

COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS INDUSTRIAIS DE PRENSAGEM DE PELLET FEED VIA SIMULAÇÃO *

Túlio MoreiraCampos¹
Gilvandro Bueno²
Luís Marcelo Marques Tavares³

Resumo

O desenvolvimento tecnológico e aplicação da prensa de rolos na indústria mineral impulsionou um grande avanço no processamento de *pellet feed* de minério de ferro nas últimas décadas. No processamento de *pellet feed* em usinas integradas de produção de pelotas de minério de ferro, a Vale S.A foi uma das pioneiras na aplicação da prensa de rolos, onde opera hoje com seis prensas de rolos nas usinas de pelotização do Complexo de Tubarão (Vitória, ES). O presente trabalho aborda a modelagem matemática da prensa de rolos proposta por Torres & Casali e modificada pelos presentes autores, para prever o desempenho de duas unidades industriais de prensagem de *pellet feed* do Complexo de Tubarão. Validando o modelo, são apresentados resultados de simulação do processo em regime estacionário visando otimizar o processo de prensagem e abordar diferentes cenários que se mostrem mais atrativos do ponto de vista operacional. As simulações mostraram que é viável reduzir a área superficial específica da alimentação da prensa de 1770 cm²/g para 1570 cm²/g, permitindo produzir um *pellet feed* de igual qualidade como produto (1911 cm²/g) e, portanto, reduzir o trabalho feito pela moagem de bolas a montante.

Palavras-chave: Prensa de rolos; Modelagem; Pellet Feed; Simulação.

COMPARISON OF SCENARIOS OF INDUSTRIAL SCALE PELLET FEED PRESSING THROUGH SIMULATION

Abstract

The HPGR development and application in the minerals industry resulted in an important increase in its application in iron ore pellet feed processing in the last decades. Vale SA was one of the pioneers in application of the HPGR in integrated plants, currently operating with six HPGRs in the pelletizing plants of Complexo de Tubarão (Vitória, ES). The work uses the mathematical model of the HPGR, proposed by Torres & Casali and modified by the present authors, to predict the performance of two industrial pellet feed HPGR units of the Complexo de Tubarão. Besides model validation, results of process simulations are shown in order to optimize the pellet feed pressing according to industrial demands, presenting different scenarios that are more attractive to HPGR operation. Simulations showed that it is feasible to reduce the specific surface area of the HPGR feed from 1770 cm²/g to 1570 cm²/g, allowing to produce a pellet feed of the same quality in its product (1911 cm²/g) and therefore reduce the work done by upstream ball milling.

Keywords: HPGR; Modeling; Pellet Feed; Simulation

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestrando, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Desenvolvimento, Departamento de Engenharia de Desenvolvimento, Complexo de Tubarão – Vale S.A, Vitória, ES, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, M.Sc., Ph.D., Professor Titular, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia da prensa de rolos nas últimas décadas impulsionou um avanço significativo na sua aplicação no setor mineral, onde a engenharia do equipamento passou por uma curva de aprendizado e desenvolvimento formidáveis, contribuindo gradativamente para sua elevada aceitação na indústria [1]. Inicialmente aplicado na indústria cimenteira, a prensa de rolos passou a ter um apreço considerável por parte das indústrias de minerais metálicos em meados de 1990. Segundo alguns autores [2, 3] a alta eficiência energética do equipamento quando comparada com os processos tradicionalmente utilizados na cominuição foi um dos principais fatores que contribuíram para sua rápida disseminação na indústria cimenteira.

A alta eficiência energética atrelada à alta capacidade possibilitou que a prensa de rolos ganhasse maturidade suficiente para expandir suas aplicações em diferentes setores minerais. A indústria de minério de ferro foi a pioneira na indústria de minerais metálicos que aplicou com sucesso a tecnologia da prensa de rolos a nível de produção industrial. Dentre as inúmeras aplicações de sucesso, o processamento de prensagem de pellet feed de minério de ferro em etapas de remoagem pré-pelotização e pré-moagem [4] foi o que de fato alavancou o desenvolvimento tecnológico da prensa de rolos neste setor, permitindo uma série de avanços que variaram desde aplicações da técnica até novos desenvolvimentos da própria tecnologia.

Ainda no início da década de 1990 a Vale, então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), implementou a prensagem de minério de ferro em prensa de rolos nas etapas de produção de *pellet feed fines* em várias usinas integradas de pelletização do Complexo de Tubarão [4]. A Figura 1 apresenta um circuito de produção de pelotas de minério de ferro em uma usina de pelletização, com destaque para a aplicação da prensa de rolos na etapa de preparação do *pellet feed*.

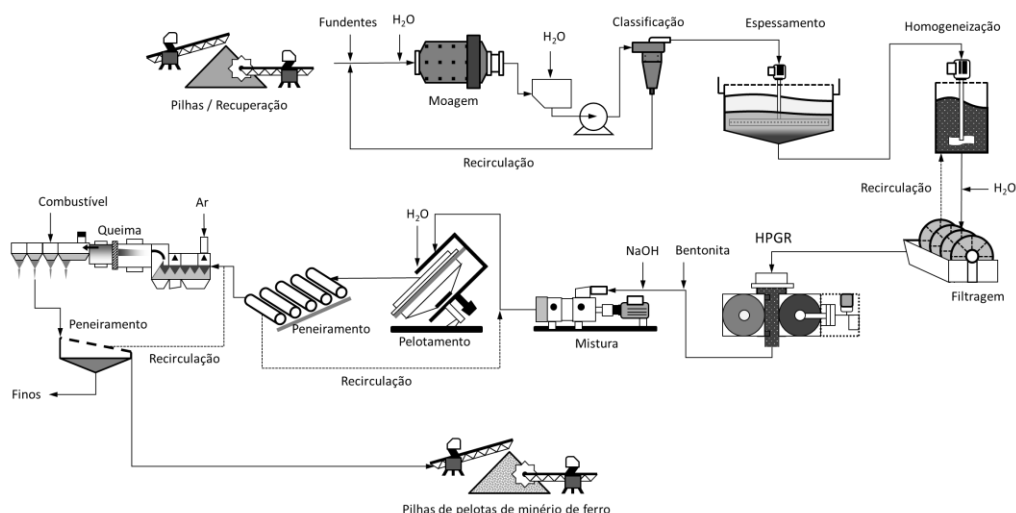


Figura 1. Circuito simplificado de uma usina pelletização de minério de ferro utilizado no Complexo de Tubarão (Vale) em Vitória, mostrando a aplicação mais comum da prensa de rolos neste circuito

O sucesso da aplicação da prensa de rolos nestes circuitos se deve, em boa parte à redução do consumo energético na operação [5, 6], alta geração de partículas

ultrafinas a partir da atrição do leito [6], maior uniformidade do produto [4], alta geração de área superficial específica [7] e também pela possibilidade de operar com teores de umidade na faixa de 8-12% [6].

Tendo em vista sua atrativa aplicação na produção de *pellet feed* de minério de ferro e, paralelo ao desenvolvimento constante de novas tecnologias no setor mineral, muitas usinas de pelotização passaram a investir em pesquisas com o intuito de otimizar o processo de prensagem e extrair ao máximo os benefícios e oportunidades oriundos da aplicação da prensa de rolos. Atualmente, uma oportunidade que tem se mostrado atrativa do ponto de vista industrial é a operação com a prensa de rolos sendo utilizada como o principal equipamento dentro da produção de *pellet feed fines*, o que pode permitir uma redução drástica nos custos operacionais da usina, uma vez que o uso de moinhos de bolas, hidrociclones, bombas, espessadores e filtros seria prescindido [8].

Paralelo ao desenvolvimento da técnica e aplicação da tecnologia, nos últimos 30 anos uma série de autores [9-17] contribuíram para o desenvolvimento de modelos matemáticos que tentassem descrever o desempenho da prensa. Desde equações empíricas com aplicações restritas até modelos fenomenológicos mais robustos, o desenvolvimento da modelagem matemática da prensa de rolos se mostrou uma ferramenta extremamente valiosa no auxílio à tomada de decisões em usinas de processamento mineral, tornando a simulação computacional uma alternativa eficiente para analisar o comportamento de diferentes condições operacionais e até mesmo circuitos de prensagem a nível industrial.

Portanto, motivado pelas evidências citadas acima, o presente trabalho tem como objetivo utilizar a simulação computacional como ferramenta ao auxílio na tomada de decisões em usinas industriais de prensagem de *pellet feed* do Complexo de Tubarão da Vale S.A. Foram simulados diferentes cenários industriais com o intuito de otimizar a operação das prensas de rolos em diferentes usinas. Os cenários foram simulados com o modelo matemático fenomenológico modificado de Torres & Casali, sendo este calibrado e validado a partir de dados experimentais em testes de prensagem de *pellet feed* em escala industrial.

2 METODOLOGIA

2.1 Material utilizado nos testes de prensagem

O *pellet feed* utilizado nos testes de prensagem é composto por uma blendagem de diferentes tipologias de minério de ferro que compõe a alimentação das usinas de pelotização do Complexo de Tubarão da Vale S.A. Tipicamente a blendagem é feita com concentrados de flotação oriundos de usinas de beneficiamento do Quadrilátero Ferrífero, podendo ser também misturado com pequenas quantidades do minério de ferro proveniente do Complexo Ferro – Carajás (Parauabebas – PA). Com exceção das Usinas I e II, a alimentação da prensa de rolos é oriunda do produto da moagem (Figura 1), garantindo um cenário industrial onde a alimentação do equipamento tenha entre 8-12% de umidade e uma área superficial específica relativamente alta. A Tabela 1 apresenta as principais características do *pellet feed* de minério de ferro que alimenta as prensas de rolos.

Tabela 1. Características do pellet feed de minério de ferro alimentado nas prensas das usinas industriais do Complexo de Tubarão da Vale S.A

	Valores
Massa específica (kg/m ³)	4400
Passante em 0,045 mm (%)	54 – 66
Tamanho com 80% passante (mm)	0,070 – 0,090
Área superficial específica (cm ² /g)	1650 – 1850
Teor de umidade (%)	7,5 – 9,5

2.2 Testes de prensagem em prensas de rolos industriais

Foram utilizadas 2 prensas industriais para execução dos testes, as quais correspondem às Usinas 6 e 8. É importante ressaltar que a prensa da usina 6 opera seguindo a moagem em moinhos de bolas em circuito fechado com classificação em hidrociclones, o que garante uma alimentação mais fina para a prensa de rolos. Contudo, a Usina 8 opera com a moagem em circuito aberto e, conseqüentemente, a alimentação da prensa é relativamente mais grosseira. De fato, os equipamentos possuem dimensões diferentes, operam em condições diferentes e têm, conseqüentemente, desempenhos muito variados. A Tabela 2 resume as dimensões dos rolos e as faixas de condições operacionais nas quais cada bateria de testes foi feita.

Tabela 2. Resumo das condições de projeto e operacionais utilizadas nos testes industriais com as prensas das Usinas 6 e 8

	Usina 6	Usina 8
Diâmetro dos rolos (m)	1,70	2,00
Comprimento dos rolos (m)	1,40	1,50
Forças específicas (N/mm ²)	0,5 – 2,1	1,5 – 1,7
Pressão operacional (bar)	40 – 100	60 – 80
Velocidade dos rolos (m/s)	0,5 – 1,7	1,5 – 1,8
Abertura operacional (mm)	9 – 22	9 – 12

Em todos os testes amostras de alimentação e produto de cada prensa foram coletadas a partir de cortes de correia, assim como amostras dos produtos ao longo da posição axial dos rolos, com o intuito de avaliar a influência do perfil de pressões no produto final de prensagem.

2.3 Modelagem matemática da prensa de rolos

Dentre as diferentes abordagens matemáticas desenvolvidas para descrição do desempenho da prensa de rolos, três delas [14-16] se destacam com uma modelagem matemática fenomenológica que permite a previsão das variáveis de desempenho do equipamento (capacidade (t/h); potência (kW) e; distribuição granulométrica do produto) a partir das variáveis operacionais e de projeto do equipamento.

Dentre estes modelos, o de Torres & Casali [15] se destaca como um dos modelos que conseguem prever, além das variáveis de desempenho supracitadas, um perfil de granulometria detalhado ao longo a posição axial do rolo. A Figura 2 apresenta

um modelo esquemático da prensa de rolos, destacando as principais variáveis utilizadas na modelagem proposta por Torres & Casali.

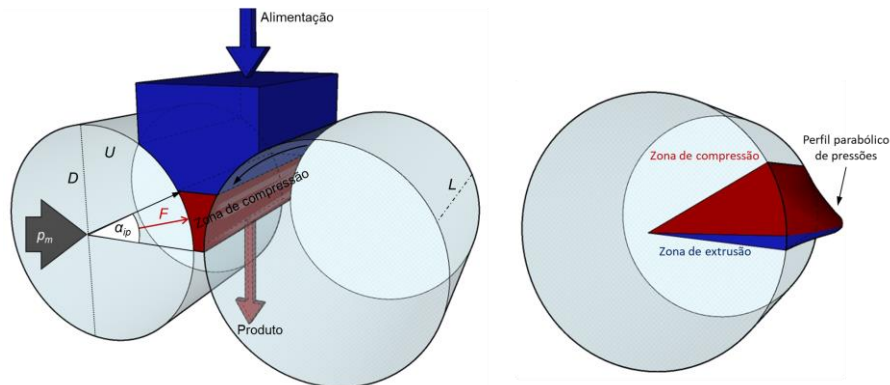


Figura 2. Desenho esquemático da prensa de rolos apresentando as principais variáveis utilizadas na modelagem proposta por Torres & Casali [15].

Torres & Casali [15] utilizam o modelo do fluxo empistonado para o cálculo da capacidade da prensa de rolos [14], o qual considera uma relação entre o comprimento dos rolos (L), a velocidade dos rolos (U), a abertura operacional (s_g) e a densidade aparente do material na zona de extrusão do equipamento (ρ_g). Para o cálculo da potência do equipamento durante a prensagem, os autores levam em consideração o torque necessário para movimentar o rolo e a velocidade angular do mesmo [15]. De maneira geral os autores relacionam a força compressiva aplicada no leito de partículas, a partir de uma pressão hidráulica e a velocidade de rotação dos rolos. Finalmente, o modelo de quebra de partículas propõe uma discretização (divisão) do rolo ao longo de N blocos na sua posição axial e presumindo um perfil de potências parabólico (P_k) que permite descrever um perfil de distribuições granulométricas ao longo do eixo longitudinal. O modelo de quebra se baseia no do balanço populacional, seguindo a função quebra $b_{i,j}$ e a função seleção específica $S_{i,k}$ dadas em outras publicações [18, 19].

Embora seja um modelo robusto e que tenha sido validado para diferentes aplicações [20, 21], trabalhos recentes mostraram que, para a prensagem de *pellet feed* de minério de ferro, o modelo matemático proposto por Torres e Casali não se mostrou uma ferramenta útil para a previsão do desempenho da prensa de rolos em escala industrial [22] e em escala piloto [17, 22]. Utilizando como base o modelo proposto por Torres & Casali, Campos et al. [17] propuseram uma série de modificações no equacionamento do modelo para aprimorar a previsão do desempenho do equipamento, tendo sido todo o modelo validado para prensagens de *pellet feed* de minério de ferro em escala piloto. Campos [22] também propôs uma equação para calcular a aceleração do material na zona de compressão da prensa de rolos quando esta estivesse operando com materiais excessivamente úmidos ($> 8\%$). Essas várias equações são dispostas na

Tabela 3.

Tabela 3. Resumo das principais equações do modelo de Torres & Casali modificado pelos autores

		$\ln\left(\frac{Y}{A}\right) = -b \frac{x_g}{D} \left(\frac{U}{U_{max}}\right)^\tau$
Capacidade	$Q = 3,6LU_s \rho_g c;$	$U_g = \frac{U x_c \rho_a}{x_g \rho_g}$
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	$\ln(s_i^E / s_1^E) = \zeta_1 \ln(\bar{x}_i / \bar{x}_1) + \xi_2 \ln(\bar{x}_i / \bar{x}_1)^2;$	$S_{i,k} = \frac{P_k}{H_k} s_i^E$

2.4 Calibração do modelo

O modelo matemático de Torres & Casali foi implementado na plataforma Matlab® (versão R2018a, Mathworks Inc.) para realizar todas as simulações de processo em estado estacionário. Para ajustar os parâmetros ótimos que aparecem nas equações da função quebra e função seleção (8 parâmetros), utilizou-se um método de otimização não linear com restrições a partir de um algoritmo de busca que conseguisse encontrar o mínimo de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial. A função objetivo consistiu na soma das diferenças quadráticas entre o logaritmo dos valores experimentais e calculados para o passante acumulado de uma distribuição granulométrica utilizada como caso base.

2.5 Simulação dos estudos de caso

Foram simulados dois cenários diferentes nas usinas industriais estudadas, correspondendo todos a prensagens a partir de demandas realistas da operação. De maneira geral os estudos foram feitos comparando quais as possíveis melhorias provocadas por pequenas mudanças nas condições operacionais ou de alimentação do material na prensagem, avaliando sempre quais os impactos que elas poderiam causar na taxa de produção do equipamento, no seu consumo energético, na área superficial específica do produto e na eficiência do processo. Foram realizados os seguintes estudos de caso:

- Caso 1: Área superficial Blaine da alimentação

O primeiro estudo de caso foi referente às operações realizadas na prensa da Usina 6 (Tabela 2). Nesta usina, a alimentação da prensa de rolos tem uma área superficial específica em torno de 1770 cm²/g, material este obtido a partir do produto da moagem de bolas. Entretanto, processos de moagem são extremamente custosos e, dentro de usinas, correspondem a boa parte do consumo energético da mesma, o que é decorrente da sua baixa eficiência energética. Desta maneira as simulações neste cenário foram feitas com o fim de avaliar como o desempenho da prensa de rolos variaria mediante uma alteração na granulometria da alimentação do equipamento. Essa alteração poderia ser

ocasionada por um engrossamento do produto da moagem, reduzindo o consumo energético nessa etapa. Um benefício potencial dessa estratégia seria a maior facilidade da operação da filtragem previamente à prensagem. Portanto, foram feitas simulações com a alimentação da prensa tendo 1415 cm²/g (Cenário 2) e 1570 cm²/g (Cenário 3), além da alimentação tradicionalmente utilizada (Cenário 1). Para efeitos de comparação, as capacidades foram mantidas em aproximadamente 550 t/h, sendo a força específica de compressão variada entre 0,9 e 1,8 N/mm². As diferentes distribuições granulométricas foram geradas simplesmente transladando a distribuição granulométrica relativa à área superficial específica de 1770 cm²/g.

- Caso 2: Modo de preparação da alimentação (circuito aberto vs. fechado)

Neste estudo de caso foram comparadas duas alimentações diferentes, sendo uma delas proveniente da prensa da Usina 6 e outra da prensa da Usina 8 (Tabela 1). Além de serem prensas com dimensões de projeto diferentes e que operam em condições bem distintas, ainda há o fato da Usina 6 operar com o circuito de moagem fechado com classificação em hidrociclones, enquanto a Usina 8 opera com moagem em circuito aberto, sendo seu produto alimentado à prensagem. Desta maneira, há uma diferença razoável entre as duas alimentações da prensa de rolos (Figura 3), na qual a Usina 8 se observa uma maior concentração de partículas nas faixas de tamanho mais grosseiras. A fim de manter a capacidade do circuito em, aproximadamente, 650 t/h, foram realizadas simulações na prensa da Usina 6 com a pressão hidráulica de 70 bar, velocidade linear dos rolos de 1,2 m/s e a abertura de operacional de 16 para ambas as alimentações. Ambas as simulações foram feitas na prensa da Usina 6 visando comparar qual o desempenho deste equipamento frente a mudanças de granulometria da alimentação.

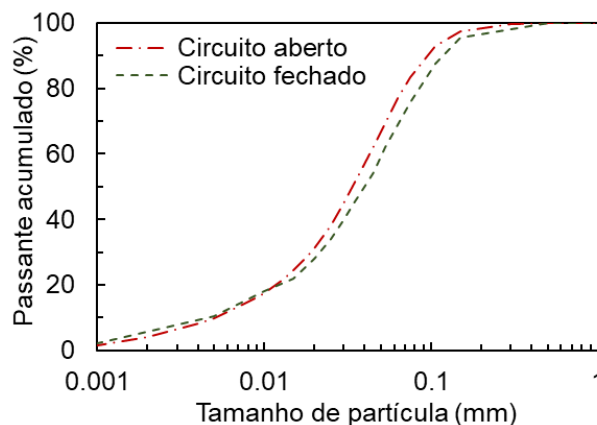


Figura 3. Comparação entre as alimentações das prensas que operam nas Usinas 6 e 8. As distribuições granulométricas mostram a existência de resquícios de partículas grosseiras na alimentação da Usina 8, que opera em circuito aberto, enquanto aquela da alimentação da Usina 6 é resultado da moagem em circuito fechado com classificação em hidrociclones

3 Resultados

Inicialmente os modelos de capacidade e potência consumida para a previsão da prensagem de *pellet feed* são validados. Em seguida, o ajuste de parâmetros ótimos e a validação do modelo de quebra na previsão da distribuição granulométrica e área superficial específica do produto é apresentado. Finalmente, são apresentados

os resultados das simulações feitas, onde é possível avaliar os diferentes cenários industriais estudados.

3.1 Ajuste dos parâmetros ótimos

Assim como apresentado na Seção 2.4, foi necessária a utilização de um teste de referência (Caso Base) para ajustar os parâmetros ótimos de quebra do modelo. Os parâmetros da função quebra não normalizável foram previamente calibrados para pellet feed de minério de ferro e são apresentados em outro trabalho dos autores [17]. Entretanto, os parâmetros da função seleção foram ajustados para cada uma das campanhas industriais, variando para cada uma das prensas utilizadas. A Figura 5 apresenta a função quebra não normalizável (a) comum a todas as campanhas (mesma blendagem de *pellet feed*) e a função seleção (b) para cada uma das prensas. A Figura 6 mostra a comparação entre a distribuição granulométrica do produto experimental e ajustado a partir da função quebra não normalizável, o que evidencia a aderência do ajuste aos valores experimentais.

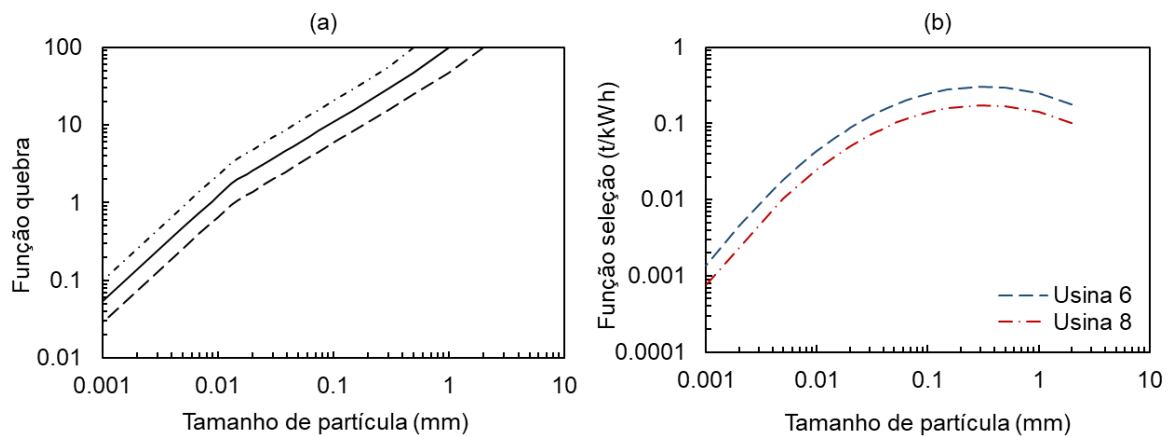


Figura 3. Função quebra (a) ajustada para o pellet feed de minério de ferro utilizado e função seleção (b) ajustada para as diferentes prensas estudadas

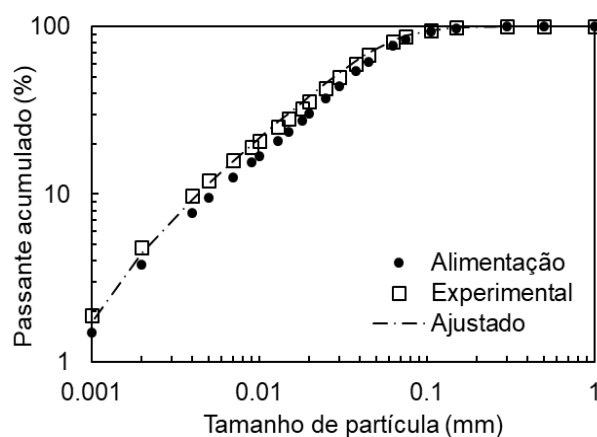


Figura 4. Comparação entre as distribuições granulométricas do produto experimental e ajustado usando a função quebra não normalizável. O ajuste foi feito utilizando resultados de um teste industrial na Usina 6 operando com força específica de compressão de 1,5 N/mm² e 550 t/h de capacidade

3.2 Validação do modelo

A Figura 7 apresenta a comparação entre os valores experimentais e calculados para a capacidade de produção (a) e potência consumida (b) pela prensa durante os testes para todas as campanhas, sendo os resultados classificados pelas forças de compressão específicas aplicadas. É evidente que as correções propostas foram fundamentais para permitir uma adequada previsão destas variáveis de desempenho, se mostrando aderente com as medidas experimentais realizadas nos ensaios industriais.

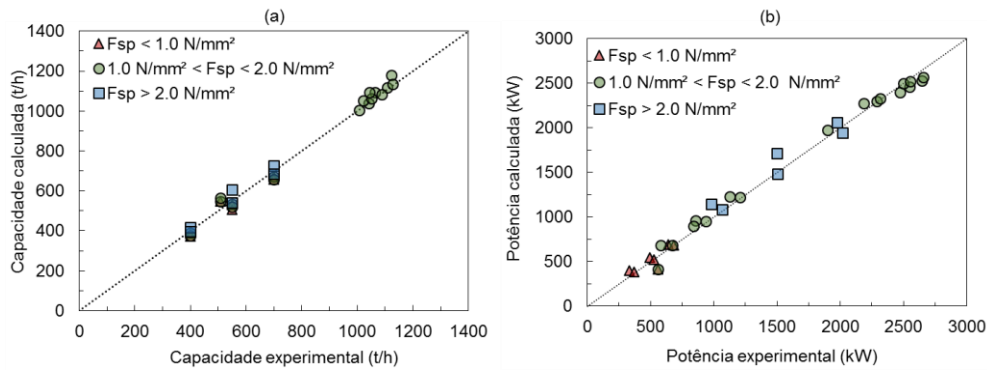


Figura 5. Comparação entre os valores experimentais e calculados para a capacidade (a) e potência consumida (b) da prensa de rolos em todas as campanhas industriais realizadas

Por outro lado, o modelo também se mostrou razoavelmente aderente na previsão da distribuição granulométrica do produto final da prensa, além de conseguir prever com fidelidade o perfil de quebra ao longo do eixo axial do rolo. A Figura 6 apresenta a comparação entre o perfil de percentagem do material menor que 0,045 mm (a) e o perfil de área superficial específica (b) ao longo da posição axial do rolo para um teste com forças específica de 0,9 N/mm² realizado na Usina 6, enquanto a Figura 7 apresenta a comparação entre os valores experimentais e previstos para a área superficial específica do produto para todos os testes de prensagem, sendo diferenciados pela força específica aplicada.

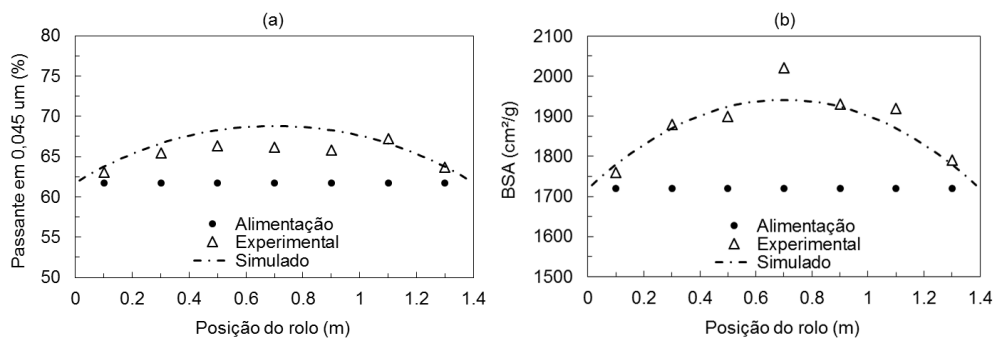


Figura 6. Comparação entre os resultados experimentais e simulados para o perfil de percentagem passante em 0,045 mm e o perfil de área superficial específica ao longo da posição axial do rolo. Os resultados são oriundos de uma prensagem na Usina 6 com forças específica de compressão de 0.9 N/mm² e capacidade de produção de 700 t/h

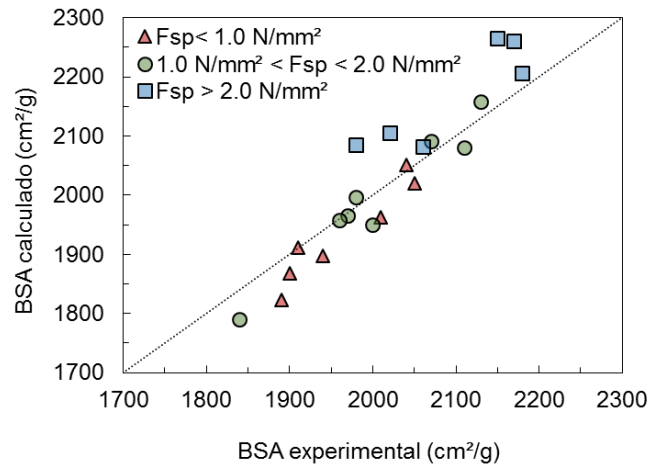


Figura 7. Comparação entre os valores experimentais e calculados para a área superficial específica dos produtos obtidos nos testes de prensagem para as três usinas

De fato, o modelo consegue prever em uma ampla faixa operacional as principais variáveis de desempenho da prensa de rolos, assim como explicitado acima. Entretanto, os resultados apresentados na Figura 7 mostraram que para forças específicas elevadas ($F_{sp} > 2,0 \text{ N/mm}^2$) o modelo superestima a quebra de partículas e, conseqüentemente, o ganho de área superficial específica. Ainda que efeitos de ineficiência de prensagem já tenham sido relatados por alguns autores [11] e já equacionados para aplicações de compressão de leito de partículas [23], o modelo utilizado não é sensível a este fenômeno e, portanto, sua validade se limita a simulações em que as condições operacionais não ultrapassem aquelas nas quais sabidamente ocorre ineficiência do processo.

3.3 Simulações

As simulações foram conduzidas como parte de dois estudos de caso (Seção 2.5) com condições operacionais distintas. No estudo de caso 1 foi simulada a prensa da Usina 6 com variações na alimentação da prensa de rolos, onde se variou a área superficial específica de 1770 cm^2/g até 1415 cm^2/g . A

Tabela 4 resume as principais informações obtidas nas simulações, destacando uma prensagem experimental realizada (Caso 1 experimental) e as demais simulações para os estudos de caso. No Cenário 1 foi empregada uma pressão operacional de 40 bar, enquanto nos cenários 2 e 3 foi utilizada a pressão operacional de 85 bar.

Tabela 4. Simulações do estudo de caso realizado para o estudo de caso 1 realizado na prensa da Usina 6

	Cenário 1 experimental	Cenário 1 simulado	Cenário 2	Cenário 3
Potência (kW)	491	547	1247	1247
Capacidade do circuito (t/h)	549	533	538	538
Energia específica (kWh/t)	0,89	1,03	2,32	2,32
Passante em 45 um da alimentação (%)	62,5	62,5	55,9	58,8
BSA da alimentação (cm^2/g)	1775	1763	1415	1570
Passante em 45 um do produto (%)	67,0	67,3	66,9	69,1
BSA do produto (cm^2/g)	1910	1911	1756	1903
Ganho BSA (cm^2/g)	135	148	341	333
Utilização de energia ($\text{cm}^2/\text{g}/\text{kWh}/\text{t}$)	151	144	147	144

Os resultados mostraram que foi possível reduzir a área superficial da alimentação da prensa e ainda assim produzir um pellet feed fines com qualidade similar ao processo tradicionalmente utilizado (Cenário 1). Ainda que o consumo de energia específica tenha crescido, é válido afirmar que a operação se mostrou tão eficiente quanto aquela relativa ao Cenário 1, mantendo uma utilização de energia de 144 cm²/g/kWh/t. Portanto, o Cenário 3 torna-se uma opção extremamente atrativa do ponto de vista operacional, uma vez que engrossar a alimentação da prensa de rolos significa reduzir o trabalho necessário a se fazer nos processos de moagem de bolas. Usualmente a moagem de bolas tem uma utilização de energia da ordem de 50 cm²/g/kWh/t, reafirmando que a aplicação industrial do Cenário 3 poderia reduzir consideravelmente o consumo energético dentro de usinas de pelotização. O cenário 2 se mostrou atrativo sob o ponto de vista de eficiência energética, mas mostra que a prensa, dentro das restrições impostas, não seria capaz de atingir a especificação do produto se alimentada com material mais grosso, com área superficial específica na faixa de 1415 cm²/g.

Já a Tabela 5 apresenta os resultados para o segundo estudo de caso, no qual foram comparadas duas operações diferentes alimentações e como elas podem influenciar o desempenho da prensa. Como explicado na Seção 2.5, a Usina 8 opera com moagem em circuito aberto, enquanto a Usina 6 opera com moagem em circuito fechado com classificação por hidrociclones à montante da prensagem. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar como as diferentes estratégias de preparação da alimentação (Figura 3) poderiam influenciar no desempenho do equipamento.

Tabela 5. Simulações do estudo de caso 2 comparando as diferentes alimentações das Usinas 6 e 8

	Circuito aberto	Circuito fechado
Potência (kW)	1226	1226
Capacidade do circuito (t/h)	656	656
Energia específica (kWh/t)	1,87	1,87
Passante em 0,045 mm da alimentação (%)	54,5	62,5
BSA da alimentação (cm ² /g)	1634	1763
Passante em 0,045 mm do produto (%)	63,8	70,5
BSA do produto (cm ² /g)	1878	2028
Ganho BSA (cm ² /g)	244	266
Utilização de energia (cm ² /g/kWh/t)	130	142

As simulações apresentadas mostram que é possível concluir que uma alimentação mais fina proveniente do *overflow* do hidrociclone permitiu, não só um maior ganho de área superficial, como também uma melhor utilização da energia aplicada ao processo. De fato, visto que as simulações e análises do processo foram feitas em operações onde não se observou a saturação da quebra de partículas, é possível concluir que alimentações mais finas são uma opção mais interessante a se aplicar nestes cenários, embora as diferenças não sejam muito grandes entre essas opções.

4 CONCLUSÃO

As modificações propostas nos módulos de capacidade, potência consumida e granulometria do produto transformou o modelo de Torres e Casali em uma

ferramenta de grande utilidade na determinação das variáveis de desempenho da prensa de rolos. O modelo foi validado para aplicações industriais de prensagem de pellet feed nas etapas de remoagem pré-pelotização, mostrando capacidade de prever o desempenho do equipamento em uma ampla faixa de condições operacionais. Entretanto, deve-se ressaltar que o modelo não se mostrou sensível à previsão da quebra de partículas em altas aplicações de energia, uma vez que efeitos de saturação da quebra ainda não são equacionados na previsão desta variável de desempenho.

Assim como em outros trabalhos publicados [8, 17], o modelo se mostrou uma ferramenta robusta para aplicações em simulações de processo estacionário e permitiu simular diferentes cenários industriais de prensagem de *pellet feed*. O estudo de caso 1, realizado na Usina 6, foi útil por mostrar que é possível reduzir o trabalho realizado pela moagem de bolas e transferi-lo para a prensa de rolos, potencialmente aumentando a eficiência energética global do circuito, tendo em vista a maior eficiência da prensa em comparação com o moinho de bolas.

Por outro lado, a comparação feita entre as prensagens com diferentes alimentações (circuito aberto e circuito fechado) mostrou que, embora a alimentação mais grosseira do circuito aberto possa sugerir que haverá um processo mais eficiente de quebra, os resultados mostraram que uma alimentação proveniente do *overflow* dos hidrociclones se mostrou mais eficiente na geração de área superficial específica.

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 BENZER, H., ERGUN, L., LYNCH, A.J., ONER, M., GUNLU, A., CELIK, I.B., Modelling cement grinding circuits, Miner Eng. 2001; 1469–1482.
- 3 AYDOGAN NA, ERGUN L, BENZER H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. Miner Eng. 2006; 19:130–9.
- 4 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.
- 5 EHRENRAUT G, RAO R. Experience with Roller Press in the Pellet Plant Kudremukh Iron Ore Company Ltd. Aufbereit. Process. 2001; 10:469–76.
- 6 VAN DER MEER, F.P. Pellet feed grinding by HPGR. Miner Eng. 2015; 73: 21–30.
- 7 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. Physicochem Probl Miner Process. 2017; 53(2):1–9.
- 8 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; p.57-68.
- 9 SCHÖNERT K. A first survey of grinding with high-compression roller mills. Int J Miner Process. 1988; 22:401–12.
- 10 SCHÖNERT, K. Stressing mechanisms in mills Johannesburg, University of the Witwatersrand, Division of Continuing Engineering Education, 1988.

- 11 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
- 12 AUSTIN, L.G., TRUBELJAL, M.P. The capacity and product size distribution of high pressure grinding rolls. Proc. IV Meet. South. Hem. Miner. Technol., Concepcion, Chile. 1994; p. 4-67.
- 13 AUSTIN, L.G., TRUBELJAL, M.P., VON SEEBACH, H.M. Capacity of high-pressure grinding rolls. Miner. Metall. Process. 1995; 65–73.
- 14 MORRELL S, LIM W, SHI F, TONDO L. Modelling of the HPGR Crusher. Comminution Pract. 1997; 117–26.
- 15 TORRES M, CASALI A. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls. Miner Eng. 2009; 22(13):1137–46.
- 16 DUNDAR H, BENZER H, AYDOGAN N. Application of population balance model to HPGR crushing. Miner Eng. 2013; 50–51:114–20.
- 17 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).
- 18 HERBST, J.A. & FUERSTENAU, D.W. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance model. Int. J. Miner. Process. 1980; v. 7, p. 1–31.
- 19 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.
- 20 ARIAS, C.A.P. Análisis comparativo de modelos fenomenológicos de HPGR, Undergraduate Diploma Thesis, Universidad de Chile. 2015;p. 63-70.
- 21 VACA, F.C., REYES-BOZO, L., VALDÉS-GONZÁLEZ, H., GUERRA, C.F., GALLEGUILLOS-POZO, R., GARCIA, M.V., VYHMEISTER, E. Controlled high pressure grinding roll by model predictive control. Proc. 3rd IEEE Colombian Conference on Automatic Control, IEEE. 2017;pp. 1-6.
- 22 CAMPOS, T.M. Modelagem matemática da prensa de rolos aplicada à cominuição de minério de ferro. Projeto final de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- 23 MÜTZE, T. Modelling the stress behaviour in particle bed comminution, Int. J. Miner. Process. 2016;156, 14–23.