



AVALIAÇÃO DO RECICLO DE BORDAS DO PRODUTO DA PRENSA DE ROLOS EM PRENSAGENS INDUSTRIAIS DE PELLET FEED VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

CAMPOS, T.M.¹, BUENO, G.², TAVARES, L.M.³

¹Universidade Federal Do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Tecnologia Mineral (COPPE/UFRJ). e-mail: tulio_uca2013@poli.ufrj.br

²Vale S.A, Complexo de Tubarão

³Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Tecnologia Mineral (COPPE/UFRJ).

RESUMO

O desenvolvimento da prensa de rolos ao longo dos anos permitiu que ela passasse a ocupar um espaço de destaque no setor mineral. Se mostrando extremamente atrativa em operação, sua aplicação cresceu significativamente na produção de pellet feed de minério de ferro, sendo utilizada em todas as usinas de pelotização do Complexo de Tubarão da Vale S.A. Paralelo a este desenvolvimento, a modelagem matemática que descreve o funcionamento deste equipamento foi aprimorada ao longo das últimas três décadas e hoje se tornou uma ferramenta preditiva extremamente robusta em usinas industriais, sendo amplamente aplicada na otimização de prensagens. O presente trabalho utiliza o modelo matemático de Torres & Casali (2009), modificado pelos autores, como ferramenta preditiva em processos de prensagem industrial de *pellet feed* de minério de ferro, apresentando a validação e aplicação do modelo em estudos de caso relacionados às melhorias obtidas na operação ao se utilizar reciclo do produto de bordas da prensagem. De forma geral o modelo se mostrou uma boa ferramenta preditiva e permitiu avaliar diferentes estratégias a serem adotadas em uma prensagem industrial de pellet feed. Simulações mostraram que é possível obter um ganho de área superficial específica de 400 cm²/g com recirculação do produto de bordas de 40%.

PALAVRAS-CHAVE: Prensa de rolos; Modelagem; Simulação; Pellet feed; Reciclo de bordas.

ABSTRACT

The HPGR development over the years allowed this equipment to now occupy an important place in the minerals industry. Extremely attractive from the operational point of view, its application has experienced a significantly increase in the iron ore pellet feed production, being used in large scale by the pelletizing plants in the Complexo de Tubarão of Vale S.A. Parallel to this development, the mathematical modeling that describes the HPGR performance has been improved over the last 30 years, and today has become an extremely robust predictive tool in industrial plants. The present work uses the mathematical model of Torres & Casali (2009), modified by the authors, as a predictive tool in the iron ore pellet feed pressing in industrial scale, presenting the validation and application of the model in a case study related to the operation when the edge product is recycled. In general, the model proved to be a good predictive tool and allowed to evaluate different strategies in the industrial plant. Simulation shown that is possible obtain a BSA increase of 400 cm²/g using product edge recycle of about 40%.

KEYWORDS: HPGR; Modeling; Simulation; Pellet feed; Edge recycle.

1. INTRODUÇÃO

Desde sua patente em 1985 a prensa de rolos tem se tornado uma tecnologia cada vez mais comum nas usinas de processamento mineral. Tendo em vista seu excelente desempenho operacional quando comparado com outros equipamentos de cominuição (Aydogan et al., 2006), sua aplicação cresceu rapidamente ao longo dos últimos 30 anos e culminou com sua grande aceitação, não só na indústria cimenteira, onde foi originalmente introduzida, como também em diversas usinas com operações de minerais metálicos.

Entretanto, é importante ressaltar que a primeira aplicação de sucesso da prensa de rolos em usinas de minerais metálicos aconteceu na indústria de minério de ferro. Desde aplicações em britagens terciárias e quaternárias na mina de Los Colorados no Chile (Campos et al., 2019), até prensagens de *pellet feed* de minério de ferro na Suécia e no Brasil (Van der Meer, 1997), a prensa de rolos passou a ser um equipamento extremamente atrativo dentro da indústria de minério de ferro, tanto pela sua alta eficiência energética, quanto pela sua flexibilidade em se adequar a diferentes cenários operacionais.

Posterior ao sucesso das aplicações das usinas da LKAB na Suécia no início da década de 1990, a Vale S.A implementou a prensa de rolos nas usinas de pelotização do Complexo de Tubarão (Vitória - ES), onde os equipamentos passaram a operar em circuitos integrados com moinhos de bolas, operando tanto na pré-moagem quanto na remoagem pré-pelotização (Van der Meer, 1997). Graças a uma série de benefícios obtidos com a aplicação da prensa, tais como alta geração de área superficial (Abanzarpour et al., 2017), maior uniformidade do produto (Van der Meer, 1997) e redução do consumo energético (Ehrenraut e Rao, 2001), este equipamento se tornou essencial para a produção de *pellet feed fines* nas usinas de pelotização da Vale S.A.

Tendo em vista sua atrativa aplicação na produção de *pellet feed* de minério de ferro, a prensa de rolos passou a ocupar um espaço de destaque dentro das usinas de pelotização. Van der Meer (1997) relatou estudos de caso de operações industriais com prensa de rolos que operavam com o equipamento sendo a principal unidade de cominuição em uma usina de produção de *pellet feed* de minério de ferro, o que vem se tornando cada vez mais comum no cenário industrial. De fato, a oportunidade de se prescindir do uso de moinhos de bolas, hidrociclones, bombas, espessadores e filtros em detrimento do uso da prensa de rolos como equipamento único ou operando em diferentes configurações de circuito de prensagem, se torna um cenário extremamente atrativo e viável operacionalmente.

Evidências experimentais mostraram que prensagens com reciclo de uma fração do produto (Ozcan et al., 2015) ou do produto das bordas (Aydogan et al., 2006) ou prensagens em circuitos fechados com classificação utilizando separador do tipo V (Altun et al., 2011) podem ser muito atrativas. Na prensagem de *pellet feed* de minério de ferro, Van der Meer (2015) mostrou por meio de experimentos em uma prensa piloto, enquanto Campos et al. (2018) e Campos et al. (2019) mostraram por meio de simulações de processo estacionário também para uma unidade piloto de prensa de rolos, que a prensagem de *pellet feed fines* com diferentes configurações de circuito garante uma maior eficiência do processo e qualidade final do produto gerado. Portanto, seria extremamente interessante do ponto de vista industrial que o trabalho realizado pelos processos de moagem fosse, ao menos em parte, transferido para as etapas de prensagem, garantindo então uma maior eficiência e homogeneização do produto.

Paralelo a este desenvolvimento e surgindo com uma ferramenta extremamente valiosa na indústria mineral, uma série de autores (Morrell et al., 1998; Torres & Casali, 2009; Dundar et al., 2013; Campos et al., 2019) foram responsáveis pelo equacionamento da fenomenologia da prensa de rolos visando prever seu desempenho. De maneira geral, os modelos matemáticos disponíveis na literatura são aptos a prever três variáveis de desempenho da prensa de rolos (capacidade de produção, potência demandada e distribuição granulométrica do produto) a partir das condições iniciais de prensagem e características do material processado. Atualmente, a modelagem matemática de processos de prensagem atrelada a simulações computacionais está se tornando uma ferramenta robusta e apta a prever e otimizar o desempenho de prensas de rolos industriais.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de simulações de processo, o efeito do reciclo de bordas no desempenho de uma unidade industrial de prensa de rolos da usina do Complexo de Tubarão da Vale S.A. Todas as simulações foram feitas utilizando o modelo matemático de Torres & Casali (2009), modificado pelos autores, sendo este calibrado e validado para dados experimentais de prensagem de *pellet feed* em escala industrial.

2. METODOLOGIA

2.1 Teste industriais de prensagem

O *pellet feed* utilizado nos testes é uma blendagem de diferentes tipologias de minério de ferro que compõe as alimentações usuais das usinas de pelletização do Complexo de Tubarão. Usualmente a prensa de rolos se localiza após os processos de moagem em moinhos de bolas e filtragem, o que garante uma alimentação com teores de umidade na faixa de 7.5 a 9.5%, além de uma superfície específica do material alimentado em torno de 1700 cm²/g. Foram realizados testes em três prensas industriais, as quais correspondem às Usinas 3, 6 e 8. Deve-se ressaltar que as prensas operam em condições diferentes e apresentam desempenho variado. A Tabela 1 resume as dimensões dos rolos e principais condições operacionais às quais as prensas foram submetidas.

	Usina 3	Usina 6	Usina 8
Diâmetro dos rolos (m)	2,25	1,70	2,00
Comprimento dos rolos (m)	1,55	1,40	1,50
Forças específicas (N/mm ²)	0,5 – 1,4	0,5 – 2,1	1,5 – 1,7
Velocidade dos rolos (m/s)	0,8 – 0,9	0,5 – 1,7	1,5 – 1,8
Abertura operacional (mm)	9 – 10	9 – 22	9 – 12

2.2 Modelagem matemática da prensa de rolos

Conforme apresentado na Seção 1, diferentes modelos matemáticos (Morrell et al., 1998; Torres & Casali, 2009; Dundar et al., 2013) foram desenvolvidos nos últimos 30 anos com o intuito de prever o desempenho da prensa de rolos. Dentre estes, Torres & Casali (2009) propuseram um modelo matemático fenomenológico que, além de prever a capacidade do equipamento (t/h) (Morrell et al., 1998), a potência demandada na prensagem (kW) e a distribuição granulométrica do produto final, é também capaz de prever o perfil de quebra ao longo da posição axial do rolo. De maneira geral, os autores propuseram um perfil de potência parabólico ao longo do eixo longitudinal do rolo e, conseqüentemente, conseguem determinar qual seria a granulometria do produto ao longo de toda posição axial (Torres &

Casali, 2009). O modelo de quebra proposto por Torres & Casali (2009), assim como boa parte dos modelos de quebra que descrevem a operação na prensa de rolos, se baseia no modelo do balanço populacional, seguindo a função quebra $b_{i,j}$ (Austin & Luckie, 1972) e a função seleção específica $S_{i,k}$ (Herbst & Fuerstenau, 1980).

Embora este modelo já tenha sido validado para diferentes aplicações (Vaca et al., 2017), Campos (2018) e Campos et al. (2019) mostraram que o modelo não se mostrou uma ferramenta preditiva para o desempenho da prensagem de *pellet feed* de minério de ferro em escala piloto e industrial. Com o intuito de aprimorar a previsão do modelo e torná-lo aplicável em prensagens de *pellet feed* de minério de ferro, Campos et al. (2019) propuseram e validaram uma série de modificações no modelo de Torres & Casali para prensagens de *pellet feed* de minério de ferro em escala piloto. De maneira complementar, Campos (2018) propôs uma equação capaz de prever a aceleração do material na zona de compressão da prensa de rolos quando operando com materiais excessivamente úmidos (>8%), como disposto na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo das principais equações do modelo de Torres & Casali, modificado pelos autores (Adaptada, Campos et al., 2018)

Capacidade	$Q = 3,6LU_g x_g \rho_g \left(\frac{100}{100-\gamma}\right);$	$\ln\left(\frac{\gamma}{A}\right) = -b \frac{x_g}{D} \left(\frac{U}{U_{max}}\right)^\tau$
		$U_g = \frac{U x_c \rho_a}{x_g \rho_g}$
Potência	$P = 2F \sin\left(\frac{C\alpha_{ip}}{2}\right) U;$	$\cos \alpha_{ip} = \frac{1}{2D} \left[(x_g + D) + \sqrt{(x_g + D)^2 - \frac{4x_g \rho_g D}{\rho_a}} \right]$
Granulometria do Produto	$p_{i,k} = \sum_{j=1}^i A_{i,j,k} \exp\left(-\frac{S_{j,k}}{v_z} z^*\right);$	$B(x, y) = K \left(\frac{x}{y_0}\right)^{n_3} \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2}$
	$\ln(s_i^E / s_1^E) = \xi_1 \ln(\bar{x}_i / \bar{x}_1) + \xi_2 \ln(\bar{x}_i / \bar{x}_1)^2$	$S_{i,k} = \frac{P_k}{H_k} S_i^E$

2.3 Simulação do estudo de caso

Foram realizadas simulações visando otimizar o desempenho da prensa de rolos a partir de pequenas modificações em cenários industriais a partir de demandas operacionais reais nas usinas. Todas as simulações foram feitas avaliando os impactos dessas modificações na taxa de produção, consumo energético, aumento de área superficial específica e índice de eficiência do processo, caracterizado pela razão entre aumento de área superficial específica gerada e energia específica. Uma das demandas operacionais observada na Usina 3 inspirou o estudo de caso simulado no presente trabalho. De maneira geral, a prensa dessa usina opera abaixo da capacidade para a qual foi projetada, tendo em vista que a coluna de alimentação não é capaz de manter o equipamento afogado durante a operação e impede que o processo opere em condições ótimas de produção.

O estudo de caso consistiu da comparação de diferentes configurações de circuito na prensa da Usina 3 visando abordar diferentes razões de recirculação do produto das bordas a fim de otimizar o desempenho do equipamento. Foram simulados e comparados dois cenários de prensagem em estágio único nessa usina, no qual um deles foi com um circuito aberto (processo tradicional) enquanto no outro foi analisado o reciclo de frações variadas do produto de borda (produto grosseiro). As simulações foram realizadas com a prensa operando na pressão hidráulica de 60 bar e abertura operacional de 9 mm, enquanto a velocidade variou

de 0,8 a 1,4 m/s, a fim de adequar a capacidade do circuito em 550 t/h. Para o reciclo de bordas, foram simuladas diferentes razões de recirculação, variando de 10 a 60% da massa processada pelo equipamento para trabalhar em circuito fechado com a alimentação, sendo a razão de recirculação igual a 100%.

3. RESULTADOS

3.1 Ajuste de parâmetros e validação do modelo

Os parâmetros de quebra do modelo foram ajustados a partir de um teste de referência, comparando-se os passantes acumulados das distribuições granulométricas do produto experimental e calculada, a partir do método dos mínimos quadrados. Os parâmetros da função quebra não-normalizável já haviam sido calibrados para *pellet feed* de minério de ferro em um trabalho realizado previamente pelos autores (Campos et al., 2019), enquanto os parâmetros da função seleção foram ajustados para cada uma das campanhas industriais. A Figura 1 mostra o ajuste de parâmetros de quebra (a) e validação do modelo de quebra (b), enquanto a Figura 2 compara os valores experimentais e calculados da capacidade de produção (a) e potência consumida (b) para as três prensas industriais.

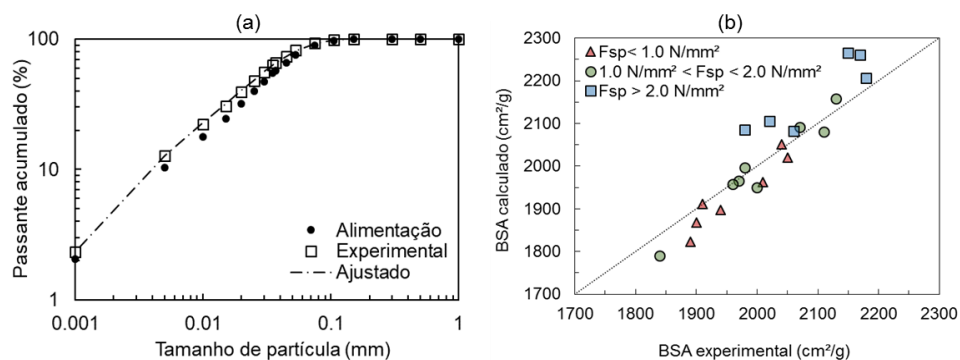


Figura 1. Comparação entre a distribuição granulométrica experimental e ajustada do produto da prensa da Usina 3 (a) e comparação entre os valores experimentais e calculados para a área superficial específica dos produtos obtidos nos testes de prensagem para as três usinas (b)

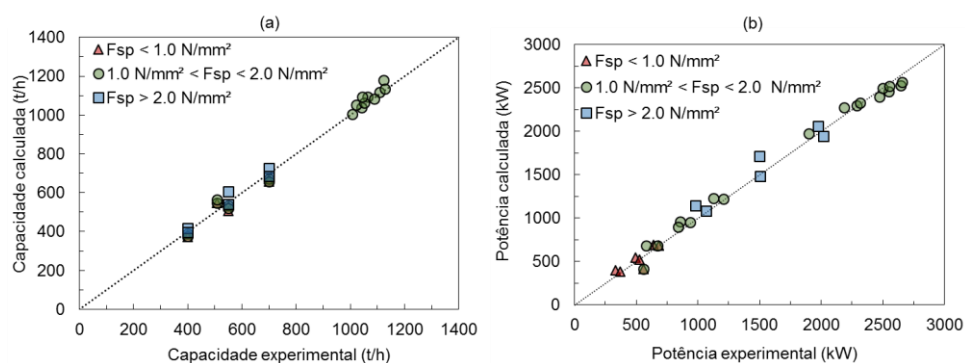


Figura 2. Comparação entre os valores experimentais e calculados para a capacidade (a) e potência consumida (b) da prensa de rolos em todas as campanhas industriais realizadas, para diferentes forças específicas de prensagem

Como observado, a Figura 1a apresenta a comparação entre a distribuição granulométrica do produto experimental e ajustada para a prensa da Usina 3, enquanto a

Figura 1b compara os resultados experimentais e calculados para a área superficial do produto final, onde se evidencia a aderência do modelo aos dados experimentais para uma ampla faixa operacional, embora para forças específicas relativamente altas já existem evidências de uma pequena saturação da quebra. Por outro lado, assim como já observado por Campos (2018), as modificações foram fundamentais para melhorar a previsão destas variáveis de desempenho da prensa de rolos em escala industrial, se mostrando compatíveis com a realidade operacional.

3.2 Simulações do estudo de caso

As simulações realizadas no estudo de caso visaram otimizar a operação da prensa da Usina 3. Para estas simulações foram testados diferentes cenários, sendo que um deles correspondeu ao processo tradicionalmente utilizado (prensagem em circuito aberto) e os demais a simulações com reciclo de bordas do produto, na qual operou-se com reciclo de 10% a 60% da massa processada pelo equipamento para trabalhar em circuito fechado com a alimentação, sendo a razão de recirculação igual a 100%. As taxas de produção foram mantidas em 550 t/h, enquanto a pressão operacional foi de 59 bar. A Tabela 3 resume os principais resultados das simulações, na qual são apresentadas em detalhes as simulações com reciclo de bordas de 20 e 40%.

Tabela 3. Resumo dos principais resultados obtidos nas simulações do estudo de caso em estágio único

	Circuito aberto (Experimental)	Circuito aberto (Simulado)	Reciclo de 20% de borda	Reciclo de 40% de borda
Potência (kW)	1000	896	1134	1512
Capacidade do circuito(t/h)	507	564	563	553
Energia específica (kWh/t)	1.97	1.58	2.01	2.73
Reciclo de bordas (%)	0	0	20	40
Pass. 45 µm da alimentação (%)	66,2	66,2	66,2	66,2
BSA da alimentação (cm ² /g)	1700	1702	1702	1702
Pass. 45 µm do produto (%)	73,9	73,5	76,1	78,6
BSA do produto (cm ² /g)	2000	1950	2039	2125
Ganho BSA (cm ² /g)	298	248	337	424
Utilização de Ener. (cm ² /g/kWh/t)	151	156	167	155

Os resultados mostram claramente que é uma boa estratégia a operação com reciclo do produto gerado nas bordas (granulometria mais grossa) a fim de otimizar o processamento na Usina 3. Como ressaltado na Seção 2.3, a prensa da Usina 3 opera com capacidade abaixo da qual foi inicialmente projetada, o que viabiliza a implementação de um possível sistema de reciclo de bordas do produto de prensagem. Como consequência, além de manter a mesma capacidade de produção do circuito e operar com o mesmo índice de utilização de energia (Tabela 3), o reciclo do produto de borda permite um aumento de 9% na área superficial do produto final se comparada à operação em circuito aberto, ao se adotar recirculação de 40% do produto de bordas. Por outro lado, utilizando uma recirculação do produto de bordas de 20%, observou-se um ganho de área superficial razoavelmente menor, tendo um acréscimo de 5% quando comparado ao processo tradicional. Contudo, deve-se ressaltar que o menor consumo de energia específica do processo permitiu que este cenário alcançasse uma utilização de energia de 167 cm²/kWh/t, se mostrando um cenário atrativo dentre as demais simulações. A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica do produto para os três cenários simulados apresentados na Tabela 3.

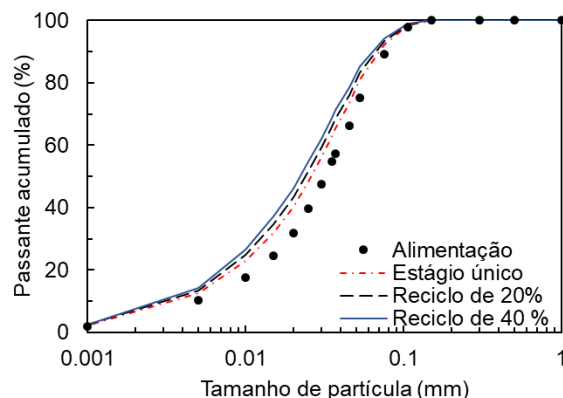


Figura 3. Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica para as diferentes simulações realizadas, evidenciando o aumento da razão de redução à medida que aumenta o reciclo de bordas

Como já apresentado por Van der Meer (2010) diferentes percentagens do produto de borda recirculado são determinantes no desempenho do processo. A Figura 4 apresenta a relação entre utilização de energia em relação à percentagem do produto de bordas recirculado (a) assim como o ganho de área superficial específica e consumo de energia específica em relação à percentagem do produto de bordas recirculada (b) para as diferentes simulações realizadas.

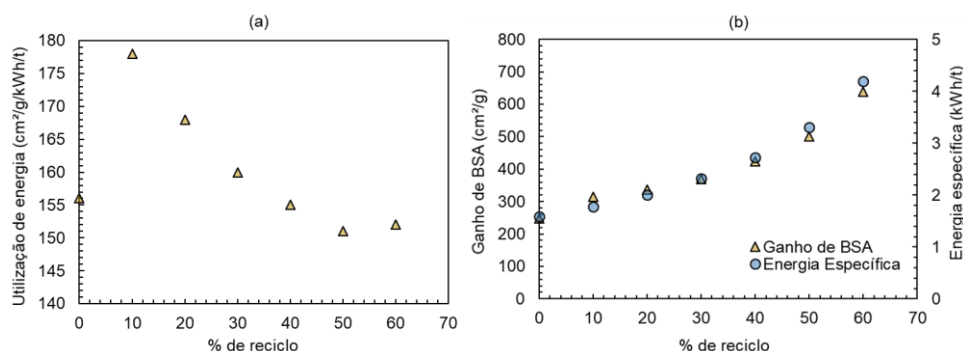


Figura 4. Influência da percentagem de material recirculado na utilização de energia (a) e no ganho de área superficial e energia específica consumida (b)

Assim como disposto na Tabela 3, a Figura 4b indica que o aumento da percentagem de material recirculado pelas laterais dos rolos beneficia o ganho de área superficial específica no produto. Em contrapartida, a utilização de energia do processo tende a atingir um ponto ótimo quando opera com reciclo de 10% do produto das bordas (Figura 4a), tendo uma redução gradativa à medida que esta percentagem aumenta. De fato, como mostra a Figura 6b, a partir de 40% de recirculação do produto de bordas, o crescimento do consumo de energia específica se torna mais incidente que o ganho de área superficial específica, reduzindo razoavelmente a eficiência do processo de prensagem.

4. CONCLUSÕES

As modificações propostas nos modelos de capacidade, potência consumida e granulometria do produto se mostraram ferramentas importantes e cruciais na determinação das variáveis de desempenho da prensa de rolos. Com o modelo validado, foi possível aplicá-lo como ferramenta preditiva dentro de um processo industrial de *pellet feed*, ainda que limitado a um processo sem aplicações de alta energia específica (Campos et al., 2019).

O estudo de caso da Usina 3 foi capaz de mostrar que ao se trabalhar com reciclo de bordas foi possível aumentar a tonelagem que passa pela prensa (prensa superdimensionada), mantendo a utilização de energia constante e aumentando o ganho de área superficial da operação ao se utilizar o reciclo de bordas do produto em 40%. Por outro lado, também foi interessante mostrar que, embora percentagens de reciclo do produto de bordas mais baixos sejam relativamente responsáveis por menores ganhos de área superficial específica, a utilização de energia foi maior se comparada com os demais casos, tendo em vista sua menor demanda energética específica. Portanto, de maneira geral foi possível mostrar que é viável utilizar diferentes percentagens do reciclo de bordas do produto da prensa, haja visto que estes cenários são atrativos do ponto de vista de geração de um produto de qualidade e com eficiência próxima daquela dos processos tradicionais.

5. REFERÊNCIAS

- Aydogan, N.A., Ergun, L., Benzer, H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry, *Miner Eng.* 2006; 19, 130–139.
- Abazarpour, A., Halali, M., Hejazi, R., Saghaeian, M. HPGR effect on the particle size and shape of iron ore pellet feed using response surface methodology, *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2017 53(2), 1–9.
- Altun, O., Benzer, H., Dundar, H., Aydogan, N.A. Comparison of open and closed circuit HPGR application on dry grinding circuit performance. *Miner Eng.* 2011;24(3–4):267–75.
- Austin, L.G., Luckie, P.T. The estimation of non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding tests, *Powder Technol.* 1972. 5(5) 267–271.
- Campos, T.M., Barrios, G.K.P., Bueno, G., Tavares, L.M. Comparação de circuitos de prensagem de *pellet feed* previamente à moagem. *Proc. 6th Brazilian Seminar on Agglomeration.* 2018. São Paulo, ABM, p.57-68.
- Campos, T.M. Modelagem matemática da prensa de rolos aplicada a cominuição de minério de ferro. Projeto final de graduação, 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Campos, T.M., Bueno, G., Barrios, G.K.P., Tavares, L.M. Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 2: Modeling and simulations, *Miner. Eng.* 2019 (submetido para publicação).
- Dundar, H., Benzer, H., Aydogan, N. Application of population balance model to HPGR crushing, *Miner. Eng.* 2013. 50-51, 114–120.
- Ehrenraut, G., Rao, R. Experience with Roller Press in the Pellet Plant Kudremukh Iron Ore Company Ltd, *Aufbereitungs Technik* 2001. 10, 469–476.
- Fuerstenau, D.W., Herbst, J.A. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance model, *Int. J. Miner. Process.* 1980. 7, 1–31.
- Morrell, S., Lim, W., Shi, F., Tondo, L. Modelling of the HPGR crusher. In: Kawatra, S.K (Ed.), *Comminution Practices*, Littleton, USA, SME. 1998, p. 117–126.
- Ozcan, O., Aydogan N.A., Benzer, H. Effect of operational parameters and recycling load on the high pressure grinding rolls (HPGR) performance. *Int J Miner Process.* 2015; 136:20 5.
- Torres, M., Casali, A. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls, *Miner. Eng.* 2009, 22(13) 1137–1146.
- Vaca, F.C. et al. Controlled high pressure grinding roll by model predictive control. *Proc. 3rd IEEE Colombian Conference on Automatic Control, IEEE.* 2007, pp. 1-6.
- Van der Meer, F.P. Roller Press Grinding of Pellet Feed. Experiences of KHD in the Iron Ore Industry. *AusIMM Conference on Iron Ore Resources and Reserves Estimation.* 1997, n. September, p. 1–15.
- Van der Meer, F.P. Pellet feed grinding by HPGR, *Miner Eng.* 2015, 73, 21–30.