

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE BRITADOR CÔNICO – ESTUDO DE CASO EM USINA DE SERRA LESTE*

Patrícia Gabrielly Macedo Meireles¹
Vinícius da Silva Moreira²
Thiago Antônio Melo Euzébio³

Resumo

A operação da britagem desempenha um importante papel para a indústria de mineração. Obter o desempenho ótimo a partir da planta e descobrir seus pontos de estrangulamento são alguns dos alvos. As técnicas de simulação são adequadas para esse propósito, desde que os seus modelos representem a dinâmica real do equipamento. O objetivo deste trabalho é reproduzir em simulação a dinâmica do britador Nordberg HP400 da Metso utilizado na Usina de Serra Leste localizado no município de Curionópolis(PA) e operado pela mineradora Vale. Empregando um simulador confiável no processo, poderão ser realizados inúmeros testes de controle no circuito de britagem. Para a validação do modelo foram utilizados experimentos industriais e o software Ideas. A distribuição granulométrica das partículas para duas aberturas da posição fechada foram medidas e comparadas com a da simulação. Os resultados mostraram uma boa correspondência entre os dados simulados e os experimentais. Para partículas maiores que 4 mm houve um erro máximo de 3,27% entre as curvas granulométricas.

Palavras-chave: Britador; Simulação; Modelagem.

MODELING AND SIMULATION OF CONE CRUSHER - CASE STUDY IN SERRA LESTE POWER PLANT

Abstract

The crushing operation plays an important role for the mining industry. Getting optimal performance from the plant and discovering your bottlenecks are some of the targets. Simulation techniques are suitable for this purpose, as long as their models represent the real dynamics of the equipment. The objective of this work is to simulate the dynamics of the Metso Nordberg HP400 crusher used in the Serra Leste Power Plant located in the municipality of Curionópolis (Brazil) and operated by the mining company Vale. By using a reliable simulator in the process, numerous tests of control in the crushing circuit can be carried out. For the validation of the model were used industrial experiments and the Ideas software. The granulometric distribution of the particles to two closed side setting were measured and compared with that of the simulation. The results showed a good correspondence between the simulated and the experimental data. For particles larger than 4 mm there was a maximum error of 3.27% between the curves of the product size distribution.

Keywords: Crusher; Simulation; Modeling.

¹ Engenheira de Controle e Automação, Bacharel, mestranda em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro de Minas, Mestre, Engenheiro de Minas, Vale S.A., Curionópolis, Pará, Brasil.

³ Engenheiro Eletricista, Doutor, pesquisador, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Chaves em [1], o conhecimento sobre o comportamento de um sistema que se deseja controlar, pode-se dar através de duas abordagens: a clássica e a modelagem matemática. A abordagem clássica analisa quantitativamente ou qualitativamente a resposta do processo real a uma entrada padrão. Já a abordagem matemática consiste na obtenção de modelos que descrevem uma relação entre as entradas e as saídas de um processo através de equações lineares, ou seja, considera-se o sistema como linear e invariante no tempo.

No campo do processamento mineral há grandes dificuldades para se desenvolver modelos. Primeiro devido as suas operações unitárias serem complexas e a maioria apresentarem características únicas. Segundo devido à grande parte dos processos serem não lineares e variantes no tempo. Isso faz com que técnicas de modelagem matemática convencionais tenham aplicações limitadas para sistemas particulares [1, 2]. Não é também uma tarefa fácil a construção de modelos quantitativos para essas operações complexas, por acontecer em alguns casos o mau entendimento dos seus princípios fundamentais [2].

Uma das operações complexas, que desempenha um papel importante para a indústria de mineração, é a britagem. Essa operação consiste na redução de tamanhos de partículas minerais e sofre a exigência de evitar a geração de quantidade excessiva de finos e de controlar o tamanho máximo dos produtos [2, 3]. Antes que o tamanho desejado seja atendido, o material de alimentação sofre de dois a quatro estágios de britagem que formam um circuito [3].

A britagem ocorre na cavidade chamada câmara que se forma entre um manto cônico e côncavo [4], Figura 1. A distância entre o côncavo e o manto, medido na parte mais estreita do equipamento, é chamada de Abertura da Posição Fechada (APF). A distância mais estreita é normalmente na saída da câmara de britagem. A APF é ajustada e controlada de forma diferente, dependendo do tipo de britador cônico. Este é o parâmetro de controle mais usado para ajustar o produto do britador [5].



Figura 1. Princípio de um britador cônico

Para analisar e descrever as operações básicas de um britador, estudos recentes, como em [4], aplicam o princípio da divisão do equipamento em zonas. Cada zona é considerada como um estágio único que tem entrada e saída, e em seu interior as partículas sofrem as ações de quebra, seleção e classificação. Pode-se dizer, no geral, que o desempenho dos britadores é a combinação e repetição dessas ações. [4]

A função de quebra representa a proporção em massa de partículas que mudam para a próxima zona após a quebra. A seleção representa a probabilidade de quebra de uma partícula. E a classificação representa a proporção do material que é

impedido de se mover para a próxima zona [4]. Essas ações são influenciadas tanto pelo tamanho, quanto pela composição das partículas, desempenhando assim, papéis importantes nos modelos [2].

Para modelos não lineares e que não são passíveis de soluções matemáticas diretas, mesmo com o uso de calculadoras ou planilhas, King em [2] faz referência ao uso de técnicas de simulação para resolver esses problemas complexos sem o gasto de grandes recursos. Ainda segundo King em [6] um bom simulador assegura que as especificações de projeto serão satisfeitas sob todas as condições operacionais requeridas, dimensiona as unidades corretamente e otimiza a operação da planta.

Com isso, este trabalho tem como objetivo validar um britador no software Ideas, de modo que sua dinâmica se assemelhe ao britador Metso HP400 utilizado na Usina de Serra Leste localizado no município de Curionópolis(PA) e operado pela mineradora multinacional Vale. Para que se alcançasse o objetivo, foi realizado um experimento industrial para medirem laboratório a distribuição granulométrica das partículas para dois valores de APF distintos.

1.1 Revisão de Literatura

Quist et al em [7] utilizaram o método de elementos discretos (DEM) e experimentos em escala industrial para fazer a modelagem de um britador cônico Svedala H6000. As partículas foram modeladas empregando o Modelo de Partículas Interligadas (BPM). O autor utilizou para a validação do seu modelo dois valores de APF diferentes. Os resultados de [7] mostraram uma correspondência relativamente boa entre dados simulados e experimentais, porém segundo ele, seria necessário mais trabalho para identificar e direcionar as fontes de variação observada.

Neves et al em [8] também utilizaram a variação da APF para a validação do modelo. Para validar, utilizou-se o simulador USIM-PAC para modelar dois britadores, um terciário do tipo H3000 e outro quaternário do tipo H4000. As funções de classificação e de quebra do produto que foram utilizados por [8] serão os mesmos utilizados neste trabalho. As curvas das distribuições acumuladas das partículas dos britadores reais obtiveram excelente correspondência em relação aos simulados. Segundo o autor, houve desvios inferiores a 5% do balanço das massas.

Há outros enfoques para realizar a validação do equipamento de cominuição. Outra forma seria através da mudança da velocidade do excêntrico. Johansson et al em [9] utilizaram o método de elementos discretos (DEM) para fazer a modelagem de um britador cônico Morgardshammar B90. As partículas foram modeladas empregando o Modelo de Partículas Interligadas (BPM). Os autores fizeram duas mudanças do valor da velocidade do excêntrico para validação do modelo. No entanto, os resultados mostraram para apenas um caso uma correspondência relativamente boa em termos de distribuição de tamanho de produto e fluxo de massa.

Há raros trabalhos na literatura que utilizaram o mesmo enfoque deste e não se encontrou nenhum utilizando o software Ideas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Para que o objetivo do trabalho fosse alcançado, foi necessário dividi-lo em quatro etapas. Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de entender

algumas questões como o funcionamento do equipamento, os seus problemas de operação, as formas de controle para assegurar a distribuição granulométrica de saída desejada e etc. Nesta etapa do trabalho, as informações necessárias foram extraídas de livros, como por exemplo, do [1] e do [2], e materiais didáticos sobre o tema.

Após o estudo inicial, foi realizada em campo, na Usina de Serra Leste, localizada no estado do Pará, a coleta de dados necessária para fazer a reprodução da dinâmica do britador cônico Nordberg HP400 da Metso no simulador. Nesta segunda etapa do projeto, um dos pontos consistiu em aferir a distribuição granulométrica de alimentação do britador. Posteriormente, fez-se a regulagem do britador através da abertura na posição fechada (APF) de 38 mm e após a alimentação do equipamento, avaliou-se em laboratório a distribuição granulométrica de saída do produto, Figura 2. Esses mesmos procedimentos foram também feitos para a APF de 41 mm, Figura 3.

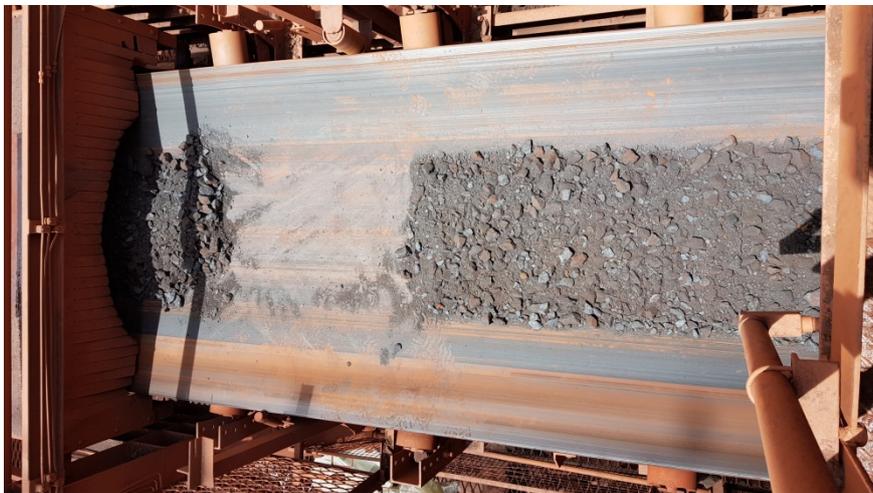


Figura 2. Distribuição granulométrica de saída do produto para APF de 38 mm



Figura 3. Distribuição granulométrica de saída do produto para APF de 41 mm

Os dados coletados em campo da distribuição granulométrica acumulada das partículas estão organizados na Tabela 1.

Tabela 1. % Passante acumulada das partículas

(mm)	Alimentação	APF = 38mm	APF = 41mm
300,00	100,00	100,00	100,00
250,00	100,00	100,00	100,00
150,00	94,89	100,00	100,00
100,00	68,34	100,00	100,00
75,00	53,94	95,31	91,91
63,00	43,26	90,77	86,41
50,00	28,46	82,92	77,25
37,50	11,21	70,05	64,64
31,50	9,59	60,78	56,04
25,00	7,98	52,02	47,90
19,00	6,95	43,41	39,63
16,00	6,40	39,02	35,51
12,50	5,75	34,13	31,09
10,00	5,30	30,28	28,21
8,00	4,98	27,44	25,34
6,30	4,58	24,57	22,72
4,00	4,01	20,40	18,42
2,00	3,37	15,32	13,88
1,00	2,85	11,96	11,04
0,50	2,34	9,41	8,84
0,25	1,84	7,56	7,15
0,15	1,42	5,90	5,64

A vazão de saída do produto britado também foi medida para cada uma das aberturas mencionadas. Para a APF de 38 mm e 41 mm o valor encontrado foi respectivamente, 986 t/h e 998 t/h.

Por meio do Catálogo - Britador cônico Nordberg® Série HP™, obtiveram-se outras informações importantes para a modelagem, como os valores da capacidade do equipamento, sua potência e seu diâmetro.

A terceira fase do projeto compreendeu na implementação do circuito de britagem no software Ideas, desenvolvido pela empresa Andritz. Foram inseridos no *worksheet* do software objetos para representar os componentes da pousa de alimentação real, bem como sua distribuição granulométrica e sua porcentagem mássica. Os componentes adicionados foram Hematita e água. Inseriu-se também um transmissor para que pudesse visualizar as distribuições do tamanho das partículas no ponto de fluxo de interesse.

Posteriormente, acrescentou-se um objeto denominado *Crusher* que teve como função modelar uma operação de cominuição básica na qual a distribuição do tamanho de partículas do fluxo de alimentação é reduzida enquanto se conserva a massa. Nas propriedades de configuração do *Crusher* os primeiros dados inseridos foram os valores da potência do britador HP400 e o seu diâmetro, que são respectivamente, 315 kW, 1320 m.

Neste objeto também foram configurados os parâmetros da função de classificação e de quebra do produto, que são os dois subprocessos do processo de redução de tamanho de sólidos. A probabilidade de classificação de partículas é uma função do tamanho de partícula d_i e no simulador é dada pela seguinte função não linear de Whiten [10] (Equação 1-3):

$$C(d_i) = 0,0 \text{ para } d_i < K_1 \quad (1),$$

$$C(d_i) = 1,0 - \left(\frac{K_2 - d_i}{K_2 - K_1} \right)^{K_3} \quad (2),$$

$$C(d_i) = 1,0 \text{ para } d_i > K_2 \quad (3).$$

Essa função significa dizer que as partículas muito finas, de tamanho inferior a K_1 , não serão classificadas para a quebra, já partículas muito grossas, de tamanho superior a K_2 , serão classificadas, e partículas entre K_1 e K_2 poderão ou não ser classificadas. Os parâmetros de K_1 e K_2 dependem das dimensões do equipamento, do seu rendimento, do tamanho da alimentação, tipo de revestimento e vários outros fatores. No simulador, utilizam-se as equações dadas por Napier-Munn para representar esses parâmetros [10] (Equação 4-5):

$$K_1 = A_0 + (A_1 * APF) - (A_2 * APF) + (A_3 * F80) + (A_4 * LLEN) \quad (4)$$

$$K_2 = B_0 + (B_1 * APF) - (B_2 * APF) + (B_3 * F80) + (B_4 * LLEN) + (B_5 * ET) \quad (5)$$

Onde:

APF = abertura da posição fechada (mm);

TPM = taxa de transferência (t/h);

F80 = d80 da alimentação;

LLEN = comprimento da superfície do manto (mm);

ET = deslocamento do excêntrico (mm).

As variáveis $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, B_0, B_1, B_2, B_3, B_4$ e B_5 são parâmetros de ajuste do modelo. Para estimativas iniciais foram configurados K_1, K_2 e K_3 com os valores recomendados por Napier-Munn, sendo respectivamente iguais à APF, ao tamanho da maior partícula do produto e a 2,3 [10].

O subprocesso de quebra é dado pela seguinte função proposta por King [10] (Equação 6):

$$B(x,y) = K \left(\frac{x}{y} \right)^{n_1} - (1 - K) \left(\frac{x}{y} \right)^{n_2} \quad (6)$$

Onde $B(x; y)$ dá a fração das partículas descendentes que são menores que o tamanho x originado da quebra de uma única partícula do tamanho y [2]. Para estimativas iniciais foram configurados n_1, n_2 e K com os valores recomendados por Atta em [4], sendo então respectivamente iguais a 0,45, 3,2 e a 0,3.

O fluxograma do processo da britagem utilizando as funções de Whiten e King está ilustrado abaixo, Figura 4.

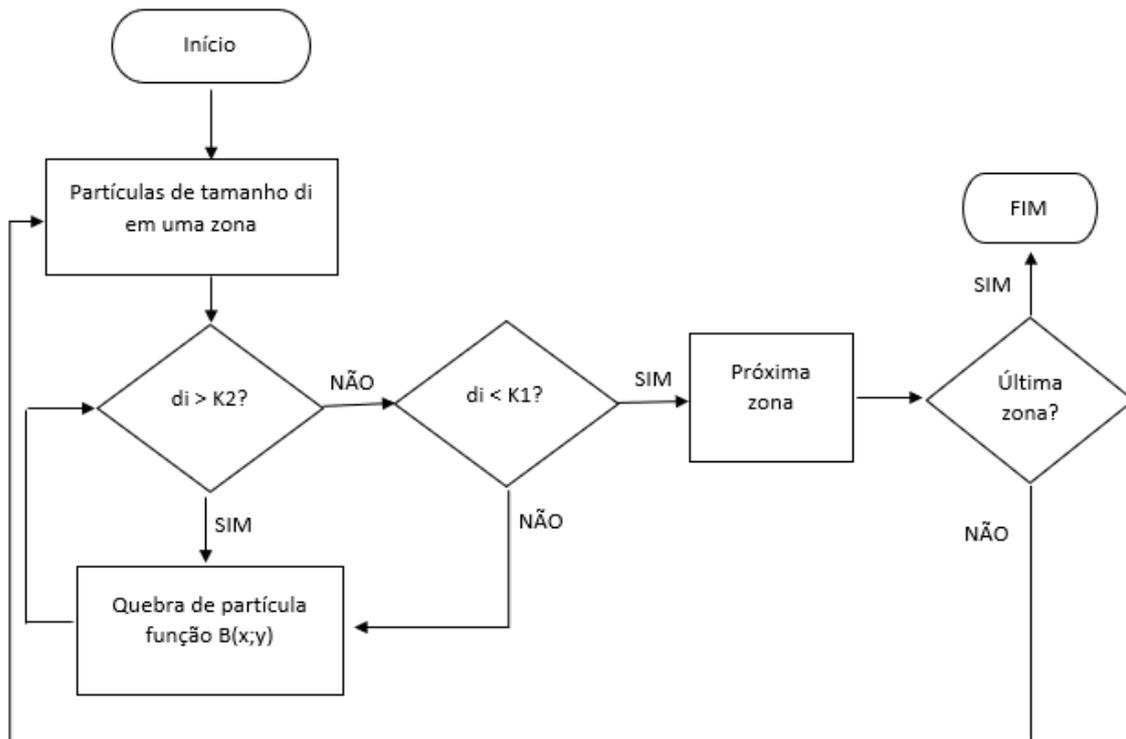


Figura 4. Fluxograma do processo de britagem

Após a configuração dos objetos necessários para executar a simulação, as conexões entre eles foram arranjadas da seguinte forma, Figura5:

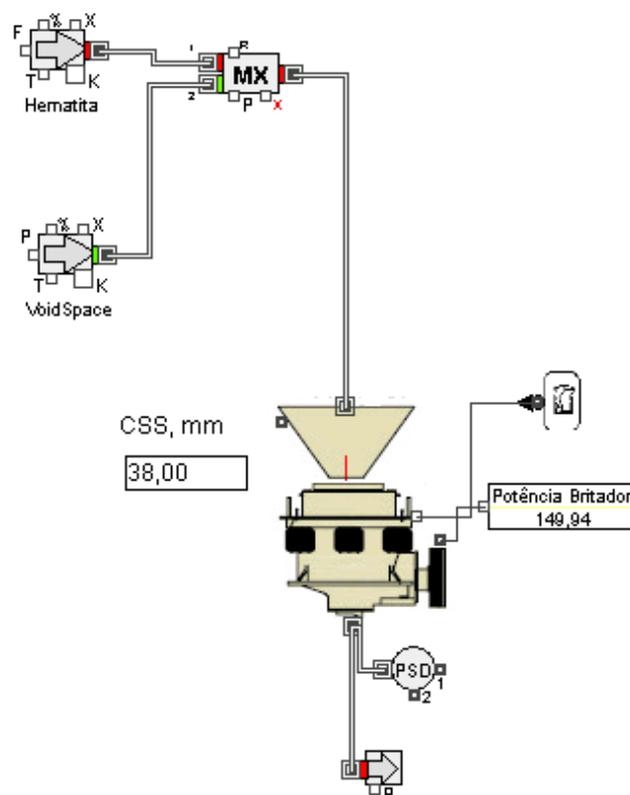


Figura5. Circuito de britagem montado no software Ideas

Na quarta fase do projeto, que consistiu na validação do modelo, foi necessário fazer sucessivos ajustes nos valores dos parâmetros da função de classificação e de quebra para que as distribuições granulométricas das partículas no britador real coincidisse com o do britador simulado. Foi preciso entender a competência de cada parâmetro e consequência que sua modificação causaria no desempenho da britagem, como por exemplo a geração excessiva de finos, ou a geração de um material pouco britado.

2.2 Resultados e Discussão

Devido ao minério não ter sido caracterizado, foi realizado um retro cálculo dos parâmetros de quebra, ou seja, foram utilizados dados amostrados da entrada e da saída do britador para fazer a calibração.

Através da Figura 6 podem ser comparadas as curvas da distribuição de tamanho das partículas acumuladas geradas pelo britador real e pelo britador simulado com APF de 38 mm e de 41 mm. Após entender a competência de cada parâmetro e de realizar as sucessivas alterações dos valores para que se achasse a melhor curva que reproduzisse a dinâmica do Nordberg HP400, os valores encontrados foram: $A_0 = 0$, $A_1 = 0,34$, $A_2 = 0,009$, $A_3 = 0$, $A_4 = 0$, $B_0 = 0$, $B_1 = 8,6$, $B_2 = 0,03$, $B_3 = 0$, $B_4 = 0$, $B_5 = 0$, $K = 0,2$, $n_1 = 0,3$, $n_2 = 1,30$.

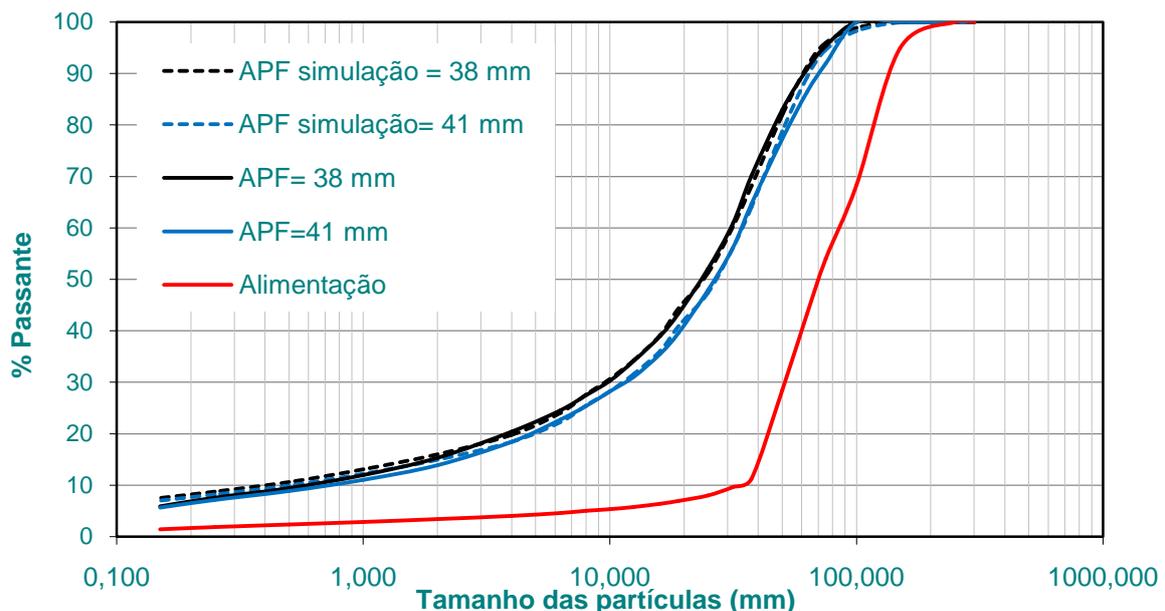


Figura 6. Curvas da distribuição do tamanho das partículas acumuladas

A distribuição normal acumulada das partículas de tamanho acima de 4 mm apresentou correspondência aos dados experimentais para os dois valores das aberturas acima, Figura 7. Nesta faixa houve um erro máximo de 3,05% entre as curvas granulométricas para a APF de 38 mm e de 3,27% entre as curvas granulométricas para a APF de 41 mm.

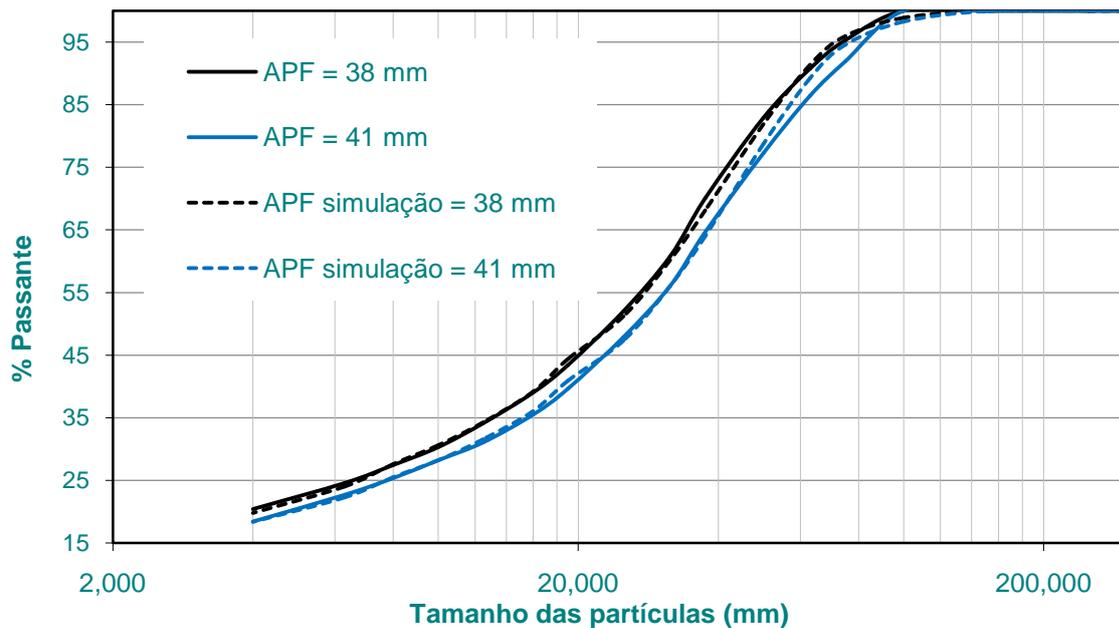


Figura 7. Curvas da distribuição do tamanho das partículas acumuladas maiores que 4 mm

Em relação às partículas muito finas, menores que 4 mm, as curvas da granulometria real e simulada apresentaram discrepâncias para os dois valores das aberturas acima, Figura 8.

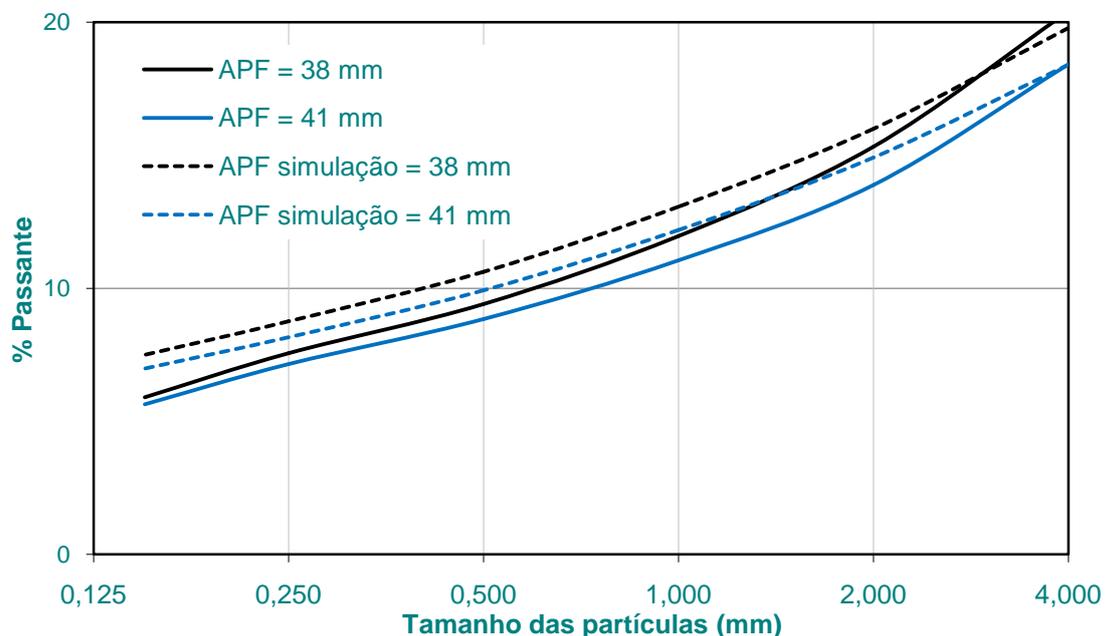


Figura 8. Curvas da distribuição do tamanho das partículas acumuladas menores que 4 mm

Apesar das discrepâncias, é visto que as tendências das curvas simuladas estão na direção correta, ou seja, em nenhum ponto da curva o valor da distribuição acumulada para a APF de 38 mm é menor que a de 41 mm.

A vazão de saída do produto no britador também foi comparada a da simulação. Para a APF de 38 mm a vazão no britador real foi de 986 t/h e do britador na

simulação foi de 937,68 t/h. Para a APF de 41 mm o valor do real foi de 998 t/h e da simulação foi de 947,13 t/h. Apesar dos resultados não coincidirem, eles foram coerentes, visto que quanto maior a APF maior é o fluxo que sai do equipamento. Outra justificativa é o fato das razões das vazões do produto real e simulado terem apresentado valor semelhante para as mesmas condições, Tabela 2.

Tabela 2. Razão das vazões do produto real e simulado

	Vazão para a APF = 41 mm (1)	Vazão para a APF simulada = 41 mm (2)	Razão (1)/(2)= 1,05
Vazão para a APF = 38 mm (3)	Razão (1)/(3)= 1,01		
Vazão para a APF simulada = 38 mm (4)		Razão (2)/(4)=1,01	
Razão (3)/(4)= 1,05			

No entanto, para simulações fora das condições amostradas deve-se considerar a possibilidade de haver desvios significativos.

3 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que é possível reproduzir a dinâmica de um equipamento complexo como o britador através de software de simulação. Os resultados mostraram uma boa correspondência entre as distribuições do tamanho das partículas acumuladas em quase toda a curva da simulação e do experimento para as duas aberturas da posição fechada testadas. Para partículas maiores que 4 mm houve um erro máximo de 3,05% entre as curvas granulométricas para a APF de 38 mm e de 3,27% entre as curvas granulométricas para a APF de 41 mm. Apesar de ter havido discrepância entre as curvas real e simulada, para partículas menores que 4 mm, não considerou isto como problema, devido a essas partículas não serem carga circulante. Houve também concordância nos valores da vazão de saída do produto britado considerando as mesmas condições.

REFERÊNCIAS

- 1 Chaves AP, Peres AEC. Britagem, peneiramento e moagem. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2012.
- 2 King RP. Modeling and Simulation of Mineral Processing System. 2. ed. Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc; 2012.
- 3 Itävuo P, Vikko M, Jaatinen A, Viilo K. Dynamic modeling and simulation of cone crushing circuits. Elsevier. 2013 [acesso em 01 jun. 2018]; 43-44:29-35. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268751200270>.
- 4 Atta KT, Johansson A, Gustafsson T. Control oriented modeling of flow and size distribution in cone crusher. Elsevier. 2013 [acesso em 23 abr. 2018]; 56;81-90. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687513003567>.

- 5 Hulthén E. Real – Time Optimization of Cone Crushers. Göteborg. Thesis [Doctor of Philosophy in Product and Production Development] – Chalmers University of Technology; 2010.
- 6 King RP, Schneider CL. Simulação de Plantas de Processamento Mineral: Princípios básicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC; 2016.
- 7 Quist J, Evertsson CM. Cone Crusher Modelling and Simulation using DEM. Elsevier. 2016 [acesso em 28 maio 2018]; 85;92-105. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687515301230>.
- 8 Neves PB, Tavares LMM. Racionalização do Uso da Energia na Britagem com Auxílio de Simulação Computacional. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. 2004 [acesso em 28 maio 2018]; 1(2);53-58. Disponível em: <http://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/tmm.00102012>.
- 9 Johansson M, Quist J, Evertsson M, Hulthén E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. Elsevier. 2017 [acesso em 01 jun 2018]; 103-104;93-101. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687516303235>.
- 10 IDEAS Help. Version v6.0.0. Andritz Inc; 2014.