

AValiação DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DO CIRCUITO DE COMINUIÇÃO A SECO DE CALCÁRIO USADO NA PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO¹

Nemer Saib Neto²

Roberto Galéry³

Dirceu Valadares Nascimento⁴

Antônio Eduardo Clark Peres⁵

Resumo

Uma análise de campo foi realizada para a avaliação dos principais parâmetros do processo de cominuição que, invariavelmente, influenciam a velocidade específica de quebra das partículas e a qualidade do produto final desta operação unitária. Essa investigação, qualitativa e quantitativa, proporcionou a validação da eficácia das modificações realizadas no moinho após o repotenciamento do sistema, para atender a demanda de calcário da terceira usina de pelletização da Samarco Mineração S/A. O balanço de massas do circuito foi fechado pelo método de Lagrange (balanço de massas redundante) em virtude da inviabilidade de amostragem do produto da moagem, visto que o sistema de transporte na descarga é pneumático (tubulação vedada). Algumas oportunidades de melhoria foram identificadas para o gerenciamento da distribuição granulométrica dos corpos moedores no interior do moinho. Outro aspecto relevante está associado ao desempenho do classificador de partículas. O balanço de massas permitiu a construção da curva de *Tromp* do separador de partículas e criar a referência de desempenho do equipamento, desconhecida até o presente momento.

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

DRY GRINDING CIRCUIT PROCESS PARAMETERS EVALUATION OF A LIMESTONE USED IN THE IRON ORE PELLETIZING

Abstract

An industrial scale analysis was developed for the main grinding process parameters evaluation that consistently manipulates the particles specific breakage rate. This qualitatively and quantitatively research enabled the validation of the grinding mill revamp modification effectiveness improved to provide limestone for the Samarco's third pelletizing plant. The mass balance was developed by the Lagrange method (redundant mass balance) regarding the grinding product sampling inability as the discharge transportation is pneumatic (enclosed tubes). A few improvement opportunities were identified for the grinding media size distribution management into the mill. Another relevant aspect is associated to particle classifier performance. The mass balance made the particle classifier *Tromp* curve building feasible and promoted the equipment standard performance creation, unknown till the present moment.

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.

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

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

1 INTRODUÇÃO

A cominuição pode ser analisada por três princípios básicos que ponderam os dados resultantes do processo de fragmentação. A base teórica para a fundamentação destes conceitos é uma abordagem específica das leis de cominuição.⁽¹⁾ Os três mecanismos de quebra podem ocorrer simultaneamente no interior dos moinhos revolventes. O ajuste dos parâmetros operacionais do moinho determina qual o mecanismo de fratura predominante do processo. A configuração destes afeta diretamente a granulometria do produto da moagem, a taxa de produção e o consumo de energia específica resultante do processo de cominuição nos moinhos. O trabalho de acabamento do produto da cominuição é finalizado no separador dinâmico de partículas, que exerce um papel fundamental na qualidade e na produtividade do circuito de moagem.

Dentre os parâmetros existentes do moinho foram selecionados a carga de bolas e o tipo de revestimento como variável de processo passível de otimização, para o desenvolvimento desse trabalho. O foco de desenvolvimento foi pautado na definição da distribuição granulométrica da carga moedora e no perfil de revestimento, ideais para o circuito em estudo. Complementarmente, após o fechamento do balanço de massas pelo método de Lagrange,⁽²⁾ a curva de *Tromp* do separador foi definida para entrever o desempenho de classificação.

Diversos autores afirmam que o melhor desempenho de cominuição ocorre quando o conjunto de bolas atinge uma condição de equilíbrio, também conhecida como carga sazoadada. Normalmente, para inserir esta característica escalonada de tamanho dos corpos moedores, a carga inicial de bolas, nos moinhos, é composta por faixas distintas de diâmetro, com o intuito de aproximar à condição ideal de fragmentação obtida após a estabilização do processo de cominuição.⁴⁽³⁻⁹⁾

A utilização de revestimentos está ligada à proteção da carcaça contra o desgaste, à redução do deslize da carga moedora sobre a parede do moinho, à classificação interna da carga moedora e à distribuição de energia para a carga do moinho.^{3(4,3,4,9)}

Além das variações de aplicação dos revestimentos referentes à granulometria da alimentação existe uma alternativa específica relacionada à classificação da carga moedora, que promove o aumento direto da eficiência de moagem a seco. Esses revestimentos promovem a distribuição da carga moedora ao longo da câmara de fragmentação, mantendo os corpos maiores na região de alimentação e os menores próximos à descarga.⁽⁹⁾

A curva de *Tromp*, também conhecida como curva de partição ou seletividade, possui vasta aplicação na avaliação de desempenho de classificadores e separadores gravimétricos.⁽⁹⁹⁻¹³⁾ A condição de separação ideal é caracterizada quando as partículas menores do que um determinado tamanho de corte são direcionadas à faixa mais fina e as maiores à mais grosseira. Na prática, como os classificadores não apresentam um comportamento ideal, alguns parâmetros adicionais são requeridos para avaliar os dados do separador. O comportamento não ideal pode ser caracterizado pelo *by-pass* aparente de partículas, o qual pode ser definido pela presença de uma parcela tal qual a alimentação, no rejeito da separação (faixa grosseira). O *by-pass* ocorre normalmente na maioria dos separadores, em várias proporções. Entretanto, o *by-pass* para a faixa mais fina não é comum, o que pode caracterizar um descontrole do processo ou um erro de dimensionamento do equipamento.

Os parâmetros associados tanto à moagem como a classificação foram avaliados em diferentes metodologias para identificar o atual desempenho de cominuição e proporcionar a criação de diretrizes operacionais para a rotina de processo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A moagem de calcário a seco na Samarco Mineração é realizada em dois moinhos de bolas, com capacidade produtiva de 50 t/h e 80 t/h. A diferença básica do circuito de ambos os moinhos refere-se ao sistema de classificação. No moinho de menor capacidade produtiva, denominado circuito 1, o processo de transporte é mecânico e a classificação de partículas é realizada no separador dinâmico de primeira geração da Sturtevant. No circuito 2, o transporte é pneumático e a separação é desenvolvida pelo separador dinâmico de segunda geração da Svedala (Gyrotor e ciclone).

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 dois silos de estocagem de capacidade individual de 350 ton, os quais alimentam os circuitos 1 e 2 de cominuição.

O produto final é obtido após as etapas de moagem e classificação, no *underflow* dos ciclones e no filtro de mangas. Esse apresenta uma área superficial específica de 5.200 cm²/g e 65% de material passante na malha de 325 mesh (0,044 mm).

O moinho de bolas do circuito de cominuição em estudo é um Svedala 12'5 x 18' (relação comprimento/diâmetro de 1,55). É constituído de um compartimento de 3,81 m de diâmetro e 5,895 m de comprimento (considerando a espessura do revestimento de 76,5 mm e de 10 mm do diafragma da descarga, esse valor é reduzido para 5,75 m).

O revestimento atual do moinho é o auto-classificador classoline da Magotteaux. A Figura 1 apresenta os detalhes desse tipo de revestimento. A disposição interna das peças do revestimento obedece à seqüência de alocação que posiciona, no início do moinho, a peça de menor tamanho e posteriormente a de maior tamanho. Esse padrão é aplicado ao longo de todo o comprimento do moinho e modificado no último conjunto, o qual recebe uma montagem rebatida (invertido-espelhada), para viabilizar o direcionamento do fluxo para a descarga no diafragma. A Figura 2 (a) (b) (c) retrata o perfil interno do moinho com o respectivo padrão de montagem e os detalhes da disposição interna das peças.

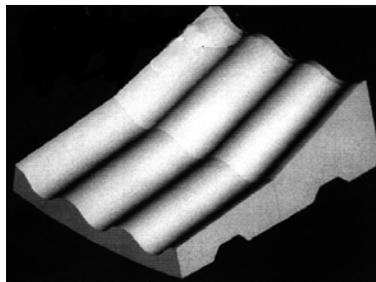


Figura 1. Revestimento auto-classificador da Magotteaux do moinho de bolas.

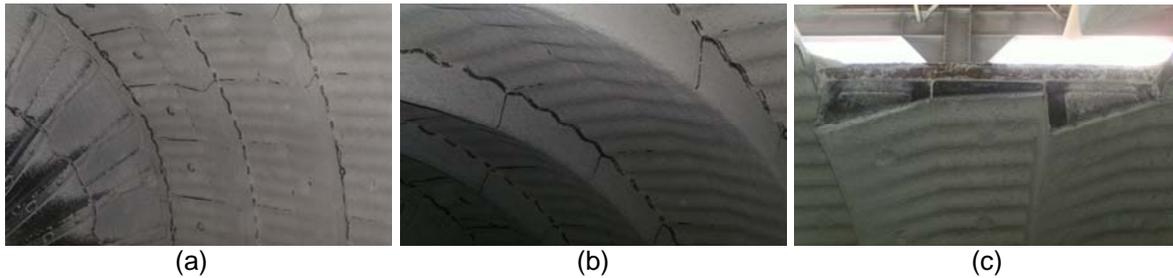


Figura 2. Disposição interna do revestimento auto-classificador. (a) Montagem no início da câmara de fragmentação; (b) Padrão de montagem do revestimento ao longo do moinho; (c) Perfil do conjunto de peças do revestimento.

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, um grau de enchimento de 28,75% e uma velocidade crítica de operação de 77,3%. A distribuição da carga de bolas original está descrita na Tabela 1. O consumo específico teórico de energia do moinho é de 11,1 KWh/t.

Tabela 1. Distribuição da carga moedora do moinho de bolas 2

Diâmetro (mm)	Toneladas	% da Carga
50	7,00	8,9
40	12,00	15,2
30	34,00	43,0
25	26,00	32,9

A Figura 3 apresenta os quatro tamanhos distintos dos corpos moedores utilizados na composição da carga em equilíbrio do moinho de bolas. As respectivas medidas geométricas foram descritas na Tabela 1. A recarga de corpos moedores deve ser realizada periodicamente, obedecendo ao padrão de abastecimento de 1,5 tonelada/mês, com material de 50 mm de diâmetro.

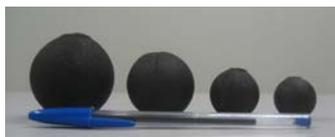


Figura 3. Tamanhos médios de 50 mm, 40 mm, 30 mm e 25 mm dos corpos moedores utilizados no moinho.

2.1 Amostragem do Circuito Industrial

A amostragem do circuito industrial foi realizada 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 oito 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 sequência descrita no fluxo apresentado pela Figura 4. 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.²⁽²⁾



Figura 4: Fluxograma do circuito de amostragem – coleta de alíquotas dos fluxos para formação do composto, a cada 15 minutos.

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 Amostragem da Carga Moedora do Moinho

O estudo referente à distribuição granulométrica das bolas do moinho foi pautado na amostragem do corpo moedor, na medição do diâmetro e na análise estatística dos resultados.

A amostragem realizada ao longo da câmara de fragmentação foi subdividida em quatro quadrantes, para viabilizar a análise comparativa de tamanhos de corpo moedor por região do moinho. O leito de corpos moedores foi amostrado a partir da profundidade de 400 mm, onde a coleta foi realizada, por quadrante, de forma aleatória, totalizando um número de 90 amostras, aproximadamente.

O diâmetro de cada bola foi medido com paquímetro, em duas orientações, para avaliar as variações de tamanho que podem sugerir uma deformidade fora do padrão. Foram desenvolvidos estudos estatísticos para a determinação do desempenho do revestimento auto-classificador e para a análise de deformação dos corpos moedores, utilizando os métodos Anova (análise de variância) e Teste de hipóteses do *software* Minitab. Adicionalmente, o método de Bond foi aplicado para a realização do diagnóstico da distribuição de tamanhos dos corpos moedores no interior do moinho, comparando os resultados da amostragem com o padrão de carga estabilizada da Magotteaux e o padrão de Bond.^(7,8)

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*). Durante o período de amostragem, a média de produção dos moinhos foi de aproximadamente 80 t/h, com uma potência média consumida de 884 kW. Essas informações foram utilizadas para o fechamento do balanço de massas do circuito industrial de moagem.

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. A Figura 5 apresenta as curvas de distribuição granulométrica referente aos fluxos amostrados.

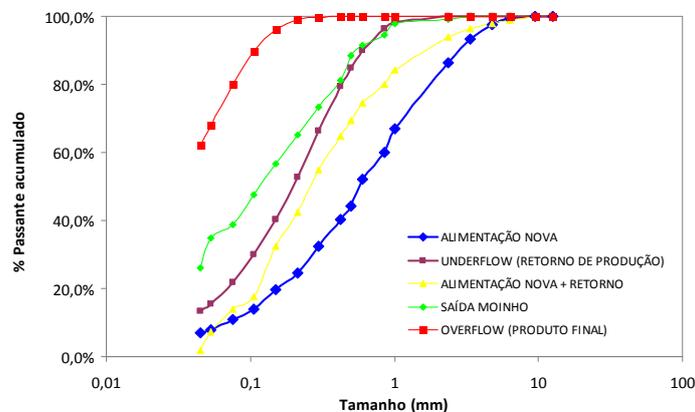


Figura 5. Distribuição granulométrica dos fluxos do circuito de moagem.

3.1 Consolidação do Balanço de Massas

O método de Lagrange foi aplicado para a determinação da carga circulante do sistema ilustrado na Figura 6.

A carga circulante do moinho de bolas 1 possui um valor médio igual a 1,08 (108%). O valor referência do moinho de bolas 1 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.

Utilizando os valores de alimentação nova, a referência de carga circulante do moinho 1 e as distribuições granulométricas alusivas à alimentação nova e retorno de produção, a distribuição granulométrica da alimentação total do moinho foi projetada. 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 a zero variando o valor da carga circulante inicial, até a aferição final da referência (125%). A Figura 7 ilustra o ajuste das curvas granulométricas, após a validação do cálculo.

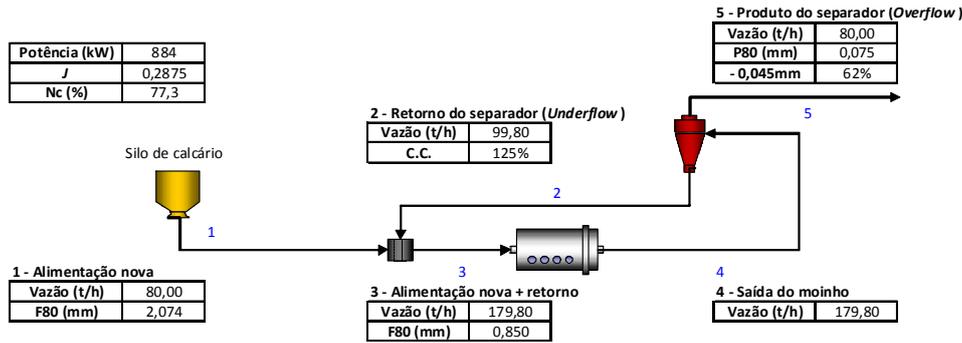


Figura 6. Consolidação do balanço de massas do circuito de moagem.

Os valores encontrados para F80 e P80 foram iguais a 2,074 mm e 0,075 mm, respectivamente. A fração passante do produto do classificador mecânico (*overflow*) na malha de abertura de 0,045 mm foi igual a 0,62.

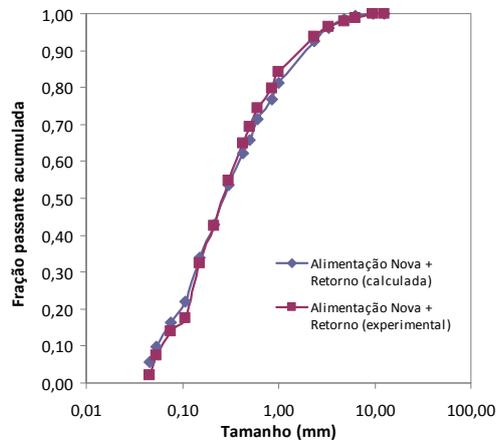


Figura 7. Ajuste das distribuições granulométricas – calculada e experimental.

3.2 Resultados da Amostragem da Carga Moedora

A amostragem realizada ao longo da câmara de fragmentação foi subdividida em quatro quadrantes, para viabilizar a análise comparativa de tamanhos de corpo moedor por região do moinho. A Figura 8 ilustra as regiões de coleta das amostras de corpo moedor, representadas pelas cavidades. A Figura 9 retrata as amostras divididas por área de coleta.



Figura 8. Regiões de coleta representadas pelas setas brancas (indicação das cavidades).



Figura 9. Amostras dos corpos moedores separadas por quadrante – divisão do 1º (Q1) ao 4º (Q4) quadrante representando as áreas da alimentação à descarga do moinho.

A Tabela 2 apresenta o descritivo estatístico das medidas realizadas nos corpos moedores. A Figura 10 ilustra a variação das medidas de diâmetro por quadrante e por dimensão, conforme os dados da Tabela 2.

Tabela 2. Medidas descritivas do diâmetro dos corpos moedores em milímetros

Variável	Número de amostras	Média	Desvio-padrão	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
Máximo_Q1	84	37,17	9,61	23,40	28,65	35,65	47,42	53,40
Mínimo_Q1	84	35,16	10,21	20,80	26,05	32,60	45,15	51,90
Máximo_Q2	89	29,92	6,52	21,10	25,80	27,90	31,50	52,00
Mínimo_Q2	89	28,11	6,69	19,50	23,80	25,70	30,80	51,10
Máximo_Q3	90	29,73	6,01	21,20	26,00	28,00	31,13	51,80
Mínimo_Q3	90	27,60	5,65	19,20	24,33	25,95	29,68	51,40
Máximo_Q4	90	26,01	2,18	21,50	24,58	26,10	27,83	30,30
Mínimo_Q4	90	24,27	2,12	19,80	22,98	24,25	25,53	30,10

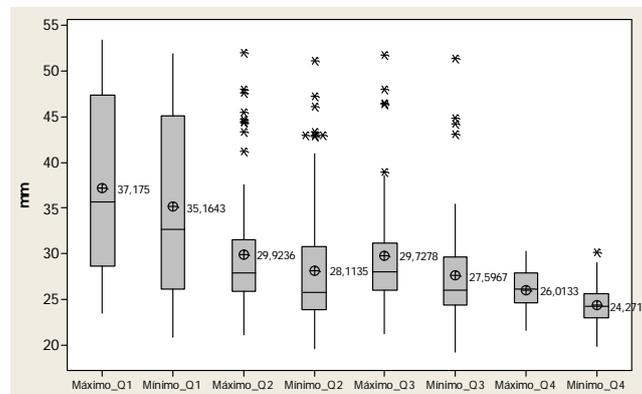


Figura 10. Medidas granulométricas máximas e mínimas dos corpos moedores, por quadrante.

Os testes de hipóteses foram realizados para cada quadrante de amostragem, comparando a medida de maior dimensão com a de menor. O teste utilizado foi o t-student pareado. A hipótese nula testada (H_0) referiu-se a igualdade das medidas e a alternativa (H_1) mostrou a diferença entre elas.

A diferença dos valores encontrados para cada quadrante foi comprovada pelo método de análise de variância (Anova), que apresentou um resultado de p-valor igual a zero. Entretanto, a comparação isolada dos quadrantes 2 e 3 mostrou a igualdade estatística do diâmetro das bolas (p-valor igual a 0,7).

A avaliação gráfica da distribuição granulométrica da carga moedora do moinho foi ilustrada na Figura 11. As retas e pontos representados pelas cores preta e vermelha remetem-se à proposta de Bond, sendo a primeira referente ao cálculo

direto da distribuição e a segunda calculada manualmente a partir do conceito básico da distribuição acumulada de tamanhos.

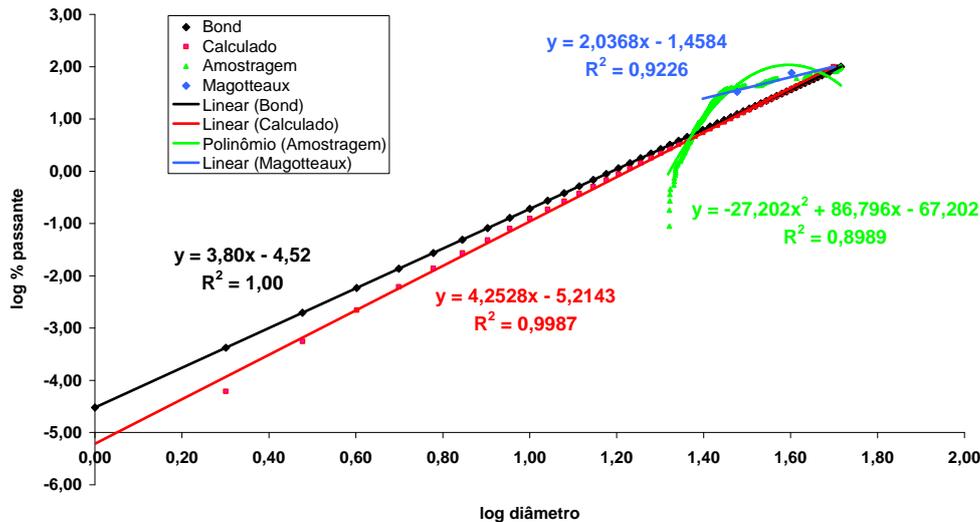


Figura 11. Comparativo das distribuições de carga moedora no interior do moinho.

A reta representada pela cor azul mostrou a distribuição da carga moedora estabilizada proposta pela Magotteaux e implantada durante o processo de repotenciamento do moinho. A distribuição da carga real foi reportada pela cor verde.

A análise do desempenho do separador dinâmico de partículas foi realizada pela curva de *Tromp* retratada na Figura 12.

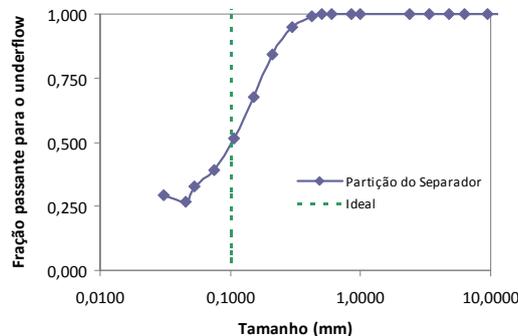


Figura 12. Curva de eficiência do separador dinâmico de partículas.

4 DISCUSSÃO

4.1 Balanço de Massas e Curva de *Tromp*

A alimentação total do moinho calculada, considerando o valor de carga circulante de 1,25, foi de 179,8 t/h. A determinação desses valores, pelo método de Lagrange, foi extremamente relevante. O circuito não possui balança para medição da carga circulante, nem mesmo locais apropriados para a coleta de minério na descarga do moinho. Sem essas informações o balanço de massas não seria fechado.

Através das informações do balanço de massas, a eficiência operacional do separador de partículas pode ser mensurada, fato relevante visto que nunca fora avaliado anteriormente, devido ao transporte pneumático do material cominuído na

descarga do moinho. A tubulação que transporta o minério fragmentado é integralmente vedada e desprovida de pontos de amostragem.

A imperfeição da classificação não foi calculada pela falta da informação do d25, fato isolado que já caracteriza uma anomalia do processo. Esse efeito foi provocado pelo elevado *by-pass* do circuito dado por $a = 0,29$, que compromete, sensivelmente, o desempenho da moagem.

O *by-pass* é peculiar dos separadores, apresentando diversos graus de impacto. O retorno de material fino para o circuito de cominuição provoca um efeito de amortecimento da carga moedora, preenchendo os interstícios do leito de moagem e reduzindo significativamente a taxa de quebra das partículas. Esse problema associado à distribuição granulométrica irregular da carga de bolas e à vedação do diafragma da descarga pode prejudicar, expressivamente, o desempenho produtivo do processo.

Um fato importante da análise de desempenho do classificador está associado à repetibilidade do teste. Esse foi o primeiro estudo realizado para o separador dinâmico da Samarco Mineração S/A. Os resultados indicam uma tendência de comportamento, entretanto, ponderações conclusivas sobre o desempenho devem ser propostas após a realização de novos estudos.

4.2 Análise da Carga Moedora

A primeira informação relevante da Tabela 2 refere-se aos valores máximos encontrados para o diâmetro dos corpos moedores. Os valores variam de 53,40 mm a 30,10 mm, do primeiro quadrante ao quarto, o que sugere uma distribuição decrescente de tamanho ao longo da câmara de cominuição. Um fator importante é a granulometria padrão da carga de bolas do moinho. Após o repotenciamento do moinho, a carga completa de corpos moedores foi composta por 7 t de 50 mm, 10 t de 40 mm, 31 t de 30 mm e 23 t de 25 mm. As cargas complementares, para a manutenção do grau de enchimento (recarga), foram inseridas com um diâmetro médio de 50 mm.

Outro ponto importante trata da variação das medições da forma do corpo moedor. A análise visual permitiu a identificação de um corpo amorfo, sem a característica circular intrínseca. Esta diferença de medida foi quantificada e demonstrada através de testes de hipóteses e de gráficos *boxplot*.

Pode-se observar nos resultados dos quatro quadrantes a diferença estatística entre as medidas. Em todos os casos o p-valor foi igual a zero, o que permitiu afirmar que a hipótese de igualdade entre as medidas de máximo e mínimo do corpo moedor não é válida.

A Figura 10 ilustrou a variação das medidas de diâmetro por quadrante e por dimensão. É notável a redução do diâmetro dos corpos moedores ao longo dos quadrantes, o que caracteriza a ação eficiente de classificação do revestimento do moinho. A distribuição decrescente da carga moedora, no interior do moinho, favorece a interação de partículas e corpos moedores na proporção ideal de tamanho, visto que as partículas grosseiras de calcário se concentram no início do moinho e as mais finas posicionam-se próximas à descarga.

A variação encontrada no primeiro quadrante é significativamente maior em relação aos outros três. Em contrapartida, a presença de *outliers* no mesmo não foi detectada, algo recorrente nos quadrantes 2, 3 e 4, em ambas as dimensões medidas.

A ocorrência dos *outliers* pode ser atribuída à eficiência de classificação dos corpos moedores pelo revestimento do moinho. Apesar de desempenhar um papel significativo de separação, entende-se como natural uma eventual contaminação conforme explicitado na Figura 10. Este efeito pode ser proveniente tanto da eficiência de separação do revestimento quanto do método de amostragem.

Mesmo com a dispersão apresentada no quadrante 1 e com os *outliers* dos quadrantes 2, 3 e 4, o resultado foi positivo, pois mostrou que o processo de segregação das bolas, no interior do moinho, por faixa granulométrica, ocorre naturalmente conforme o projetado.

A distribuição granulométrica da carga moedora do moinho ilustrada na Figura 11 mostra a diferença de ajuste entre as curvas, determinadas pelos coeficientes m de inclinação, onde Bond propôs um valor igual a 3,8, diferente do real calculado de 4,25.⁽⁷⁾ Bond não apresentou o método utilizado para a efetivação do ajuste de inclinação da curva. Contudo, ambas as retas servem de referência para uma adequada avaliação da distribuição da carga moedora.

A reta representada pela cor azul mostrou a distribuição da carga moedora estabilizada proposta pela Magotteaux e implantada durante o processo de repotenciamento do moinho. A inclinação da reta sugeriu uma distribuição mais fina da carga moedora. Essa composição está de acordo com as recomendações feitas por de Bond para aplicações em circuitos de moagem a seco.^(7,8)

O perfil encontrado para amostra real (curva verde da Figura 11) retratou um comportamento atípico. O ajuste não apresentou linearidade, sendo representado matematicamente por uma regressão polinomial. Esse resultado pode estar associado ao fato da carga moedora não ter sido reclassificada após o repotenciamento, que ocorreu há mais de três anos, e à falta de cumprimento do padrão de reposição das bolas.

5 CONCLUSÃO

O fechamento do balanço de massas pelo método de Lagrange foi fundamental para a determinação da carga circulante e da distribuição granulométrica da saída do moinho. O ajuste foi promovido através da otimização das curvas de distribuição granulométrica da alimentação total do moinho, que apresentou uma boa aderência.

O método para a avaliação de desempenho do separador dinâmico de partículas foi determinado a partir do fechamento de balanço de massas redundantes. A primeira referência foi criada e pode-se perceber uma oportunidade de desenvolvimento do processo de classificação das partículas. Esse trabalho pode contribuir incisivamente para o ganho de produção e qualidade do produto cominuído.

O teste de hipóteses pareado realizado para a avaliação da deformação dos corpos moedores indicou uma falta de uniformidade geométrica, para todos os tamanhos avaliados.

A avaliação da eficiência de classificação dos revestimentos auto-classificadores mostrou um resultado positivo.

A distribuição granulométrica dos corpos moedores no interior do moinho apresentou um comportamento fora dos padrões utilizados como referência.

A rotina de amostragem da carga moedora deve ser estabelecida para garantir uma gestão eficiente do processo de cominuição.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 GALÉRY, R., ALVES, V. K., MONTENEGRO, L. C. M., PERES, A. E. C., “Avaliação da tecnologia utilizada para o dimensionamento, modelagem, simulação e otimização de processos de fragmentação”, XXI ENTMME, Natal – RN, Novembro 2005.
- 2 VALADÃO, G. E. S., ARAÚJO, A. C., “Introdução ao tratamento de minérios”, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2007.
- 3 TAGGART, A. F., “Handbook of Mineral Dressing: Ores and Industrial Minerals”, John Wiley & Sons, Sections 5 and 6, pp. 5.01 - 6.54, New York, 1927.
- 4 BERALDO, J. L., “Moagem de minérios em moinhos tubulares”. 1ª ed. São Paulo: Edgar Blücher, p.1-47, 1987.
- 5 GALÉRY, R., “Moagem: Modelagem de parâmetros de quebra através da análise da energia de fratura”, Tese de Doutorado, CPGEM / UFMG, Maio 2002.
- 6 CHAVES, A. P., PERES, A. E. C., “Teoria e prática do tratamento de minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem”, Vol.3, Signus Editora, 3ª Edição, São Paulo – SP, 2006.
- 7 BOND, F. C., “Grinding ball size selection”, Trans. AIME, Mining Engineering, p. 592-595, 1958.
- 8 BOND, F. C., “Crushing & grinding calculations I”, British Chemical Engineering, Vol. 6, N. 6, p. 378-385, 1961.
- 9 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.
- 10 LYNCH, A. J., “Mineral crushing and grinding circuits: their simulation, optimization, design and control”, Elsevier Scientific Publishing Company, vol. 1, New York, 1977.
- 11 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.
- 12 BENZER, H., “Modeling and simulation of a fully air swept ball mill in a raw material grinding circuit”, Powder Technology 150, p. 145-154, 2005.
- 13 TAVARES, L. M., CUNHA, E. R., ALMEIDA, S. L., “Influência de variáveis operacionais no desempenho de classificador aerodinâmico”, Revista Escola Minas, Vol.60, N. 3, Ouro Preto – MG, 2007.