

COMPARAÇÃO DE CIRCUITOS DE Prensagem DE PELLET FEED PREVIAMENTE À MOAGEM*

Túlio Moreira Campos¹
Gabriel Pantoja Barrios²
Gilvandro Bueno³
Luís Marcelo Marques Tavares⁴

Resumo

A aplicação da prensa de rolos em circuitos de cominuição se encontra cada vez mais presente na indústria mineral. No caso da prensagem de *pellet feed*, previa a pelletização, as usinas do Complexo de Tubarão da Vale S.A foram as pioneiras na aplicação da tecnologia. O presente trabalho avalia, por meio de simulações de processo, o desempenho da prensa de rolos em escala piloto na prensagem de *pellet feed* em diferentes configurações de circuito (prensagem em um estágio; um estágio com recirculação de bordas; um estágio com bordas processadas em um segundo estágio, e prensagem em dois estágios). Para as simulações foi utilizado o modelo fenomenológico de Torres & Casali (2009), os parâmetros das funções quebra e seleção foram ajustados com base em um dos testes experimentais. O modelo foi validado usando dados experimentais de prensagem em diferentes condições de operação. O trabalho mostrou que variações do circuito tradicional (prensagem em um único estágio) podem ser muito atrativas do ponto de vista de ganho de área superficial específica no produto final. De fato, a prensagem com reciclagem de bordas destaca-se comparada com a prensagem em único estágio, em termos do alto ganho de área superficial atrelado à boa eficiência no consumo energético.

Palavras-chave: *Pellet Feed*, Simulação, Prensa de Rolos, Prensagem em duplo estágio.

COMPARISON OF CIRCUITS FOR ROLLER PRESSING OF PELLET FEED PRIOR TO MILLING

Abstract

The application of the HPGR in comminution circuits is increasingly at the present in the mineral industry. In the case of pellet feed pressing during pre-pelletizing, VALE's Complexo de Tubarão plants were the pioneers in the application of the technology. The present work evaluates, through process simulations, the performance of a pilot scale HPGR during pellet feed pressing different circuits configurations (one stage pressing, one stage with edge recycling, one stage with reprocessed edges in a second stage, and two-stage pressing). The simulations were performed with Torres & Casali's model (2009), the breakage and selection function parameters were fitted using a experimental base case. The model was validated using the experimental data of pressing in different operational conditions. The work showed that variations of the traditional circuit used in pellet feed pressing can be very attractive from the point of view of the specific surface gain in the final product. In fact, the edge recycling configuration stands out when compared to the single-stage, in terms of the high surface area gain and the energy consumption efficiency.

Keywords: Pellet Feed, Simulation, HPGR, Double Stage Pressing.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Aluno de Iniciação Científica, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Pós-Doutorando, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Desenvolvimento, Departamento de Engenharia de Desenvolvimento, Complexo de Tubarão – Vale S.A, Vitória, ES, Brasil.

⁴ Engenheiro de Minas, M.Sc., Ph.D., Professor Titular, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Desde a introdução da prensa de rolos na indústria cimenteira em 1984, o projeto e a engenharia do equipamento passaram por uma curva de aprendizado e desenvolvimento apreciável, que culminou com a grande aceitação da tecnologia em diferentes aplicações na indústria mineral [1].

No começo da década de 1990 a VALE, então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), implementou a prensagem de minério de ferro em prensa de rolos combinada com a moagem em moinhos de bolas para produzir *pellet feed fines* em várias das usinas integradas de moagem e pelletização do Complexo de Tubarão, seja na pré-moagem (Usinas I e II) ou na remoagem (Usina IV) da descarga do moinho de bolas [2].

A prensagem de *pellet feed*, tem mostrado uma série de benefícios:

- Redução do consumo de energético através da introdução de microfissuras, que aumentam a taxa de produção e a redução da granulometria do produto [3].
- Geração de uma alta proporção de ultrafinos, principalmente pela atrição e cisalhamento das superfícies das partículas no leito de material úmido, resultando em aumento da área superficial específica de 300 a 600 cm²/g (Blaine)[4].
- Capacidade de lidar com níveis de umidade entre 8 e 12 % (produto filtrado após moagem)[4].
- Geração de formato de partícula mais angular em comparação com produtos de moinho de bolas, o que permite que o produto seja adequado para pelletização com um valor menor de Blaine, presumindo um melhor empacotamento e densidade das pelotas [5].
- Vantagens no processo de pelletamento em termos de uniformidade no tamanho das pelotas verdes, maior resistência, menor consumo de aditivos e menor taxa de recirculação na grelha [2].

Atualmente, diferentes configurações de circuitos de prensagem têm sido objeto de pesquisa, inclusive com a proposição da prensa de rolos ser usada como o principal equipamento na produção de *pellet feed fines*, em um processo denominado prensagem em múltiplos estágios, o que permitiria prescindir do uso de moinhos de bolas, hidrociclones, bombas, espessadores, e filtros, diminuindo potencialmente tanto o CAPEX quanto o OPEX.

Do ponto de vista do processo, as principais configurações de circuitos de prensagem que têm sido utilizados na indústria são [6]:

- Circuito aberto em um ou vários estágios em série;
- Circuito fechado com classificação;
- Circuito fechado com reciclo do produto (fração do produto ou produto de bordas).

Evidências experimentais em escala industrial mostram que a instalação de uma prensa de rolos em estágio simples pode aumentar a capacidade e diminuir o consumo energético de circuitos existentes de moagem de cimento [7] e de *pellet feed*[8]. Por outro lado, diferentes autores afirmam que a prensagem com reciclo de uma fração do produto [9] ou do produto das bordas [7], e a prensagem em circuito fechado com classificação usando o separador do tipo V[10] são ainda mais atrativas que a prensagem em estágio simples, ressaltando que essa última

alternativa é exclusivamente aplicável a processos a seco, como a produção do cimento Portland.

Estudos experimentais de prensagem de minérios competentes em escala piloto [11,12], mostram que em termos de razão de redução, o circuito com reciclo de bordas é mais eficiente que a prensagem tanto em estágio simples quanto em vários estágios. Entretanto, o circuito fechado com classificação usando peneira tem demonstrado ser mais eficiente que as configurações mencionadas anteriormente.

Um estudo de prensagem em escala de laboratório [13] demonstrou que a eficiência em termos de consumo energético e razão de redução dependem do tipo do material, sendo a prensagem em estágios seriados, mais eficiente para a prensagem de minérios menos competentes (calcário), enquanto que a prensagem em circuito fechado com classificação usando peneiras foi mais eficiente para minérios competentes.

No caso em particular da prensagem de *pellet feed*, devido à granulometria fina do produto da prensagem e à umidade, as únicas configurações de circuito diretamente aplicáveis são o circuito aberto em um único ou vários estágios em série, e o circuito fechado, seja com reciclo de bordas ou de uma fração do produto. Van der Meer [4] realizou diferentes experimentos de prensagem em circuito aberto com um e dois estágios de prensagem, e circuito fechado com reciclo de bordas com taxas de reciclo de, aproximadamente, 100 a 200%. Os resultados mostraram que, para uma mesma taxa de alimentação do circuito, o melhor desempenho em termos de geração de superfície específica foi obtido com reciclo de 210%. No entanto, o teste apresentou o maior consumo específico de energia. Comparando os testes de dois estágios de prensagem em circuito aberto e circuito fechado com 105% de reciclo, os mesmos apresentaram desempenho similar em termos de geração de superfície específica e consumo específico de energia.

Contudo, a realização de testes de prensagem de diferentes configurações de circuitos nem sempre é viável, devido principalmente a questões de custo e logística associadas ao transporte, preparação do material e número de testes a serem realizados. Além disso, ainda quando usados, nem sempre os ensaios com as diferentes configurações são realizados em condições comparáveis e ótimas. A simulação computacional se mostra como uma ótima alternativa nessa tarefa, tendo sido utilizada com sucesso para analisar comparativamente o desempenho de diferentes circuitos na prensagem de cimento [10, 14].

Motivados pelas evidências experimentais supracitadas, o presente estudo compara diferentes configurações de circuitos de prensagem que podem ser aplicados na pre-moagem de *pellet feed*. Os diferentes circuitos foram simulados usando um modelo matemático fenomenológico, o qual foi calibrado e validado usando dados experimentais de testes de prensagem de *pellet feed* em escala piloto.

2 METODOLOGIA

2.1 Material utilizado nos testes de prensagem

O minério de ferro ou *pellet feed* utilizado nos testes experimentais de prensagem em escala piloto foi um concentrado de flotação proveniente de minas do Complexo de Itabira (Minas de Conceição e Cauê). Em geral, o minério tal qual processado serve como alimentação da moagem, com exceção das Usinas I e II. Portanto,

diferente do cenário industrial, o minério utilizado apresentou teor de umidade inferior a 3% e uma distribuição granulométrica relativamente mais grossa, como apresentado na Tabela 1, junto a outras características do minério.

Tabela 1. Características do minério de ferro utilizado na alimentação dos testes

	Valores
Massa Específica (t/m ³)	5.07
Passante em 45 µm (%)	33.7
Blaine (cm ² /g)	510
Umidade (%)	< 3.0

2.2 Testes de prensagem em escala piloto

A prensa de rolos utilizada nos testes de prensagem é da marca KHD/WEIR com diâmetro D de 1 m e comprimento L de 0,32 m. A prensa piloto conta com um sistema de controle automático que permite variar os parâmetros de operação de velocidade dos rolos U e pressão de operação R_p e registrar os valores das variáveis de desempenho como capacidade Q , abertura de operação s , e potência P . Para cada um dos testes foi coletada uma amostra de corte de correia para caracterizar a granulometria e a superfície específica do produto da prensagem. Adicionalmente, foram coletadas amostras com um dispositivo contendo cinco subdivisões (Figura 1), introduzido longitudinalmente na descarga da prensa durante o ensaio, as quais foram utilizadas para avaliar a granulometria e Blainedas regiões de centro e borda.



Figura 1. Dispositivo utilizado para coletar as amostras ao longo do rolo

Com o intuito de avaliar o desempenho da prensa de rolos e gerar um conjunto de dados consistente para a calibração e validação do modelo matemático, foram realizadas duas baterias de testes de prensagem de *pellet feed* em escala piloto. Na primeira bateria de testes (T1 – T5) foi avaliado o efeito da pressão de operação R_p no desempenho da prensa de rolos. Na segunda bateria de testes foi avaliado o efeito do número de passadas na prensa, com a prensagem em um (P1) e dois estágios (P2). A Tabela 2 resume as principais condições dos testes, com as suas respectivas variáveis de desempenho.

Tabela 2. Condições operacionais dos testes de prensagem em escala piloto

	Símbolo	Prensagens variando R_p					Prensagem em dois estágios	
		T1	T2	T3	T4*	T5	P1	P2
Pressão oper. (bar)	R_p	8.2	15.4	23.1	42.8	54.2	66.4	66.3
Abertura oper. (mm)	s	19.3	16.3	14.5	11.3	10.9	7.6	9.9
Velocidade (m/s)	U	0.22	0.22	0.22	0.27	0.26	0.61	0.49
Capacidade (t/h)	Q	20.6	17.9	16.8	18.2	17.9	39.7	40.5
Potência (kW)	P	10.8	15.9	21.2	43.3	50.3	114.8	112.5
Passante 45 µm (%)	$<45\mu m$	39.1	43.5	45.7	54.9	56	62.4	74.6
Blaine (cm ² /g)	B	580	652	695	941	994	1050	1510

*Caso Base

2.3 Modelo matemático da prensa de rolos

Atualmente existem diferentes modelos matemáticos empíricos e fenomenológicos que podem ser usados para descrever a capacidade [15, 16], o consumo energético[17, 18] e a granulometria do produto[16-19] da prensa de rolos com base nas variáveis operacionais e de projeto do equipamento. Contudo, dentro dos modelos fenomenológicos existentes de granulometria do produto da prensa de rolos, só os de Morrel/Shi/Tondo[16] e de Torres e Casali[18] descrevem de forma diferenciada a granulometria dos produtos do centro e da borda, de importância central no presente estudo. Assim, o modelo de Torres e Casali foi escolhido para a modelagem da prensa de rolos por fornecer o perfil detalhado de granulometria do produto ao longo do rolo.

A Figura 2 mostra um esquema das principais variáveis usadas no modelo de Torres e Casali, enquanto a Tabela 3 apresenta as principais equações utilizadas no cálculo das variáveis de desempenho da prensa de rolos, com algumas adequações propostas. Adicionalmente, foi ainda calibrado o modelo proposto por Napier-Munn e Zhang[20] que permite transformar resultados de análises granulométricas em Blaine.

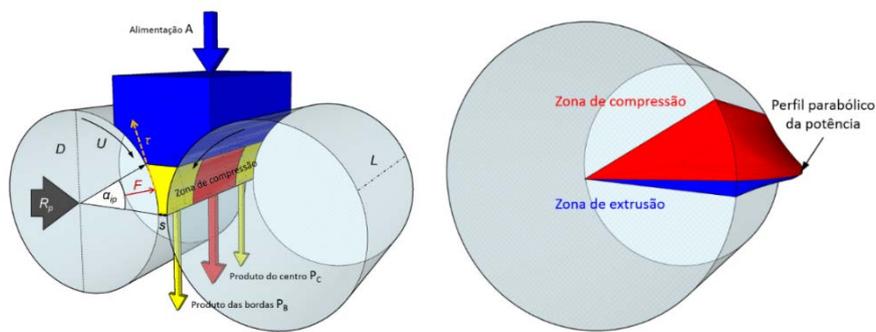


Figura 2. Diagrama esquemático da prensa com definição de variáveis do modelo matemático de Torres e Casali

O cálculo da capacidade da prensa de rolos é baseado no modelo de fluxo pistão simples[16], que considera o comprimento L , a velocidade dos rolos U , a abertura de trabalho s e a densidade do material na abertura de trabalho ρ_g . Adicionalmente, o modelo de capacidade adota uma proposta de extrusão de material pelas laterais do rolo, que correlaciona a porcentagem de material da alimentação que sofre extrusão com a abertura operacional s na forma de um desvio c do fluxo pistão[21].

Tabela 3. Principais Equações do modelo modificado de Torres e Casali modificado pelos autores

Capacidade	$Q = 3,6LU s \rho_g c;$	$c = a e^{-bs}$
Força compressiva	$F = 100R_p \frac{D}{2} L$	
Potência	$P = 2F \sin\left(\frac{\alpha_{ip}}{2}\right) U;$	$\cos \alpha_{ip} = \frac{1}{2D} \left[(s + D) + \sqrt{(s + D)^2 - \frac{4s\rho_g D}{\rho_a}} \right]$
Granulometria do Produto	$p_{i,k} = \sum_{j=1}^i A_{ij,k} \exp\left(-\frac{S_{j,k}}{v_z} z^*\right);$	$P_k = 2F \sin\left(\frac{\alpha_{ip}}{2}\right) U \frac{L^2 - 4y_k^2}{\sum_{j=1}^{N_B} (L^2 - 4y_k^2)}$
Função Quebra	$B(x, y) = K \left(\frac{x}{y_0}\right)^{n_3} \left(\frac{x}{y}\right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{x}{y}\right)^{n_2}$	
Função Seleção	$\ln(s_i^E / s_1^E) = \zeta_1 \ln(\bar{x}_i / \bar{x}_1) + \zeta_2 \ln(\bar{x}_i / \bar{x}_1)^2;$	$S_{i,k} = \frac{P_k}{H_k} s_i^E$

Torres e Casali propuseram um modelo para o cálculo da potência em operação da prensa de rolos em função da força de compressão F aplicada sobre a área efetiva dos rolos, calculado com base na pressão de operação R_p , no ângulo de captura α_{ip} e na velocidade dos rolos U . No modelo, também se propõe uma correção do ângulo de captura, tendo em vista, que a equação originalmente proposta não levava em consideração efeitos como a distribuição granulométrica da alimentação, o teor de umidade do material e as dimensões do silo de alimentação [21].

Finalmente, o modelo propõe a discretização (divisão) do rolo em um número N_B de blocos e presume que a potência P_k demandada em cada bloco k segue uma função parabólica que permite a determinação do perfil da distribuição granulométrica do produto ao longo de todo o eixo longitudinal do rolo. Para descrever a quebra foram adotadas as expressões de função quebra não-normalizável $b_{i,j}$ proposta por King [22] e a de seleção específica $S_{i,k}$ proposta por Herbst e Fuerstenau [23], a fim de calcular o produto em cada bloco.

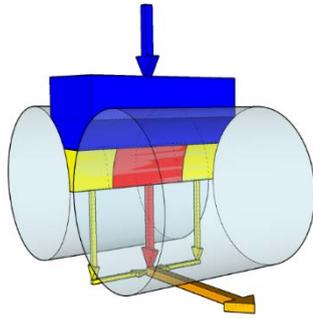
2.4 Calibração do modelo

A fim de estimar os parâmetros da função quebra e função seleção utilizados no modelo modificado de Torres & Casali, foi realizada uma otimização de oito parâmetros com o método de otimização não linear sem restrições. Este método foi implementado em Matlab® com a função *fminsearch*, responsável por encontrar o mínimo de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial. Com o intuito de minimizar a função objetivo, comparam-se os valores ajustados com os valores experimentais através do método dos mínimos quadrados até que se encontrasse o melhor ajuste possível (função objetivo próxima de zero). Foram utilizados os resultados do teste 4 (Tabela 2) como caso base para a estimação dos parâmetros ótimos do modelo de quebra.

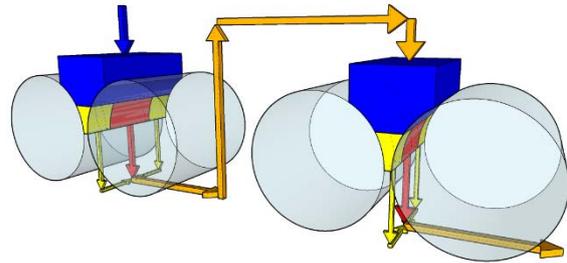
2.5 Simulação das configurações de circuitos de prensagem

Foram realizados quatro estudos de caso para analisar a influência de possíveis modificações do circuito tradicional de prensagem de *pellet feed* no desempenho da prensa de rolos. As simulações dos diferentes circuitos (Figura 3) foram feitas em duas condições diferentes de pressão operacional, correspondentes a 30 e 60 bar. A fim de garantir uma comparação em igualdade, a taxa de alimentação dos circuitos simulados foi fixada em 20 t/h, as prensas foram operadas em velocidades similares, e o mesmo número de prensas foi usado em cada caso. Exceção foi o caso 4, no qual a capacidade foi de 40 t/h, no qual três prensas foram usadas, ao invés de apenas duas nas demais configurações de circuito. Nos circuitos com reciclo de borda, a razão de recirculação %R selecionada foi 100%.

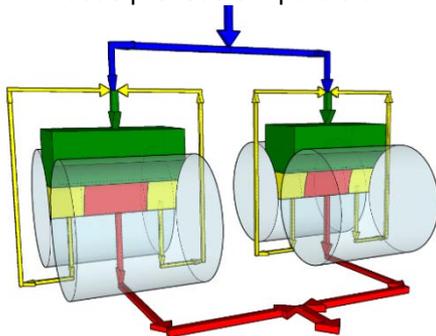
Caso 1: Prensagem em um estágio com prensas em paralelo



Caso 2: Prensagem em dois estágios em série



Caso 3: Prensagem com reciclo de borda com duas prensas em paralelo



Caso 4: Prensagem em um estágio com re-prensagem do produto das bordas

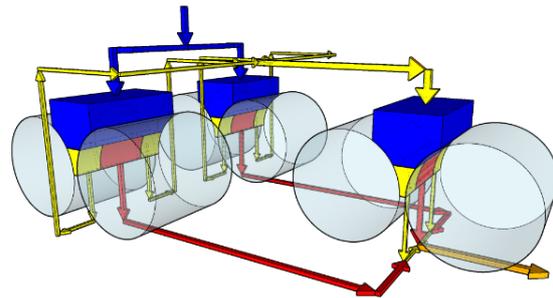


Figura 3. Configurações de prensagem simuladas usando o modelo de Torres e Casali.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimação dos parâmetros ótimos do modelo

Comparações entre as distribuições granulométricas medidas e ajustadas do produto do caso base (teste 4) são apresentadas na Figura 4, onde é possível observar o material passante em 0,045 mm ao longo do rolo e também a área superficial específica ao longo do rolo. A aderência do modelo aos resultados experimentais é evidente. Ajustando então os parâmetros das funções quebra e seleção (Figura 5), foi possível simular os demais casos experimentais com diferentes condições operacionais.

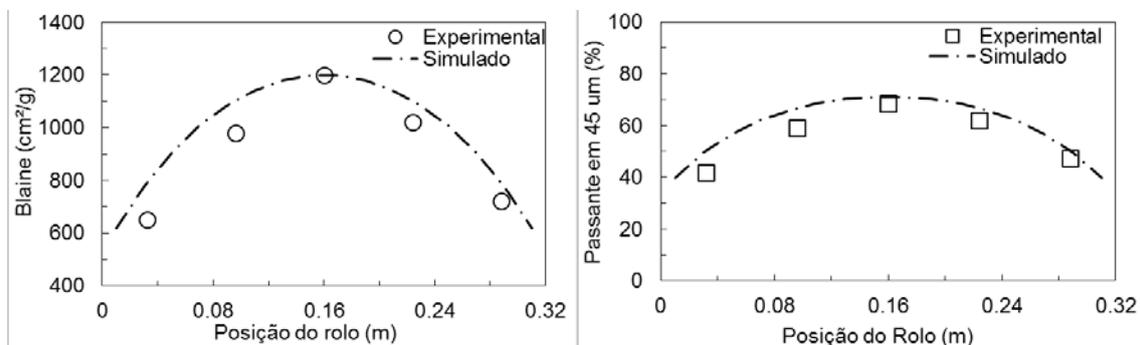


Figura 4. Perfil de área superficial específica (esquerda) e passante em 45 µm (direita) ao longo do rolo para o teste T4.

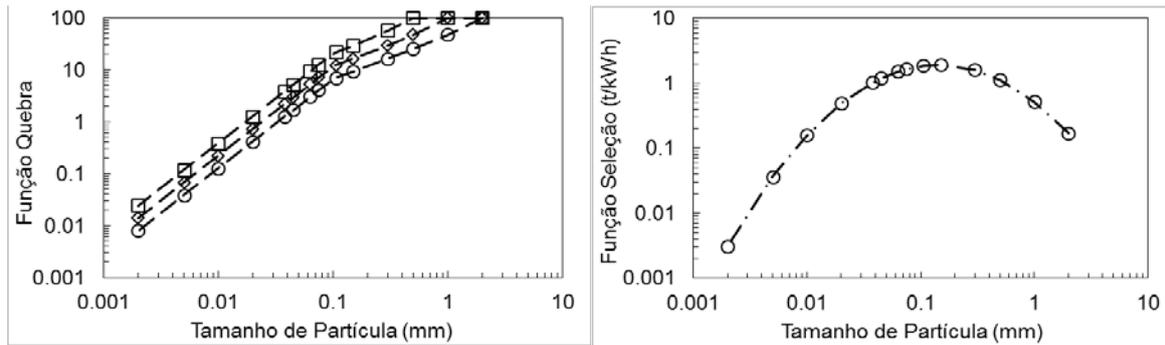


Figura 5. Função quebra (não-normalizável) e função seleção ajustadas e utilizadas nas simulações

3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

A Figura 6 apresenta a comparação entre os resultados previstos e medidos para a capacidade e potência consumida pela prensa de rolos. Ela permitiu mostrar que as equações de capacidade e potência consumida conseguiram prever o desempenho do equipamento nas faixas de operação de interesse. A Figura 7 apresenta a distribuição granulométrica completa do produto do teste 3 mostrando que há uma diferença significativa entre a quebra no centro e na borda dos rolos e, ainda assim, o modelo foi capaz de prever tal fenômeno.

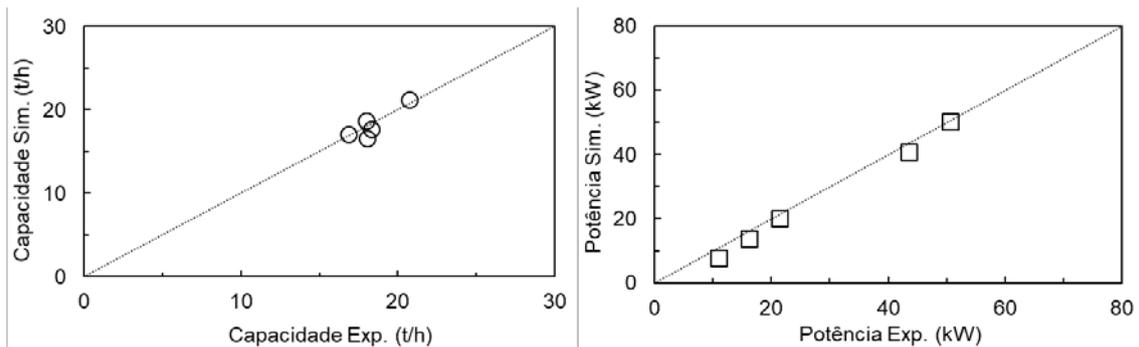


Figura 6. Comparação entre resultados simulados e experimentais para a Capacidade e Potência

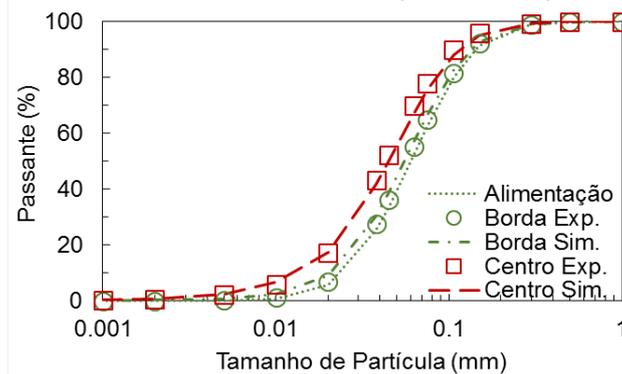


Figura 7. Comparação entre distribuições granulométricas medidas e previstas para os produtos de centro e borda do Teste 3

Ainda com o intuito de validar o modelo, o mesmo foi utilizado com o objetivo de prever os testes de prensagem em série apresentados na Tabela 2. A Figura 8 mostra o perfil de área superficial específica e a percentagem passante em 45 µm ao longo do rolo para o segundo estágio de prensagem em série, bem como para o teste 3 (Tabela 2). Portanto, tendo em vista que o modelo foi capaz de prever a distribuição

granulométrica do produto até a segunda prensagem da operação, foi possível realizar as simulações do segundo estudo de caso, analisado a seguir.

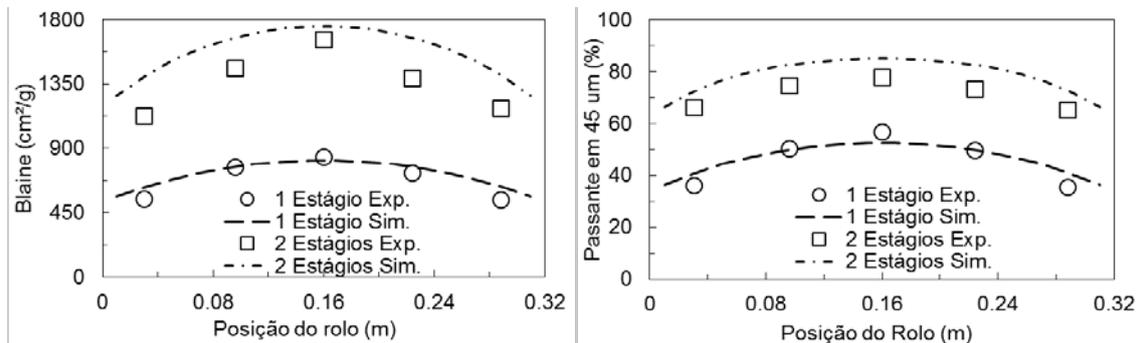


Figura 8. Comparação entre resultados simulados e experimentais para os dois estágios de prensagem em série e para o estágio único de prensagem

3.3 SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas com duas pressões operacionais diferentes, sendo uma pressão de 30 bar (baixa) e uma pressão de 60 bar (alta). A taxa de produção dos circuitos estudados foi fixada em 20 t/h e a velocidade dos rolos foi selecionada para atingir tal capacidade. Como mencionado, exceção foi o caso 4, no qual a taxa adotada foi de 40 t/h. A abertura operacional da prensa foi estimada de acordo com a pressão operacional utilizada. É importante ressaltar que o estudo de caso considerou taxa de recirculação de 100% e duas prensas operando em paralelo (cada uma com 10 t/h de alimentação nova) para atingir a capacidade necessária do circuito. A Tabela 4 apresenta os resultados para as simulações realizadas com 30 bar de pressão operacional.

Tabela 4. Resultados das simulações (Pressão de 30 bar)

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Capacidade (t/h)	20	20	20	40
Potência (kW)	24.3	50.5	48.5	72.8
Energia específica (kWh/t)	1.21	2.53	2.43	1.82
Passante em 45 µm (%)	48.9	59.6	63.9	59.2
Blaine (cm ² /g)	772	973	1056	945
Ganho de Blaine (cm ² /g)	262	463	546	435
Blaine / Energia	216	184	225	239

Os resultados mostram que foi atingido um maior ganho de área superficial específica com a alteração do circuito tradicional. O caso 3, no qual foi utilizada recirculação de bordas, foi o caso no qual foi gerado maior ganho de área superficial em relação à alimentação do circuito. A Figura 9 mostra o perfil de Blaine e passante em 0,045 mm ao longo do rolo para todos os cenários.

A análise dos perfis na Figura 9 pode sugerir que o caso 2 (prensagem em dois estágios) se mostrou relativamente melhor que o caso 3. Entretanto, como mostrado na Tabela 4, a recirculação, apesar de não ser a mais eficiente, foi a que gerou maior ganho de área superficial. Isto se a que o produto final do caso 3 é formado apenas pelo produto central dos rolos, sendo, portanto, o que teve maior quebra na prensagem. A distribuição granulométrica completa do produto gerado nos circuitos é mostrada na Figura 10.

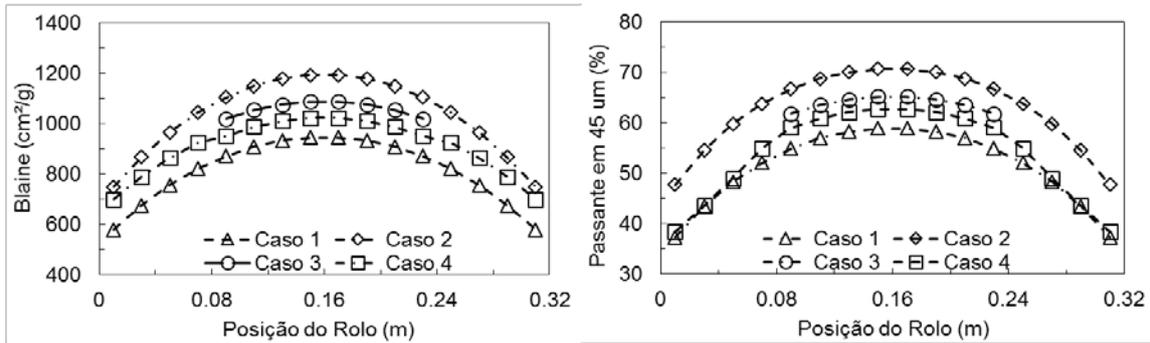


Figura 9. Passante em 45 µm e perfil de Blaine ao longo do eixo dos rolos para todos os cenários estudados (pressão de 30 bar)

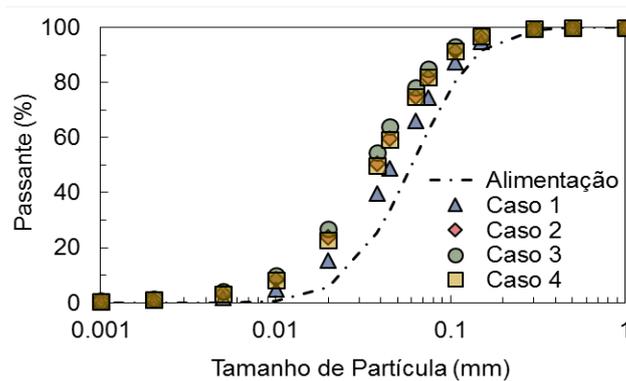


Figura 10. Distribuição granulométrica do produto dos circuitos à pressão de 30 bar

O caso 4 foi o mais eficiente dentre os cenários estudados, com base na razão entre a área superficial gerada e a energia consumida. De fato, apesar da utilização de três equipamentos no circuito, a taxa de produção foi maior que nos cenários anteriores e o ganho de área superficial relativamente próximo aos casos 2 e 3.

Tabela 5. Resultados das simulações (pressão de 60 bar)

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Capacidade (t/h)	20	20	20	40
Potência (kW)	47.2	95.7	94.5	141.7
Energia Específica (kWh/t)	2.36	4.78	4.72	3.54
Passante em 45 µm (%)	62.1	79.7	84.0	78
Blaine (cm²/g)	1047	1507	1612	1390
Ganho de Blaine (cm²/g)	537	997	1102	880
Blaine / Energia	227.3	208.4	233.3	248.4

Para os testes com a pressão operacional de 60 bar, os resultados estão compilados na Tabela 5. Com essas condições, o caso 4 se mostrou novamente mais eficiente que os demais cenários estudados. Entretanto, o ganho de área superficial atingido nos casos 2 e 3 foi muito superior àquele do caso 4, mas tendo demandado consumo energético muito superior também.

A Figura 11 apresenta os perfis de área superficial e passante em 45 µm ao longo do rolo para os estudos de caso com a pressão de 60 bar. Assim como na análise para a pressão baixa, o perfil do estudo de caso 4 apresentou um resultado que induz a uma avaliação equivocada das simulações, como já explicado anteriormente. Com a pressão elevada, novamente houve uma maior eficiência do caso 4, embora não seja o cenário que promova maior ganho de área superficial em relação a alimentação. A distribuição granulométrica completa do produto gerado nos circuitos é mostrada na Figura 12.

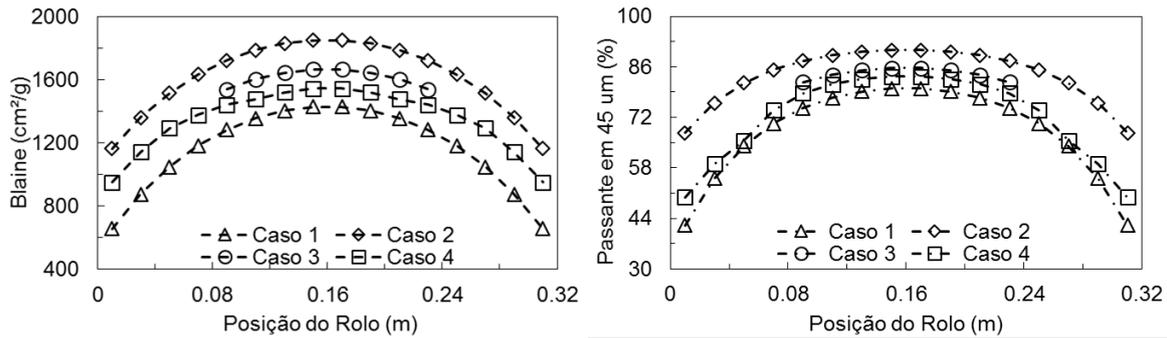


Figura 11. Passante em 45 µm e perfil de Blaine ao longo do eixo dos rolos para todos os cenários estudados (Pressão de 60 bar)

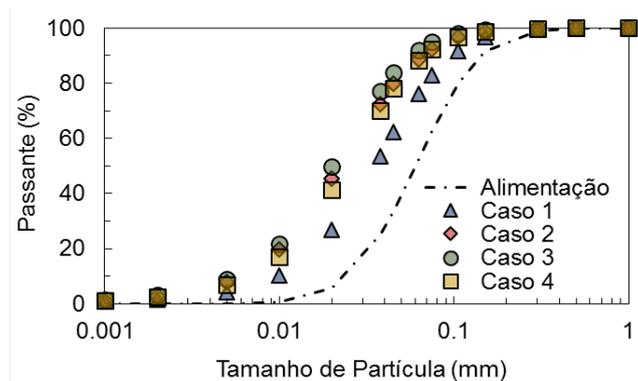


Figura 12. Distribuição granulométrica do produto dos circuitos à pressão de 60 bar

5 CONCLUSÃO

Os resultados do presente estudo permitiram validar o modelo matemático de Torres e Casali para a previsão da prensagem de *pellet feed* em escala piloto. Algumas modificações propostas foram utilizadas (Modelo de Capacidade; Modelo de Potência; Função quebra não-normalizável), as quais permitiram um ótimo ajuste e simulação usando o modelo.

Dentre os quatro estudos de caso realizados, foi possível observar que uma alternativa ao processo tradicional de prensagem seria a recirculação de bordas. Apesar de sua boa eficiência, a operação de prensagem em estágio único (Caso 1), gerou baixo ganho de área superficial, sendo menos atrativa que as demais alternativas. O estudo de caso 2 (Prensagem em 2 estágios) também se mostrou interessante e extremamente eficiente, oferecendo potencial de melhora ainda maior no caso da utilização de uma terceira prensagem em série. O estudo de caso 4 foi o cenário mais eficiente sob a ótica de ganho de área superficial e energia consumida. De fato, a alta taxa de produção do circuito atrelada a um razoável ganho de área superficial específica, contribuiu para melhoria da eficiência, embora a prensagem seja realizada usando três equipamentos.

Finalmente, o produto gerado pelos testes com 60 bar de pressão operacional nos estudos de caso 2 e 3, apresentou, aproximadamente 80% de material passante na malha de 45 µm e área superficial específica de 1600 cm²/g. O resultado mostra a relevância dos cenários simulados, visto que com estes índices de granulometria já seria viável o processo de pelotamento. Cabe ressaltar que os estudos de caso foram baseados no minério com teor de umidade inferior a 3%, o que não é uma condição usual de operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S.A por autorizar a publicação dos dados e pelo suporte a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 KELLERWESSEL, H. High pressure material bed comminution in practice. *ZKG Int.* 1990; 43(B):71–5.
- 2 VAN DER MEER, F.P. Roller Press Grinding of Pellet Feed. Experiences of KHD in the Iron Ore Industry. In: *AusIMM Conference on Iron Ore Resources and Reserves Estimation*, Perth, Australia; 1997. p. 1–15.
- 3 SHU, L.; YONGQING, W. Application of RP 3.6-120/50 Roll Press in Chengchao's Pelletizing Production. *Met Mine.* 2008; August: 263–8.
- 4 VAN DER MEER, F.P. Pellet feed grinding by HPGR. *Miner Eng.* 2015; 73: 21–30.
- 5 ABAZARPOOR, A.; HALALI, M.; HEJAZI, R.; SAGHAEIAN, M. HPGR effect on the particle size and shape of iron ore pellet feed using response surface methodology. *PhysicochemProbl Miner Process.* 2017; 53(2):1–9.
- 6 VAN DER MEER F.P.; GRUENDKENA. Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls. *Miner Eng.* 2010; 23(9):663–9.
- 7 AYDOGAN NA, ERGUN L, BENZER H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. *Miner Eng.* 2006; 19:130–9.
- 8 EHRENRAUT G, RAO R. Experience with Roller Press in the Pellet Plant Kudremukh Iron Ore Company Ltd. *Aufbereit Process.* 2001; 10:469–76.
- 9 OZCAN O, AYDOGAN NA, 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.
- 10 ALTUN O, BENZER H, DUNDAR H, AYDOGAN NA. Comparison of open and closed circuit HPGR application on dry grinding circuit performance. *Miner Eng.* 2011;24(3–4):267–75.
- 11 HILDEN M, SUTHERS SP. Comparing energy efficiency of multi-pass high pressure grinding roll (HPGR) circuits. In: *XXV International Mineral Processing Congress (IMPC 2010)*. Brisbane; 2010. p. 1–20.
- 12 OLIVEIRA R, DELBONI H, BERGERMAN M. Performance analysis of the HRC HPGR in pilot plant. *Rem Rev Esc Minas.* 2016; 69(2):227–32.
- 13 RASHIDI S, RAJAMANI R, DUNNE R. A comparison of open multiple-pass and closed-circuit tests in a laboratory scale HPGR. In: *IMPC 2014*. 2014. p. 1–12.
- 14 BENZER H, ERGUN L, LYNCH AJ, ONER M, GUNLU A, CELIK IB, et al. Modelling cement grinding circuits. *Miner Eng.* 2001;14(11):1469–82.
- 15 SCHÖNERT K. A first survey of grinding with high-compression roller mills. *Int J Miner Process.* 1988; 22:401–12.
- 16 MORRELL S, LIM W, SHI F, TONDO L. Modelling of the HPGR Crusher. *ComminutionPract.* 1997; 117–26.
- 17 AUSTIN LG, WELLER R, LIM ILL, AUSTIN G, WELLER R, LIM ILL. Phenomenological Modelling of the High Pressure Grinding Rolls. *XVIII Int Miner Process Congr.* 1993;(May):87–96.
- 18 TORRES M, CASALI A. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls. *Miner Eng.* 2009; 22(13):1137–46.
- 19 DUNDAR H, BENZER H, AYDOGAN N. Application of population balance model to HPGR crushing. *Miner Eng.* 2013; 50–51:114–20.
- 20 ZHANG, Y. M.; NAPIER-MUNN, T. J. Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on Portland cement strength. *Powder Technology*, v. 83, n. 3, p. 245–252, 1995.
- 21 CAMPOS, T. M.; BARRIOS, G. K.P.; BUENO, G.; TAVARES, L.M. Desafios na modelagem da capacidade e potência consumida da prensa de rolos. In: *XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2017, Belém, 2017. v. 1. p. 1743-1753.
- 22 KING, R.P., *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- 23 HERBST, J.A. & FUERSTENAU, D.W. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance model. *International Journal of Mineral Processing*, v. 7, p. 1–31, 1980.