

Aplicação de modelos matemáticos estudados na graduação em engenharia para estimativa da capacidade de um britador de mandíbulas

Application of mathematical models studied in engineering graduation to estimate the capacity of a jaw crusher

Aplicación de modelos matemáticos estudiantes en el curso de ingeniería para estimar la capacidad de una trituradora mandibina

Recebido: 25/06/2024 | Revisado: 01/07/2024 | Aceito: 30/07/2024 | Publicado: 16/08/2024

Dercílio Marcelo Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5232-9586>

Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

E-mail: marcelobiobrasil@gmail.com

Moilton Ribeiro Franco Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0296-8221>

Universidade Federal de Uberlândia-FEQUI, Brasil

E-mail: moilton@ufu.br

Resumo

Uma confiável previsão da capacidade de britagem, aliada a escolha propriamente dita do britador ideal para uma determinada aplicação, seja na fase de projeto quanto na fase de operação, não é uma tarefa fácil e exige muito conhecimento técnico e análise de pontos críticos do processo. Neste trabalho serão discutidos alguns modelos matemáticos que permitem estimar a capacidade de britadores de mandíbula. A influência das características físicas do material a ser processado e algumas variáveis de projeto de britadores serão avaliadas para uma possível definição de um modelo adequado para dimensionamento e escolha destes equipamentos.

Palavras-chave: Modelos matemático; Estimativa de capacidade; Britagem.

Abstract

A reliable forecast of crushing capacity, combined with the choice of the ideal crusher for a given application, whether in the design phase or in the operation phase, is not an easy task and requires a lot of technical knowledge and analysis of critical points of the process. In this work, some mathematical models which allow estimating the capacity of jaw crushers will be discussed. The influence of the

physical properties of the material to be processed and some crusher design variables will be evaluated for a possible definition of a suitable model for sizing and choosing this equipment.

Keywords: Mathematical models. Capacity estimation. Crushing.

Resumen

Una predicción fiable de la capacidad de trituración, combinada con la elección real de la trituradora ideal para una aplicación determinada, ya sea en la fase de diseño o en la fase de operación, no es una tarea fácil y requiere mucho conocimiento técnico y análisis de los puntos críticos en el proceso. En este trabajo se discutirán algunos modelos matemáticos que permiten estimar la capacidad de trituradoras de mandíbulas. Se evaluará la influencia de las características físicas del material a procesar y algunas variables de diseño de la trituradora para una posible definición de un modelo adecuado para el dimensionamiento y elección de este equipo.

Palabras clave: Modelos matemáticos; Estimativa de capacidad; trituración.

Introdução

Adquirir equipamentos que irão compor a estrutura de produção fabril é uma das tarefas de um profissional técnico da área de ciências exatas. A previsão da capacidade desse equipamento e seu consumo de energia nem sempre é uma missão suave, isso pôde ser observado, também, por Varela et al, (2011). Uma fábrica com todas as suas instalações em funcionamento não é uma garantia que uma situação inusitada não deva ser enfrentada pelo pessoal técnico que a administra.

Um assunto típico de cursos de graduação nas áreas de Química, Engenharia, e outras correlatas é o projeto de uma instalação que promova a redução de tamanho de partículas quer seja por britagem ou moagem. Infelizmente, por motivos até de carga horária o futuro profissional deixa de enfrentar a solução de situações que podem vislumbrar na sua carreira.

Uma das atividades profissionais de um engenheiro está na compra de equipamentos para uma nova unidade a ser implantada na fábrica ou a substituição de algum que esteja obsoleto. Nesse momento, sabendo qual equipamento deseja comprar, o profissional recorre às cartas de especificação dos fabricantes que estão disponíveis. Estas cartas são verdadeiros manuais em que o engenheiro deve buscar o modelo que mais se aproxime das especificações (capacidade, vazão, densidade...) que ele deseja. No caso de britadores, visando completar a especificação de forma a se poder buscar um modelo de equipamento que o atenda, modelos matemáticos podem auxiliar de forma a compra do equipamento seja mais segura.

Esse trabalho apresenta uma situação em que o profissional das ciências exatas necessita especificar um equipamento em termos de capacidade de processamento de material e dessa forma, busca na literatura modelos que possam suportar e assegurar uma compra segura. Observa-se que apesar de ser um assunto antigo, a determinação da capacidade de um britador para cominuir certo material deve ser realizada com mais critério quando a base de escolha for os modelos disponíveis na literatura.

Apresentação do problema

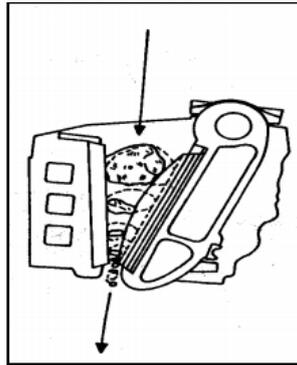
Indústrias que processam diferentes minerais extraídos de minas industriais e que são transformados em produtos e comercializados em nossa sociedade são observadas que todos esses materiais passam por uma ou mais etapas de cominuição. Basicamente, a cominuição pode ser definida como o processo de redução granulométrica de um material (WANG et al., 2022).

Existem duas grandes áreas de cominuição, a saber, a britagem e a moagem. Os respectivos equipamentos utilizados nestes processos são britadores e moinhos.

A britagem tem por objetivo a geração de um produto ou preparação e adequação do mesmo a uma etapa posterior, seja ela uma cominuição, classificação ou concentração. A seguir são apresentados os principais critérios para avaliação do processo de britagem, tipos de equipamentos disponíveis no mercado (BACHERA *et al.* 2022) e suas características, e por fim, recomendações de equipamentos segundo a aplicação de processo. (FARIA *et al.*, 2021; VARELA *et al.*, 2011)

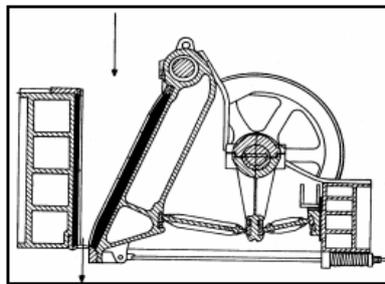
Os britadores de mandíbulas são classificados em dois tipos, baseando-se no mecanismo de acionamento da mandíbula móvel. Assim, tem-se britadores de um eixo (Figura 1) e dois eixos - tipo Blake (Figura 2). Nos britadores de dois eixos, a mandíbula móvel tem movimento pendular (Figura 3), enquanto os de um eixo, tem movimento elíptico. Em termos de custos de capital, britadores de dois eixos são cerca de 50% mais elevados que os de um eixo, sendo indicados para materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação. A especificação dos britadores de mandíbulas é dada pelas dimensões de abertura da alimentação. (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

Figura 1 – Movimento dos blocos durante a fragmentação no britador de mandíbulas de um eixo (Dodge)



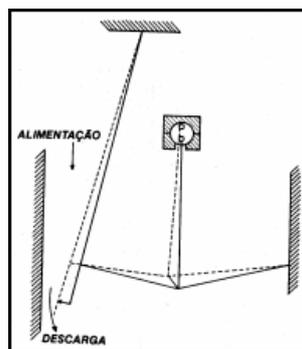
Fonte: Figueira et al. (2010)

Figura 2 – Britador de mandíbulas de dois eixos (Blake)



Fonte: Figueira et al. (2010)

Figura 3 – Esquema do movimento do britador de mandíbulas de dois eixos (Blake)



Fonte: Figueira et al. (2010)

Nesse trabalho foi solicitada aos estudantes a especificação de um equipamento para redução do tamanho de partícula denominado britador. A vazão volumétrica de material que deveria ser processado era de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ de minério que vem da mina, com um *top size* de 30 polegadas (0,76 m) e 25% menor que 2,5 polegadas. Sabe-se que o WI (Work Index) do minério é $\text{WI} = 10 \text{ kWh/tonelada curta}$. A densidade aparente do minério é $1,6 \text{ t/m}^3$, o teor de argila é maior que 5% e a umidade 10%.

Em algum momento, na rotina do setor fabril em uma mineradora, pode-se observar uma mudança nas características físico-químicas do material da mina ou talvez seja preciso adquirir um novo britador para suprir as necessidades de uma dada demanda. Dessa forma, faz-se necessário a leitura de tabelas de fabricantes (METSO MINERALS, 2005) que levará o profissional a escolher um modelo de britador de mandíbulas que seja mais adequado. Se considerarmos que a vazão volumétrica de material que deveria ser processado seria de 70 m³/h de minério que vem da mina, deveria ser escolhido e adquirido o modelo 8050C que tem capacidade na faixa 65-88 m³/h de produto. Por outro lado, verificou-se que o fabricante, em seu manual, propõe um modelo para estimar a capacidade de processamento para esse britador que resulta em 57,51 m³/h. Os cálculos estão ilustrados a seguir.

Utilizando a equação 1 e os dados da Tabela 1. Obtemos o valor de capacidade do britador abaixo:

$$Q = Q_t \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \quad (1)$$

Em que:

Q_t = capacidade de tabela;

A = densidade aparente dos materiais britados;

B = fator dependente do WI;

C = fator de tamanho de alimentação;

D = fator de umidade.

Tabela 1 – Estimativa da capacidade de britagem pelo modelo do **fabricante** para o britador 8050C.

Q _t	m ³ /h	70
Top size	M	0,76
< 25%	M	0,0635
Teor de argila	%	5
Umidade	%	10
WI	kWh/sht	10
Densidade		1,6
Fator A		1
Fator B		1,15
Fator C		0,94
Fator D		0,76
Q	m ³ /h	57,51

Fonte: Os autores.

Neste trabalho, testou-se outros valores de densidade e Work Index para avaliar a capacidade do britador visando verificar sua abrangência na estimativa dessa dimensão a fim de se providenciar suporte para a compra do britador. No caso desses cálculos de capacidade em função da densidade e *Work Index* para diferentes materiais, utilizou-se o Excel, obteve-se a Tabela 2 que se segue:

Tabela 2 - Resultados de vazão para o britador 8050C de acordo com a variação de grandezas de projeto.

Variável	DENS(t/m ³)	Fator		Q(m ³ /h)
A1	1,2	A	0,75	43,13
A2	2,3	A	1,44	82,81
	Umidade			
B1	7%	D	0,88	66,58
B2	13%	D	0,7	52,99
	WI (kWh/sht)			
Quartzito 1	8	B	1,2025	60,13
Magnesita 1	10	B	1,15	57,50
Quartzito 2	12,3	B	1,075	53,75
Quartzo	14,4	B	1,01	50,51
Magnesita 2	15,9	B	0,9693	48,47
Quartzito 3	19	B	0,877	43,85
Magnesita 3	22	B	0,8	40,01

Fonte: Os autores.

Legenda: A1 Densidade de 1,2; A2 Densidade de 2,3; B1 Umidade de 7%; B2 Umidade de 13%; C1 Quartzo; C2 Xisto Oleoso e C3 Quartzito.

A estimativa da capacidade do britador pode ser conferida na Tabela 2 e nota-se que está muito aquém da faixa de capacidade especificada pelo fabricante, em sua carta de consulta, para a empresa consumidora. Dessa forma, dada a insegurança de previsão feita pelo modelo empregado pelo fabricante, optou-se por buscar outros modelos que pudessem auxiliar na solução desse impasse.

Metodologia

Modelos de cálculo de um britador de mandíbula

Antes de se abordar a apresentação dos modelos para dimensionar britadores de mandíbula, é necessário confirmar se o britador de mandíbula é o ideal para a operação solicitada pelo requerente ou

consumidor. Para isso deve-se estimar o valor de um fator denominado X, pela equação 2. Se o valor do mesmo for menor do que 0,115, o britador de mandíbula será a melhor escolha.

$$X = \frac{\text{vazão } (\frac{t}{h})}{(\text{gape em polegada})^2} \quad (2)$$

Visando estimar a dimensão da variável nomeada por gape, será utilizada a equação 3 que se segue,

$$\text{Gape} = \text{TMPA}/0,8 \quad (3)$$

No caso desse britador em que esse estudo está se baseando, encontramos um valor de gape igual a 37,4 in (pois o tamanho máximo da partícula alimentada (TMPA) é de 0,76 m) e assim o valor de X igual a 0,08, o que possibilita a utilização do britador de mandíbula. Na sequência, serão apresentados, e posteriormente, serão empregados alguns dos diferentes modelos para o cálculo da capacidade de britadores que se encontram disponíveis na literatura.

Modelo de Taggart

Desenvolvido em 1951 por Taggart, o modelo é regido pela equação 4

$$C = 0,0845 * L * S \quad (4)$$

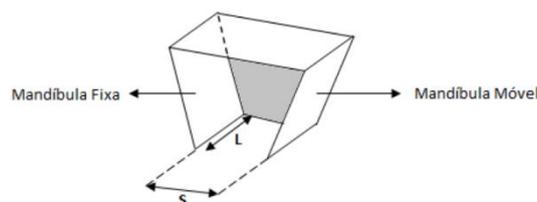
Onde:

C = Capacidade em t/h;

L = comprimento da boca de alimentação paralela ao plano da mandíbula fixa (cm);

S = afastamento máximo de abertura de descarga;

Figura 4– Visão esquemática do Britador de mandíbula



Fonte: Teixeira, 2013.

Seguindo o modelo de Gupta e Yan (2008), temos as equações 5 e 6. Com elas encontramos o valor de L e S.

$$1,2 * \text{gape}(m) < L < 3 * \text{gape}(m) \quad (5)$$

$$S = 0,0502 * gape^{0,85} (m) \quad (6)$$

Para nosso valor de gape (0,95m), temos que $1,14 < L < 2,85$ e D igual a 0,0481 metros. Adotando o valor de L igual a 200 centímetros e S igual a 4,81 centímetros, temos que nossa capacidade é igual a 81,3 toneladas por hora.

Método de Hersam (HERSAM, 1923)

O método de Hersam descreve o volume de material expulsado em cada movimento da mandíbula móvel (Figura 10), segundo a equação 7,

$$C = 30 \left(\frac{T^2 + 2 * S * T}{G - S} \right) n * L * D * \delta * k \quad (7)$$

Onde:

C = produção horária em toneladas métricas (t/h) se D, G, S, T e L são expressas em Metros;

T = Throw ou excêntrico que pode ser calculado pela diferença entre o APA (Abertura na posição aberta) e o APF (Abertura na posição fechada) (m);

L = Largura do britador (m);

δ = Densidade aparente do material (kg/m^3);

n = revoluções por minuto;

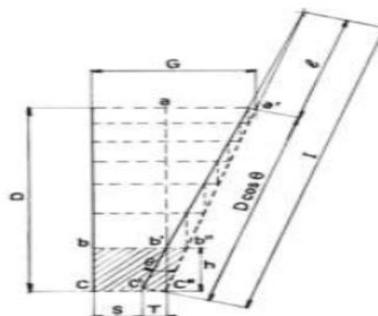
k = é o coeficiente de rendimento que Hersam propõem estabelecer é um valor médio convencional de 0,75 que segundo a literatura pode variar de 0,5 a 1;

D = Altura da mandíbula (m);

G = gape (m)

Por exemplo, se considerar: T = 0,0464 metros; S = 0,0481 metros; G = 0,95 metros (gape); n = 180 rpm; L = 2 metros; D = 1,824 metros; $\delta = 1,7 kg/m^3$; k = 0,75. Com estes valores, temos que a capacidade é de 184,3 toneladas por hora.

Figura 5 – Corte longitudinal do britador com mandíbula móvel



Fonte: Teixeira (2013)

Método de Broman

O método de Broman (BROMAN, 1984) considera a estimativa da capacidade pela seguinte equação,

$$C = L * S * T * \cot(\alpha) * k * 60 * n \quad (8)$$

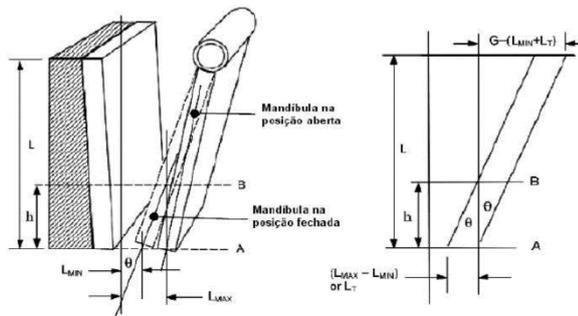
Em que : C = Capacidade (m³/h); L = é a largura da câmara de britagem em metros; K = constante do material varia entre 1,5 e 2,5; S = abertura de saída na posição aberta (APA) em metros; T = deslocamento (throw ou excêntrico) que pode ser calculado pela diferença entre a abertura na posição aberta e fechada (APA - APF) em metros; n = revoluções por minuto e α = ângulo de ataque.

Algumas considerações deverão ser feitas para a aplicação desse método. Em adição, discussões serão levantadas a respeito do fator K proposto pelo método.

Método de Rose & English (ROSE; ENGLISH,1967)

Método utilizado para determinar a capacidade dos britadores de mandíbulas considerando tempo e distância percorridos pelas partículas (Figura 6).

Figura 6 – Representação da geometria das mandíbulas



Fonte: Teixeira, 2013

Uma maneira mais simples de calcular a capacidade para este sistema, consiste em relacionar essa a baixa ou alta frequência, conforma as equações 9 e 10, respectivamente.

$$Q_s = 60 * L_t * v * L(2 * L_{min} + L_t) \left(\frac{R}{R-1}\right) \quad (9)$$

$$Q_F = 132435 * L(2 * L_{min} + L_t) \left(\frac{1}{v}\right) \quad (10)$$

Em que:

L_t = Deslocamento (m);

v = frequência (ciclos/minutos);

L = largura das chapas das mandíbulas (m);

L_{min} = Abertura de saída na posição fechada (APF em metros);

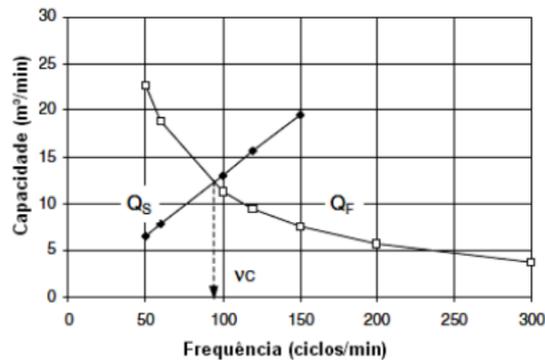
R = taxa de redução do britador (gape/abertura de saída);

Q_S = capacidade (baixa frequência) em termos de volume de material no produto por horas (m^3/h);

Q_F é a capacidade (em alta frequência) em termos de volume de material no produto por horas (m^3/h);

Uma estimativa foi realizada por Teixeira, 2013 visando encontrar o comportamento da curva da capacidade do britador segundo a variação da frequência de mandíbula. Os valores de v variam entre 50 e 300 rpm. Esse pesquisador apresentou a Figura 7 que mostra o valor de v_c que é a frequência crítica do britador.

Figura 7– Gráfico da capacidade em função da frequência do britador.



Fonte: Teixeira, 2013

Na frequência crítica, a capacidade máxima (Q_m) pode ser dada pela equação 11 a seguir.

$$Q_m = 2820 * L * \sqrt{L_T} (2 * L_{min} + L_T) * \sqrt{\left(\frac{R}{R-1}\right)} \quad (11)$$

Com os valores citados, temos que nossa capacidade máxima é de $729 m^3/h$.

Porém, a metodologia apresentada não considera características do empacotamento, distribuição granulométrica do minério a ser tratado, densidade inicial, entre outros fatores. Para esse fim, é recomendado utilizar a equação 12.

$$C_m = 2820 * W * (\sqrt{L_T} (2 * L_{min} + L_T) * \sqrt{\left(\frac{R}{R-1}\right)} * \rho_s * f(P_k) * f(\beta) * S_c * T/h \quad (12)$$

Onde:

ρ_s = densidade do minério

$f(P_k)$ = Função característica do empacotamento

$f(\beta)$ = Função da capacidade

S_c = Característica da superfície do material

E se considerarmos a velocidade dos britadores reais, devemos utilizar as equações 13 e 14.

$$C_a = Q_m * \frac{v}{v_c} \text{ para } v < v_c \quad (13)$$

$$C_a = Q_m * \frac{v_c}{v} \text{ para } v > v_c \quad (14)$$

Onde: C = Capacidade (t/h); G = gape; L_{MIN} = APF; L_T = Deslocamento/Throw;

Resultados

Neste tópico serão apresentados resultados que permitirão alguma definição a respeito do processo de se estimar a capacidade de um britador, a ser adquirido, para processar uma dada quantidade de material na confiança da previsão de um modelo que assegure a produção especificada pelo fabricante.

O caso industrial apresentado neste trabalho, bem como em trabalho anterior publicado cito o artigo de COSTA; FRANCO JUNIOR, 2021, revelou que o modelo do fabricante não é confiável, ou seja, resultados obtidos, mesmo com variações de propriedades físicas e químicas, demonstraram que há necessidade de se averiguar outras fontes da literatura.

Os quatros modelos aqui apresentados foram empregados para estimar a capacidade do britador modelo 3020C. Este modelo possui um motor com potência na faixa de 15-2- HP, trabalha na frequência de 350 RPM e possui uma capacidade de processamento de 6 a 8 m³/h de material, segundo tabela da Metso Minerals. Dessa forma, os estudos aqui apresentados foram conduzidos na verificação da estimativa dos modelos segundo a variação da frequência da mandíbula (Tabelas 1), a densidade do material (Tabela 2) e o tamanho da maior partícula alimentada (TMPA em in (polegadas)) em que os resultados estão nas Tabelas 3-8 em função de outras variáveis de projeto que são importantes na avaliação.

A avaliação do efeito da densidade do material, no desempenho dos modelos pode ser ilustrada com a Tabela 2. Nota-se que o modelo de Taggart se mostrou o mais adequado para previsão da capacidade, ademais o modelo de Hersam também apresentou boa estimativa face aos demais.

As Tabelas 3 e 4 apresentam resultados referentes ao efeito do tamanho da maior partícula alimentada ao britador. Nota-se que, mesmo para os modelos de Taggart e Hersam, que até então se mostravam adequados, existe um efeito substancial dessa dimensão na estimativa da capacidade de britagem do equipamento e que tem que ser considerado na escolha durante a fase de projeto.

A Tabela 5 exibe resultados similares aos da Tabela 4, além disso notamos que estimativas feitas considerando a frequência da mandíbula num valor igual ao do fabricante, tendem a prover melhores resultados, mesmo para o modelo de Rose & English que até então carece de mais atenção para ser usado.

Tabela 1 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020C obtida por modelos de acordo com a variação da frequência da mandíbula. (DENS: 1,6 t/m³; APF: 1 in(0,0254m); TMPA: 10 in; Lmed: 0,6586 m; desteo: 0,01836 m)

Freq.	$C_{m^3/h}^{Targ}$	$C_{m^3/h}^{Targ1}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Her1}$	$C_{m^3/h}^{Her180}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	R- θ	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
180	6,63	6,39	4,43	4,43	4,64	25,8	6,9-6.1	11,1	33,9
220	6,63	6,4	5,42	5,42	4,64	31,6	6,9-11,8	13,5	27,7
260	6,63	6,4	6,40	5,42	4,64	37,3	6,9-16	16,0	23,4
300	6,63	6,4	7,4	7,40	4,64	43,1	6,9-21	18,5	20,3
350	6,63	6,39	8,62	8,62	4,64	50,23	6,9-28	21,5	17,4

Fonte: Os autores.

Tabela 2 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida por modelos de acordo com a variação da densidade do material. (FREQ: 300 rpm; APF: 1 in(0,0254m); TMPA: 10 in ; Lmed: 0,6586 m; desteo: 0,01836 m)

DENS.	$C_{m^3/h}^{Targ}$	$C_{m^3/h}^{Targ1}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Her1}$	$C_{m^3/h}^{Her180}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	R- θ	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
1,6	6,62	6,39	7,39	7,39	4,64	43,1	6,9-21,3	18,5	20,3
1,8	5,89	5,68	7,39	7,39	4,64	43,1	6,9-21,3	18,5	20,3
2,0	5,30	5,11	7,39	7,39	4,64	43,1	6,9-21,3	18,5	20,3
2,2	4,82	4,65	7,39	7,39	4,64	43,1	6,9-21,3	18,5	20,3

Fonte: Os autores.

Tabela 3 – Capacidade, gape e deslocamento teórico da mandíbula móvel do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida por modelos de acordo com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 280 rpm; DENS 1,6 t/m³) alfa 25⁰ k^{Brm} =2,0.

TPMA	$C_{m^3/h}^{Targ}$	$C_{m^3/h}^{Tar}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Her1}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	R- θ	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$	gtm	Lmed	Desteo
5	3,31	1,77	1,85	1,85	2,55	20,1	3,5-18,7	10,4	10,8	0,153	0,329	0,0102
7	4,64	3,30	3,45	3,45	3,38	28,1	4,8-18,7	13,0	15,2	0,214	0,461	0,0136
10	6,62	6,38	6,89	6,89	4,64	40,2	6,9-18,7	17,2	21,8	0,306	0,658	0,0184
12	7,95	8,95	9,94	9,94	5,49	48,2	8,3-18,7	20,1	26,1	0,367	0,790	0,0214

Fonte: Os autores.

Tabela 4 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida por modelos de acordo com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 280 rpm; DENS 1,6 t/m³) alfa 18,7⁰ k^{Brm} =2,0

TPMA	$C_{m^3/h}^{Targ}$	$C_{m^3/h}^{Targ1}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Her1}$	$C_{m^3/h}^{Her180}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	R- θ	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
5	3,31	1,77	1,85	1,85	2,55	27,7	3,46-18,7	10,4	10,8
7	4,64	3,30	3,45	3,45	3,38	38,8	4,82-18,7	13,0	15,2
10	6,62	6,38	6,89	6,89	4,64	42,7	6,89-18,7	17,2	21,8
12	7,95	8,95	9,94	9,94	5,49	55,6	8,27-18,7	20,1	26,1

Fonte: Os autores.

Tabela 5 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida por modelos de acordo com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 350 rpm; DENS 1,6 t/m³) alfa 18,7⁰ k^{Brm} =2,0

TPMA	$C_{m^3/h}^{Targ}$	$C_{m^3/h}^{Targ1}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Her1}$	$C_{m^3/h}^{Her180}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	R- θ	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
5	3,31	1,77	1,85	1,85	2,55	34,6	3,5-27,8	13,0	8,7
7	4,64	3,30	3,45	3,45	3,38	48,4	4,8-27,8	16,3	12,2
10	6,62	6,38	6,89	6,89	4,64	69,2	6,9-27,8	21,5	17,4
12	7,95	8,95	9,94	9,94	5,49	83,1	8,3-27,8	25,1	20,9

Fonte: Os autores.

Tabela 6 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida por modelos de acordo com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 280 rpm; DENS 1,6 t/m³) alfa 27,8⁰ k^{Brm} =2,0

TPMA	$C_{m^3/h}^{Targ}$	$C_{m^3/h}^{Targ1}$	$C_{m^3/h}^{Her}$	$C_{m^3/h}^{Her1}$	$C_{m^3/h}^{Her180}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	R- θ	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
5	3,31	1,77	1,85	1,85	2,55	11,4	3,5-18,7	10,4	10,9
7	4,64	3,30	3,45	3,45	3,38	16,0	4,8-18,7	13,0	15,2
10	6,62	6,38	6,89	6,89	4,64	22,8	6,9-18,7	17,2	21,8
12	7,95	8,95	9,94	9,94	5,49	27,4	8,3-18,7	20,1	26,1

Fonte: Os autores

Uma atenção especial para o método de Broman.

Referente aos resultados das Tabelas 1-6, para o método de Broman, observou-se que o valor do parâmetro k utilizado (k=2,0) não seria o mais recomendado para o caso de britadores com baixa capacidade de processamento. Dessa forma, um estudo mais apurado desse modelo será apresentado

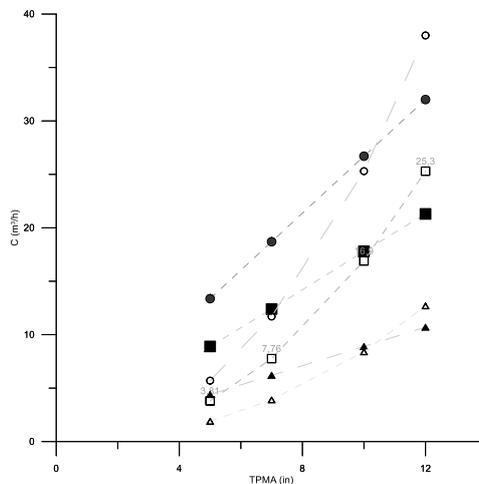
fazendo-se a variação do valor de k fora dos limites recomendados pela literatura (entre 1,5 e 2,5). Os cálculos foram realizados para duas frequências da mandíbula: 280 e 350 rpm bem como levando-se em conta o deslocamento da mandíbula fornecido pelo fabricante (DES) e aquele estimado teoricamente (desteo) por equação proposta na literatura. Os resultados encontram-se nas Tabelas 7 e 8 bem como nas Figuras 8 e 9.

Tabela 7 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida pelo modelo de Broman com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 280 rpm; DENS 1,6 t/m³) θ : 27,8⁰

TPMA (in)	k=1,5		k=1,0		k=0,5	
	C^{Brm} m ³ /h	C^{Brm1} m ³ /h	C^{Brm} m ³ /h	C^{Brm1} m ³ /h	C^{Brm} m ³ /h	C^{Brm1} m ³ /h
5	13,37	5,7	8,9	3,81	4,4	1,9
7	18,7	11,7	12,4	7,76	6,2	3,9
10	26,7	25,3	17,8	16,9	8,9	8,4
12	32,0	38,0	21,3	25,3	10,7	12,7

Fonte: Os autores.

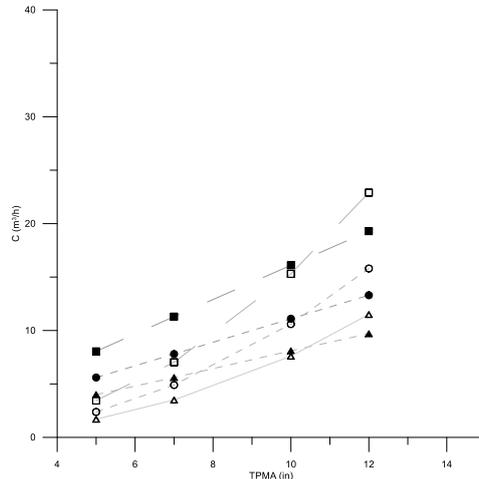
Fig. 8. - Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida pelo modelo de Broman com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 280 rpm; θ : 27,8⁰) (k=1,5 : ○DES ● desteo; k=1,0 : □DES ■ desteo; k=0,5 : △DES ▲desteo).



Fonte: Os autores.

Fig. 9. - Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida pelo modelo de Broman com a variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 350 rpm; θ : 27,8⁰)

(k=0,5 θ : 27,8⁰ : \circ DES \bullet desteo; k=0,5 θ : 20⁰ : \square DES \blacksquare desteo; k=0,25 θ : 20⁰: \blacktriangle DES \triangle desteo).



Fonte: Os autores.

Tabela 8 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020 obtida pelo modelo de Broman em função da variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ: 350 rpm; DENS 1,6 t/m³) θ : 20⁰ e 27,8⁰

TPMA (in)	k=0,5 (27,8 ⁰)		k=0,5 (20 ⁰)		k=0,25(20 ⁰)	
	$C_{m^3/h}^{Brm}$	$C_{m^3/h}^{Brm1}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	$C_{m^3/h}^{Brm1}$	$C_{m^3/h}^{Brm}$	$C_{m^3/h}^{Brm1}$
5	5,6	2,38	8,05	3,45	4,0	1,7
7	7,8	4,9	11,3	7,03	5,6	3,5
10	11,1	10,6	16,1	15,3	8,1	7,6
12	13,3	15,8	19,3	22,9	9,7	11,5

Fonte: Os autores.

Os resultados para capacidade de britagem, quando se utiliza valores de k, menores que 1,5, estão mais próximos da faixa de valor fornecida pelo fabricante. O valor de k igual a 0,25, com o deslocamento da mandíbula (DES) especificado pelo fabricante, foi o que melhor estimou a capacidade do britador na frequência de projeto (350 rpm), contudo em uma frequência menor, no caso 280 rpm, o melhor valor de k a ser empregado seria de 0,5, o que indica que o modelo pode ser melhorado fazendo-se uma correlação entre as duas grandezas, frequência e coeficiente k. Esses resultados demonstram que há muito a ser aprimorado para se utilizar o modelo de Broman.

Tabela 9 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020C obtida pelo modelo de Rose & English em função da variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ:350 rpm)

TPMA (in)	θ/θ_1	R/R ₁	DES		Desteo	
			$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
5	27,9/15,8	3,5/4,3	13,0	8,7	10,5	7,6
7	27,9/20,7	4,8/5,5	16,3	12,2	14,5	11,2
10	27,9/27,1	6,9/7,0	21,5	17,4	21,3	17,2
12	27,9/30,8	8,3/7,9	25,1	20,9	26,2	21,6

Fonte: Os autores.

Tabela 10 – Capacidade do britador de mandíbulas modelo 3020C obtida pelo modelo de Rose & English em função da variação do tamanho de partícula alimentada. (FREQ:300 rpm)

TPMA (in)	θ/θ_1	R/R ₁	DES		Desteo	
			$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$	$C_{m^3/h}^{REb}$	$C_{m^3/h}^{REa}$
5	21,3/11,8	3,5/4,3	11,1	10,2	9,0	8,1
7	21,3/15,5	4,8/5,5	13,9	14,2	12,4	13,1
10	21,3/20,5	6,9/7,0	18,5	20,3	18,2	20,1
12	21,3/23,6	8,3/7,9	21,6	24,4	22,4	25,2

Fonte: Os autores.

Levando-se em consideração os resultados insatisfatórios do modelo de Rose & English exibidos nas Tabelas de 1 a 6, buscou-se estimar a capacidade do britador segundo a variação das dimensões frequência, ângulo entre as mandíbulas e deslocamento da mandíbula proposto pelo fabricante (DES) e teórico (desteo); Os resultados mostrados nas Tabelas 9 e 10 são referentes ao modelo de Rose & English que considera equações de estimativa para a capacidade segundo a mandíbula trabalhando em alta (C^{REa}) e em baixa rotação (C^{REb}). Considerando o modelo de britador empregado nos testes, cuja capacidade especificada pelo fabricante varia de 6,0 a 8,0 m³/h, observou-se que o modelo em teste é apropriado para estimativas de capacidade apenas quando partículas pequenas (5 in) são alimentadas ao gape do britador e que considerar o deslocamento do fabricante (DES) ou a equação teórica de estimativa do deslocamento (desteo) não altera muito a predição do modelo tanto para capacidade, quanto para o fator de redução de partícula (R).

Considerações Finais

Neste trabalho foi possível avaliar, usando como exemplo de comparação um britador de pequeno porte, a predição da capacidade produtiva de britadores de mandíbulas de acordo com alguns modelos propostos na literatura.

Surpreendentemente, observou-se que modelos mais antigos como o de Taggart e o de Hersam proporcionam uma estimativa mais adequada do que os mais atuais. Por outro lado, quando se estuda o efeito do tamanho da maior partícula alimentada ao britador, nota-se que, mesmo para estes modelos, ou seja, de Taggart e Hersam, que até então se mostravam adequados, existe um efeito substancial dessa dimensão na estimativa da capacidade de britagem do equipamento e que tem que ser considerado na escolha durante a fase de projeto

Iniciou-se um estudo referente à influência de alguns parâmetros na predição dos modelos de Broman e de Rose & English (ROSE; ENGLISH,1967) e que mostrou que as propostas de faixas publicadas para estimativas de capacidade de britagem não são confiáveis e que há muito a ser melhorado para que eles sejam empregados por Químicos e Engenheiros num processo de especificação e compra de um novo britador.

A continuidade deste trabalho pode ser fomentada se outros engenheiros estudarem o dimensionamento dos britadores cônicos, por exemplo, pois não há informação suficiente sobre este assunto na literatura. A falta de conhecimento a respeito desse tipo de equipamento tem restringido os profissionais da área mineral aos dados de fabricantes. Estudos mais elaborados correlacionando a capacidade do britador com suas grandezas internas tais como, ângulos de acessórios internos, características do material a ser cominuído podem agregar muito à área de conhecimento.

Lista de símbolos e abreviaturas

APF Abertura na posição fechada (m)

$C_{m^3/h}^{Targ1}$ Capacidade do britador calculada pelo modelo de Tagart com deslocamento estimado pela literatura.

$C_{m^3/h}^{Targ}$ Capacidade do britador calculada pelo modelo de Tagart com deslocamento fornecido pelo fabricante.

$C_{m^3/h}^{Her1}$ Capacidade do britador calculada pelo modelo de Herman com deslocamento estimado pela literatura.

$C_{m^3/h}^{Her}$ Capacidade do britador calculada pelo modelo de Herman com deslocamento fornecido pelo fabricante.

$C_{m^3/h}^{Brm1}$	Capacidade do britador calculada pelo modelo de Broman com deslocamento estimado pela literatura.
$C_{m^3/h}^{Brm}$	Capacidade do britador calculada pelo modelo de Broman com deslocamento fornecido pelo fabricante.
$C_{m^3/h}^{REb}$	Capacidade do britador calculada pelo modelo de Rose & English – baixa frequência com deslocamento estimado pela literatura.
$C_{m^3/h}^{REa}$	Capacidade do britador calculada pelo modelo de Rose & English – alta frequência com deslocamento fornecido pelo fabricante.
DENS	densidade do material (t/m^3)
DES	deslocamento da mandíbula fornecido pelo fabricante (in)
Desteo	deslocamento teórico estimado por equação da literatura (m).
FREQ	Frequência (rpm)]
gtm	gape médio
L_{med}	Largura da mandíbula
Θ, α	ângulo entre as mandíbulas
P_{inf}	Potência inferior do motor do britador
P_{sup}	Potência superior do motor do britador
3020C	Modelo de britador testado
R	razão de redução da partícula
TMPA	Tamanho da maior partícula britada.

Referências

BACHERA, J.; RINTALA, L.; HORTTANAINENBA, M., The effect of crusher type on printed circuit board assemblies' liberation and dust generation from waste mobile phones **Minerals Engineering**. vol. 185 107674, 2022.

BROMAN, J. **Engineering and Mining Journal**. v. 185, n. 6, p. 69, 1984.

COSTA, M. A.; FRANCO JUNIOR, M. Análise de alimentadores de correia HDRN segundo seu consumo de energia, as suas variáveis de projeto e a densidade do material. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 12, n. 1, p. e26889, 2021.

FARIA, G. H. C.; TEIXEIRA, R. L. P; SHITSUKA, R.; GOUVEIA, L. L. A. Potencial de atuação da engenharia nos rejeitos sólidos de mineração no Brasil. **Revista de Casos e Consultoria**, v. 12, n. 1, e24041, 2021.

FIGUEIRA, H. V.; SALVADOR, A.B. L.; ALMEIDA, L. M., et al “**Britagem e Moagem**”, Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 4 – pág. 143–211. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. Rio de Janeiro, 2010.

HERSAM, E. A. **Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME)**. New York: AIME, v. 68, 1923, 463 p.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. Sorocaba, SP: Metso Minerals, 2005. 432 p.

ROSE, H. E.; ENGLISH, J. E. **Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy**. London: Institution of Mining and Metallurgy, v. 76, p. C32, 1967.

TEIXEIRA, H. G “Desenvolvimento de um sistema para dimensionamento, análise e otimização de circuitos de preparação de minérios”, **Dissertação de mestrado**, Belo Horizonte/Minas Gerais, 2013.

VARELA, J. et al, “Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral”, **XXIV ENTMME**, 2011, Salvador/Bahia.

WANG, LIANG; WANG, HAO; ZHU, JINTUO; HUANG, WENYI; ZHAO, YUECHEN. Experimental study on particle size distribution of impact crushed coal containing gas. **Fuel**. Vol. 325 124745, 2022.