




Comparação entre o desempenho de moinhos de barras e rolos de alta pressão (HPGR) para a moagem de minério de cromo

Pablo Souza de Oliveira ^{1,2} 
André Carlos Silva ^{2*} 
Elenice Maria Schons Silva ² 

Resumo

A mineração foi, e continua sendo, um dos principais pilares da economia brasileira. Contudo, as empresas do setor devem tomar decisões sustentáveis e estarem sempre abertas para inovações tecnológicas para se manterem competitivas, otimizando seus processos e buscando a redução contínua de custos e desperdícios. Neste sentido, estudos visando a redução do custo com a cominuição mineral se mostram necessários, visto que esta etapa é responsável por grande parte dos custos operacionais de uma planta de processamento mineral. Testes em escala de bancada foram realizados visando caracterizar tecnologicamente amostras de minério de cromo (com teor médio de 38% de Cr_2O_3) oriundas da mina Ipueira da Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA), líder nacional na produção de concentrado de cromo e suas ligas. Um britador laboratorial modelo HRC D1000 foi testado e comparado com a moagem realizada atualmente nos moinhos de barras da empresa. Os resultados obtidos indicam ser possível a cominuição a seco do minério de cromo, adequando a sua granulometria para a concentração gravimétrica, como também a redução dos custos operacionais com a moagem.

Palavras-chave: Moagem; High Pressure Grinding Rolls (HPGR); Minério de cromo.

Comparison between the performance of bar mills and high-pressure grinding rolls (HPGR) for chromium ore milling

Abstract

Mining was, and continues to be, one of the main pillars of the Brazilian economy. However, companies in the sector must make sustainable decisions and always be open to technological innovations to remain competitive, optimizing their processes and seeking continuous reduction of costs and waste. In this sense, studies aimed at reducing the cost of mineral comminution are necessary, since this step is responsible for a large part of the operating costs of a mineral processing plant. Bench-scale tests were carried out in order to technologically characterize samples of chromium ore (with an average content of 38% of Cr_2O_3) from the Ipueira mine of Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA), national leader in the production of chromium concentrate and its leagues. A laboratory crusher model HRC D1000 was tested and compared with the grinding currently carried out in the company's bar mills. The results obtained indicate that it is possible to comminute the chromium ore dry, adapting its granulometry to the gravimetric concentration, as well as reducing operating costs with grinding.

Keywords: Milling; High Pressure Grinding Rolls (HPGR); Chromium ore.

1 Introdução

A mineração foi e permanece sendo fundamental para o desenvolvimento da sociedade e da sua modernização. É geradora de matérias-primas que mantém diversos setores da economia, tais como transporte, construção civil, telecomunicação, aviação

etc. Desta forma, é inegável a sua importância para a economia brasileira [1]. A cromita ($\text{Fe}^{2+}\text{Cr}_2\text{O}_4$), composta tipicamente por 67,9% de Cr_2O_3 e 32,1% por FeO , é o principal mineral minério de cromo. A cromita produzida na Bahia representa 65% da

¹ Companhia de Ferro Ligas da Bahia – FERBASA, Andorinha, BA, Brasil.

² Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral – LaMPPMin, Curso de Especialização em Tratamento de Minérios – CETM, Universidade Federal de Catalão – UFCAT, Catalão, GO, Brasil.

*Autor correspondente: ancarsil@ufcat.edu.br



produção de todo país, sendo a Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA) a maior produtora deste bem mineral [2]. A FERBASA atua no distrito mineral do Vale do Jacurici, a maior e mais importante reserva de cromita do Brasil, estimada em mais de 30 milhões de toneladas do minério. A FERBASA é a maior produtora nacional de ligas ferrocromo, respondendo por mais de 90% destas ligas, fornecendo insumos para a indústria siderúrgica de aços especiais, principalmente os aços inoxidáveis [3]. A Tabela 1 apresenta as fases minerais majoritárias, determinadas por difração de raios X, presentes no minério do Vale Jacurici/BA.

A mina de Ipueira, operada pela FERBASA, está localizada no município de Andorinha-BA. Suas operações iniciaram 1973 e, desde então, o processamento do minério de cromo tem sido realizado gravimetricamente com o uso de jiques e espirais. A cominuição é a operação que visa adequar a granulometria das partículas para as operações subsequentes, liberar o mineral de interesse econômico e/ou aumentar a área superficial das partículas. Nos moinhos tubulares revolventes, a cominuição é realizada tipicamente através da abrasão e do impacto, gerados pelos corpos moedores em queda livre. Os corpos moedores utilizados podem ser feitos de diversas formas (barras, bolas, cilindros, cylpebs etc.) e materiais (aço, ferro fundido, cerâmicas etc.) [5].

Atualmente o circuito de cominuição do minério de cromo é realizada em britadores de mandíbulas, britador cônico, moinhos de barras e bolas. A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado do processo adotado na mina de Ipueira/BA da FERBASA, considerando o minério vindo direto da mina (ROM, do inglês Run of Mine).

A britagem primária é realizada em um britador de mandíbulas 120x40 do tipo Blake da antiga FAÇO. A britagem

secundária é realizada utilizando um britador de mandíbulas C96 da Metso, em circuito fechado com peneiras vibratórias (o retido na peneira é encaminhado para um rebritador de mandíbulas 80x50 da FAÇO). A britagem terciária é realizada em um britador de mandíbulas 45x35 da FAÇO, com APA regulada para 2", já a britagem quaternária usa um britador cônico Symons Nordberg 4¼' Standard modelo 60TS. A moagem primária (barras) e secundária (bolas) são feitas em moinhos com 1.500 mm de diâmetro e 3.000 mm de comprimento.

A cominuição é a etapa que mais consome energia elétrica nas plantas de processamento mineral (cerca de 80%) [6], um consumo significativo uma vez usinas de

Tabela 1. Caracterização mineralógica por difração de raios-x do minério da mina de Ipueira/BA. Adaptado de Oliveira et al. [4]

Mineral	Fórmula Química	Abundância (%)
Cromita	$(Mg_{0,43}Fe_{0,58})_8(Cr_{1,19}Al_{0,77}Ti_{0,03})_8O_{32}$	25-30
Talco	$Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$	25-30
Serpentina maciça lizardita	$Mg_3(Si_2O_5(OH)_4)$	25-30
Clinocloro	$Mg_{3,54}Al_{10,97}Fe_{0,46}n_{0,03}(Si_{2,85}Al_{1,15}O_{10})(OH)_8$	< 10
Biotita	$K(Mg_{1,48}Fe_{1,28}Ti_{0,24})(Al_{1,2}Si_{2,8}O_{10})(OH)_{1,4}F_{0,32}O_{0,28}$	< 1
Pirrotita	Fe_7S_8	< 1
Pentlandita	$FeNiS_2$	< 1
Calcopirita	$CuFeS_2$	< 1
Calcita	$CaCO_3$	< 1

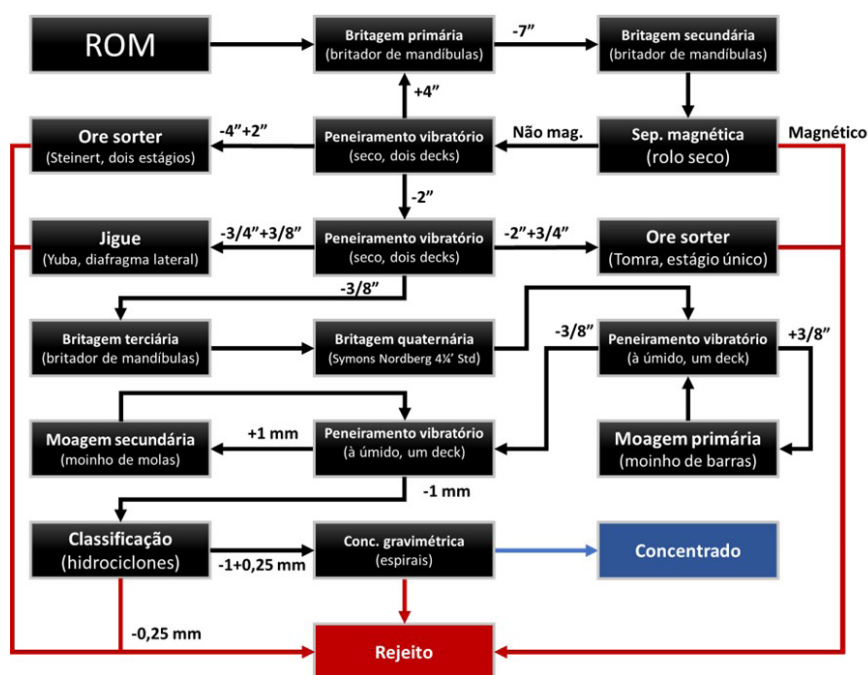


Figura 1. Fluxograma simplificado do processo produtivo de areia de cromita (concentrado) na mina de Ipueira/BA da FERBASA.

processamento mineral consomem aproximadamente 5% de toda a energia elétrica mundial. Segundo os autores a otimização e o controle do consumo de energia em unidades de cominuição mineral desempenham um papel crítico. Os rolos de alta pressão, do inglês *High Pressure Grinding Rolls* (ou simplesmente HPGR), têm se mostrado uma opção aos moinhos de barras. Desenvolvido pelo Professor Dr Klaus Schonert, da Universidade Técnica de Clausthal, situada na Alemanha. Estas máquinas possuem alta eficiência na quebra mineral, devido principalmente ao mecanismo de compreensão das partículas individuais. Desta forma, a eficiência energética resultante da quebra de um leito mineral sob compressão é nitidamente superior à obtida em moinhos tubulares revolventes (barras ou bolas) [7].

A redução do consumo de energia e a capacidade de cominuir minérios abrasivos e de alta dureza são algumas das principais vantagens dos HPGR, que podem substituir britadores terciários ou serem usados em estágios de pré-moagem, alimentando diretamente moinhos de bolas [6].

Destaca-se ainda a facilidade no controle granulométrico do produto do HPGR a partir do ajuste na pressão aplicada aos rolos e a possibilidade de simplificação dos circuitos de moagem [8,9]. Desta forma, o presente trabalho apresenta um estudo visando a adoção de um HPGR como uma possível alternativa à moagem do minério de cromo adotada atualmente pela FERBASA, visando a adequação da granulometria do material e a redução do custo operacional desta etapa.

2 Materiais e métodos

Amostras de minério de cromo oriundo da mina Ipueira com teor médio de 38% de Cr₂O₃ foram coletadas em dois pontos da usina de processamento mineral: alimentação da britagem terciária (100% passante na malha de 40 mm) e na descarga do moinho de barras (100% passante na malha de 1 mm). Entre os pontos de coleta das amostras, o minério de cromo é atualmente submetido à fragmentação em um britador de mandíbulas, um cônico e três moinhos de barras (que operam em paralelo).

As amostras foram enviadas para o centro de testes da Metso-Outotec, situado em Sorocaba-SP, onde foram secas em estufa a 100 °C por 24 horas (com determinação da umidade pela perda de massa após a secagem), homogeneizadas, quarteadas, analisadas granulometricamente e submetidas a ensaios para determinação da abrasividade de Bond (A_i) e de Macon (AI), britabilidade Macon (Br), Work Index (W_i), e testes em um HPGR em escala de bancada, modelo HRC D1000 da Metso, que opera com rolos de 1.000 mm de diâmetro. Tais testes foram realizados de modo a caracterizar o minério de cromo da FERBASA e verificar se a adoção de um HPGR era recomendada, visto que este britador possui restrições quanto à dureza e abrasividade do minério. As condições de operação do HRC D1000 da Metso são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de operação adotadas nos testes com o HRC D1000.

Variável operacional	Valor adotado nos testes
Pressão inicial (N/mm ²)	2,0
Pressão de operação (N/mm ²)	2,4
Gap inicial (mm)	10,0
Gap de operação (mm)	19,4
Tipo do circuito	Fechado
Malha de fechamento (mm)	1,0

O W_i do minério foi determinado usando metodologia padrão do teste de W_i de Bond, em um moinho de bolas com uma malha de controle de 0,150 mm. O teste de A_i foi realizado de acordo com a metodologia disponível na literatura [10]. Para a determinação do índice AI uma amostra de minério (500 g com granulometria $-3/4''+1/2''$) foi colocada em um cilindro (tambor) de 12'' de diâmetro e 4,5'' de profundidade, o qual contém um rotor concêntrico em seu interior de 4,5'' de diâmetro. Uma placa de aço de alta resistência ao atrito (dureza de 110 a 121 HB), de dimensões 25 X 50 X 5 mm e peso inicial conhecido (m_1), é fixada no rotor. A placa é então submetido a uma rotação de 70 rpm durante 15 minutos, sendo a mesma pesada ao final do teste (m_2). O AI (em g/t) é representado pela redução de massa da placa de aço ao final do teste e calculado conforme apresentado na Equação 1.

$$AI = \frac{1000 * (m_1 - m_2)}{0,5} \quad (1)$$

Para a determinação da britabilidade Macon (Br) a placa é mantida em movimento por 5 minutos. Após este tempo o tambor foi esvaziado e o minério testado foi peneirado usando uma malha quadrada de 1,6 mm.

A britabilidade Macon da amostra é representada pela relação entre a massa total da amostra (m_t) e a massa retida em 1,6 mm após o teste (m_r), como apresentado na Equação 2.

$$Br = \frac{1000 * (m_t - m_r)}{m_t} \quad (2)$$

Adicionalmente, foram determinadas massa específica e a lameralidade do minério, sendo esta última definida como a fração de partículas com formato oblongado presentes no minério. Para tal, as partículas com comprimento maior que três vezes a menor dimensão presentes em uma amostra de 300 g do minério britado (granulometria entre 10 e 13 mm) foram separadas e pesadas.

Uma vez que se desejava testar a substituição de parte do circuito de cominuição da FERBASA por um HPGR, foi definida uma curva granulométrica objetivo (*target*), baseada na especificação da produção de areia de cromita. Tal curva pode ser vista na Figura 2.

Desta forma foi adotado um $d_{80} = 550 \mu\text{m}$ e $d_{20} = 130 \mu\text{m}$ para o produto do HPGR. De posse dos resultados dos testes utilizou-se o software de simulação Bruno da Metso

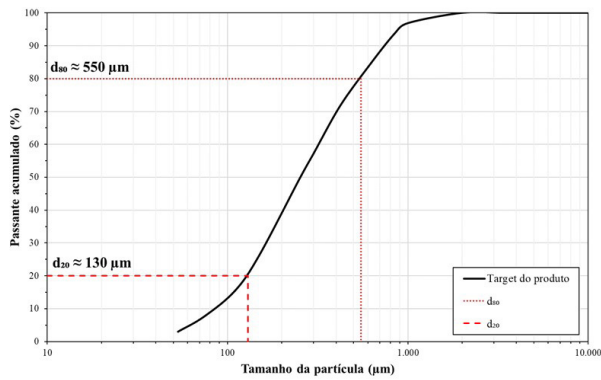


Figura 2. Curva granulométrica objetivo para a cominuição do minério de cromo.

para simular a condição de operação industrial do HPGR, realizando assim o *scale up* do britador, do modelo HRC D1000 (em escala de laboratório) para um dos nove modelos industriais disponíveis no mercado brasileiro pela fabricante. Desta forma foi possível dimensionar um britador que se adequasse às condições de trabalho necessárias na FERBASA.

3 Resultados e discussões

A massa específica encontrada foi de $3,26 \text{ g/cm}^3$, com massa específica aparente de $1,81 \text{ g/cm}^3$. A umidade encontrada foi de $2,84\%$. O *Work Index* (W_i) encontrado foi de $14,67 \text{ kWh/t}$ e o índice de abrasão de Bond (A_i) igual a $0,235$. O índice de abrasão Macon (AI) obtido foi de 1.042 g/t , classificando assim o minério de cromo como sendo de média abrasão ($600 \leq A_i \leq 1200 \text{ g/t}$). A britabilidade Macon (Br) encontrada foi de $47,58\%$, o que indica um minério de fácil britabilidade ($40 \leq Br \leq 50\%$).

A lamelaridade do minério foi de $7,85\%$, indicando se tratar um minério com formato tendendo ao cúbico. De acordo com os parâmetros supracitados seria possível o uso de um HPGR para a cominuição do minério de cromo, não sendo encontrada nenhuma restrição para a adoção deste equipamento.

A Figura 3 apresenta a análise granulométrica da alimentação e descarga do moinho de barras da FERBASA.

É possível notar que o minério após cominuição apresentava $d_{80} = 4.100 \mu\text{m}$ e $d_{20} = 180 \mu\text{m}$. Apenas 45% da massa produzida estava apta a seguir para a moagem secundária (passante em $1,0 \text{ mm}$).

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos com o HRC D1000 da Metso. Uma compilação dos resultados dos dois moinhos (barras e HPGR) pode ser vista na Figura 5. É possível notar que o d_{80} do produto (curva preta pontilhada) aumentou para $6.000 \mu\text{m}$ e o d_{20} para $1.500 \mu\text{m}$, quando comparado com o circuito atual usando moinho de barras.

Após o fechamento do circuito de cominuição com uma peneira o d_{80} (curva cinza) foi reduzido para $640 \mu\text{m}$ e o d_{20} para $73 \mu\text{m}$, 100% passante em $1,0 \text{ mm}$. Outro

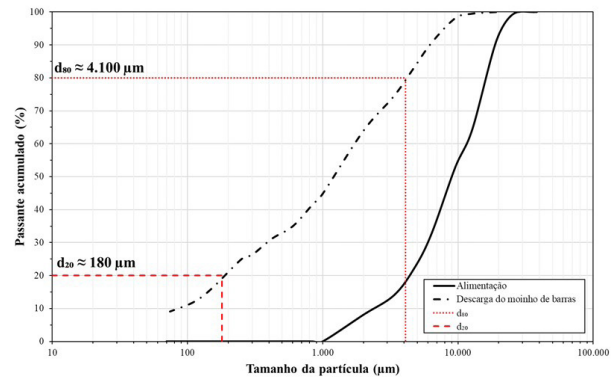


Figura 3. Análise granulométrica da alimentação e descarga do moinho de barras da FERBASA.

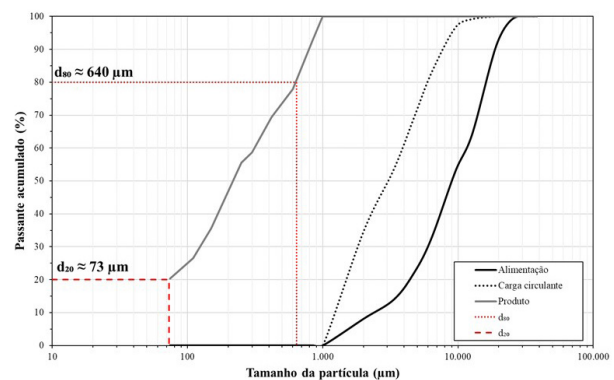


Figura 4. Análise granulométrica da alimentação e descarga do HRC D1000.

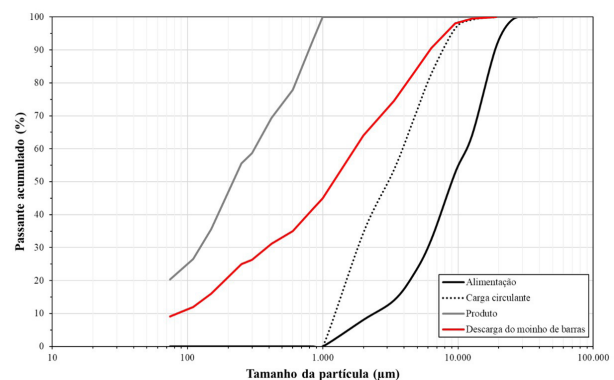


Figura 5. Comparação entre a análise granulométrica da alimentação (em preto), da descarga (em vermelho) do moinho de barras da FERBASA e do produto do HRC D1000 (em cinza).

ponto importante de se notar é a quantidade de material produzido abaixo de $250 \mu\text{m}$ (ou $60\#$), uma vez que material demasiado fino compromete a produção de areia de cromita, cuja a especificação na referida malha deve estar entre 25 e 48% passante. O produto gerado com o HRC D1000, após peneiramento, obteve $55,6\%$ passante em $250 \mu\text{m}$, $7,6\%$

superior ao permitido pela especificação do produto. Desta forma, é necessário realizar uma etapa de classificação do produto para a remoção de parte da fração fina e/ou a realização de etapas de otimização da moagem com o HRC D1000 de modo a gerar menos finos.

A Figura 6 apresenta um comparativo entre o produto obtido com o HRC D1000 (real) e a curva granulométrica objetivo definida inicialmente (teórico). Cada ponto no gráfico corresponde a uma peneira usada na análise granulométrica.

É possível notar que para granulometrias mais grosseiras os resultados foram muito próximos da reta identidade, indicando uma forte correlação entre o teórico e o real. Contudo, é possível notar um viés nos resultados obtidos para granulometrias finas (< 420 µm), onde o produto obtido foi mais fino que o inicialmente previsto, indicando uma quebra maior do minério de cromo do que o esperado. No geral o ajuste entre a curva objetivo e o produto obtido obteve R2 ajustado de aproximadamente 96%.

O minério ao passar pelo britador de rolo pode formar pequenos aglomerado, chamados em inglês de *cake*. O material produzido nos testes de bancada com o HRC D1000 podia ser facilmente quebrado manualmente, não sendo notado nenhum problema de *caking* do produto. Desta forma, estima-se que havendo um pré-empolpamento adequado na alimentação do peneirador e o uso de spray os aglomerados que venham a ser formados serão completamente dissolvidos.

Simulações foram realizadas no software Bruno da Metso para dois possíveis cenários de produção, produção de 60 e 120 t/h de minério de cromo. Para o primeiro cenário (60 t/h) o britador indicado foi o HRC 800 da Metso, o menor equipamento disponível na linha HRC, operando com carga circulante de 100% do valor da alimentação nova. Tal britador possui dimensões dos rolos de 800 mm x 500 mm, opera com dois motores de 177 hp (potência máxima de cada motor de 132 kW) e capacidade produtiva nominal de 80 a 120 t/h. Já para uma produção de 120 t/h (100% de aumento na produção) é possível adotar duas unidades do HRC 800 ou uma unidade do britador HRC 1000. O HRC 1000 possui dimensões dos rolos de 1000 mm x 600 mm (aproximadamente 25% maior), opera com dois motores de 590 hp (potência máxima de cada motor de 440 kW, representando um aumento de aproximadamente 333% na potência máxima) e capacidade produtiva nominal de 200 a 399 t/h. Contudo, atenção deve ser dada ao peneiramento na malha de 1,0 mm de modo a manter a carga circulante estável. Atualmente a potência instalada no circuito de britagem somada com os circuitos de moagem de barras e bolas é de 858 kW, sendo o consumo médio durante a operação de 512 kWh.

Referências

- 1 Chaves MM. Análise dos efeitos da troca de corpo moedor no custo das etapas de moagem e flotação no beneficiamento de minério [monografia]. Niterói: UFF; 2016.

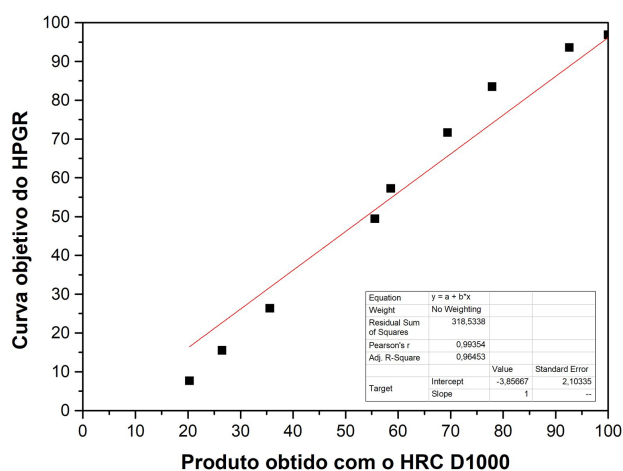


Figura 6. Comparação entre o produto obtido com o HRC D1000 e a curva objetivo definida inicialmente.

Desta forma, a adoção de um ou mais britadores da linha HRC (800 ou 1000) da Metso tem grande probabilidade de gerar uma redução de custo de operação da ordem de 30%.

4 Conclusões

O presente trabalho testou uma nova rota de cominuição do minério de cromo da mina de Ipueira da FERBASA, visando substituir o atual circuito composto por britador de mandíbulas, cônico e moinho de barras por um HPGR. Os resultados obtidos indicam não só um grande potencial técnico para tal substituição, como também econômico, visto que o HPGR, tem eficiência energética maior que a do moinho de barras. Cita-se ainda uma possível redução no custo de peças de desgaste e corpos moedores, não abordada no presente trabalho. A adoção do HPGR traz ainda vantagens ambientais para a FERBASA no que tange a produção de ruído e no consumo de água, uma vez que este britador é operado a seco. Embora os resultados dos testes tenham boa confiabilidade, os valores de capacidade simulados poderão sofrer desvios durante a operação real, sendo recomendável considerar uma tolerância de ±10%.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA) pela realização do presente trabalho, à Metso-Outotec e à Universidade Federal de Catalão.

- 2 Lima JMG. Perfil da mineração de cromo. Brasília: Ministério de Minas e Energia; Banco Mundial; 2009. Produto 12: minério de cromo; p. 35. (Relatório Técnico; no. 21).
- 3 Sampaio JA, Carvalho EA, Fonseca BF. Cromita: Ferbasa – Mina Ipueira. In: Sampaio JA, Luz AB, Lins FF, editores. Usina de beneficiamento de minérios do Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2001. p. 139-147.
- 4 Oliveira PS, Nascimento AF, Silva FMS, Silva AC, Silva EMS. Proposta de recuperação da cromita contida em rejeitos de minério de cromo da mineração FERBASA. Revista Foco. 2023;16(6):e2329-e9.
- 5 Rosa AC. Desempenho dos circuitos de moagem direto inverso da SAMARCO [dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2013.
- 6 Tohry A, Yazdani S, Hadavandi E, Mahmudzadeh E, Chelgani SC. Advanced modeling of HPGR power consumption based on operational parameters by BNN: a “Conscious-Lab” development. Powder Technology. 2021;381:280-284.
- 7 Pedrosa FJBO. High Pressure Grinding Rolls como alternativa à cominuição de óxido de alumínio eletrofundido: uma avaliação do potencial de simplificação de um circuito [dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2019.
- 8 Pedrosa FJB, Bergerman MG, Delboni H Jr. Aplicação do HPGR na cominuição do óxido de alumínio eletrofundido. In: Anais do XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2017 Out 23-27; Belém, PA. Belém: UFPA; 2017. p. 1-8.
- 9 Pedrosa FJB, Bergerman MG, Segura-Salazar J, Delboni H Jr. HPGR as alternative to fused alumina comminution route: an assessment of circuit simplification potential. REM - International Engineering Journal. 2019;72(3):543-551.
- 10 Peres LM, Massola CP, Bergerman MG. Avaliação da abrasividade de minérios a partir do ensaio LCPC em alternativa ao método de Bond. In: Anais do XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2017 Out 23-27; Belém, PA. Belém: UFPA; 2017. p. 1-8.

Recebido em: 30 Abr. 2023

Aceito em: 28 Set. 2023