



É POSSÍVEL USAR O MÉTODO DE BOND PARA AVALIAR O DESEMPENHO ENERGÉTICO DE CIRCUITOS DE MOAGEM SEMI-AUTÓGENA (SAG)?

JULIACI, T.S.¹, MAZZINGHY, D.B.¹, BERGERMAN, M.G.²

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN),
Laboratório de Geometalurgia e Simulação de Processos. E-mail: thalesjuliaci@gmail.com

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)

RESUMO

No processamento mineral a etapa de cominuição representa grande custo para as mineradoras. O consumo de energia necessário à fragmentação tem sido alvo de vários trabalhos que buscam obter maior conhecimento sobre esta variável e, por consequência, propor a otimização dos circuitos. Bond propôs através da Terceira Lei da Cominuição, muito utilizada até hoje, uma maneira de determinar a energia consumida para reduzir a granulometria de minérios. A aplicação da teoria para moinhos de barras e bolas possui boa aderência, porém em moinhos SAG, característicos por gerar mais partículas finas, esse método não obtém resultados satisfatórios no cálculo do Índice de Trabalho Operacional (OWi) de um minério. A Energia Específica de Tamanho (SSE), utilizada para medir o consumo energético na geração de partículas finas, é um parâmetro mais adequado para mensurar a eficiência energética de circuitos SAG/Bolas. Este trabalho analisou dados de três operações para avaliar e comparar o Índice de Trabalho Operacional (OWi) e a Energia Específica de Tamanho (SSE) de circuitos de cominuição com moinhos SAG e bolas. Foi também aplicada uma metodologia para avaliar o desempenho de cada equipamento nos circuitos.

PALAVRAS-CHAVE: Moagem Semi-Autógena (SAG), Eficiência energética, Índice de Trabalho Operacional de Bond (OWi), Energia Específica de Tamanho (SSE)

ABSTRACT

In mineral processing the comminution stage represents high cost to the mining companies. The energy consumption necessary for the fragmentation has been the target of researches who seek understanding this variable and consequently proposing circuits' optimization. Bond proposed through the Comminution Theory, which continues to be used today, a way to determine the energy to reduce the particle size of an ore. The application of this theory for rod and ball mills has great adherence, however in SAG mills, which is characterized by generating more fine particles, this method did not achieve satisfactory results in calculating the ore's *Operational Work Index* (OWi). The *Size Specific Energy* (SSE), used to measure the energy consumption in fine particle generation, is a more adequate parameter to measure the energy efficiency of SAG/Balls mill circuits. This work analyzed operational data from three mines and compared the *Operational Work Index* (OWi) and the *Size Specific Energy* (SSE) of SAG and ball mill comminution circuits. A methodology was also applied to evaluate the performance of each equipment in the circuits.

KEYWORDS: SAG milling, efficiency, *Operational Word Index* (OWi), *Size Specific Energy* (SSE)

1. INTRODUÇÃO

Na indústria mineral é constante a busca pela redução de custos e aumento de produção visando maior lucratividade. O desenvolvimento de rotas de cominuição com maior eficiência energética se torna um desafio, uma vez que esta etapa é a que apresenta maior despesa operacional dado o grande consumo de energia elétrica.

Buscando relações capazes de calcular a energia necessária a fragmentação, Fred C. Bond determinou a terceira lei da cominuição. Segundo essa teoria, o trabalho aplicado é proporcional ao comprimento das fissuras iniciais que se desenvolvem no fraturamento (Bond, 1952). De acordo com Bond, a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho, sendo este, a abertura da peneira pela qual passam 80% do material. Foi proposto o uso do índice de trabalho, o Work Index (Wi), considerando o tamanho passante em 100 μm .

O Método de Bond é amplamente utilizado para determinar a moabilidade dos materiais, sendo o Work Index obtido por testes de laboratório ou em operações industriais, neste último caso, o Operational Work Index (OWi), ou índice de trabalho operacional, termo introduzido por Rowland, 1976.

O OWi é um dos parâmetros para mensurar o desempenho energético dos circuitos, no entanto, a equação de Bond se baseia na suposição de que as distribuições de alimentação e produto do moinho são paralelas em gráficos com eixos X e Y em escala logarítmica. Já os moinhos autógenos (AG) e semi-autógenos (SAG) não se encaixam nessa suposição, pois tendem a produzir maior quantidade de partículas finas (Foggiatto, 2017).

Alguns pesquisadores sugerem, para estes casos o uso da *Size Specific Energy* (SSE) para calcular a eficiência energética, pois é mais eficaz do que a equação de Bond, uma vez que está relacionada à geração de finos, e não à redução no qual 80% é passante (Foggiatto, 2017). Este trabalho teve como objetivo determinar e comparar o Índice de Trabalho Operacional de Bond (OWi) e a Energia Específica de Tamanho (SSE) de circuitos de cominuição com moinhos semi-autógenos (SAG), visando verificar se esses dois parâmetros de avaliação energética são adequados para esse tipo de moinho.

2. METODOLOGIA

Para avaliação energética foram considerados o Índice de Trabalho Operacional de Bond (OWi) e a Energia Específica de Tamanho (SSE) para circuitos de cominuição contendo moinhos SAG e Bolas. Os dados para a análise foram obtidos através de trabalhos publicados referentes aos circuitos das minas de Sossego, *Sarcheshmeh* e *Cadia*. Foram obtidas as Energias Específicas E (kWh/t), os F_{80} (tamanho no qual passam 80% da alimentação nova do circuito, em μm), os P_{80} (tamanho no qual passam 80% do produto, em μm), os F_{75} (% passante em 75 μm da alimentação) e os P_{75} (% passante em 75 μm do produto). A partir desses dados foram calculados o OWi e a SSE₇₅, considerando a malha de 75 μm um marco adequado para o cálculo da eficiência energética (Levin, 1992). O OWi em kWh/t é dado pela Equação 1.

$$OWi = E / \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (1)$$

A SSE₇₅ em kWh/t é dada pela Equação 2.

$$SSE_{75} = \frac{E}{(P_{75} - F_{75})/100} \quad (2)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No circuito da mina do Sossego, o minério de cobre é alimentado no moinho SAG, que opera em circuito fechado com britadores de *pebbles*. A descarga do moinho alimenta uma peneira vibratória. A fração passante na peneira é bombeada para o circuito de classificação, constituído de ciclones, que operam em circuito fechado reverso com dois moinhos de bolas. O *overflow* dos ciclones alimenta a flotação. A fração retida na peneira alimenta o britador de *pebbles* e retorna para a alimentação do SAG. A Tabela 1 apresenta os dados extraídos de trabalho de Bergerman (2009).

Tabela 1: Dados do circuito de moagem da mina do Sossego.

Parâmetros	Moinho Semi-Autógeno (SAG)	Moinho de Bolas
Energia Específica (kWh/t)	7,77	7,55
F_{80} (μm)	58400	780
P_{80} (μm)	780	162
OWi (kWh/t)	24,54	17,66
F_{75} (%)	5,5	28,8
P_{75} (%)	28,8	53,5
% New -75 μm	23,3	24,7
SSE -75μm (kWh/t)	33,35	30,57

As energias específicas dos moinhos são muito parecidas. Com o F_{80} da alimentação do SAG e o P_{80} do *undersize* da peneira do SAG foi possível calcular o OWi deste moinho. O mesmo foi feito para o moinho de bolas, sendo o F_{80} obtido pelo *undersize* da peneira e o P_{80} obtido pelo *overflow* do ciclone. O OWi do moinho SAG foi cerca de 39% maior comparado ao do moinho de bolas em termos absolutos.

Comparando a Energia Específica de Tamanho (SSE) para geração de -75 μm , o consumo energético foi pouco maior no moinho SAG. A porcentagem de geração de finos também teve pequena diferença. Dessa forma, o moinho SAG e o moinho de bolas da mina de Sossego tem desempenho semelhante na geração de partículas menores que 75 μm .

O circuito de cominuição da planta de concentração 2 do *Sarcheshmeh Copper Complex* é composto por um moinho SAG em circuito fechado com uma peneira vibratória e um moinho de bolas juntamente com uma bateria de hidrociclones. O *undersize* da peneira alimenta os ciclones, que alimenta o moinho de bolas através de seu *underflow*. As

partículas finas por sua vez irão para a alimentação da flotação *rougher*. A Tabela 2 apresenta os dados extraídos do trabalho de Jahani *et al.* (2011).

Tabela 2: Dados do circuito de moagem da mina de *Sarcheshmeh*.

Parâmetros	Moinho Semi-Autógeno (SAG)	Moinho de Bolas
Energia Específica (kWh/t)	9,59	10,16
F_{80} (μm)	48000	415
P_{80} (μm)	415	89
OWi (kWh/t)	21,55	17,86
F_{75} (%)	5,7	48,7
P_{75} (%)	48,7	75,7
% New -75 μm	43,1	26,9
SSE -75μm (kWh/t)	22,27	37,72

Assim como na mina de Sossego, as energias específicas dos moinhos deste circuito apresentam pouca diferença. Estas foram calculadas pela potência (kW) dos equipamentos dividida pela taxa de alimentação (t/h). Com o F_{80} da alimentação do SAG e o P_{80} do *undersize* da peneira do SAG foi possível calcular o OWi deste moinho. O mesmo foi feito para o moinho de bolas, sendo o F_{80} obtido pelo *undersize* da peneira e o P_{80} obtido do *overflow* do ciclone. O OWi do moinho SAG foi cerca de 21% maior comparado ao do moinho de bolas.

Comparando a Energia Específica de Tamanho (SSE) para geração de -75 μm , o consumo energético do moinho de bolas foi muito elevado comparado ao SAG. Ainda assim, o moinho SAG gerou 16,2% mais finos que o moinho de bolas (43,1% - 26,9%). Jahani *et al.* (2011), apresenta em seu trabalho que o moinho SAG teve 61,52% de proporção na produção de -75 μm , enquanto o moinho de bolas teve 38,48%.

No processamento da *Cadia Valley Operations* uma prensa de rolos de alta pressão HPGR alimenta o moinho SAG, que tem sua descarga classificada por um *trommel*. A fração grossa é reclassificada em uma peneira, onde o *oversize* é direcionado a britagem secundária e o *undersize* para o HPGR. Já o material passante do *trommel* é direcionado para hidrociclones que através dos *underflows* alimentam três circuitos em paralelo de moinhos de bolas. A Tabela 3 apresenta os dados extraídos do trabalho de Powell *et al.* (2015).

Tabela 3: Dados do circuito de moagem da mina de *Cadia*.

Parâmetros	Moinho Semi-Autógeno (SAG)	Moinhos de Bolas
Energia Específica (kWh/t)	5,91	14,37
F_{80} (μm)	34730	1900
P_{80} (μm)	1900	131
OWi (kWh/t)	33,65	22,39
F_{75} (%)	6,9	23,0
P_{75} (%)	23,0	64,0
% New -75 μm	16,1	41,0
SSE -75μm (kWh/t)	36,65	38,00

As energias específicas foram calculadas pela potência (kW) dos equipamentos dividido pela taxa de alimentação (t/h). No caso dos moinhos de bolas foi obtida uma média dos valores referentes aos três moinhos. O valor médio foi de 14,37 kWh/t com um desvio padrão de 2,10. Os moinhos de bolas apresentaram energia específica maior comparada ao moinho SAG.

Com o F_{80} da alimentação do SAG e com o P_{80} do passante do *trommel* foi possível calcular o OWi deste moinho. O mesmo foi feito para os moinhos de bolas, sendo o F_{80} obtido pelo passante do *trommel* e o P_{80} médio dos *overflows* dos ciclones. O OWi do moinho SAG foi cerca de 50% maior comparado ao do moinho de bolas, indicando grande consumo energético do SAG comparado ao moinho de bolas, segundo a metodologia de Bond.

Comparando a Energia Específica de Tamanho (SSE) para geração de $-75\mu\text{m}$, o consumo energético foi pouco maior nos moinhos de bolas. O valor de SSE de 38 kWh/t foi apresentado por Powell *et al.* (2015) comparando a energia específica de tamanho de cada equipamento com a do circuito total. O circuito obteve SSE de 35 kWh/t, dessa forma o moinho SAG (36,65 kWh/t) obteve melhor eficiência energética comparada aos moinhos de bolas. A porcentagem de geração de finos dos moinhos de bolas, em contrapartida, foi maior comparada ao SAG.

As Figuras 1 e 2 comparam o desempenho dos moinhos (SAG e Bolas) dos três circuitos estudados de acordo com o OWi e a SSE, respectivamente.

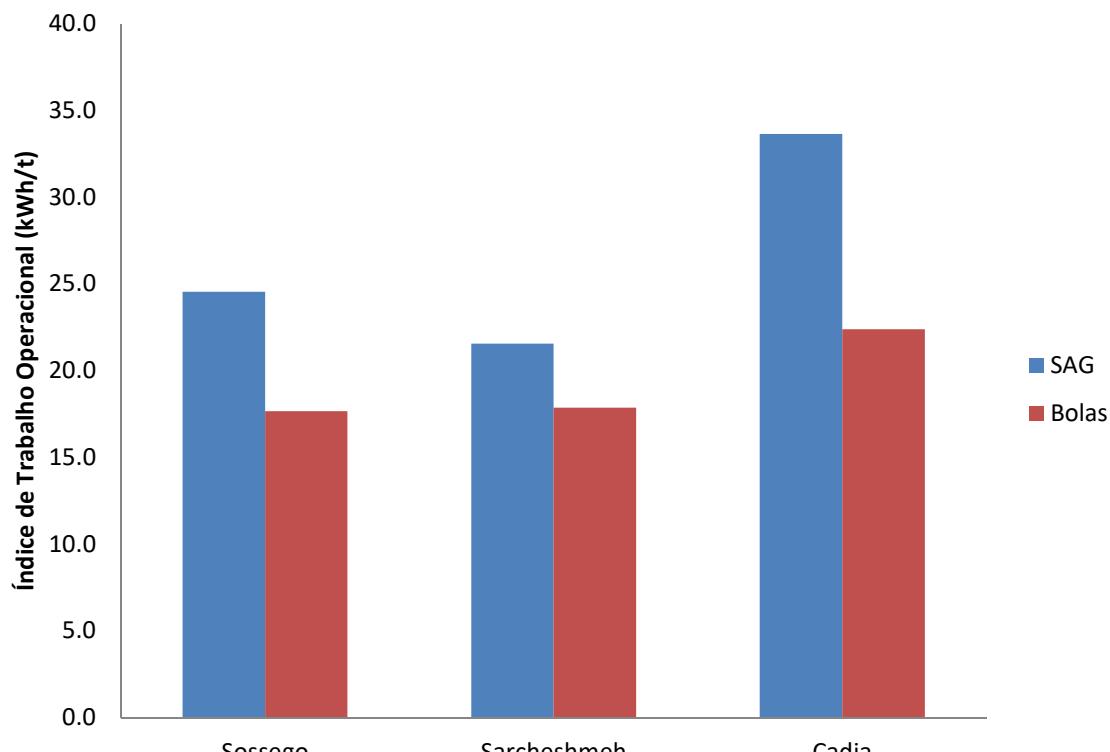


Figura 1: Índice de Trabalho Operacional dos Moinhos (OWi).

Os moinhos SAG apresentaram maior consumo energético em todas as operações ao serem avaliados pelo OWi. Comparando os equipamentos à primeira vista por este parâmetro, os moinhos SAG operam com desempenho inferior aos moinhos de bolas.

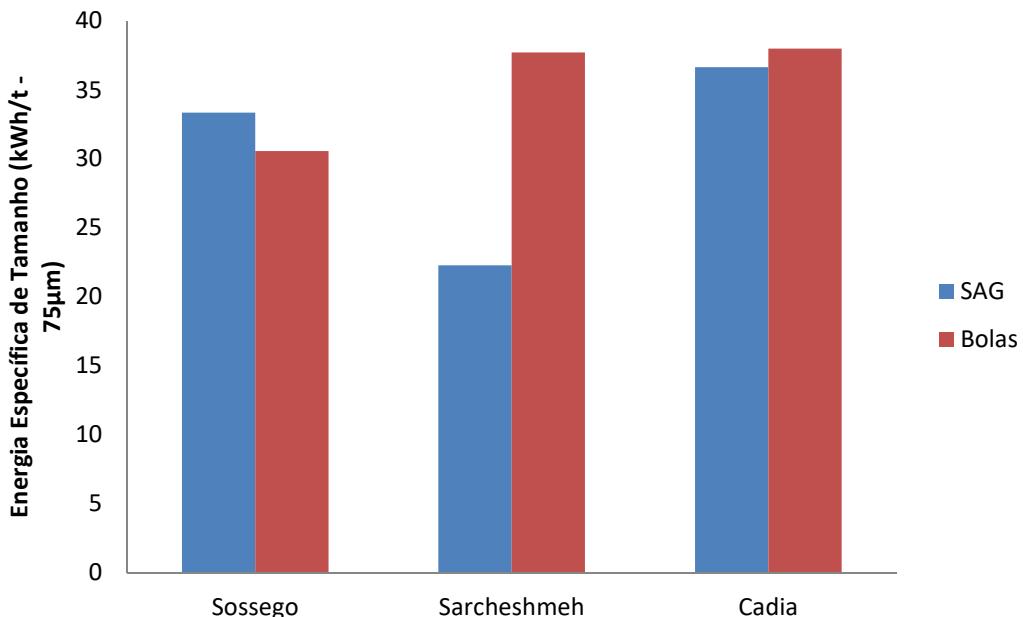


Figura 2: Energia Específica de Tamanho dos Moinhos (SSE).

Contudo, ao serem avaliados pela SSE, os circuitos de *Sossego* e de *Cadia* apresentaram eficiências semelhantes. A comparação evidencia que a avaliação de etapas de moagem SAG pelo método de Bond é prejudicada pelo fato destes moinhos gerarem mais partículas finas e também devido à equação de Bond considerar a fração de 80% passante e desprezar a geração de finos (a Teoria de Bond considera que as curvas granulométricas são paralelas em escala log-log).

No circuito de *Sarcheshmeh* o moinho de bolas apresenta SSE consideravelmente maior que a do SAG, indicando um desempenho ineficiente do moinho de bolas. Os moinhos operam com energias específicas semelhantes, porém com uma diferença de geração de partículas menores que 75 μ m de 16,2%. Como o moinho SAG gerou maior quantidade de finos, a partir da relação da Eq.2, este moinho obteve menor SSE.

Ballantyne *et al.* (2015) propôs uma metodologia para identificar graficamente oportunidades de melhoria de processos em circuitos de cominuição. A estratégia avalia a eficiência com a qual os circuitos aplicam energia para obter a redução de tamanho requerida. Foram calculadas a energia específica, a SSE e a geração de partículas menores que 75 μ m para seis estudos de casos com circuitos contendo equipamentos como britadores, HPGR, SAG e moinho de bolas. Os dados encontrados foram adicionados a um gráfico de energia específica *versus* geração de partículas -75 μ m para verificar o desempenho dos equipamentos dos circuitos analisados. Cada ponto do gráfico representa um equipamento e uma linha de tendência foi criada a fim de avaliar os que estavam operando com eficiências similares. Aqueles situados abaixo da linha de tendência estão próximos da ineficiência. A Figura 3 apresenta os dados dos equipamentos estudados por Ballantyne *et al.* (2015) e os equipamentos dos circuitos analisados por este artigo.

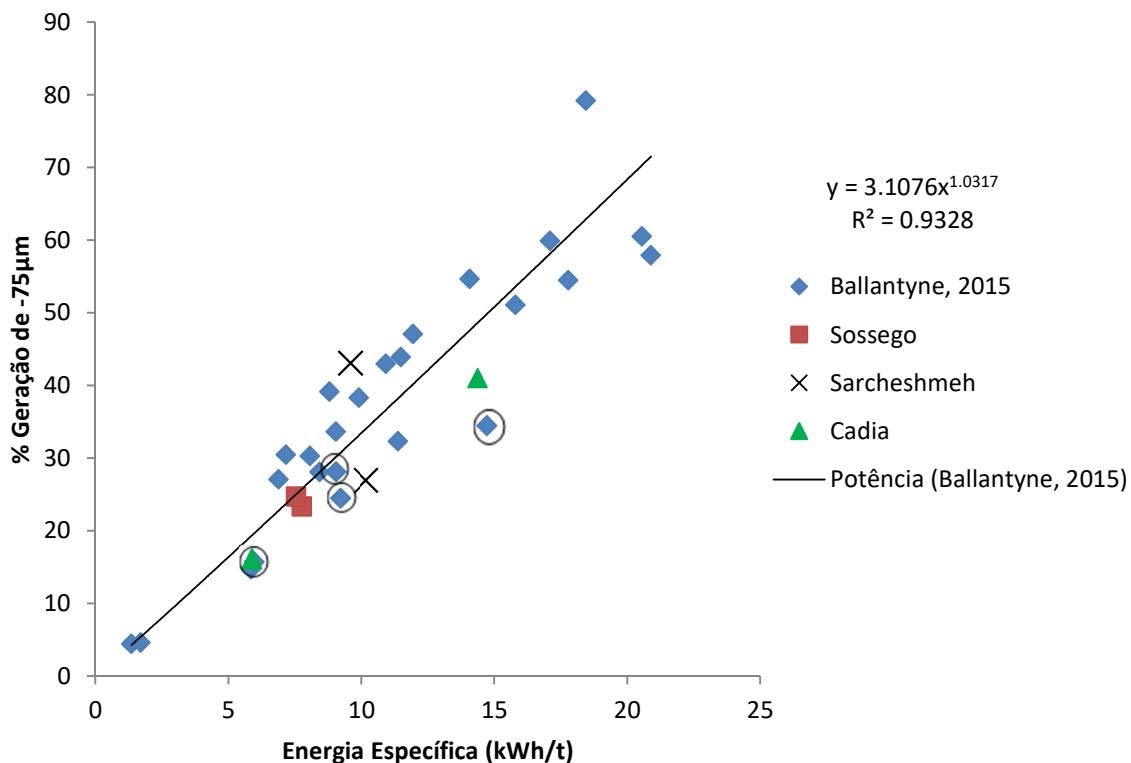


Figura 3: Identificação de baixo desempenho utilizando Energia Específica de Tamanho.

Os círculos, apresentados pelo autor, indicam os equipamentos que possuem elevado consumo de energia comparada aos outros equipamentos do circuito em que eles estão presentes. A linha de tendência de potência foi a que apresentou melhor ajuste aos dados.

De acordo com Ballantyne *et al.*(2015), equipamentos com a SSE 10% maior que o circuito total foram classificados como com baixo desempenho. No circuito de Sossego os moinhos apresentam desempenhos semelhantes na geração de -75µm. O circuito pode ter seu SSE total calculado a partir dos dados do britador cônicos, que possui energia específica de 0,71 kWh/t, obtendo a energia específica total do circuito de 16,03 kWh/t. O SSE total então foi calculado usando o F_{75} da alimentação e o P_{75} do produto final, resultando em 33,40 kWh/t. Dessa forma, tanto o moinho SAG (SSE = 33,35 kWh/t) e o moinho de bola (SSE = 30,57 kWh/t) operam com energias específicas de tamanho menores que a do circuito, sendo classificados como eficientes no processo.

O circuito de *Sarcheshmeh* pode ter seu SSE calculado pelo F_{75} da alimentação do SAG e o P_{75} do overflow do ciclone. O valor total foi de 28,22 kWh/t. O moinho SAG opera com energia específica de tamanho de 22,27 kWh/t, sendo considerado eficiente. Já o moinho de bolas opera com energia 33% maior que do circuito total. A posição deste equipamento na Fig. 3, próximo a dois outros equipamentos definidos como ineficientes, corrobora com a classificação de ineficiência definida por Ballantyne *et al.*(2015).

No circuito de *Cadia*, Powell *et al.* (2015) apresenta como dados a energia específica de 21,20 kWh/t e a SSE total em 35 kWh/t. Dessa forma, o moinho SAG opera com SSE em 4,7% acima do total, enquanto os moinhos de bolas têm 8,6% acima. Considerando o valor de 10% estabelecido pelo autor e as posições em que ocupam na Fig.3, estes equipamentos

estariam operando próximos ao limite da eficiência energética. A Tabela 4 apresenta um resumo destes valores obtidos e calculados.

Tabela 4: SSE total e dos moinhos dos circuitos avaliados.

Referência	SE do circuito (kWh/t)	F75 do circuito (%)	P75 do circuito (%)	SSE do circuito (kWh/t)	SSE SAG (kWh/t)	SSE Bolas (kWh/t)
Sossego	16,03	5,50	53,50	33,40	33,35	30,57
Sarcheshmeh	19,76	5,70	75,70	28,22	22,27	37,72
Cadia	21,20	6,90	64,00	35,00	36,65	38,00

4. CONCLUSÕES

As figuras comparando OWi e SSE evidenciaram que para moinhos SAG, o método de Bond não apresenta resultados satisfatórios, uma vez que este modelo de moinho tem como característica a maior geração de partículas finas. A energia específica de tamanho é um parâmetro mais adequado para mensurar a eficiência energética em circuitos SAG.

A metodologia de Ballantyne *et al.* (2015) se apresenta como uma estratégia simples para ter conhecimento da eficiência energética de circuitos de cominuição. Através da comparação do desempenho com outros equipamentos no circuito e com o desempenho de outras operações, é possível identificar oportunidades de melhorias nos processos de uma maneira rápida. Porém, é necessário ressaltar que o método é apenas um indicativo, sendo os testes em escala laboratorial e piloto indispensáveis para obtenção de resultados para a tomada de decisões como investimentos em expansões.

5. REFERÊNCIAS

- Ballantyne G.R, Powell M.S, Bonfils B, Yahyaei, M. *Simple Energy Measures For Assessing Total Circuit Efficiency*. SAG Conference 2015 – Vancouver. 6p.
- Bergerman M.G. *Modelagem e Simulação do Circuito de Moagem do Sossego*.[Dissertação Mestrado]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. 190p.
- Bond F.C. *The Third Theory of Comminution*. AIME Trans. Vol 193, 1952, p484-494.
- Foggiatto B. *Modelling and Simulation Approaches For Exploiting Multi-Component Characteristics Of Ores In Mineral Processing Circuits*. [Tese Doutorado]. The University Of Queensland, 2017. 225p.
- Jahani M, Noaparast M, Farzanegan A, Langarizadeh G. *Application of SPI for Modeling Energy Consumption in Sarcheshmeh SAG and Ball Mills*. Journal of Mining & Environment. Vol.2, No.1, 2011, p27-40.
- Levin J. *Indicators of grindability and grinding efficiency*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1992, p283-290.
- Powell M.S, Engelhardt D, Yahyaei M, Lane G. *The Cadia HPGR-SAG Circuit – From Design To Operation – The Commissioning Challenge*. SAG Conference 2015 – Vancouver. 18p.
- Rowland C.A. *The Tools of Power Power: The Bond Work Index, A Tool To Measure Grindind Efficiency*. In 1976 SME-AIME Fall Meeting & Exhibit. 1976 Set 1-3; Denver, Colorado, Estados Unidos. (Preprint Number 76-B-311), p1-16.