

SIMULAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO DE UMA ETAPA DE MOAGEM SECUNDÁRIA DA SAMARCO PARA DIFERENTES TAMANHOS DE BOLAS*

Alexandre Camilo Leles de Figueiredo¹
Jackson Teixeira de Oliveira²
Vanderson Eney de Matos³
Douglas Batista Mazzinghy⁴

Resumo

Este trabalho estudou o efeito de diferentes tamanhos de bolas em uma etapa de moagem secundária da Samarco. O aplicativo *Moly-Cop Tools 3.01* foi utilizado para calibração de modelos e simulações que consideraram como *topsize* dos corpos moedores os diâmetros de 15, 20, 25, 30 e 35mm. Uma função seleção específica normal até o maior tamanho de partículas do minério alimentado (840 μ m) foi obtida. A maior geração de finos e o atendimento às especificações de granulometria (+74 μ m e -44 μ m) se mostraram mais favoráveis para as bolas de menor tamanho. O consumo específico de energia foi menor para a bola de 15mm (10,7kWh/t), aumentando até a bola de 35mm (13,0kWh/t). Embora as bolas de menor diâmetro pareçam ser a melhor opção para os indicadores de granulometria, alguns fatores podem limitar seu uso: maior geração de área superficial específica; e a quantidade de expurgo de bolas na descarga dos moinhos.

Palavras-chave: Simulação; Tamanho de Bolas; Moagem Secundária; Minério de Ferro.

SIMULATION OF PRODUCT SPECIFICATIONS OF A SAMARCO'S SECONDARY GRINDING STAGE FOR DIFFERENT BALL SIZES

This work studied the effect of different ball sizes in the secondary grinding stage of Samarco. The *Moly-Cop Tools 3.01* spreadsheet was used for models calibration and simulations, considering grinding balls *topsize* of 15, 20, 25, 30 and 35mm diameters. A normal specific selection function up to the largest fed ore particle size (840 μ m) was obtained. The higher generation of fines and compliance with particle size specifications (+74 μ m and -44 μ m) proved to be more favorable for smaller ball sizes. The specific energy consumption was lower for the 15mm ball (10.7kWh/t), increasing up to the 35mm ball (13.0kWh/t). Although smaller diameter balls seem to be the best option for the size specifications, some factors may limit their use, such as: the higher generation of specific surface area; and the amount of ball purge in the discharge of the mills.

Keywords: Simulation; Ball Size; Secondary Grinding; Iron Ore.

¹ Engenheiro de Minas, Engenheiro Especialista, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.

² Engenheiro de Minas, Engenheiro Sênior, Vale S11D, Canaã dos Carajás, PA, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro de Minas, Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Professor Adjunto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O Concentrador 01 da Samarco Mineração S.A. tem capacidade para tratar um minério itabirítico com teor de aproximadamente 44,0% de ferro, resultando numa produção anual de até 12,0 milhões de toneladas de *pellet feed*. Em seu processo, os concentrados da flotação convencional são remoidos em moinhos de bolas para adequar a granulometria às especificações das etapas de flotação em células de grande volume e colunas, transporte em minerodutos e processo subsequente de pelletização. São seis moinhos de 5,2m de diâmetro (17') e 10,4m de comprimento (34'), cuja potência máxima de cada um é de 4.114kW (cerca de 40% de enchimento).

Alterações foram realizadas em 2014 no circuito de moagem secundária da planta de beneficiamento supracitada. Essas alterações consistiram em moer todo o pré-concentrado em circuito fechado reverso e não mais em dois estágios, sendo um em circuito aberto e outro em circuito fechado. Silva *et al.* [1] descrevem que as mudanças permitiram aumentar a eficiência energética do circuito de remoagem, reduzir o consumo energético em 9,3% e adequar granulometria e grau de liberação para a etapa subsequente de flotação. A figura 1 apresenta o circuito antes e após a alteração.

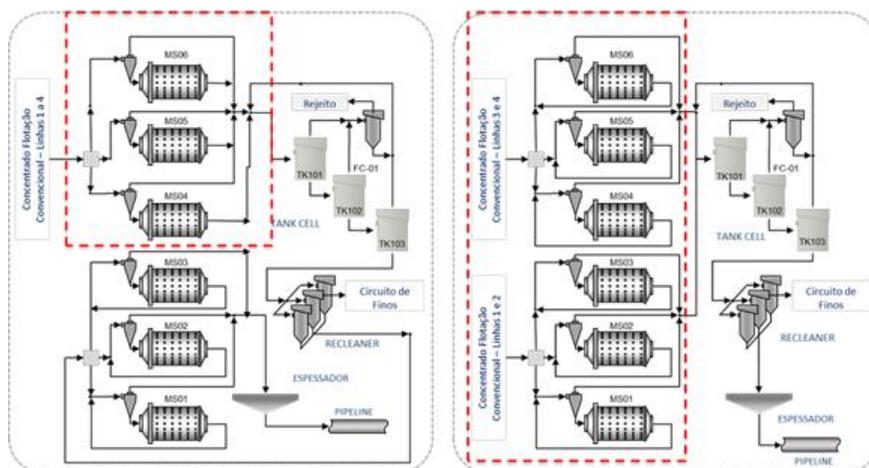


Figura 1. Fluxograma do circuito de moagem secundária e flotação *cleaner* do Concentrador 01 da Samarco antes e depois das modificações (Silva *et al.* [1]).

Junto com as mudanças do circuito, foram realizados testes operacionais buscando-se obter as configurações ideais dos ciclones, entretanto, nenhum estudo complementar relacionado à determinação do tamanho ideal de corpos moedores foi realizado. Diante disso, o presente trabalho objetiva-se a avaliar o desempenho operacional da etapa de moagem secundária do Concentrador 01 da Samarco para diferentes tamanhos de bolas, uma vez que a temática não foi avaliada durante as mudanças de circuito.

1.1 Modelo de moagem

O modelo de balanço populacional tem sido muito utilizado para a simulação de circuitos de moagem (Mazzinghy *et al.* [2]) e descreve o processo de moagem através de eventos sucessivos de quebra das partículas (Mazzinghy [3]). Segundo Fuerstenau *et al.* [4], nesse modelo, as partículas são classificadas em faixas de tamanhos, sendo que o balanço de massa é realizado através da observação da evolução granulométrica nessas faixas em função do tempo. O modelo do balanço populacional para moagem em batelada é descrito pela equação 1 (Austin *et al.* [5]).

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Sendo: $m_i(t)$ a fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho i após o tempo t de moagem; S_i a função seleção das partículas no intervalo de tamanho i ; e b_{ij} a função quebra ou fração em massa de partículas no intervalo de tamanho i produzidas pela quebra de partículas no intervalo de tamanho j .

A equação 2 demonstra um modelo que descreve a função quebra acumulada B_{ij} (Austin *et al.* [5]). Os parâmetros β_0 , β_1 , β_2 representam as constantes dependentes das características do material.

$$B_{ij} = \beta_0 \left(\frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\beta_1} + (1 - \beta_0) \left(\frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\beta_2}, \quad 0 \leq \beta_0 \leq 1 \quad (2)$$

A equação 3 demonstra um modelo que descreve a função seleção S_i (Austin *et al.* [5]). Os parâmetros α_0 , α_1 , α_2 , d_{crit} representam as constantes dependentes do material e das condições de moagem.

$$S_i = \frac{\alpha_0 (d_i)^{\alpha_1}}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{crit}} \right)^{\alpha_2}}, \quad \alpha_2 \geq 0 \quad (3)$$

A equação 4 descreve a relação de proporcionalidade entre a função seleção S_i com a potência absorvida pelo moinho e a massa contida nele (Herbst e Fuerstenau [6]).

$$S_i = S_i^E \left(\frac{P}{H} \right) \quad (4)$$

Sendo: S_i a função seleção no intervalo de tamanho i (min^{-1}); S_i^E a função seleção específica em energia (t/kWh); P a potência líquida demandada pelo moinho (kW); e H a massa de material contida no moinho (t).

1.2 Estimativa de potência

Através das dimensões e condições operacionais, a potência do moinho pode ser estimada pela equação 5 (Hogg e Fuerstenau [7]).

$$P_{liq} = \eta P_{inst} = 0,238 D^{3,5} \left(\frac{L}{D} \right) N_C \rho_{ap} (J - 1,065 J^2) \text{sen} \alpha \quad (5)$$

Sendo: P_{liq} a potência líquida (kW); P_{inst} a potência instalada (kW) = P_{cons}/η ; η a eficiência de transmissão elétrica e de potência (%); D o diâmetro interno do moinho (pés); N_C a fração da velocidade crítica: $N_{Crit} = 76,6/D^{0,5}$; ρ_{ap} a densidade aparente da carga (t/m³); J o enchimento volumétrico (%); e α o ângulo de levantamento da carga.

Sepúlveda [8] ajustou o modelo para representar independentemente a contribuição de cada componente da carga, bolas e polpa, para a potência total do moinho.

$$\rho_{ap} = \frac{(1-f_v)\rho_b J_b + \rho_p J_p f_v J_b + \rho_p (J - J_b)}{J} \quad (6)$$

Sendo: f_v o volume (%) de vazios intersticiais entre as bolas (tipicamente assume ser 40% do volume aparente ocupado pelas bolas); J_b o enchimento aparente de bolas (%), incluindo bolas, polpa e vazios intersticiais entre as bolas; J_p o enchimento intersticial da polpa (%), corresponde à fração intersticial de vazios disponíveis (entre a carga de bola) na verdade ocupada pela polpa e partículas finas; e ρ_p o peso específico da polpa (t/m³).

1.3 Modelo de classificação

As equações 7, 8, 9, 10 e 11 descrevem o modelo de Plitt [9], desenvolvido pela análise estatística de ensaios experimentais. O modelo de Plitt ao longo dos anos sofreu modificações e correções (Silva *et al.* [10]).

Pressão de alimentação do ciclone:

$$H = a_1 \left(\frac{Q^{1,46} \exp(-7,63\phi + 10,79\phi^2)}{(D_c)^{0,20} h^{0,15} (D_i)^{0,51} (D_o)^{1,65} (D_u)^{0,53}} \right) \quad (7)$$

Sendo: a_1 a constante dependente da aplicação; D_c o diâmetro do ciclone (pol); D_i o diâmetro de entrada do ciclone (pol); D_o o *vortex* (pol); D_u o *apex* (pol); h a altura do ciclone (pol); H a pressão de alimentação do ciclone (pés de coluna de polpa); Q a vazão de alimentação (m³/h); e ϕ a fração de sólidos em volume na alimentação.

Tamanho de corte corrigido, d_{50c} :

$$d_{50c} = a_2 \left(\frac{(D_c)^{0,44} (D_i)^{0,58} (D_o)^{1,91} \exp(11,12\phi)}{(D_u)^{0,80} h^{0,37} Q^{0,44} (\rho_s - 1)^{0,5}} \right) \quad (8)$$

Sendo: a_2 a constante dependente da aplicação. O tamanho de corte corrigido d_{50c} é definido como sendo um tamanho de partícula que deveria ser corrigido em 50% indo para o *underflow* e 50% indo para o *overflow* baseado na curva de eficiência corrigida.

Partição de fluxo:

$$S = a_3 \frac{h^{0,19} \left(\frac{D_u}{D_o} \right)^{2,64} \exp(-4,33\phi + 8,77\phi^2)}{H^{0,54} (D_c)^{0,38}} \quad (9)$$

Sendo: S a carga circulante volumétrica (razão entre *underflow* e *overflow*); e a_3 a constante dependente da aplicação.

Eficiência de classificação corrigida:

$$E_i^c = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{d_i}{d_{50c}} \right)^m \right]; m = \exp \left[a_4 - 1,58 \frac{S}{(S+1)} \right] \left[\frac{(D_c)^2 h}{Q} \right]^{0,15} \quad (10)$$

Sendo: a_4 a constante dependente da aplicação.

Curto circuito de polpa:

Uma variação do modelo de Plitt é o modelo de classificação do CIMM (Gutiérrez e Sepúlveda [11]). Nele é considerada mais uma equação para descrever o curto circuito de polpa.

$$B_{pf} = \lambda B_{pw}; B_{pw} = \frac{\frac{S}{(S+1)} - \phi R_s^c}{1 - \phi [1 - \lambda (1 - R_s^c)]} \quad (11)$$

Sendo: B_{pf} o curto circuito para *underflow*; B_{pw} o curto circuito de água; λ a constante dependente da aplicação; e R_s^c = recuperação total de sólidos em peso (hipotética).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Amostras

Para calibração dos modelos e obtenção dos parâmetros cinéticos de moagem e classificação, foram utilizadas as curvas granulométricas obtidas a partir de amostragens industriais no Concentrador 01 realizadas em 30/09/2015 da alimentação e descarga do moinho secundário 03MS02, bem como da alimentação, *underflow* e *overflow* dos ciclones. A figura 2 apresenta a distribuição granulométrica dos materiais amostrados.

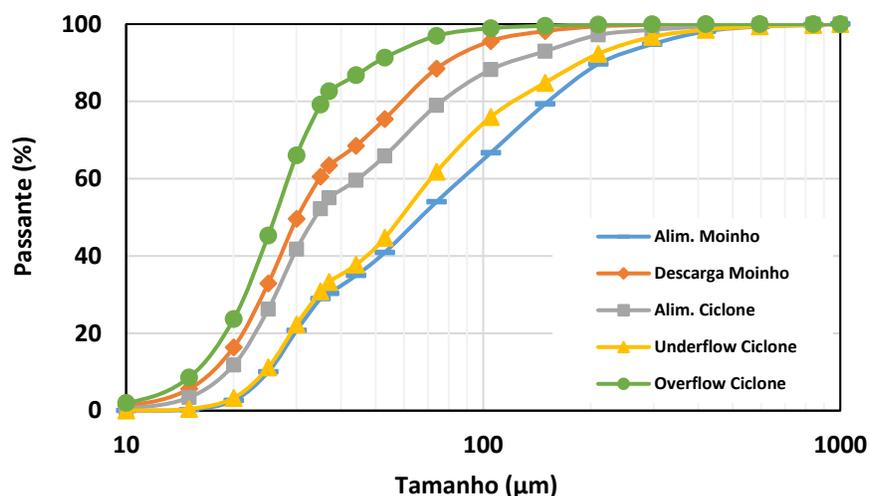


Figura 2. Distribuições granulométricas das amostragens industriais.

A tabela 1 mostra os percentuais de sólidos em massa obtidos a partir das amostras industriais.

Tabela 1. Percentual de sólidos em massa das amostras industriais

| Alimentação da Moagem | Descarga Moinho | Alimentação dos Ciclones | Underflow Ciclones | Overflow Ciclones |
|-----------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|-------------------|
| 53,73 | 80,49 | 61,68 | 80,36 | 40,82 |

2.2 Parâmetros cinéticos de moagem e de classificação

Os parâmetros cinéticos de moagem e de classificação foram determinados com o uso do aplicativo *Moly-Cop Tools 3.01* utilizando as amostras coletadas no circuito de moagem secundária com moinho de bolas, além das condições operacionais e os dados dos moinhos e ciclones industriais existentes e instalados na planta em estudo. Esse aplicativo tem por princípio básico a minimização dos desvios entre os dados experimentais e do modelo, ao quadrado de uma função objetivo, buscando uma representação aceitável do modelo para com os dados experimentais.

2.3 Determinação da influência dos diferentes tamanhos de bolas

Nesta etapa do estudo não foram realizados testes em escala de laboratório, portanto, os resultados obtidos são provenientes de simulações. Assim como foi feito na etapa de calibração, as simulações foram realizadas por meio do aplicativo *Moly-Cop Tools 3.01*, utilizando-se os parâmetros cinéticos de moagem e aqueles de classificação. Foram criadas, a partir dessas simulações, as funções seleção e quebra e as curvas granulométricas previstas para o produto da moagem secundária (*overflow* dos

ciclones), bem como obtidos os valores para os indicadores principais da etapa (+74 μ m e -44 μ m) para os tamanhos de bola (*topsize*) de 15, 20, 25, 30 e 35mm.

Para a área superficial específica (*ASE*), foi realizada uma regressão linear utilizando-se o *software* Minitab, uma vez que somente os resultados simulados de granulometria são obtidos utilizando-se o aplicativo *Moly-Cop Tools 3.01*. Para tal, foram coletados os dados industriais diários de granulometria (-44 μ m) e o teor de PPC (perda por calcinação) armazenados no *software* MES utilizado pela Samarco. A melhor regressão alcançada, com coeficiente de correlação R^2 igual a 73,8%, é apresentada na equação 12.

$$ASE = -3624 + (338 \times PPC) + (50,5 \times -44\mu m) \quad (12)$$

Buscando-se avaliar o consumo energético da moagem para as diferentes configurações dos corpos moedores, foram criadas curvas correlacionando a energia específica aplicada (kWh/t) com os dados de granulometria e área superficial específica obtidos a partir das simulações.

2.3.1 Especificações do *pellet feed* produzido pela Samarco Mineração S.A.

As simulações realizadas terão como premissa principal o atendimento aos indicadores de processo da Samarco para granulometria, média de 3,5% de +74 μ m e 88,2% -44 μ m.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Parâmetros cinéticos de moagem e de classificação

As tabelas 2 e 3 exibem os valores dos parâmetros da função seleção, da função quebra e de classificação obtidas a partir das amostras industriais.

Tabela 2. Parâmetros cinéticos utilizados para as simulações

| Função | Seleção | | | | Quebra | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Parâmetros | α_0 | α_1 | α_2 | d_{crit} | β_0 | β_1 | β_2 |
| Valores | 0,00033 | 1,439 | 3,00 | 5.576,21 | 0,9 | 0,50 | 4,00 |

Tabela 3. Parâmetros de classificação utilizados para as simulações

| a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | λ |
|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 13,02 | 5,35 | 35,06 | 0,89 | 1,90 |

As condições operacionais de moagem e classificação no momento das amostragens são apresentadas nas tabelas 4 e 5 a seguir.

Tabela 4. Condições operacionais do moinho 03MS02

| Diâmetro | Comprimento | Veloc. Crítica | Enchimento Bolas | Perda Energia | Alimentação Moinho | Energia Operação |
|----------|-------------|----------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|
| (m) | (m) | (%) | (%) | (%) | (t/h) | (kW) |

| | | | | | | |
|-----|------|------|------|-----|-------|-------|
| 5,2 | 10,4 | 70,3 | 32,0 | 8,0 | 271,6 | 3.651 |
|-----|------|------|------|-----|-------|-------|

Tabela 5. Condições operacionais dos ciclones industriais

| Ciclones (Quant.) | Diâmetro (mm) | Entrada (mm) | Vortex (mm) | Apex (mm) | Pressão (kgf/cm ²) |
|----------------------|------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------------|
| 7 | 254,0 | 101,6 | 88,9 | 44,5 | 2,46 |

A partir dos dados da tabela 4, é possível verificar que, no momento da amostragem, a energia específica aplicada na moagem foi de 13,4kWh/t.

A figura 3 mostra as distribuições granulométricas a partir das amostragens industriais (pontos) e aquelas previstas pelas simulações utilizando-se o aplicativo *Moly-Cop Tools 3.01* (linhas). Conforme pode ser visualizado, as simulações realizadas apresentaram boa previsão dos dados industriais obtidos a partir das amostragens.

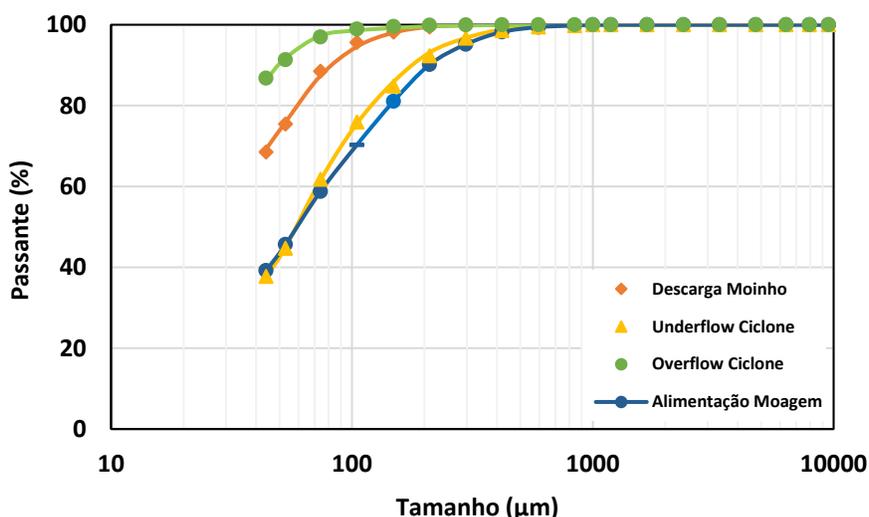


Figura 3. Distribuições granulométricas a partir das amostragens industriais (pontos) e simuladas obtidas pelo aplicativo *Moly-Cop Tools 3.01* (linhas).

3.2 Determinação da influência dos diferentes tamanhos de bolas

A figura 4 apresenta as funções seleção e quebra determinadas para os diferentes tamanhos (*topsize*) de bolas. Para todos os tamanhos de bola, foi verificado que as funções seleção específicas são do tipo normal, ou seja, a taxa de quebra cresce com o aumento do tamanho das partículas. Importante salientar que as curvas foram criadas tendo como limite o tamanho do *topsize* das partículas do minério (840μm). Portanto, espera-se que, mesmo para o menor tamanho de bolas utilizado nas simulações (15mm), a quebra ocorra para todos os tamanhos de partículas.

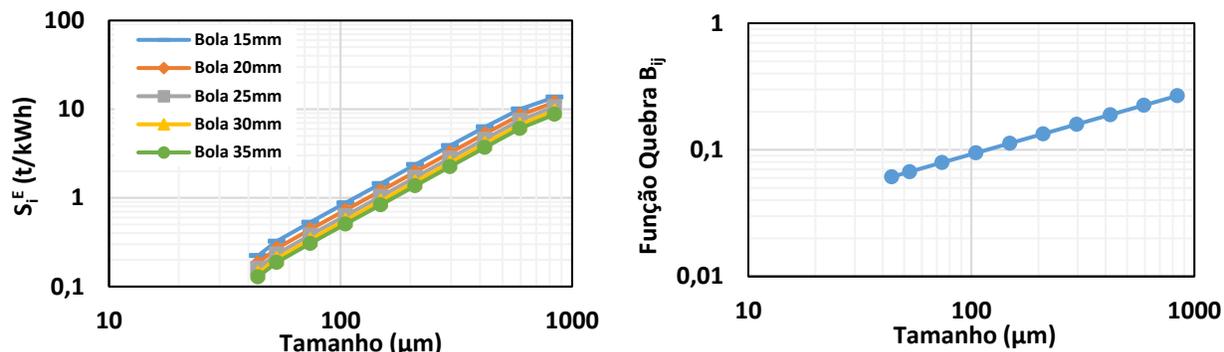


Figura 4. Curvas da função seleção (esquerda) e função quebra (direita) simuladas para os diferentes tamanhos (*topsize*) de bolas para o material da alimentação da moagem secundária.

A figura 5 apresenta as curvas simuladas das distribuições granulométricas para o produto da moagem secundária para diferentes tamanhos (*topsize*) de bola. É possível verificar que, utilizando bolas de 15mm de diâmetro, o produto da moagem será mais fino do que para as bolas de maior diâmetro.

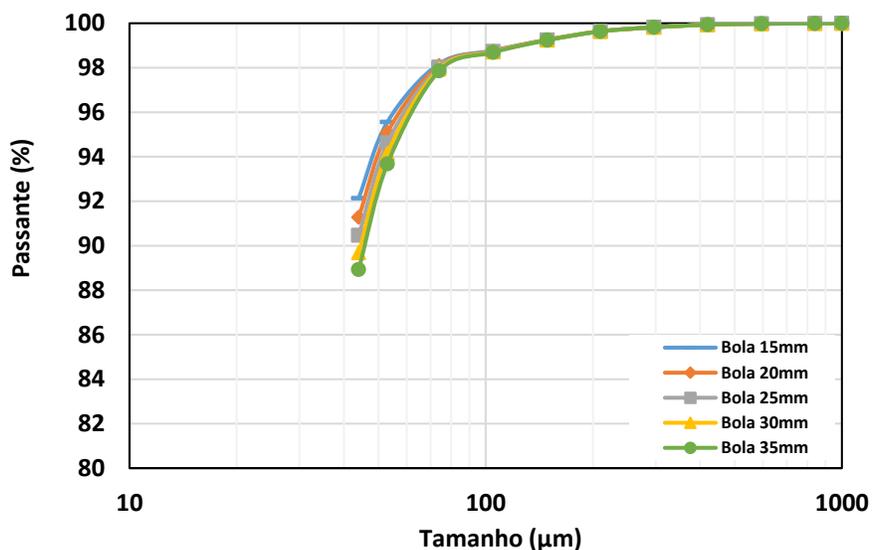


Figura 5. Curvas simuladas das distribuições granulométricas para o produto da moagem secundária para diferentes tamanhos (*topsize*) de bola.

Na tabela 6 abaixo podem ser visualizados os resultados de +74 μ m e -44 μ m a partir das curvas granulométricas simuladas apresentadas na figura 5.

Tabela 6. Resultados de +74 μ m e -44 μ m a partir das curvas granulométricas simuladas

| <i>Topsize</i> bolas | 15mm | 20mm | 25mm | 30mm | 35mm |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| +74 μ m | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,1 |
| -44 μ m | 92,1 | 91,3 | 90,5 | 89,7 | 88,9 |

Para os diferentes tamanhos (*topsize*) de bola, as simulações mostram um atendimento às especificações de +74 μ m e -44 μ m para as condições operacionais citadas anteriormente.

Na figura 6 estão representadas as curvas para a porcentagem retido em 74 μ m e passante em 44 μ m para diferentes energias específicas (kWh/t) aplicadas.

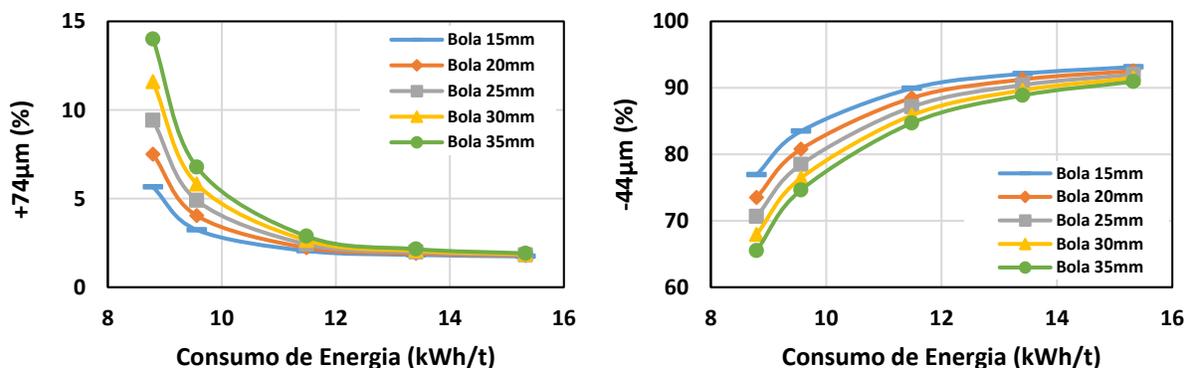


Figura 6. Curvas simuladas para comparação entre os diferentes tamanhos (*topsize*) de bolas: porcentagem retida em 74 μ m (esquerda) porcentagem passante em 44 μ m (direita) no produto da moagem secundária.

Percebe-se que, aplicando-se uma mesma energia específica (kWh/t), a maior geração de finos e o atendimento às especificações de granulometria se mostrou mais favorável para as bolas de menor tamanho. Pode-se dizer também que, utilizando-se bolas de 15mm de diâmetro, espera-se um consumo total de energia de moagem menor do que para bolas maiores para se atingir um mesmo valor para +74 μ m ou -44 μ m.

De acordo com a tabela 7, para se atender a especificação de 88,2% passante em 44 μ m, o consumo específico de energia foi menor para a bola de 15mm (10,7kWh/t), aumentando até a bola de 35mm (13,0kWh/t). A utilização do menor tamanho (*topsize*) de bolas pode permitir a operação dos 6 moinhos secundários do Concentrador 01 com um nível mais baixo de enchimento do que aquele até então praticado para bolas de 25mm de diâmetro.

Tabela 7. Consumo previsto de energia na moagem secundária para os diferentes tamanhos de bolas para obtenção de 88,2% passante em 44 μ m

| Tamanho Bola | Alimentação | +74 μ m (%) | -44 μ m (%) | Energia Específica Simulada | Energia Total Necessária |
|--------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| (mm) | (t/h) | Média Simulada | Média Simulada | (kWh/t) | (kW) |
| 15 | 1.629 | 2,3 | 88,2 | 10,7 | 17.442 |
| 20 | 1.629 | 2,3 | 88,2 | 11,4 | 18.523 |
| 25 | 1.629 | 2,3 | 88,2 | 11,9 | 19.462 |
| 30 | 1.629 | 2,3 | 88,2 | 12,5 | 20.339 |
| 35 | 1.629 | 2,2 | 88,2 | 13,0 | 21.147 |

A figura 7 mostra as curvas simuladas por regressão linear (equação 12) dos valores de área superficial específica no produto da moagem secundária para os diferentes tamanhos (*topsize*) de bolas em função da energia específica (kWh/t) aplicada, bem como para dois níveis diferentes de teor de PPC (perda por calcinação) representativos do processo produtivo.

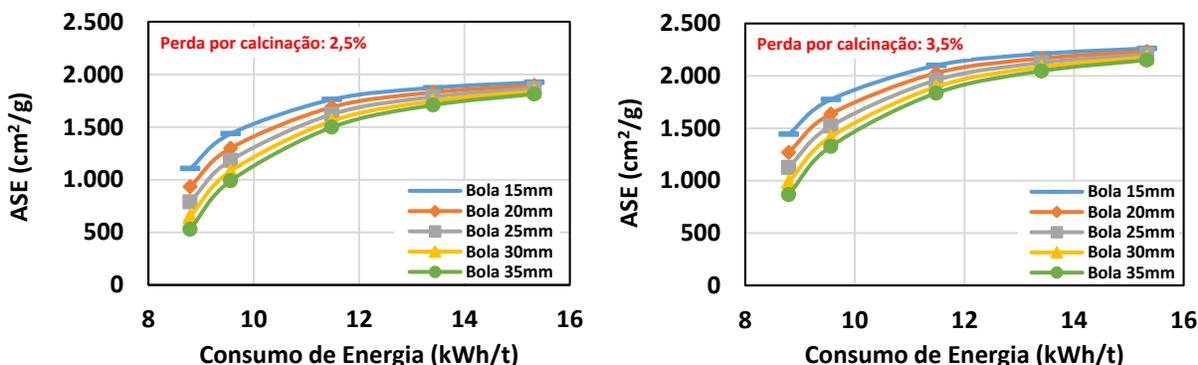


Figura 7. Curvas simuladas por regressão para comparação entre os diferentes tamanhos (*topsize*) de bolas: área superficial específica (ASE) no produto da moagem secundária para minério com teores de 2,5% (esquerda) e 3,5% de PPC (direita).

Para uma mesma energia específica aplicada (kW/t), a geração de área superficial específica será maior utilizando-se as bolas de menor diâmetro. Embora essas bolas pareçam ser a melhor opção, uma vez que reduz o consumo de energia, alguns fatores podem limitar seu uso: a maior geração de área superficial específica devido ao menor tamanho de bolas e elevação do teor de PPC (perda por calcinação) do ROM (figura 7), podendo ocasionar perda de produtividade no processo subsequente de filtragem; e a quantidade de expurgo de bolas na descarga dos moinhos secundários.

4 CONCLUSÃO

Simulações foram realizadas considerando como *topsize* de bolas (corpos moedores) os diâmetros de 15, 20, 25, 30 e 35mm. Para esses tamanhos de bola, foi verificada uma função seleção específica normal até o maior tamanho de partículas do minério (840µm) alimentado. Aplicando-se uma mesma energia específica (kWh/t), a maior geração de finos e o atendimento às especificações de granulometria se mostrou mais favorável para a bola de menor tamanho. Além disso, para se atender a especificação de 88,2% passante em 44µm, o consumo específico de energia foi menor para a bola de 15mm (10,7kWh/t), aumentando até a bola de 35mm (13,0kWh/t). Embora essas bolas pareçam ser a melhor opção para o Concentrador 01, uma vez que reduz o consumo de energia, alguns fatores podem limitar seu uso: a maior geração de área superficial específica devido ao menor tamanho de bolas e elevação do teor de PPC (perda por calcinação) do ROM, podendo ocasionar perda de produtividade no processo subsequente de filtragem; e a quantidade de expurgo de bolas na descarga

dos moinhos secundários. É importante salientar que testes em escala de laboratório são necessários para confirmar os resultados apresentados pelas simulações.

REFERÊNCIAS

1. Silva, J.P.M., Oliveira, P.S., Figueiredo, A.C.L., Guimarães, M.G.G., Silva, F.T., Vieira, M.G. Aumento da eficiência energética da moagem secundária do Concentrador I. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2015. p.874-881.
2. Mazzinghy, D.B., Russo, J.F.C., Pimentel, D.A. Avaliação dos parâmetros cinéticos de moagem para amostras de itabiritos compacto e friável. XXV ENTMME; 2013. p. 451-458.
3. Mazzinghy, D.B. Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical [Tese de Doutorado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
4. Fuerstenau, D., Abouzeid, A.Z.M., Phatak, P.B. Effect of particulate environment on the kinetics and energetics of dry ball milling. International Journal of Mineral Processing; 2010. p. 52-58.
5. Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T. Process engineering of size reduction. Society of Mining Engineers: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers; 1984.
6. Herbst, J.A., Fuerstenau, D.W. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. International Journal of Mineral Processing; 1980. p.1-31.
7. Hogg, R., Fuerstenau, D.W. Power relations for tumbling mills. Society of Mining Engineers: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers; 1972. p. 418-432.
8. Sepúlveda, J.E. Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale. Mineral Engineering; 2004. p.1269-1279.
9. Plitt, L.R.A. Mathematical Model for the Hydrocyclone Classifier. CIM Bulletin; 1976.
10. Silva, A.C., Silva, E.M.S., Matos, J.D.V., Modelo Empírico para cálculo do diâmetro de corte corrigido de Hidrociclones. Tecnol. Metal. Mater. Miner.; São Paulo, Brasil; 2012. p. 302-308.
11. Gutiérrez, L., Sepúlveda, J.E. Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática. Santiago: Publicación CIMM – Centro de Investigación Minera y Metalúrgica; 1986.