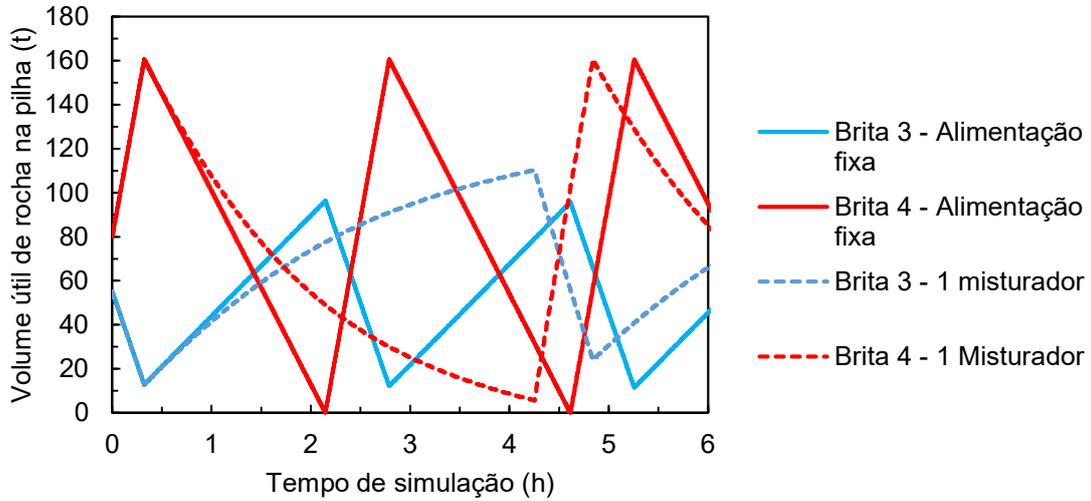


Figura 5.63 - Variação do volume útil de rocha na pilha para seis horas de operação nos cenários considerando a granulometria da alimentação fixa e considerando a variação da granulometria nas pilhas pulmão dos britadores através da adoção de um misturador perfeito

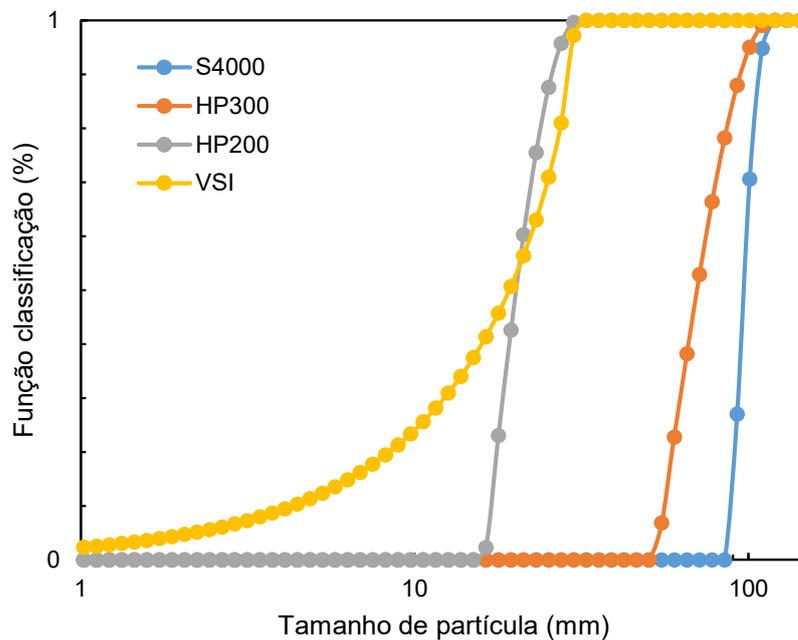


Figura 5.64 - Função classificação dos britadores da usina de rebitagem

A adoção de uma sequência de misturadores perfeitos para representar as diferentes camadas de material ao longo da pilha, por sua vez, permite reduzir a propagação da perturbação na granulometria do material sendo lançado na pilha no

momento que ocorre a variação das condições operacionais dos diferentes equipamentos do circuito. A Figura 5.65 apresenta a variação do P80 da alimentação da pilha de brita 4 ao longo das duas primeiras horas de operação do circuito para as diferentes configurações de misturadores adotadas. Considerando a perturbação na granulometria sendo introduzida aos 20 minutos de simulação, no momento em que o britador secundário S4000 é desligado, nota-se que a adoção de uma maior quantidade de misturadores garantiu a presença de uma granulometria mais grossa no alimentador da pilha por mais tempo, indicando que ocorreu a representação do efeito de estratificação do material ao longo da pilha. No caso onde apenas um misturador perfeito é utilizado, a introdução da perturbação na granulometria da pilha afeta instantaneamente o P80 da alimentação do britador HP300.

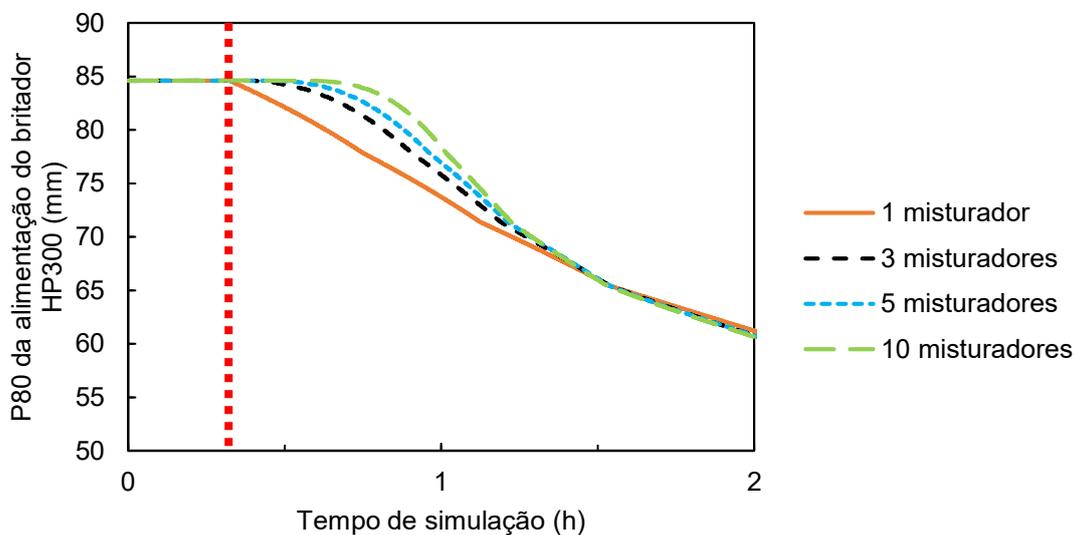


Figura 5.65 - Variação do P80 da alimentação do britador HP300 ao longo das duas primeiras horas de operação do circuito para as diferentes configurações da pilha adotando misturadores perfeitos. Em vermelho está indicado o início da perturbação na granulometria da pilha de brita 4

5.10. Simulação no Matlab-Simulink: Comparação com a simulação otimizada – cenário 2

Foram realizadas simulações em regime dinâmico do cenário 2 (otimizado) seguindo as recomendações apresentadas na seção 5.8.2 e utilizando a plataforma Matlab-Simulink. Adotou-se a representação da pilha como um conjunto de 10 misturadores perfeitos, conforme explicado na seção 4.3.2. A Figura 5.66 apresenta a dinâmica de enchimento e esvaziamento das pilhas pulmões dos estágios terciários e quaternários da usina de agregados. É possível notar que o tempo de operação, correspondente ao enchimento da pilha de brita 4 foi otimizado em relação ao cenário

1, que reflete as condições de operação nas condições originais da usina. Não foi possível neste cenário observar o impacto da variação da granulometria da pilha na dinâmica das pilhas uma vez que o britador HP300 se encontrava operando com uma APF inferior ao corte do primeiro deque da peneira PV-03/PV-04. Desta forma, o material é todo capturado pela função classificação e sofre a quebra e não mais concentra em uma única faixa de tamanho.

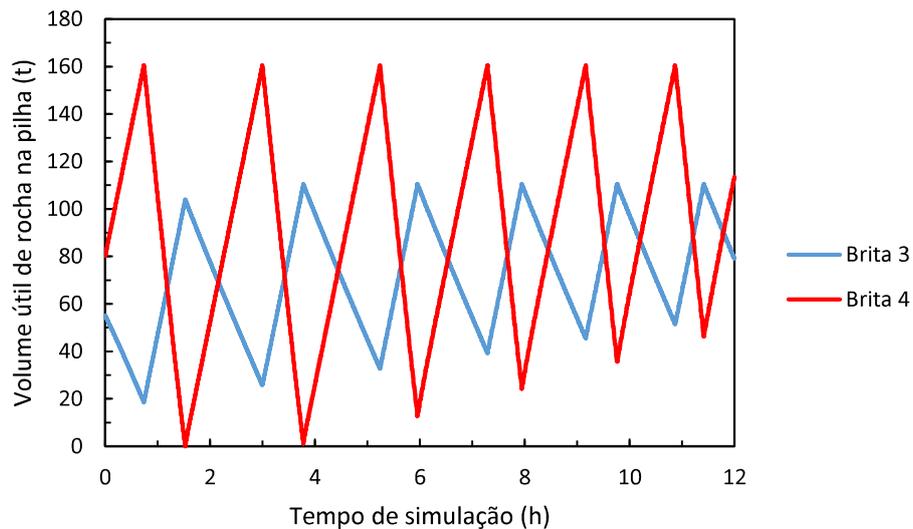


Figura 5.66 - Variação do volume útil de rocha na pilha para doze horas de operação no cenário otimizado utilizando simulação em regime dinâmico

Como forma de validar os resultados obtidos na simulação em regime dinâmico diante das simulações em regime estático, foram comparadas as distribuições granulométricas simuladas para ambos os casos. É possível observar na Figura 5.67 que existe excelente correspondência entre as granulometrias para ambos os regimes de simulação. Tal resultado, aliado ao apresentado na Figura 5.66, corroboram para a boa implementação dos modelos matemáticos de classificação e cominuição na plataforma Matlab-Simulink.

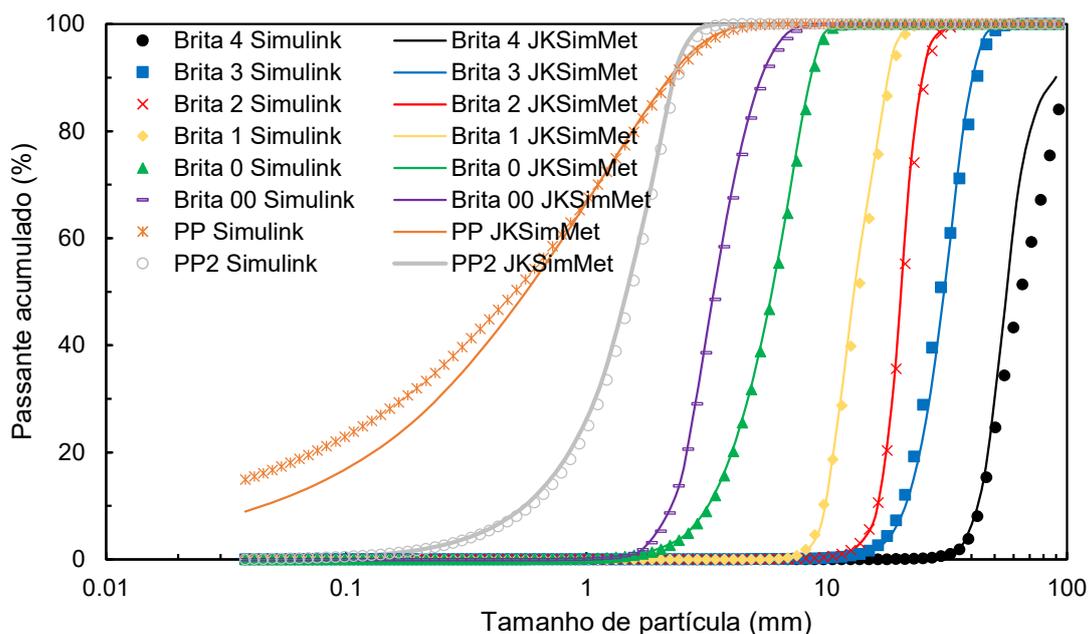


Figura 5.67 - Comparação entre os produtos simulados da usina no cenário otimizado utilizando regime de simulação estático e dinâmico, onde as linhas representam resultados do JKSimMet® e os símbolos resultados do Simulink para o cenário 2

Em relação aos fluxos mássicos, é possível notar na Tabela 5.18 que a simulação em regime dinâmico resultou em valores próximos na proporção de produto gerado quando comparado com a simulação em regime estacionário, indicando que embora considere a variação granulométrica das pilhas pulmões dos britadores, este resultado não afetou significativamente a distribuição mássica dos produtos nas diferentes peneiras do circuito. A exceção à proporcionalidade entre os produtos se deu com a brita 0, que teve um aumento de produção em cerca de 7% no cenário otimizado.

Tabela 5.18 - Proporção dos produtos gerados para o cenário otimizado utilizando os regimes estacionário e dinâmico

Origem	Produto	JKSimMet® (%)	Simulink (%)
Circuito de Rebritagem	Pó de Pedra	31,1	29,0
	Brita 00	3,9	3,8
	Brita 0	20,7	27,3
	Brita 1	30,8	27,8
	Brita 2	13,4	12,1

6. Conclusões

O presente trabalho ilustrou a importância da adoção da simulação como ferramenta para garantir o bom funcionamento de circuitos de britagem para a produção de agregados para a construção civil. Simulações em regime estacionário fornecem aos usuários um referencial das condições de operação da usina, todavia apresentam severas limitações no que diz respeito a previsão de desbalanços de fluxo mássicos e previsão de paradas devido a problemas na usina.

Ainda assim, simulações em regime estacionário apresentam-se como uma importante base para a realização de simulações dinâmicas, uma vez que ambas podem compartilhar modelo de cominuição e classificação em comum, proporcionando a possibilidade de utilização da mesma metodologia de calibração de parâmetros para ambos os regimes de simulação.

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para a realização de simulações em regime estacionário utilizando o software JKSimMet[®], abrangendo desde a realização de amostragens industriais até a calibração de parâmetros de modelos de classificação e cominuição em regime estacionário. As simulações em regime estacionário serviram como base para a estimativa das condições operacionais de um dia de operação da usina. Procedeu-se com a implementação dos mesmos modelos na plataforma Matlab-Simulink para a realização de simulações dinâmicas e posterior comparação entre os resultados obtidos na plataforma de simulação JKSimMet[®].

Os resultados obtidos expuseram importantes limitações de simulações em regime estacionário. Por não considerar a variação granulométrica ao longo de um dia de operação, simulações em regime estacionário são incapazes de prever mudanças nas características de fluxos mássicos decorrentes do desligamento de algum equipamento da usina. Além disso, simulações em estado estacionário se mostraram incapazes de prever a parada de equipamentos devido a problemas existentes ao longo da operação da usina. Simulações realistas usando o simulador JKSimMet[®] somente foram possíveis pelo uso cauteloso da simulação em diferentes condições do circuito, juntando os resultados obtidos a posteriori para montagem dos cenários completos.

A adoção de simulação em regime dinâmico permitiu realizar de forma direta a simulação do circuito em condição desbalanceada, além de considerar a variabilidade das granulometrias dos fluxos mássicos da usina, o que impactou fortemente o tempo de parada dos equipamentos para o cenário não otimizado. Além disso, os resultados obtidos corroboraram para a correta implementação dos diferentes modelos matemáticos de cominuição e classificação na plataforma de simulação dinâmica. Por

fim, a adoção de diferentes modelos de classificação e cominuição expôs a importância da calibração dos parâmetros com dados experimentais consistentes.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Por visar apenas a comparação entre simulações em regimes estacionários e dinâmicos através da implementação de uma plataforma de simulação dinâmica no software Matlab-Simulink, o presente trabalho não focou em condições mais complexas de operação da usina. Recomenda-se para trabalhos futuros a realização de simulações que prevejam outros níveis de dinâmica, como variação da APF dos britadores devido ao desgaste, a influência dos tempos de parada programadas para a manutenção dos diferentes equipamentos da usina além de paradas emergenciais devido a problemas inesperados ou condições meteorológicas a partir da análise de dados registrados ao longo dos anos. Além disso, a implementação de diferentes modelos de peneiramento, a influência das propriedades do material no circuito, como mudança no parâmetro A^*b .

Referências Bibliográficas

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, *NBR NM 51 - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles."*
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, *NBR 7211 - Agregados para concreto.*
- ANDERSEN, J. S., 1988, *Development of a cone crusher model*. Tese de Mestrado, The University of Queensland.
- ANDERSEN, J. S., NAPIER-MUNN, T. J., 1990, "The influence of liner condition on cone crusher performance". *Minerals Engineering*, v. 3, pp. 105–116.
- ARIS, R., 1991, "Manners makyth modellers". *Chemical Engineering Science*, v. 46, pp. 1535–1544.
- ASBJÖRNSSON, G., 2015, *Crushing Plant Dynamics*. Tese de Doutorado, Chalmers University of Technology.
- ASBJÖRNSSON, G., BENGTSSON, M., HULTHÉN, E., *et al.*, 2016, "Modelling of discrete downtime in continuous crushing operation". *Minerals Engineering*, v. 98, pp. 22–29.
- ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., EVERTSSON, M., 2012, "Modelling and dynamic simulation of gradual performance deterioration of a crushing circuit - Including time dependence and wear". *Minerals Engineering*, v. 33, pp. 13–19.
- ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., EVERTSSON, M., 2013, "Modelling and simulation of dynamic crushing plant behavior with MATLAB/Simulink". *Minerals Engineering*, v. 43–44, pp. 112–120.
- ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., EVERTSSON, C. M., 2013, "An on-line training simulator built on dynamic simulations of crushing plants". In: *16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, pp. 218–223, San Diego, California, USA, PART 1.
- AUSTIN, L. G., KLIMPEL, R. R., LUCKIE, P. T., 1984, "Theory of grinding operations". *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 56, pp. 18–29.
- BENGTSSON, M., ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., *et al.*, 2017, "Towards dynamical profit optimization of comminution circuits". *Minerals Engineering*, v. 103–104, pp. 14–24.
- BHADANI, K., ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., *et al.*, 2018, "Application of Multi-Disciplinary Optimization Architectures in Mineral Processing Simulations". In:

Comminution '18, pp. 10, Cape Town, April.

- BROADBENT, S. R., CALLCOTT, T. G., 1956. "A matrix analysis of processes involving particle assemblies. Philosophical Transactions of the Royal Society of London". *Series A, Mathematical and Physical Sciences* 249. S.I.: pp. 99–123.
- CONCHA, F. A., 1995, "Value of first principles and phenomenological modeling in mineral processing". In: *XIX International Mineral Processing Congress*, pp. 9–15, Littleton, Setembro.
- CRAIG, I. K., MACLEOD, I. M., 1995, "Specification framework for robust control of a run of- mine ore milling circuit". *Control Engineering and Practice*, v. 3, pp. 621–630.
- CREMONESE, D. T., 2014, *Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.
- CUNHA, E. R. DA, 2014, *Modelagem mecanicista de britadores de impacto de eixo vertical*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- EVERTSSON, C. M., 2000, *Cone crusher performance*. Tese de Doutorado, Chalmers University of Technology.
- FRANKLIN, M., GERTENBACH, J., 2005, "Applying Modeling & Simulation as part of Business Process Improvement of Complex Mining Logistics". In: *Business Process improvement in the extractive industries*, Denver, Setembro.
- GUPTA, A., YAN, D., 2016, *Mineral processing design and operations*.
- HUKKI, R. T., 1961, "Proposal for a solomnic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond". *Transactions SME/AIME*, v. 220, pp. 403–408.
- HULTHÉN, E., ASBJÖRNSSON, M. S. G., HULTHÉN, E., *et al.*, 2015, "Development of Operator Training for the Swedish Aggregate Industry Development of Operator Training for the Swedish Aggregate Industry". In: *14th European Symposium on Comminution and Classification*, Gothenburg, Sweden, September.
- JESWIET, J., SZEKERES, A., 2016, "Energy Consumption in Mining Comminution". *Procedia CIRP*, v. 48, pp. 140–145.
- JKTECH PTY LTD., 2015. "JKSimMet - Steady State Processing Simulator. User Manual.". . 2015. Brisbane: JKTech Pty Ltd.
- KARRA, V. K., 1979, "Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen". *CIM Bulletin*, pp. 167–171.

- KING, R. P., 1990, "Simulation - the modern cost-effective way to solve crusher circuit processing problems". *International Journal of Mineral Processing*, v. 29, pp. 249–265.
- KING, R. P., 2001, *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Butterworth-Heinemann.
- KING, R. P., SCHNEIDER, C. L., 2004. "Simulação de usinas de beneficiamento: princípios básicos". *Tratamento de Minérios*. 4ª edição. Rio de Janeiro: pp. 721–781.
- KOJOVIC, T., NAPIER-MUNN, T. J., ANDERSEN, J. S., 1998, "Modeling cone and impact crushers using laboratory determined energy-breakage functions". *Comminution Practices*, pp. 187–194.
- LEE, E., EVERTSSON, C. M., 2008, "Yield and Energy Optimizations of Compressive Crushing". In: *XXIV International Mineral Processing Congress*, pp. 316–324, Beijing, Setembro.
- MIRANDA, R. C. DE, SILVA, K. C., VIEIRA, M. G., *et al.*, 2016, "Simulação Dinâmica para Análise de Confiabilidade de um Processo de Beneficiamento de Minério de Ferro". In: *ABM Week*, pp. 666–671, Rio de Janeiro, Setembro.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009, *Relatório Técnico 30 - Perfil de brita para construção civil*.
- MONTGOMERY, D. C., 1996, *Introduction to statistical quality control*. Wiley.
- MORRISON, R. D., RICHARDSON, J. M., 2002, *JKSimMet: A Simulator for Analysis, Optimization and Design of Comminution Circuits. Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings*. Vol. 1. New York: Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME).
- MULAR, A. L., HERBST, J. A., 1980. "Digital Simulation: An aid for mineral processing plant design". *Mineral Processing Plant Design*. 2. S.l.: SME. pp. 306–338.
- NAPIER-MUNN, T. J., MORRELL, S., MORRISON, R. D., *et al.*, 1996, *Mineral Comminution Circuits - Their Operation and Optimisation*. 1 ed. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- NETO, O. D., 2007, *Sistema para Simulação Dinâmica de Circuitos de Britagem*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo.
- SEGURA-SALAZAR, J., BARRIOS, G. P., RODRIGUEZ, V., *et al.*, 2017, "Mathematical modeling of a vertical shaft impact crusher using the Whiten model". *Minerals*

- Engineering*, v. 111, pp. 222–228.
- SODRÉ, U., 2007, *Modelos Matemáticos*. 1 ed. Universidade Estadual de Londrina.
- TAVARES, L. M., 2004, "Optimum routes for particle breakage by impact". *Powder Technology*, v. 142, pp. 81–91.
- TAVARES, L. M., 2007. "Chapter 1 - Breakage of Single Particles: Quasi-Static". *Handbook of Powder Technology*. Elsevier: pp. 3–68.
- TAVARES, L. M., 2009, "Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation". *Powder Technology*, v. 190, pp. 327–339.
- TAVARES, L. M., KING, R. P., 1998, "Single-particle fracture under impact loading". *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, pp. 1–28.
- TAVARES, L. M., NEVES, P. B. DAS, 2008, "Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing". *International Journal of Mineral Processing*, v. 87, pp. 28–41.
- VALE, J. M. DE C., 2017, *Controle Preditivo Aplicado Na Otimização De Um Processo De Concentração Típico De Flotação Em Coluna Para Aproveitamento De Minérios*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del Rei.
- WHITEN, W. J., 1972a, "A model for simulating crushing plants". *J. South African Inst. Min. Metall*, v. 72, pp. 257–264.
- WHITEN, W. J., 1972b, "The Simulation of Crushing Plants with Models Developed using Multiple Spline Regression". In: *10th International Symposium on the Application of Computer Methods in Mineral Industry*, pp. 167–161, Johannesburg, Maio.
- WHITEN, W. J., WHITE, M. E., 1979, "Modeling and simulation of high tonnage crushing plants". In: *12th International Mineral Processing Congress*, pp. 148–158, São Paulo, Setembro.
- WILLS, B. A., NAPIER-MUNN, T. J., 2006, *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7 ed. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.

Anexo

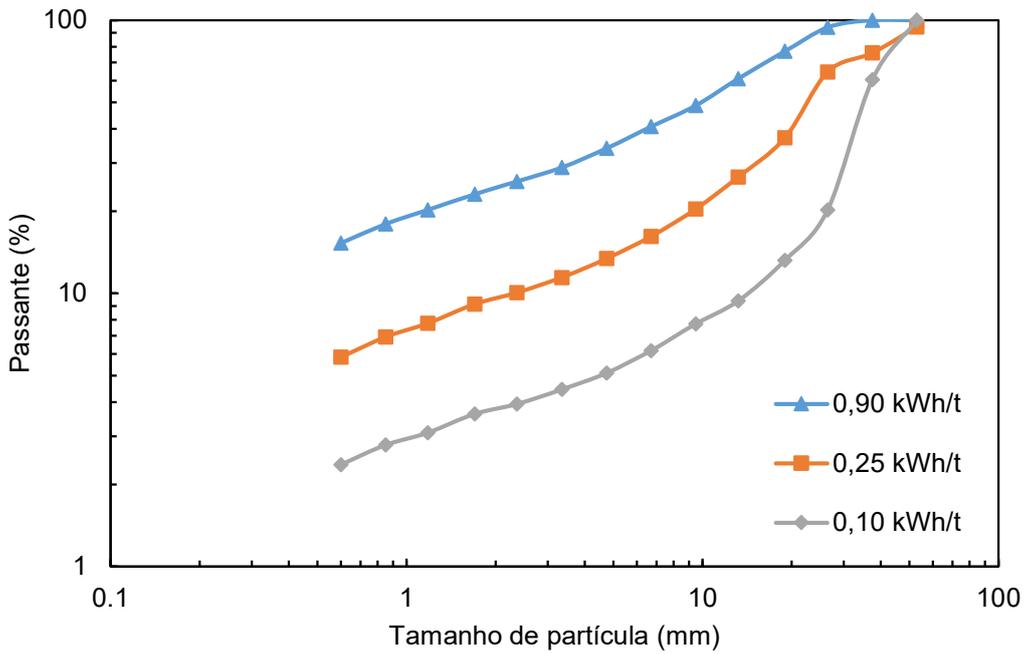


Figura i - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 63 x 53 mm

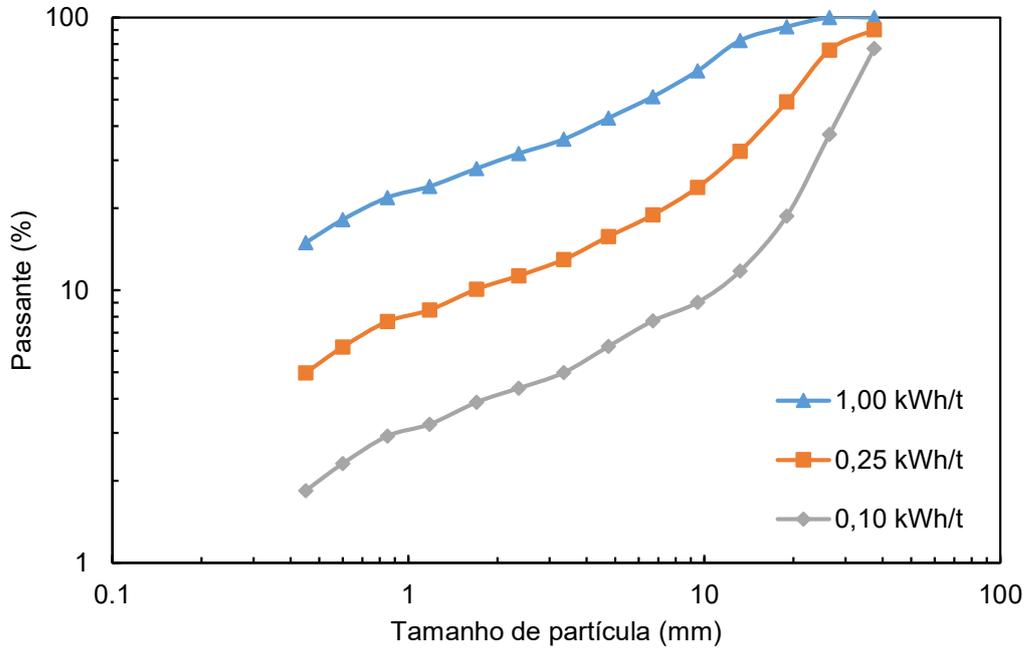


Figura ii - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 45 x 37,5 mm

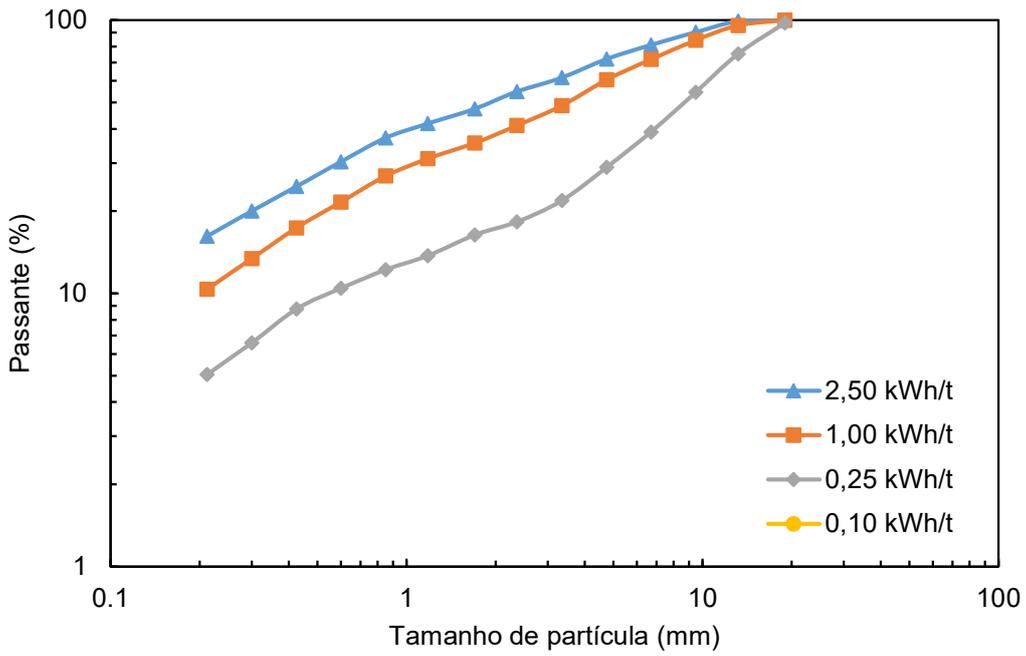


Figura iii - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 22,4 x 19 mm

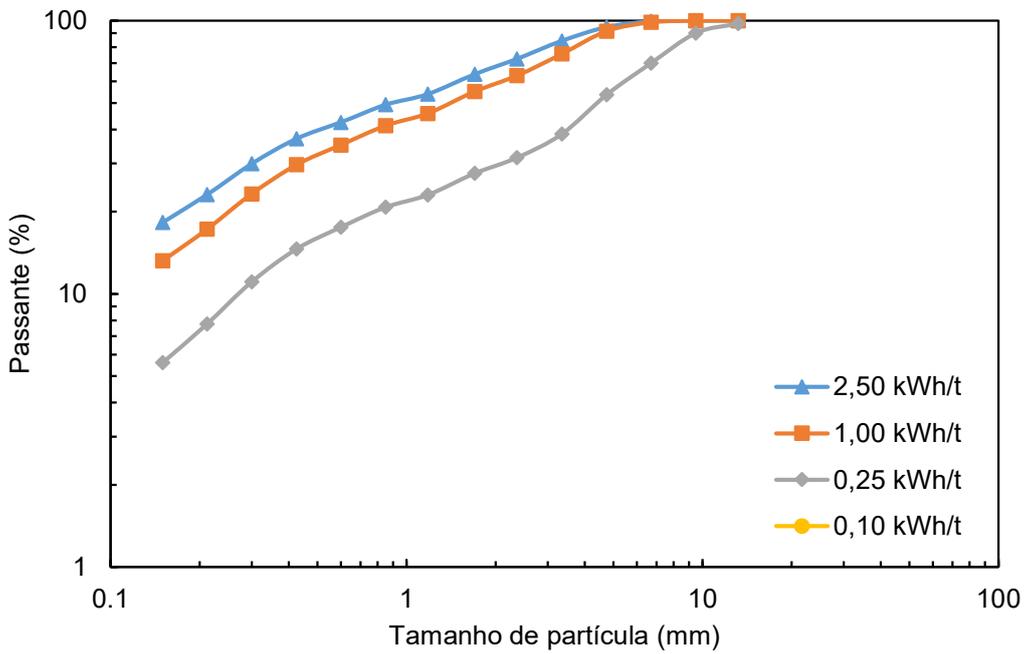


Figura iv - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 16 x 13,2 mm

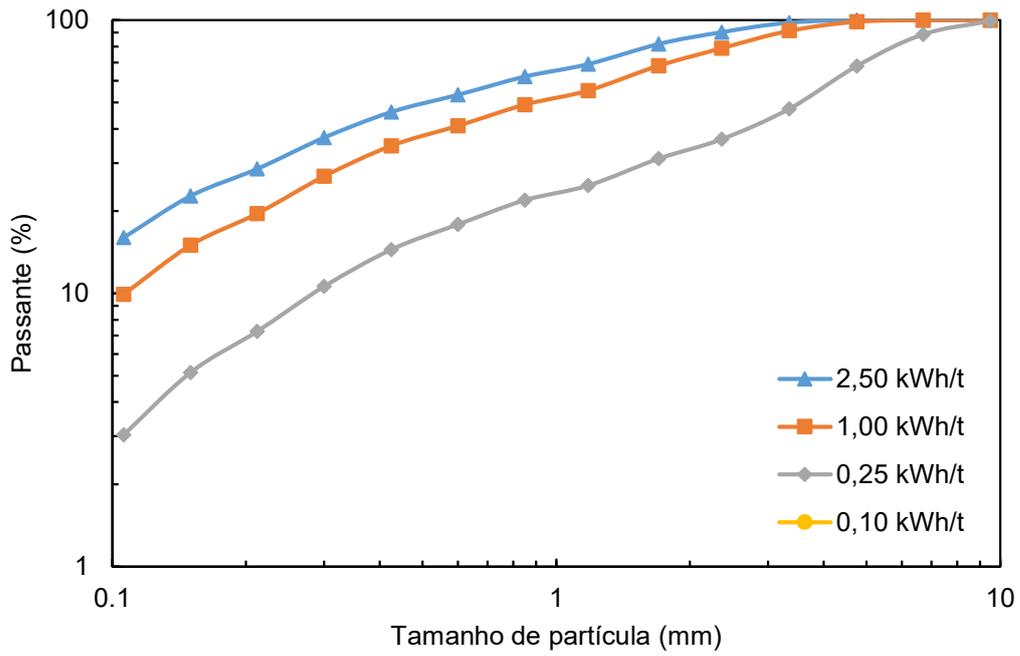


Figura v - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 11,2 x 9,5 mm

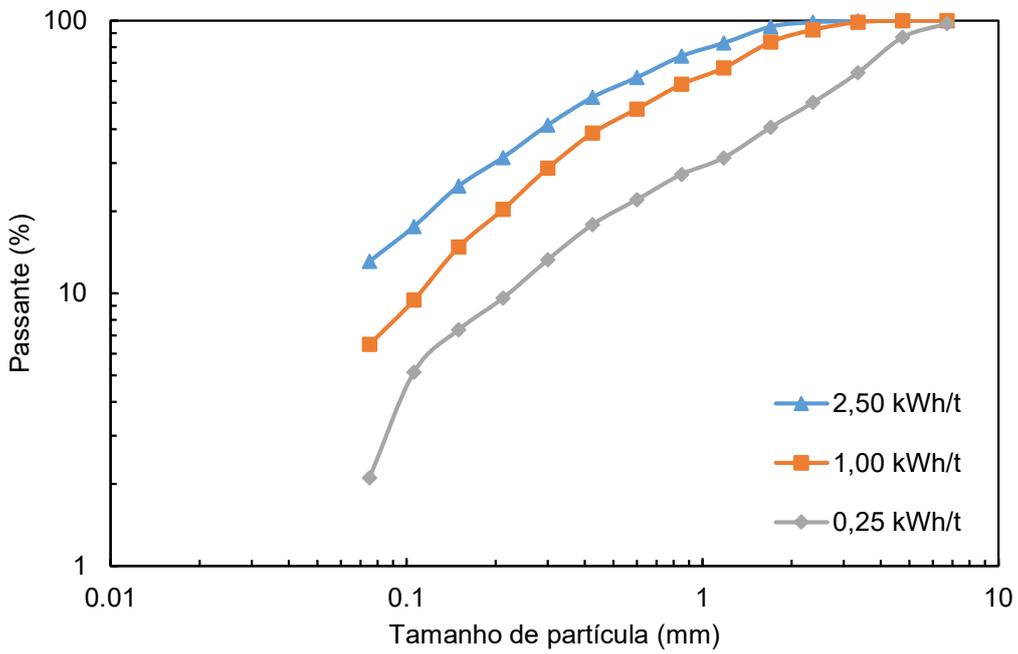


Figura vi - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 7,9 x 6,7 mm

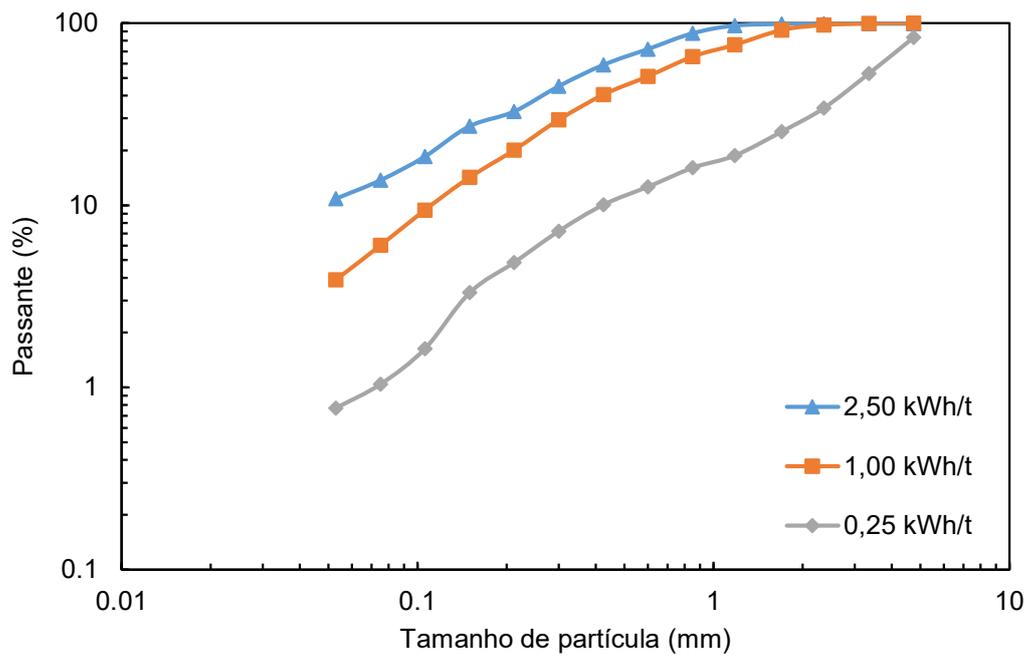


Figura vii - Análises granulométricas dos produtos de ensaio de fragmentação de partículas de 5,6 x 4,75 mm