

COMPARAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS NA Prensagem DE ROLOS DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO*

Túlio Moreira Campos¹
Gabriel Pantoja Barrios²
Juliana Segura Salazar³
Douglas Batista Mazzinghy⁴
José Francisco Cabello Russo⁵
Luís Marcelo Marques Tavares⁶

Resumo

A tecnologia da Prensa de Rolos se encontra cada vez mais presente em circuitos de cominuição na indústria mineral. No caso de minérios de ferro itabiríticos, essa tecnologia está sendo aplicada de forma pioneira no projeto Minas-Rio, atualmente em fase de *ramp-up*. O trabalho compara o desempenho das Prensas de Rolos do circuito Minas-Rio sob diferentes condições de operação em relação às previsões obtidas pelos três principais modelos matemáticos disponíveis na literatura: Morrell / Lim / Shi / Tondo (1997), Torres & Casali (2009) e Dundar *et al.* (2013). A comparação foi realizada considerando o ajuste dos modelos a um caso base, sendo os demais testes simulados a partir dos parâmetros ajustados para esse. A comparação entre os modelos foi realizada com base nas previsões de potência consumida, capacidade e distribuição granulométrica do produto. Em geral, foram obtidas boas previsões da distribuição granulométrica do produto com os diferentes modelos, embora o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo tenha superestimado a finura do produto em alguns dos testes. Além disso, foi observada uma boa correspondência entre a potência experimental e a simulada para os três modelos na maioria dos testes industriais. Entretanto, a capacidade prevista pelos modelos de Morrell / Lim / Shi / Tondo e Torres & Casali foi subestimada em todos os casos em relação aos valores experimentais.

Palavras-chave: Prensa de rolos; Moagem; Simulação; Minério de ferro itabirítico.

COMPARISON OF MATHEMATICALS MODELS IN HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS OF AN ITABIRITE IRON ORE

Abstract

High Pressure Grinding Rolls technology is increasingly more present in comminution circuits in the minerals industry. In the case of Itabirite iron ore, this technology is being applied for the first time in the Minas-Rio project, currently in ramp-up phase. The present work compares the performance of the Minas-Rio's roller presses under different operating conditions in relation to the predictions obtained by the three main mathematical models available in the literature: Morrell / Lim / Shi / Tondo (1997), Torres & Casali (2009) and Dundar *et al.* (2013). The comparison was made considering the fitting of the model parameters using a base case, and simulating the other cases using the calibrated parameters. A comparison of the models was performed based on predictions of power consumption, capacity and size distribution of the product. In general, simulations were in good agreements with the size distribution of the product for the different models, although the model by Morrell / Lim / Shi / Tondo has overestimated the fineness of the product in some of the tests. Furthermore, a good correlation was observed between the experimental and simulated power for the three models in most of the industrial tests. However, the capacity predicted by models Morrell / Lim / Shi / Tondo and Torres & Casali was underestimated in all cases compared to the experimental values.

Keywords: High pressure grinding rolls; Grinding; Simulation; Itabirite iron ore.

- ¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Aluno de Iniciação Científica, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ² Engenheiro Químico, D.Sc., Pós-Doutorando, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ³ Engenheira Química, M.Sc, Aluna de Doutorado, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- ⁴ Eng. de Minas, D.Sc., Eng. Especialista, Anglo American, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.
- ⁵ Especialista em Processos, Gerente de Processo e Desenvolvimento, Anglo American, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.
- ⁶ Engenheiro de Minas, Ph.D., Professor Titular, Laboratório de Tecnologia Mineral, PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as grandes empresas na área de mineração no Brasil reconhecem a importância da inclusão da tecnologia da Prensa de Rolos nos circuitos de cominuição [1]. Especificamente, no processo de cominuição de minério de ferro, a Prensa de Rolos tem sido aplicada com sucesso na britagem grosseira, britagem de *pebbles* de moinhos autógenos e, sobretudo, na remoagem pré-pelotização. Alguns dos exemplos de utilização desta tecnologia podem ser encontrados na mina de Los Colorados no Chile e, mais recentemente, no projeto Minas-Rio em Conceição do Mato Dentro (MG), além de diversas usinas de pelotização no Brasil.

O projeto Minas-Rio emprega Prensas de Rolos na etapa de pré-moagem, substituindo as etapas de britagem terciária e quaternária. Essa escolha foi baseada principalmente na redução do custo de investimento e do consumo energético, na maior estabilidade da operação e na simplificação do circuito, que a prensa de rolos proporciona [2].

A Prensa de Rolos (Figura 1) consiste em dois rolos girando em sentidos opostos: um deles gira sobre um eixo fixo, enquanto o outro se movimenta linearmente. O rolo móvel transmite a força compressiva às partículas por meio de um sistema hidráulico de pressão. A alimentação de material é introduzida na abertura entre rolos, onde a cominuição das partículas ocorre pelo mecanismo de quebra interparticular [3].

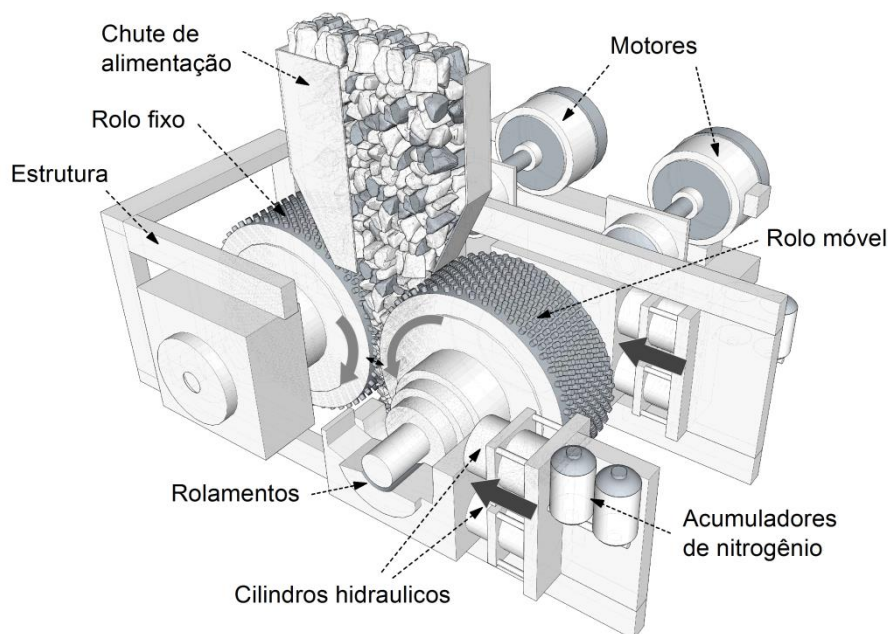


Figura 1 - Esquema da Prensa de Rolos

Ao longo das últimas duas décadas, foram propostos diferentes modelos matemáticos empíricos e fenomenológicos com o objetivo de prever as principais variáveis de desempenho da Prensa de Rolos, as quais são: a distribuição granulométrica do produto, a capacidade ou taxa de alimentação específica e o consumo específico de energia [4-5]. Esses modelos correlacionam essas variáveis de desempenho com os "parâmetros chave" de operação, como a abertura entre os rolos, o ângulo de captura ("pega do material") e a pressão de operação [4]. Entretanto, esses parâmetros chave também dependem de variáveis relacionadas à geometria da Prensa de Rolos (diâmetro, comprimento e velocidade dos rolos, abertura inicial entre os rolos e tipo

de revestimento), ao sistema hidráulico de pressão (parâmetros iniciais de nitrogênio e óleo) e às propriedades do material processado (resistência do material e granulometria da alimentação) [6].

O presente trabalho compara a aplicação de três dos principais modelos matemáticos fenomenológicos na simulação de Prensas de Rolos em escala industrial no projeto Minas-Rio. A comparação apresenta os parâmetros de entrada necessários para a utilização de cada modelo, bem como os parâmetros que foram calibrados com base em um mesmo teste industrial (caso base). Assim, a capacidade preditiva dos modelos é avaliada com base na sua habilidade em prever resultados de seis testes adicionais, realizados sob diferentes condições de operação para o mesmo minério.

2 MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DA PRENSA DE ROLOS

Diferentes *softwares* de simulação de processamento mineral utilizam modelos fenomenológicos que permitem a previsão da granulometria do produto e do consumo energético da Prensa de Rolos. As Tabelas 1 a 3 apresentam, de forma sucinta, as principais variáveis e parâmetros dos modelos comparados no presente trabalho: Morrell / Lim / Shi / Tondo [7] disponível no *software JKSimMet*, Torres & Casali [8] programado em Matlab® como parte do presente trabalho, e o modelo de Dundar *et al.* [9], disponível na plataforma *MDK*, que é um *software* baseado em Excel® e desenvolvido no Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) da Austrália [10].

O modelo de capacidade da prensa de rolos usado pelos diferentes autores é baseado no modelo de fluxo pistão simples [7]. A taxa de alimentação é calculada a partir do comprimento L e da velocidade dos rolos u , da abertura de trabalho x_g e da densidade do floco ρ_g na abertura de trabalho. O modelo também inclui um fator de correção (c), que faz referência ao escorregamento aparente do material que ocorre quando os rolos operam com velocidades elevadas (superiores a 3 m/s).

Tabela 1 - Variáveis e parâmetros do modelo de Torres & Casali

	Variáveis de entrada	Parâmetros de ajuste	Parâmetros do minério
Capacidade	U, L, x_g	-	ρ, ρ_g
Potência	F, u	-	-
Granulometria do produto	-	$\alpha_{1SP}, \alpha_{2SP}, \alpha_{3SP}, S_F^E, \zeta_1, \zeta_2$	-
Efeito de borda	-	a	-

ρ : massa específica do minério; $\alpha_{1SP}, \alpha_{2SP}, \alpha_{3SP}$: parâmetros da função quebra de Austin e Luckie; S_F^E, ζ_1, ζ_2 : parâmetros da função seleção de Herbst & Fuerstenau; v_z : velocidade vertical do leito de partículas; D : diâmetro dos rolos; a : fração de minério produzido nas bordas do rolo.

Tabela 2 - Variáveis e parâmetros do modelo de Morrell / Lim / Tondo / Shi

	Variáveis de entrada	Parâmetros de ajuste	Parâmetros do minério
Capacidade	u, L, x_g	-	ρ, ρ_g
Potência	τ, u, D	K_P	-
Granulometria do produto	CEE	t_{10h}	A, b
Efeito de borda	-	γ	-

T : Torque; CEE : consumo específico de energia; t_{10h} : parâmetro da função quebra para a zona de compressão; γ : fator de separação específico do minério.

Tabela 3 - Variáveis e parâmetros do modelo de Dundar e colaboradores

	Variáveis de entrada	Parâmetros de ajuste	Parâmetros do minério
Capacidade	u, L, x_g	-	θ_c, θ_g
Potência	τ, u, D	-	-
Granulometria do produto	F	k_D, α_D	A, b, c, d, A_s

F : força específica, A_s : área superficial específica da alimentação.

O modelo de potência proposto por Morrell / Lim / Shi / Tondo é baseado no parâmetro K_P ou coeficiente de potência na zona de compressão, o qual é calibrado com base na energia específica experimental E_{cs} obtida em ensaios na Prensa de Rolos em escala de laboratório. Para prever a potência são usados os parâmetros t_{10} , A e b , bem como a família de curvas $t_{10} - t_n$ do modelo de Narayanan e Whiten [11], obtidos a partir dos ensaios de quebra de partículas individuais (*Drop Weight Test*, DWT) e de quebra de leitos de partículas por compressão em prensa e pistão.

Torres & Casali propuseram um modelo para o cálculo da potência demandada pela prensa de rolos em função da força de compressão F aplicada sobre a área efetiva dos rolos, em função da pressão de operação p_m , do ângulo que limita a zona de quebra interparticular α_{IP} e da velocidade dos rolos u .

Os modelos de Morrell / Lim / Shi / Tondo e Torres & Casali de granulometria do produto compreendem três zonas dentro da Prensa de Rolos: a zona de pré-britagem onde quebram as partículas com tamanho maior que a abertura crítica (x_c), a zona periférica ou de efeito de borda, e a zona central ou de compressão.

A principal diferença é que o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo adota a metodologia experimental dos ensaios de prensa e pistão e DWT para caracterizar a função de aparecimento (*appearance function*), a qual é uma relação entre a energia absorvida pelo leito ou pelas partículas e o parâmetro t_{10} do modelo de Narayanan e Whiten [11], para descrever os mecanismos de quebra individual de partículas e da quebra em leitos nas diferentes zonas. Entretanto, o modelo de Torres & Casali discretiza o rolo em um número N_B de blocos e presume que a potência aplicada em cada bloco segue uma função parabólica. Para descrever a quebra o modelo adota as expressões de função quebra b_{ij} de Austin & Luckie [12] e seleção S_{ik} de Herbst & Fuerstenau [13], a fim de calcular o produto em cada bloco.

Finalmente, o modelo de granulometria do produto de Dundar *et al.* aplica o modelo de mistura perfeita de Whiten [14] para descrever o balanço de massa por fração granulométrica, com base na taxa de quebra das partículas $r_{D,i}$, a quantidade de material contida no tamanho i dentro do reator $s_{D,i}$ e a função quebra a_{ij} a qual depende da energia aplicada no evento de quebra sobre as partículas de tamanho inicial j , usando também o parâmetro t_{10} do modelo de Narayanan e Whiten [11]. A velocidade de quebra r_D , é calculada com base em uma constante relacionada ao equipamento k_D e uma constante do material α_D . Assim como o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo, o modelo de Dundar *et al.* também requer a caracterização experimental da quebra do material a partir de ensaios de laboratório de quebra de leitos por compressão em prensa e pistão.

3 METODOLOGIA

3.1 TESTES INDUSTRIAIS DE Prensagem

Os testes em escala industrial foram conduzidos com o intuito de analisar o funcionamento das prensas instaladas no projeto Minas-Rio, variando sua pressão de operação, velocidade do rolo e abertura (*gap*) operacional. Esses testes foram realizados com alimentação de itabirito friável em duas prensas de rolos idênticas (HG-01 e HG-03), cada uma com diâmetro de 2,40 m, comprimento de 1,65 m e dois motores de 2400 kW, totalizando 4800 kW por Prensa. Foram realizados um total de sete testes em escala industrial, sendo dois na HG-01 e cinco na HG-03. Um dos testes foi selecionado como caso base ou de referência e usado para calibrar os parâmetros dos diferentes modelos citados acima, a fim de prever o comportamento das prensas de rolos nas condições operacionais dos demais testes. A Tabela 4 resume as condições operacionais do processo durante os testes.

Tabela 4 – Condições operacionais dos testes em escala industrial

	T 1	T 2*	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7
Pressão (bar)	65	75	85	70	70	64	73
Velocidade (m/s)	2,20	2,20	2,20	2,08	2,10	2,20	2,19
Gap operacional (mm)	36,0	39,0	39,0	36,3	36,3	41,3	39,7
Potência (kW)	3460	4082	4612	3751	3655	2526	3385
Capacidade úmida (t/h)	2224	2404	2404	2020	2287	2450	2074
Capacidade seca (t/h)	2137	2296	2248	1935	2193	2367	2001
Energia específica (kWh/t)	1,62	1,78	2,05	1,94	1,67	1,07	1,69
Umidade (%)	3,9	4,5	6,5	4,2	4,1	3,4	3,5
Densidade aparente (t/m ³)	2,50	2,39	2,61	1,85	1,89	2,10	2,10
Densidade do sólido (t/m ³)	4,01	4,01	4,01	3,52	3,75	3,50	3,50
Passante em 1,18 mm** (%)	85,7	85,7	85,7	81,3	78,8	74,8	73,5

* Caso base ** Na alimentação

3.2 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS FENOMENOLÓGICOS

O modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo (Tabela 2) foi calibrado no JKSimMet® versão 5.2 usando como entradas do modelo os dados experimentais do caso base (Tabela 4), as dimensões do equipamento industrial, as vazões mássicas e distribuições granulométricas da alimentação e do produto da prensa, bem como as características de fragmentação do minério obtidas por meio de ensaios de compressão de leitos em prensa e pistão. Neste caso não foi possível obter a função quebra do minério usando o ensaio DWT, pois a granulometria do material era bastante fina, não apresentando quantidade suficiente de partículas nas faixas de tamanho padrão do ensaio [15]. Portanto, a função quebra obtida a partir do ensaio de compressão também foi empregada como entrada do modelo para o caso da quebra de partículas individuais. Esta aproximação considerou-se válida, sendo que Daniel [3] sugere que uma aproximação contrária pode ser utilizada para propósitos de modelagem e simulação, ou seja, presumir a função quebra obtida pelo ensaio DWT como entrada para substituir a quebra por compressão de leitos. Os autores também consideram que a aproximação pode ser útil para fins práticos na faixa de tamanhos a ser avaliada.

O modelo de Dundar *et al* [9] foi utilizado na plataforma de simulação MDK, usando como entradas fixas do modelo as especificações do caso base (Tabela 4), sendo que as características de quebra também foram obtidas por meio do ensaio de compressão de leitos em prensa e pistão. Já para o modelo de Torres & Casali foi realizada uma otimização de sete parâmetros (Tabela 1) com o método de otimização não linear sem restrições. Este método foi aplicado em Matlab® com a função *fminsearch*, responsável por encontrar o mínimo de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial. Para minimizar a função objetivo, compararam-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).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS

Comparações entre as distribuições granulométricas medidas e ajustadas do produto do caso base (Teste 2) obtidas com os diferentes modelos são apresentadas nas Figuras 2 a 4. Os melhores resultados foram observados para o modelo de Dundar *et al*. (Figura 2), enquanto os demais modelos se ajustam relativamente bem aos dados, com alguma diferença nas faixas de tamanho intermediárias (Figuras 3 e 4).

4.2 PREVISÃO DA CAPACIDADE E POTÊNCIA CONSUMIDA

A partir dos parâmetros previamente ajustados para o caso base, foram previstas a potência consumida na cominuição do minério e a capacidade do equipamento para cada um dos seis testes experimentais adicionais obtidos nas prensas operando em diferentes condições operacionais e de alimentação do material.

Os submodelos de capacidade de Morrell / Lim / Shi / Tondo e de Torres & Casali são equivalentes e relacionam a velocidade e comprimento dos rolos, abertura de trabalho e densidade dos flocos, não apresentando parâmetros de ajuste. Esta última variável não foi medida nos testes industriais, mas ela foi calculada com base em uma aproximação sugerida por Torres & Casali [8] e Daniel [3], equivalente a 85% da massa específica do minério. A partir dessa aproximação foi observado (Figura 5) que em todos os casos houve uma subestimação significativa da capacidade em relação aos valores experimentais. Este fato já foi observado em trabalhos anteriores de simulação de Prensas de Rolos processando minério de ferro itabirítico [16-17], e pode estar associado às características particulares desse tipo de minério, que são a alta proporção de finos e a alta suscetibilidade do mesmo à quebra, pois esse minério difere muito daqueles a partir dos quais os modelos foram desenvolvidos. Por outro lado, o modelo de Dundar *et al*. previu valores de capacidade mais realistas, embora tenha superestimado em algumas outras. Cabe destacar, entretanto, que os modelos de capacidades não têm parâmetros de ajuste, sendo os mesmos preditivos. A introdução de um parâmetro de calibração permitiria corrigir grande parte do erro encontrado nas previsões obtidas através dos modelos de Torres & Casali e Morrell / Lim / Shi / Tondo.

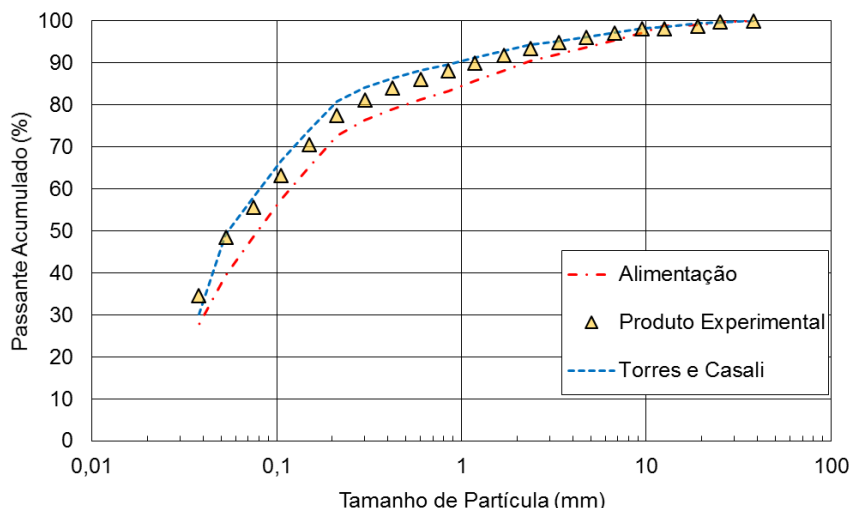


Figura 2 – Comparação entre as distribuições granulométricas medidas e ajustadas usando o modelo de Torres & Casali para o Teste 2

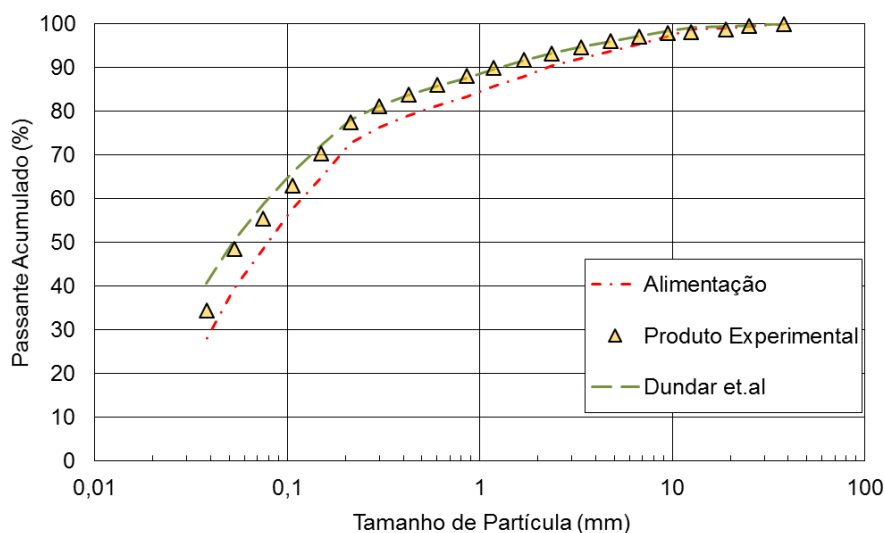


Figura 3 – Comparação entre as distribuições granulométricas medidas e ajustadas usando o modelo de Dundar *et al.* para o Teste 2

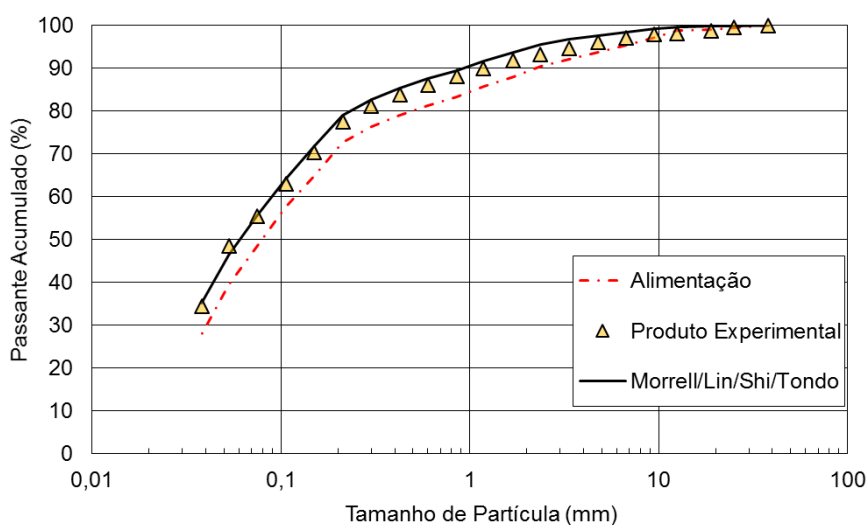


Figura 4 – Comparação entre as distribuições granulométricas medidas e ajustadas usando o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo para o Teste 2

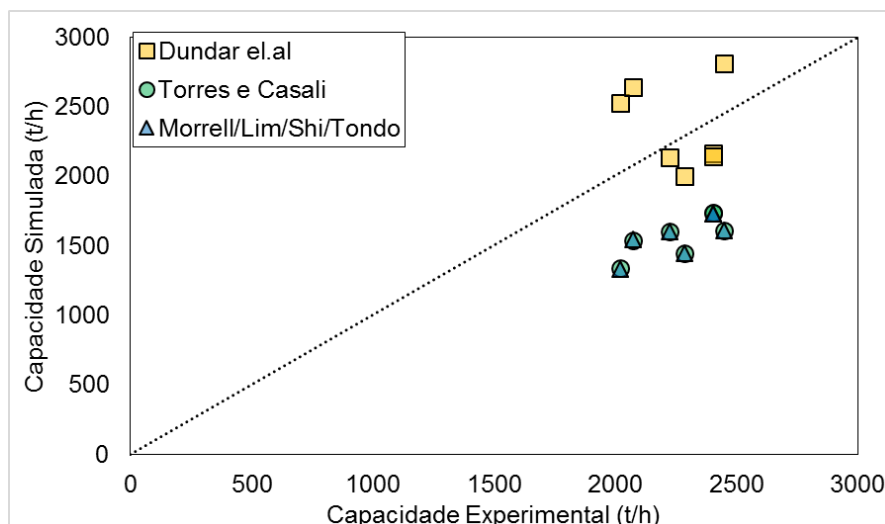


Figura 5 – Comparação entre as capacidades unitárias experimentais e simuladas das prensas

Os três modelos permitiram obter previsões relativamente boas da potência consumida pelas prensas de rolos na maioria dos testes industriais, com previsões marginalmente mais fiéis com o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo (Figura 6).

Nas Figuras 7 a 9 se observa a comparação dos resultados experimentais com as previsões dos três modelos para a granulometria do produto da Prensa de Rolos. As simulações dos Testes 1 e 3 apresentam uma boa correspondência com os resultados dos testes, sendo que nestes testes utilizou-se amostras com a mesma massa específica real, variando a pressão de operação e o gap operacional durante a operação. Já para o Teste 4, no qual, além da variação de pressão e gap operacional, também variou-se a massa específica real do sólido e a velocidade dos rolos, o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo não alcançou uma boa correspondência na parte “grossa” da distribuição do produto. Por outro lado, o modelo de Dundar *et al.* previu melhor a distribuição nessa mesma parte da distribuição granulométrica do produto. Por fim, o modelo de Torres & Casali permitiu uma boa previsão ao longo de toda a distribuição granulométrica. Nos Testes 5 a 7, novas condições de pressão e alimentação do sólido (variação na massa específica real) foram utilizadas e os resultados obtidos foram semelhantes aos do Teste 4.

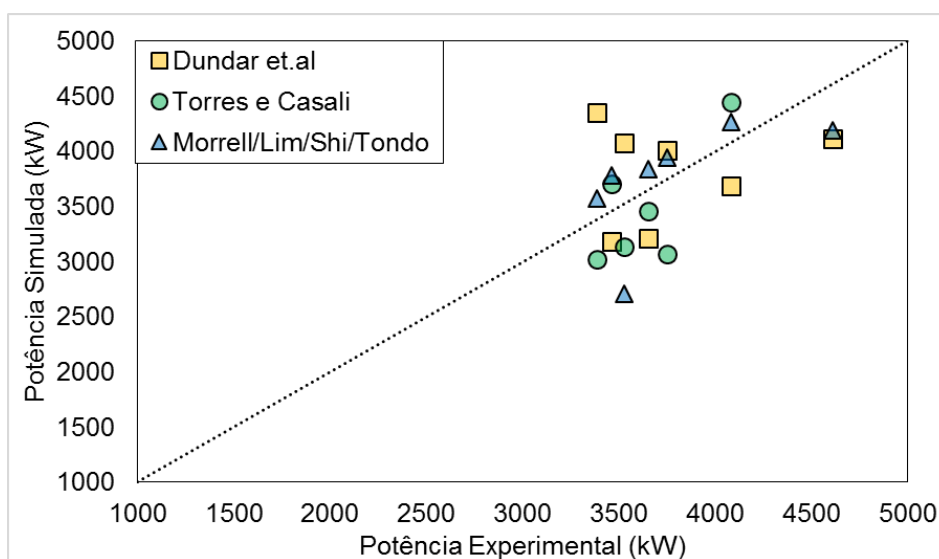


Figura 6 – Comparação entre os valores experimentais e simulados para a Potência Consumida

A fim de facilitar as comparações, calcularam-se as percentagens passantes em 1,18 mm e 0,045 mm medidas e simuladas para o produto. Complementando os resultados analisados nas distribuições, percebeu-se que o modelo de Torres & Casali e o modelo de Dundar *et al.* obtiveram boas previsões para o material passante em 1,18 mm (Figura 8). Por outro lado, o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo previu melhor a distribuição granulométrica na parte “fina” da distribuição, com bons resultados na percentagem passante em 0,045 mm (Figura 9).

Assim, é evidente que o modelo de Torres & Casali apresentou uma fraca aderência à porção “fina” da distribuição do produto. Este modelo utiliza um perfil de pressão parabólico ao longo do comprimento do rolo, determinando, a partir dele, um gradiente de potência. Na prática, o revestimento dos rolos e algumas condições operacionais podem interferir diretamente no gradiente de pressão e alterar o perfil adotado. Essa fraca aderência das previsões obtidas aos dados experimentais na parte “fina” da distribuição pode estar relacionada com o perfil de pressões presumido equivocadamente para o centro dos rolos, onde se gera o produto mais fino da Prensa de Rolos.

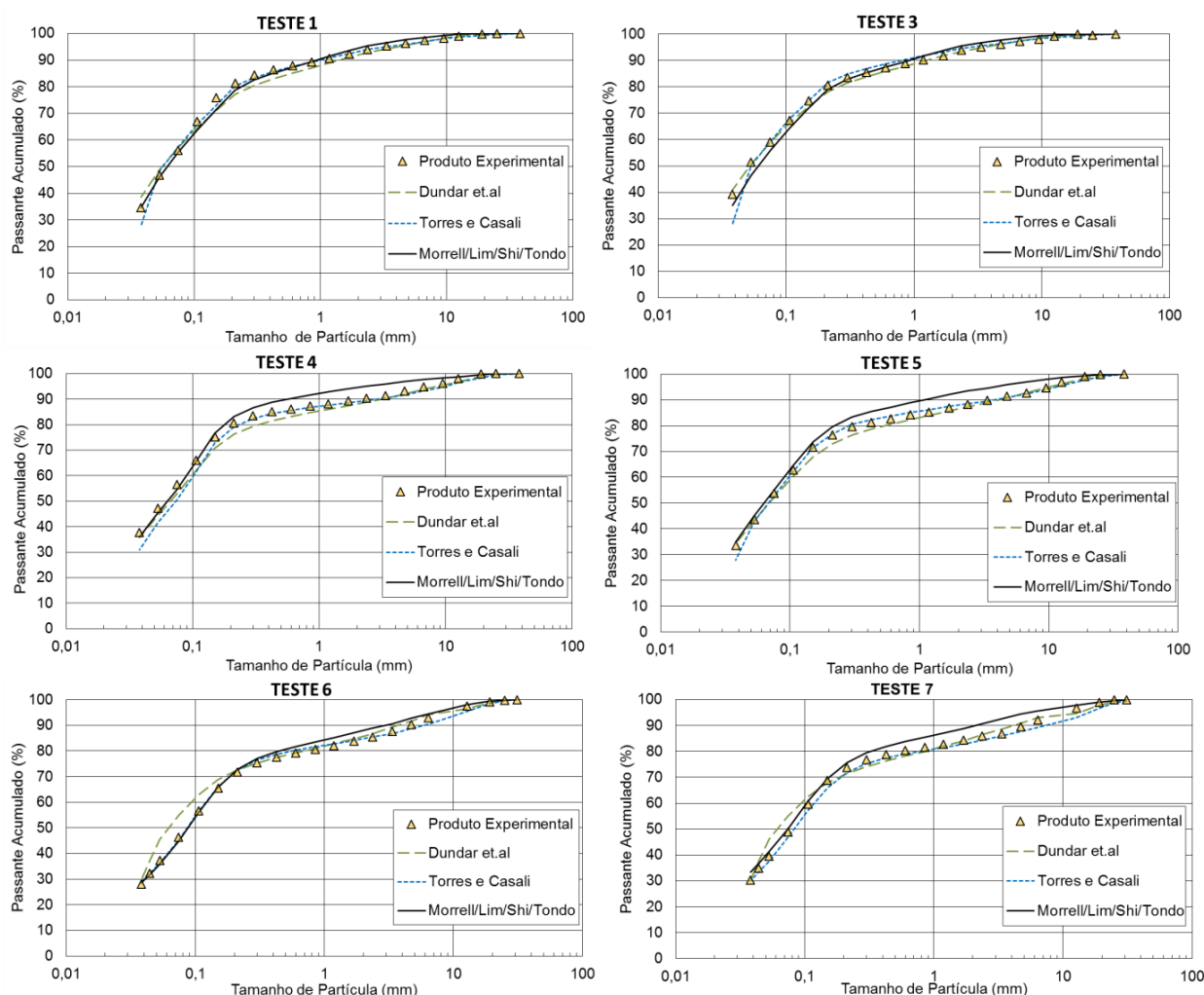


Figura 7 – Comparação entre as distribuições granulométricas experimentais e simuladas pelos modelos para os 6 testes

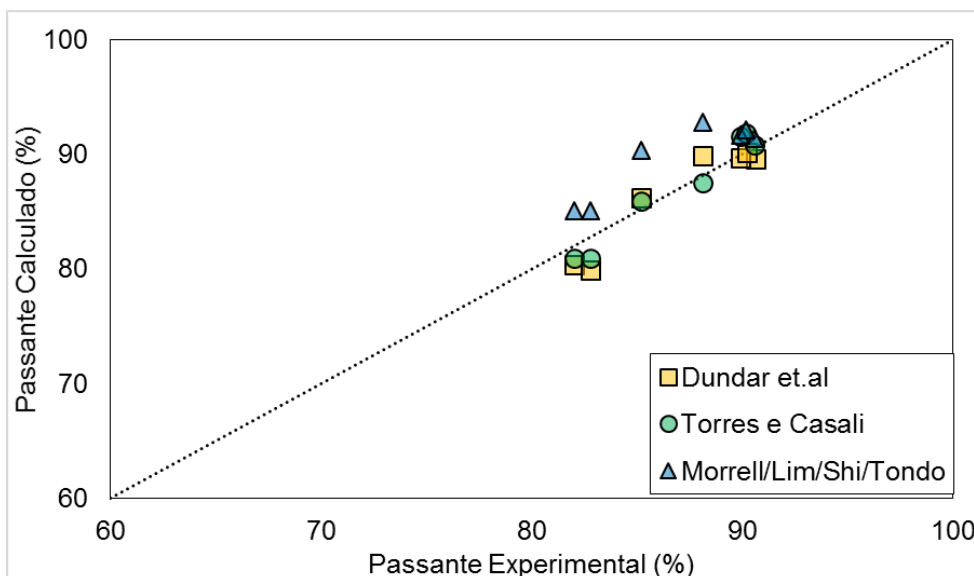


Figura 8 – Comparação entre a percentagem passante experimental e simulada em 1,18 mm no produto

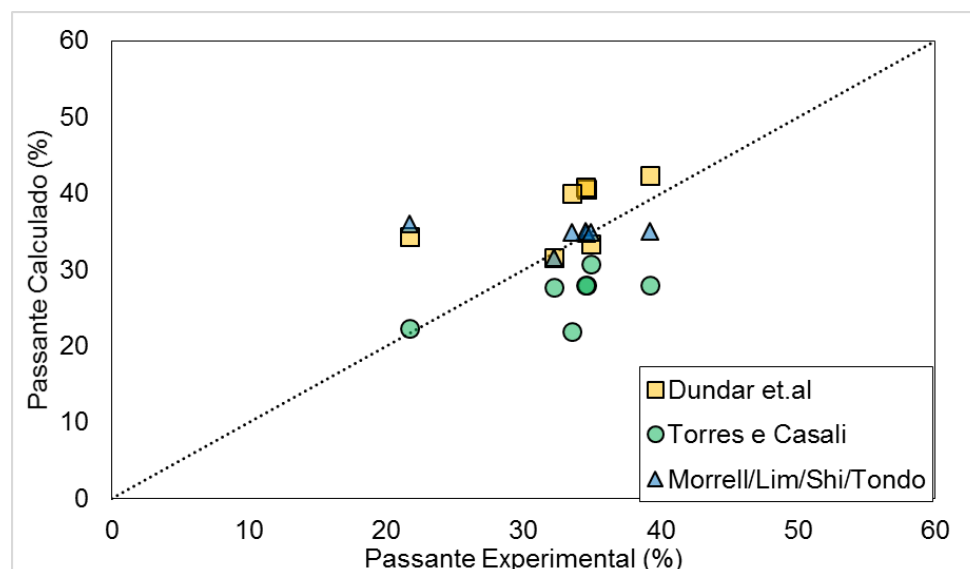


Figura 9 – Comparação entre a percentagem passante experimental e simulada em 0,045 mm no produto

5 CONCLUSÕES

Os três modelos matemáticos analisados conseguiram prever com moderada precisão a distribuição granulométrica do produto das prensas operando sob diferentes condições operacionais. Foi observado um ajuste mais preciso na parte “fina” da distribuição com o modelo de Morrell / Lim / Shi / Tondo, porém com uma previsão deficiente da parte “grossa” em alguns casos. Já os modelos de Torres & Casali e de Dundar *et al.* se ajustaram relativamente bem a toda a distribuição, tendo uma diferença mais representativa na parte “fina da distribuição” (melhor ajuste no Torres & Casali). A média do erro calculado entre os valores experimentais e simulados do material passante em 1,18 mm e passante em 0,045 mm foram menores para os modelos de Torres & Casali e Morrell/Lim/Shi/Tondo, respectivamente.

Em relação à potência consumida, foram obtidas previsões apenas moderadas para a maioria dos testes com os três modelos. Os submodelos de capacidade de Torres

& Casali e de Morrell / Lim / Shi / Tondo subestimaram significativamente a capacidade para todos os testes, enquanto o de Dundar *et al.* conseguiu obter melhores previsões de capacidade em alguns casos, com erros da ordem de 15%. Para a potência consumida o erro calculado foi próximo para os três modelos, sendo comparativamente menor para o modelo Morrell / Lim / Shi / Tondo (8%).

Cabe destacar que erros experimentais e de amostragem podem ter contribuído para as diferenças observadas. Ainda assim, é evidente que existe grande potencial para avanços com o refinamento de modelos aplicados a minérios de ferro itabiríticos, os quais diferem em muito se comparados aos minérios com base nos quais os modelos testados foram desenvolvidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Anglo American por disponibilizar os dados dos ensaios industriais e ao CNPq pelo financiamento de parte da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHNEIDER, C.L.; ALVES, V.K.; AUSTIN, L.G. Modeling the contribution of specific grinding pressure for the calculation of HPGR product size distribution. *Minerals Engineering*, v. 22, p. 642–649, 2009.
- 2 RIBEIRO, F.S.; RUSSO, J.F.C.; COSTA, T. Aplicação de prensas de rolos em minério de ferro. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 63, p. 399–404, 2010.
- 3 DANIEL, M.J. HPGR Model verification and scale-up. 203 f. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 2002.
- 4 BEARMAN, R. High-Pressure Grinding Rolls Characterising and Defining Process Performance for Engineers. In: KAWATRA, S. K. (Org.). *Advances in Comminution*. 1. ed. Littleton, Colorado: SME, p. 3–14, 2006.
- 5 LIM, W.I.L.; CAMPBELL, J.J.; TONDO, L.A. The effect of rolls speed and rolls surface pattern on high pressure grinding rolls performance. *Minerals Engineering*, v. 10, p. 401–419, 1997.
- 6 BARRIOS, G.K.P. Modelagem da prensa de rolos usando o método dos elementos discretos com acoplamento dinâmico e o modelo de substituição de partículas. 2015. 165 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- 7 MORRELL, S.; LIM, W.; SHI, F.; TONDO, L.A. Modelling of the HPGR Crusher. *Comminution Practices*, Littleton, Colorado: SME, pp.117–126, 1997.
- 8 TORRES, M.; CASALI, A. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls. *Minerals Engineering*, v. 22, p. 1137–1146, 2009.
- 9 DUNDAR, H.; BENZER, H.; AYDOGAN, N. Application of population balance model to HPGR crushing. *Minerals Engineering*, v. 50-51, p. 114–120, 2013.
- 10 HILDEN, M., POWELL, M.S. The future developments in circuit simulation capability at the JKMR (A. Kwade, S. Breitung-Faes, D. Steiner, Eds.)13th European Symposium on Comminution and Classification. Anais.2013
- 11 NARAYANAN, S.S.; WHITEN, W.J. Breakage characteristics of ores for ball mill modeling. *Proceedings of Aus. IMM*, p. 31–39, 1983.
- 12 AUSTIN, L.G.; LUCKIE, P.T. The estimation of non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding tests. *Powder Technology*, v. 5, p. 267–271, 1972.
- 13 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.
- 14 WHITEN, W.J. A matrix theory of comminution machines. *Chemical Engineering Science*, v. 29, p. 589–599, 1974.
- 15 NAPIER-MUNN, T.J., MORRELL, S., MORRISON, R.D., KOJOVIC, T. Mineral

- Comminution circuits: Their operation and optimisation. Queensland, Australia: Ullrich Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.
- 16 SEGURA, J.S. Comparação de rotas de cominuição de minério de ferro itabirítico usando conceitos de sustentabilidade e eficiência energética. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2014.
 - 17 ALVES, V. K. Metodologia para Simulação e Escalonamento de Prensas de Rolos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.