

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUEBRA DO CALCÁRIO USADO NA PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO¹

Nemer Saib Neto²

Roberto Galéry³

Dirceu Valadares Nascimento⁴

Antônio Eduardo Clark Peres⁵

Resumo

O uso de modelos matemáticos para a previsão e simulação de desempenho dos processos industriais, de beneficiamento de minério, tem sido aplicado com relativo sucesso na atualidade. O desenvolvimento dessa metodologia apresenta resultados significativos, visto que os dados obtidos na operação industrial são correlacionados com os parâmetros de quebra determinados em moinho de laboratório. A metodologia de escalonamento da função seleção foi aplicada para a determinação dos parâmetros de quebra do calcário calcítico, utilizado como insumo na fabricação de pelotas de minério de ferro, processado num circuito fechado de moagem a seco. A determinação dos parâmetros de quebra do calcário calcítico proporcionou a criação de uma base de desenvolvimento do processo de cominuição a seco da Samarco Mineração S/A. A análise final do modelo de escalonamento mostrou um ajuste satisfatório, validado quantitativamente por métodos estatísticos, evidenciando algumas oportunidades de melhoria.

Palavras-chave: Moagem; Balanço de massas; Calcário.

BREAKAGE PARAMETERS DETERMINATION OF A LIMESTONE USED IN THE IRON ORE PELLETIZING PROCESS

Abstract

Nowadays, the mathematical models utilization to forecast and simulate the industrial processes performance of ore beneficiation has been successfully wide applied. This methodology development present relevant results as the industrial operational data are correlated to the breakage parameters settled in a lab-scale grinding mill. The selection function scale-up methodology was applied to determine the calcite limestone breakage function used as an intake in the iron ore pelletizing process, shaped into a dry closed grinding circuit. The calcite limestone breakage parameters determination provided the creation of a dry grinding process enhancement basis for Samarco Mineração S/A. The scale-up model final analysis showed a suitable adjustment ensured quantitatively by statistical methods, revealing a few improvement opportunities.

Key words: Grinding; Mass balance; Limestone.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Engenheiro Metalurgista, M. Sc., VALE, da Gerência de Engenharia de Processos da DIPE.

³ Engenheiro de Minas, D. Sc., UFMG, Escola de Engenharia da UFMG.

⁴ Engenheiro de Minas, Mestrando, UFMG, Escola de Engenharia da UFMG.

⁵ Engenheiro Metalurgista, Ph. D., UFMG, Escola de Engenharia da UFMG.

1 INTRODUÇÃO

Para aumentar o desempenho do processamento do calcário, a literatura apresenta um volume representativo de metodologias que viabilizam a interpretação dos fenômenos de fragmentação e a otimização do desempenho dos processos de cominuição.⁽¹⁻¹³⁾¹ O acervo literário das últimas décadas apresenta o bom desempenho dos modelos matemáticos na função descritiva do comportamento de quebra.^(3,5,6,9,10,14,15)³ A teoria é baseada no balanço populacional que representa, explicitamente, por equações descritivas, os principais subprocessos de cominuição. Entre eles destacam-se: a quebra de partículas, a distribuição por tamanhos apresentada pelos novos fragmentos, o transporte e a classificação do material fragmentado.

A aplicação do balanço populacional na fragmentação tem proporcionado um ganho significativo na área industrial viabilizando o dimensionamento, a simulação e a otimização dos diferentes circuitos de cominuição, além de promover um gerenciamento apropriado das variáveis operacionais.⁽¹⁰⁾

O método de escalonamento de Austin, Klimpel e Luckie⁽¹⁶⁾ é um dos mais conceituados entre as técnicas de simulação. Embasado pelo trabalho de Reid,⁽²⁾ Herbst e Fuerstenau⁽³⁾ e Austin, Klimpel e Luckie⁽¹⁶⁾ desenvolveram técnicas de modelagem e simulação que viabilizaram a comparação do desempenho de diferentes sistemas de cominuição, baseado nos experimentos realizados em escala piloto e industrial.

A função quebra do calcário calcítico utilizado como insumo na produção de pelotas de minério de ferro foi determinada e o modelo de escalonamento da função seleção específica proposto por Austin foi empregado, para avaliação do processo de cominuição a seco do moinho de bolas da Samarco Mineração S/A.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A granulometria do calcário alimentado nos circuitos é de 100% passante na malha de 10 mm, com especificação do teor de umidade máximo de 1,1%. O calcário bruto é armazenado em um silo de estocagem de capacidade líquida de 350 t. A capacidade produtiva do moinho é de 80 t/h. O transporte do material cominuído é pneumático e a classificação é desenvolvida no separador dinâmico de segunda geração da Svedala (Gyrotor e ciclone). O produto final obtido após as etapas de moagem e classificação, no *underflow* dos ciclones e no filtro de mangas, apresenta uma área superficial específica de 5.200 cm²/g e 65% de material passante na malha de 325 mesh (0,044 mm).

A potência instalada do moinho é de 1.118,5 KW (potência calculada de 1.098 KW), com uma carga de bolas de 79 t (com *top-size* de 50 mm), um grau de enchimento de 28,75% e uma velocidade crítica de operação de 77,3%. O consumo específico teórico de energia do moinho é de 11,1 KWh/t.

2.1 Amostragem do Circuito Industrial

As amostras foram obtidas nos fluxos da alimentação do moinho, do retorno da classificação do separador de partículas de segunda geração, do fluxo composto pelo material da alimentação e pelo retorno do separador, do produto final da saída dos ciclones e do material do filtro de mangas, para análise da distribuição granulométrica.

Os compostos de cada fluxo foram formados por 8 alíquotas, coletadas a cada 15 minutos no intervalo de 2 horas. Todos os fluxos foram amostrados no mesmo período, seguindo um circuito de coleta padronizado, que obedeceu a seqüência descrita no fluxo apresentado pela Figura 1. O procedimento de formação dos compostos foi repetido, para garantir um número total de três amostras por fluxo. Os resultados da distribuição granulométrica das amostras foram utilizados para o fechamento do balanço de massas, feito pelo método de Lagrange.⁽¹⁷⁾

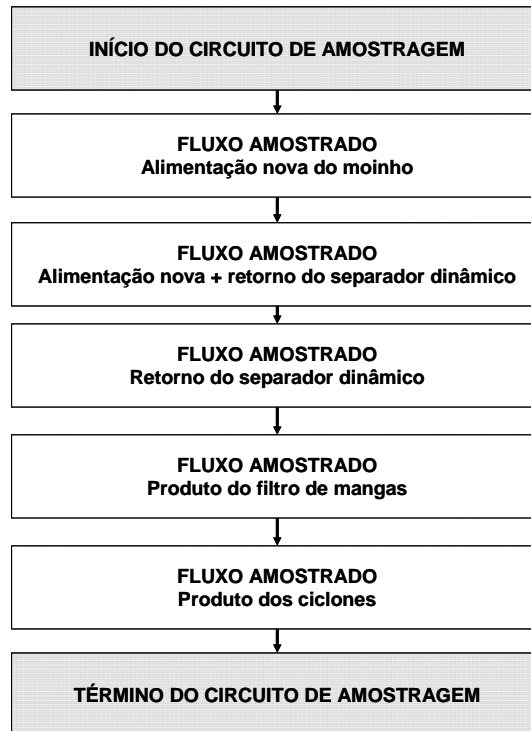


Figura 1. Fluxograma do circuito de amostragem.

As variáveis de processo monitoradas e levantadas para o fechamento do balanço de massas foram listadas abaixo:

- taxa de alimentação do moinho;
- granulometria da alimentação nova;
- granulometria dos produtos do circuito;
- carga circulante; e
- potência consumida pelo moinho.

2.2 Determinação das Funções Quebra e Seleção no Moinho de Bancada

Inicialmente, amostras da alimentação da moagem de calcário da Samarco Mineração foram coletadas para a realização dos testes laboratoriais (moinho de bancada) de determinação da função quebra e função seleção. A amostra foi composta por 20 alíquotas de 1 kg, que foram coletadas diariamente no circuito de abastecimento dos silos de material britado (padrão da alimentação nova do moinho), utilizando um cortador de fluxo *cross-belt*. Foram gerados quatro incrementos diários a cada 2 horas que, após o quarteamento, contabilizaram a amostra diária. O produto final da campanha de amostragem gerou o montante de 20 kg que foi destinado à execução dos testes laboratoriais.

O teste cinético de moagem foi realizado com partículas de mono-tamanho, com granulometria compreendida entre os tamanhos 1,4 mm e 1,0 mm, para determinar as funções quebra e função seleção do calcário, utilizando um moinho padrão de Austin, de dimensões $D = 252$ mm e $L = 260$ mm (moinho de bancada). As bolas utilizadas possuíam um diâmetro médio de 1 polegada (entre 25 mm e 26 mm). O grau de enchimento adotado foi de 20% do volume interno do moinho que é dado por $V = 12.968$ cm³. A carga de bolas, para uma porosidade de leito 0,4, foi de 11,95 kg. Foram utilizadas 8 barras internas, espaçadas proporcionalmente, para a realização do revolvimento da carga de bolas. A velocidade crítica de rotação determinada para os ensaios foi de 70%. A fração de preenchimento dos interstícios do leito de bolas foi apresentada por $U = 0,5$. Desta forma, a massa da carga de minério empregada para o teste foi de 1.421 g.

A amostra de minério foi carregada no moinho junto com a carga de bolas e os testes cinéticos foram desenvolvidos para os cinco intervalos de tempo: 0,33 min. – 0,66 min. – 1,00 min. – 2,00 min. – 4,00 minutos.

Para cada intervalo de moagem, a massa de minério foi cuidadosamente separada da carga de bolas, homogeneizada e quarteada até gerar uma amostra de aproximadamente 100 g, para o ensaio de peneiramento via seca. A distribuição granulométrica, das amostras geradas, foi determinada para todos os intervalos de moagem praticados. Os parâmetros relacionados às funções quebra e seleção de laboratório foram determinados utilizando as técnicas de retro-cálculo de Austin e Luckie,⁽¹⁸⁾ baseadas no método BII.

2.3 Determinação da Função Seleção Específica

O segundo teste cinético de moagem foi desenvolvido com o padrão de granulometria da alimentação do moinho de bolas, que utiliza o calcário de granulometria 100% passante na malha de 10 mm (material da mesma procedência do primeiro teste cinético). Foram coletados 20 kg de calcário por dia, na correia de alimentação do moinho, até finalizar a composição final de uma amostra representativa de 100 kg. Esse minério foi utilizado na determinação da função seleção específica, que foi calculada após a realização dos testes cinéticos no moinho de torque. Os parâmetros reais de operação do moinho industrial foram utilizados para o cálculo da função seleção específica. A metodologia de escalonamento foi baseada nos trabalhos de Austin, Klimpel e Lucike⁽¹⁶⁾ e Herbst e Fuerstenau.⁽³⁾

A massa de bolas e de minério utilizada nos ensaios foi de 79,5 kg e 15,2 kg, respectivamente. Após cada intervalo de moagem, as amostras foram descarregadas, quarteadas e peneiradas. As alíquotas finais geradas para a realização dos peneiramentos, via seca, foram de aproximadamente 100 g. Essas amostras foram utilizadas para a determinação da distribuição granulométrica gerada em todos os intervalos de moagem praticados.

Os testes cinéticos foram desenvolvidos para cinco intervalos de tempo, dados por: 0,00 min. – 0,38 min. – 1,00 min. – 2,00 min. – 4,00 minutos. A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados para a determinação da função seleção específica e a função seleção do moinho industrial.

Tabela 1. Dados utilizados no cálculo da função seleção específica

| Minério | | Carga de bolas | |
|----------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densidade (g/cm ³) = | 2,74 | Massa de bolas do moinho calculada: | 79,5 kg |
| Massa de minério (kg) = | 15,12 | 50 mm | 8,90% 7,075 kg |
| | | 40 mm | 15,20% 12,084 kg |
| | | 30 mm | 43,00% 34,185 kg |
| | | 25 mm | 32,90% 26,155 kg |
| Moinho | | Equações | |
| D (m)= | 0,45 | $U = \frac{f_c}{0,4 \cdot J}$ | $J = \left(\frac{\text{massa de bolas / densidade das bolas}}{\text{volume do moinho}} \right)^{1,0} \frac{1,0}{0,6}$ |
| L (m)= | 0,38 | | |
| Vol (m ³) = | 0,06 | | |
| Vc (%) = | 0,773 | | |
| rpm = | 48,63 | | |
| J (%) = | 0,2875 | | |
| U = | 0,8 | | |
| Bolas | | $f_c = \left(\frac{\text{massa de minério / densidade do minério}}{\text{volume do moinho}} \right)^{1,0} \frac{1,0}{0,6}$ | |
| Densidade (g/cm ³) = | 7,68 | | |

3 RESULTADOS

Os resultados referentes às análises granulométricas dos materiais coletados no circuito industrial foram agrupados pelos fluxos: alimentação nova, retorno do separador (*underflow*), alimentação nova com retorno da classificação, descarga do moinho e produto da separação (*overflow*). Os ajustes das curvas de distribuição granulométrica, dos fluxos referentes ao *overflow* e *underflow* do separador mecânico, foram feitos pela equação de Rosin-Rammler. A determinação da distribuição granulométrica do produto da moagem (saída do moinho) foi realizada pelo método de Lagrange⁽¹⁷⁾. A Figura 2 apresenta as curvas de distribuição granulométrica referente aos fluxos amostrados.

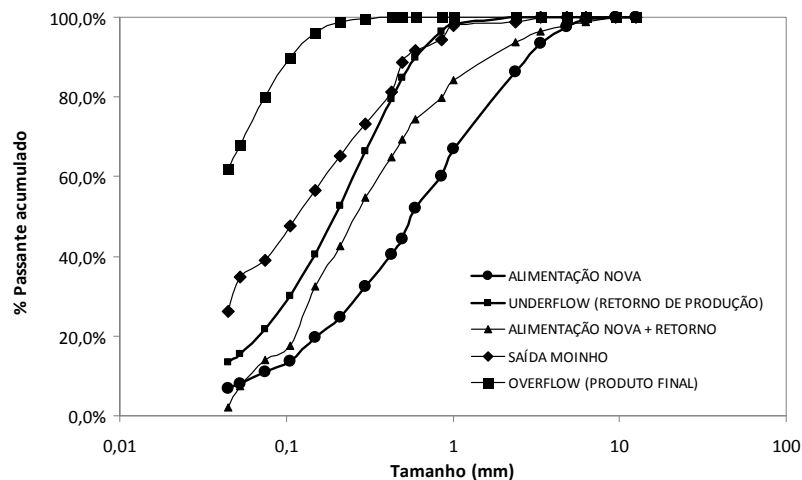


Figura 2: Distribuição granulométrica dos fluxos do circuito de moagem.

3.1 Consolidação do Balanço de Massas

O método de Lagrange⁽¹⁷⁾ foi aplicado para a determinação da carga circulante do sistema. A referência do moinho de bolas 1, de valor médio igual a 1,08 (108%), foi utilizado como padrão para a determinação da carga circulante do moinho de bolas 2. O valor encontrado para o moinho de bolas 2 foi de 1,25 (125%). A determinação foi realizada utilizando os valores de composição da carga total de alimentação do moinho, feita pelos fluxos de alimentação nova e retorno de produção do separador mecânico (*underflow*). A distribuição granulométrica dos fluxos citados foi gerada em análise anterior, sendo elas comparadas para a validação da carga circulante do moinho 2.

A distribuição granulométrica da alimentação total do moinho foi projetada utilizando os valores de alimentação nova, da referência de carga circulante do moinho 1 e das distribuições granulométricas referentes à alimentação nova e retorno de produção. O valor encontrado nesse cálculo foi comparado com a amostra experimental. A diferença encontrada entre os valores das distribuições granulométricas, calculada e experimental, foi reduzida à zero variando o valor da carga circulante inicial, até a aferição final da referência (125%). A alimentação total do moinho calculada, considerando o valor de carga circulante de 1,25, foi de 179,8 t/h.

3.2 Resultados das Simulações do Moinho de Bancada

A função quebra do calcário calcítico, apresentada na Figura 3, foi determinada pelo método BII de Austin e Luckie.⁽¹⁸⁾ O *software* do laboratório de tratamento de minérios da UFMG foi utilizado para a realização dos cálculos matemáticos. A Tabela 2 apresenta o resumo das informações relacionadas aos resultados obtidos no moinho de bancada.

O ensaio de laboratório foi realizado com partículas de mono-tamanho do calcário calcítico, 100% passante na malha de abertura de 10 mm. O material utilizado nos testes foi peneirado, gerando a amostra final compreendida na faixa granulométrica de 1,4 mm a 1,0 mm.

Tabela 2. Parâmetros da função quebra determinados em moinho de bancada

| Função Quebra - B_{ij} | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| Φ | 0.610666 | γ | 1.042677 | β | 4.809556 |
| $B_{ij} = \Phi_j \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \cdot \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta, \quad 0 \leq \Phi \leq 1$ | | | | | |

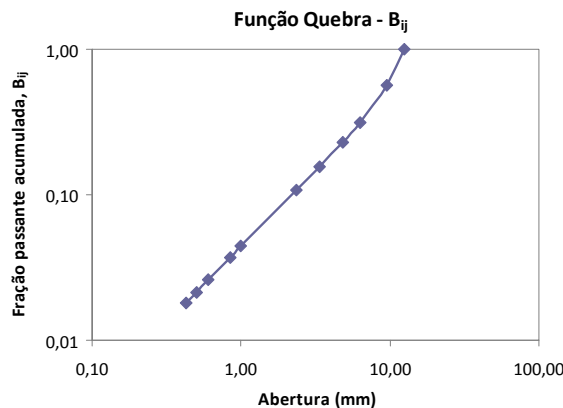


Figura 3. Função quebra do calcário determinada no moinho de bancada.

3.3 Resultados das Simulações do Moinho de Torque

Os resultados referentes ao cálculo da função seleção do moinho de torque foram agrupados na Tabela 3. Esses dados foram utilizados para a determinação da função seleção específica. Os ensaios no moinho de torque foram realizados para cinco intervalos de tempo de moagem. A Figura 4 apresenta os resultados referentes às distribuições granulométricas obtidas em cada ensaio. A Figura 5 mostra o comportamento não linear da velocidade específica de quebra S_i .

Tabela 3. Parâmetros da função seleção determinados em moinho de torque

| Função Seleção - S_i | | | | | | | | | |
|------------------------|--------|-----|-------------|----------|-------------|-------|-------------|-----------|-------------|
| x_0 | 0.9633 | a | 1.154656749 | α | 0.887500448 | μ | 2.194291571 | Λ | 1.451360549 |

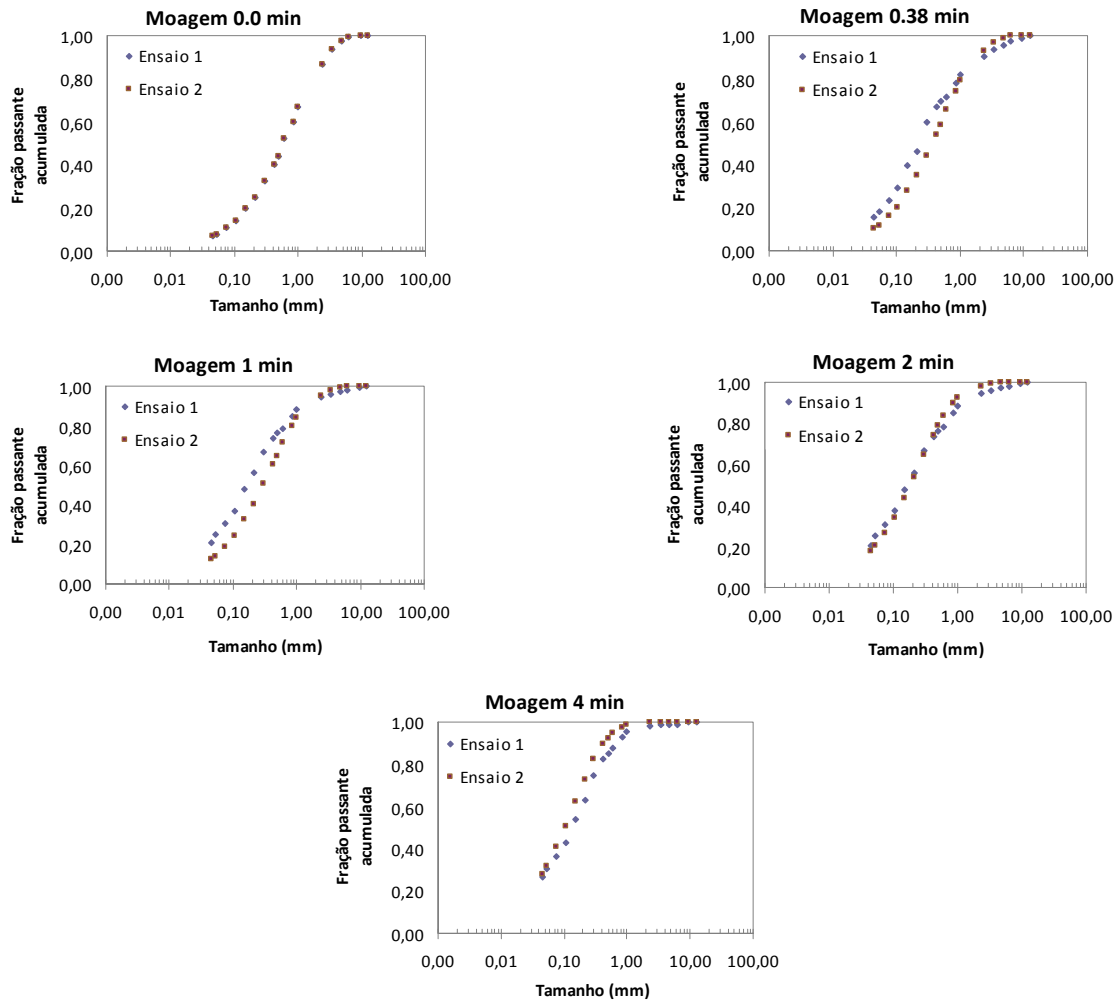
$$S_i = \frac{a \cdot \left(\frac{x_i}{x_0}\right)^\alpha}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu}\right)^\Lambda} \quad \Lambda \geq 0$$


Figura 4. Distribuição granulométrica dos ensaios realizados no moinho de torque.

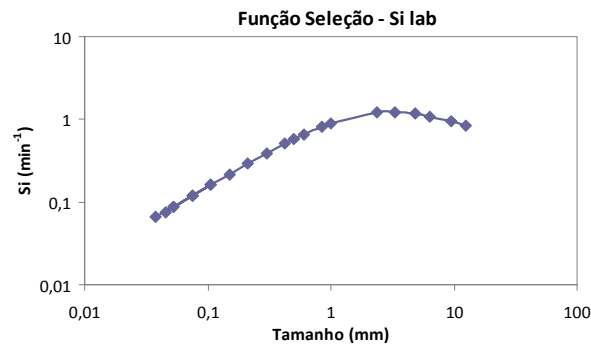


Figura 5. Função seleção determinada no moinho de torque.

A velocidade específica de quebra das partículas foi determinada no moinho de torque, utilizando os dados apresentados na Tabela 4. O gráfico referente à função seleção específica foi ilustrado na Figura 6.

Tabela 4. Dados utilizados no escalonamento da função seleção

| Moinho de torque | |
|------------------------------------------|-------------|
| Potência (kW) | 5.09 |
| Massa carregada (t) | 0.01512 |
| P/M | 336.8069902 |
| $S_i = S_i^E \left(\frac{P}{H} \right)$ | |

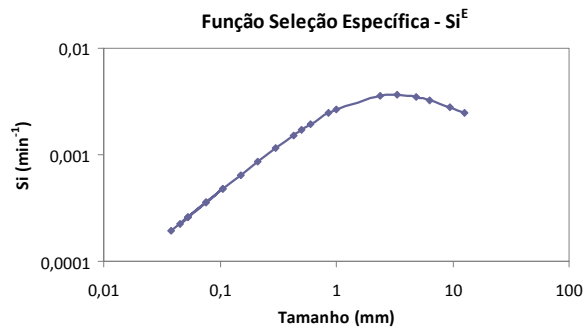


Figura 6. Função seleção específica determinada no moinho de torque.

A partir da determinação da função seleção específica no moinho de torque, o escalonamento da função seleção para o moinho industrial foi viabilizada. As informações associadas aos parâmetros industriais do moinho de bolas, da Samarco Mineração S/A, utilizadas nesse procedimento foram descritas na Tabela 5.

Tabela 5 Parâmetros do moinho de bolas – escala industrial

| Moinho industrial | |
|----------------------------------|----------|
| Diâmetro (m) | 3.81 |
| Largura (m) | 5.875 |
| Volume (m³) | 66.98039 |
| J | 0.2875 |
| Densidade da rocha (t/m³) | 4.65 |
| Massa de minério (t) | 53.72665 |
| Potência absorvida (kW) | 884 |
| P/M | 16.45366 |

Os resultados obtidos para a velocidade específica de quebra do moinho industrial foram agrupados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros da velocidade específica de quebra – escala industrial

| Função Seleção - S_{IND} | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| x₀ | 2.2128 | a | 0.116965 | α | 0.883311 | μ | 2.220985 | Λ | 1.452206 |
| $S_i = \frac{a \left(\frac{x_i}{x_0} \right)^\alpha}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^\Lambda} \quad \Lambda \geq 0$ | | | | | | | | | |

A Figura 7 mostra o comportamento da função seleção, escalonada para o moinho industrial utilizando o método proposto por Austin *et al.*⁽¹⁶⁾

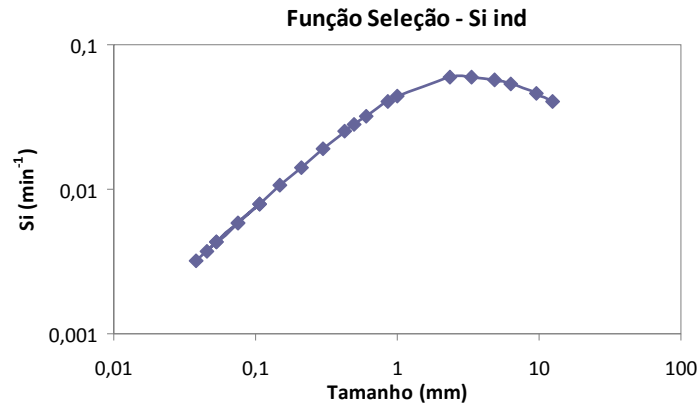


Figura 7. Função seleção escalonada para o moinho industrial.

A Figura 8 apresenta o comparativo das funções seleção dos moinhos industrial e de torque, bem como da função seleção específica.

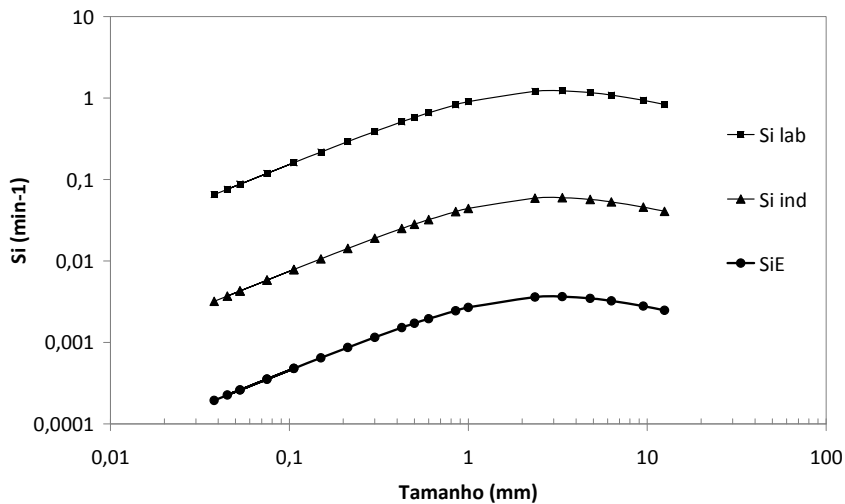


Figura 8. Comparativo das funções seleção e função seleção específica.

A Tabela 7 apresenta o resumo das informações referentes às distribuições de tamanho da partícula para a função seleção dos moinhos de torque e industrial. Adicionalmente, os valores utilizados para o escalonamento da função seleção do moinho industrial também foram disponibilizados. Essas informações foram utilizadas para a construção do modelo de balanço populacional.

Tabela 7. Dados da função seleção dos moinhos de torque e industrial

| Tamanho de partícula (mm) | S_{LAB} | S_T^E | S_{IND} |
|---------------------------|-----------|----------|-----------|
| 12.5 | 0.832253 | 0.002471 | 0.040657 |
| 9.5 | 0.93754 | 0.002784 | 0.045801 |
| 6.3 | 1.087468 | 0.003229 | 0.053125 |
| 4.8 | 1.167204 | 0.003465 | 0.05702 |
| 3.35 | 1.22548 | 0.003639 | 0.059867 |
| 2.36 | 1.211265 | 0.003596 | 0.059173 |
| 1 | 0.904492 | 0.002685 | 0.044186 |
| 0.85 | 0.824991 | 0.002449 | 0.040302 |
| 0.6 | 0.658273 | 0.001954 | 0.032158 |
| 0.5 | 0.57768 | 0.001715 | 0.028221 |
| 0.425 | 0.511332 | 0.001518 | 0.02498 |
| 0.3 | 0.38839 | 0.001153 | 0.018974 |
| 0.212 | 0.291481 | 0.000865 | 0.014239 |
| 0.15 | 0.217213 | 0.000645 | 0.010611 |
| 0.106 | 0.160882 | 0.000478 | 0.007859 |
| 0.075 | 0.11892 | 0.000353 | 0.005809 |
| 0.053 | 0.08764 | 0.00026 | 0.004281 |
| 0.045 | 0.075866 | 0.000225 | 0.003706 |
| 0.106 | 0.160882 | 0.000478 | 0.007859 |
| 0.075 | 0.11892 | 0.000353 | 0.005809 |
| 0.053 | 0.08764 | 0.00026 | 0.004281 |
| 0.038 | 0.065345 | 0.000194 | 0.003192 |

3.4 Resultados da Validação do Modelo de Austin

O modelo de balanço populacional de Austin, Klimpel e Luckie⁽¹⁶⁾ foi utilizado para a determinação do melhor ajuste para o modelo. As simulações foram realizadas para o fluxo em batelada, reator de mistura perfeita e série de reatores de mistura perfeita. A identificação do modelo ideal foi realizada através da observação dos ajustes das curvas granulométricas. O reator de mistura perfeita apresentou o ajuste mais apropriado. O tempo de residência encontrado para o ajuste foi de 75 minutos. O comparativo das funções seleção mostrado na Figura 9 evidenciou a baixa velocidade específica de quebra do moinho industrial, que está diretamente associada ao tempo de residência citado. O teste de hipóteses pareado (*t-paired test*) comparou os valores passantes de cada faixa granulométrica, de ambos os produtos, agrupados em pares. O resultado encontrado para o p-valor foi de 0,320, o que valida a igualdade estatística entre os valores encontrados para as duas distribuições granulométricas do produto (calculada e experimental). O cálculo foi realizado no *software* Minitab.

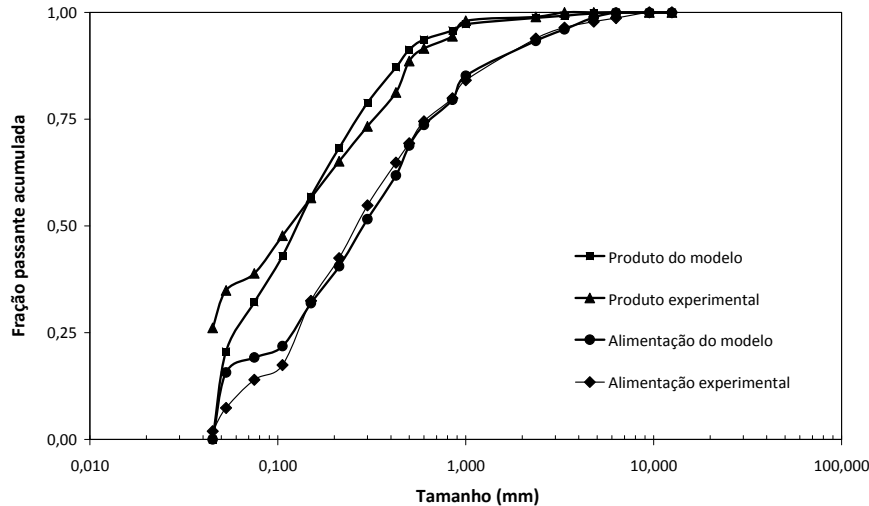


Figura 9. Modelo de reator de mistura perfeita para a cominuição de calcário em moinho de bolas.

4 DISCUSSÃO

4.1 Simulações do Moinho de Bancada

Os diferentes mecanismos de quebra da partícula podem ser descritos pelos parâmetros Φ , β e γ . Na Figura 3, a inclinação da parte inferior da curva é representada por γ , região em que as partículas de calcário apresentam uma distribuição granulométrica mais fina. O fenômeno de quebra associado a esse parâmetro é o de impacto. Alguns autores demonstraram que γ é peculiar do material, ou seja, não deve variar conforme as modificações promovidas no meio^(10,16). O mecanismo de quebra por compressão é determinado por β , que descreve o comportamento da parte superior da curva. O parâmetro Φ , obtido através do prolongamento do ponto de interseção das duas retas de inclinação γ e β , até o eixo das ordenadas, mostrou que 61% do calcário foi fragmentado pelo mecanismo de quebra por impacto e 39% por compressão.

4.2 Simulações do Moinho de Torque

A Figura 5 mostrou o comportamento não linear da velocidade específica de quebra S_i . A energia fornecida às partículas para a efetuação da fragmentação foi insuficiente, o que comprometeu significativamente a taxa específica de cominuição e promoveu a quebra anormal da partícula. Este efeito é frequentemente associado à acomodação das partículas grosseiras no leito de bolas, que viabiliza a fragmentação das partículas mais macias, enquanto as mais resistentes se misturam na carga do moinho.^(15,16)

Austin, Klimpel e Luckie⁽¹⁶⁾ apresentaram o resultado da variação da velocidade específica de quebra, S_i , em função do tamanho de partículas, x_i , onde demonstraram o efeito não linear da função seleção. A velocidade específica de quebra, para tamanhos crescentes, reduz a partir de um determinado tamanho x_m . Este é um resultado típico de moagem que se fundamenta na lei de primeira ordem em relação à fragmentação de partículas mono-tamanho.⁽¹⁰⁾ Na região anormal de quebra, a energia fornecida para a cominuição das partículas é insuficiente, o que explica o padrão de comportamento identificado no trabalho.

4.3 Função Seleção Específica e Modelo de Austin

Foi identificada uma baixa taxa de quebra das partículas no moinho industrial, diferentemente do resultado obtido para o moinho de torque (Figura 8). Parte dessa divergência pode ser associada às condições de controle de um ensaio laboratorial, que são muito mais apuradas. Porém, esse comportamento pode, também, ser influenciado por outros aspectos de cunho operacional, fato realçado pela diferença significativa de velocidade específica de quebra das partículas no moinho de laboratório em relação ao moinho industrial, margeando valores da ordem 10 vezes superior.

As simulações realizadas para o fluxo em batelada, reator de mistura perfeita e série de reatores de mistura perfeita promoveu a identificação do modelo ideal para o processo em estudo. O tempo de residência encontrado de 75 minutos está intimamente associado à baixa velocidade específica de quebra no moinho industrial (Figura 9). Uma série de fatores pode contribuir para esse desempenho inadequado. Deniz.⁽¹⁹⁾ avaliou o efeito do tamanho das partículas na alimentação dos moinhos, do tipo de material e do diâmetro das bolas, na função seleção, onde concluiu que os mesmos exercem influencia significativa na taxa específica de quebra. A variação da taxa específica de quebra em relação ao tamanho de partícula, simulada em um moinho revolvente com vários tamanhos de bolas foi apresentado por Austin *et al.*⁽¹⁶⁾ que evidenciou a maior taxa de quebra das partículas de menor tamanho associada às bolas de menor diâmetro.

A ausência da manutenção da relação de tamanho corpo moedor/partícula a ser fragmentada pode ser um dos fatores de queda da velocidade específica de quebra, visto que a carga moedora presente no moinho nunca foi classificada e apresenta um histórico de mais de 25.000 h de operação. A descarga do moinho via diafragma (grelha) inviabiliza o descarte dos corpos moedores desgastados, que por sua vez presentes no processo prejudicam substancialmente a capacidade de fragmentação da carga moedora. Complementarmente, esse material pode contribuir para a vedação da grelha de descarga, reduzindo a aeração do moinho e, conseqüentemente, impactando a taxa específica de quebra das partículas.

O ajuste ideal das curvas de distribuição granulométrica referente ao produto obtido na amostragem industrial e no cálculo do modelo foi apresentado na Figura 9. O nítido ajuste das curvas foi comprovado pelo teste hipóteses que comprovou estatisticamente a validade do modelo.

5 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia de escalonamento da função seleção promoveu a geração de um conhecimento técnico de processo básico, do sistema de moagem de calcário da Samarco Mineração S/A, não reportado anteriormente.

A função quebra do calcário foi determinada e o princípio predominante de fragmentação identificado foi o de impacto, corroborado pelo parâmetro $\Phi = 0,61$.

O modelo matemático ajustado para um reator de mistura perfeita e tempo de residência igual a 75 minutos apresentou um resultado representativo.

Os parâmetros de processo devem ser avaliados criteriosamente para identificar a origem da ineficiência da velocidade específica de quebra do moinho industrial, o qual apresentou valores 10 vezes inferior aos resultados do moinho de torque.

O desenvolvimento deste trabalho viabilizou a validação de uma nova metodologia para a Samarco Mineração S/A, que pode embasar novos trabalhos de

dimensionamento e otimização de circuitos de moagem, utilizando aparatos laboratoriais e modelos matemáticos.

Agradecimentos

Agradecemos à Samarco Mineração S/A e à UFMG pela oportunidade de desenvolvimento técnico do processo industrial de moagem de calcário.

REFERÊNCIAS

- 1 BOND, F. C., "Grinding ball size selection", Trans. AIME, Mining Engineering, p. 592-595, 1958.
- 2 REID, K. J., "A Solution to the Batch Grinding Equation", Chem. Eng. Sci., Vol. 20, 1965.
- 3 HERBST, J. A., FUERSTENAU, D. W., "Mathematical simulation of dry ball milling using specific power information", Trans. AIME, Vol. 254, 1973.
- 4 AUSTIN, L. G., BAGGA, P., CELIK, M., "Breakage properties of some materials in a laboratory ball mill", Powder Technology 28, 235–241, 1981.
- 5 KLIMPEL, R. R., AUSTIN, L. G., "The Back-Calculation of Specific Rates of Breakage from Continuous Mill Data", Powder Technology, Vol. 38, p.77-91, 1984.
- 6 KING, R. P., BOURGEOIS, F., "A New Conceptual Model for Ball Milling", XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, p.23-28, 1993.
- 7 VERMA, R., RAJAMANI, R. K., "Environment-dependent breakages in ball milling", Powder Technology 84, p. 127- 137, 1995.
- 8 YILDIRIM, K., CHO, H., AUSTIN, L. G., "The modeling of dry grinding of quartz in tumbling media mills", Powder Technology 105, p. 210-221, 1999.
- 9 AUSTIN, L. G., "A treatment of impact breakage of particles". Powder Technology, Elsevier, p. 85-90, 2002.
- 10 GALÉRY, R., "Moagem: Modelagem de parâmetros de quebra através da análise da energia de fratura", Tese de Doutorado, CPGEM / UFMG, Maio 2002.
- 11 DATTA, A. RAJAMANI, R. K., "A direct approach of modeling batch grinding in ball mills using population balance principles and impact energy distribution", International Journal of Mineral Processing 64, p. 181-200, 2002.
- 12 TAVARES, L. M., KING, R. P., "Measurement of the load-deformation response from impact-breakage of particles", International Journal of Mineral Processing 74S, p. S267-S277, 2004.
- 13 TOUIL, D., BELAADI, S., FRANCES, C., "The specific selection function effect on clinker grinding efficiency in a dry batch ball mill", International Journal of Mineral Processing 87, p. 141-145, 2008.
- 14 KELLY, E. G., SPOTTISWOOD, D.J., "The breakage function; what is it really?", Minerals Engineering, Vol. 3, n.5, p.405-414, 1990.
- 15 TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., "Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills", Minerals Engineering 22, p. 650-659, 2009.
- 16 AUSTIN, L. G., KLIMPEL, R. R., LUCKIE, P. T., "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", A.I.M.E., S.M.E., New York, USA, 1984.
- 17 VALADÃO, G. E. S., ARAÚJO, A. C., "Introdução ao tratamento de minérios", Editora UFMG, Belo Horizonte, 2007.
- 18 AUSTIN, L. G., LUCKIE, P. T., "Methods for determination of breakage distribution parameters", Powder Technology 5, 215-222, 1971.
- 19 DENIZ, V., "A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball Mill", Cement and Concrete Research 33, p. 439-445, 2003.