

AVALIAÇÃO DA MOAGEM DA BAUXITA CONSIDERANDO DIFERENTES BLENDS DE MINÉRIO*

Ana Soares¹
Júlio Almeida²
Fernando Bicalho³
Jonni Moura⁴
Rodrigo Sales⁵
Boris Volavicius⁶

Resumo

A operação de moagem representa uma etapa fundamental no processo para atingir a granulometria e grau de liberação adequados do minério para a etapa subsequente da cadeia produtiva. Especialmente para a bauxita, a moagem a úmido pode se tornar complexa em função da alteração da moabilidade quando exposta às condições de moagem comumente empregadas: altas temperaturas e meio alcalino. Com o objetivo de compreender a operação do moinho compartimentado barra/bolas de uma operação de bauxita no Brasil, um estudo foi conduzido para avaliar o impacto ao alimentar o circuito com diferentes blends de minério. O trabalho consistiu em amostragem no circuito de moagem (alimentação e produto), coleta de dados do sistema historiador da planta, realização de WI de Bond e granulometria e cálculos utilizando a teoria de Bond e modelo de potência. A partir dos resultados, foi possível analisar o comportamento da moagem frente a diferentes condições, assim como conhecer as limitações do circuito.

Palavras-chave: Moagem; Moabilidade; Bauxita; Amostragem; WI de Bond.

GRINDING CIRCUIT EVALUATION FOR BAUXITE CONSIDERING DIFFERENT ORE BLENDS

Abstract

Grinding operation represents a key step on the process to achieve the particle size and liberation required to the subsequent stage of the productive chain. Especially for bauxite, wet grinding can be complex due to the change on grindability when exposed to the grinding conditions commonly used: high temperatures and alkaline medium. To understand the operation of the single-body rod/ball mill of a bauxite operation in Brazil, a study was conducted to evaluate the impact of feeding the circuit with different ore blends. The work consisted of sampling on the grinding circuit (feed and product), data collection of the plant historian system, conduction of Bond WI test and particle size distribution and calculations using Bond theory and power model. Based on the results, it was possible to analyze the behavior of the grinding due to changes on different conditions, as well as to know the restrictions on the circuit.

Keywords: Grinding; Grindability; Bauxite; Sampling; Bond WI.

¹ Engenheira de Minas, mestrado, Engenheira de Processos, Process Optimisation, Metso, Sorocaba, SP, Brasil.

² Engenheiro de Produção, bacharelado, Engenheiro de Processos, Process Optimisation, Metso, Sorocaba, SP, Brasil.

³ Engenheiro de Automação-Computação, mestrado, Engenheiro de Produto, Process Optimisation, Metso, Sorocaba, SP, Brasil.

- ⁴ *Engenheiro de Controle e Automação, bacharelado, Engenheiro de Produto, Process Optimisation, Metso, Sorocaba, SP, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro de Controle e Automação, bacharelado, Engenheiro de Produto, Process Optimisation, Metso, Sorocaba, SP, Brasil.*
- ⁶ *1 Engenheiro de Controle e Automação, bacharelado, MBA, Gerente de Otimização de Processos, Process Optimisation, Metso, Sorocaba, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de avaliar os efeitos do uso de diferentes blends de bauxita na alimentação da moagem de uma planta no Brasil, o comportamento do moinho compartimentado barras/bolas foi avaliado de forma a identificar os blends adequados para a alimentação do moinho, mantendo as especificações do produto. Em função das necessidades do cliente, cada blend representa uma composição a partir de bauxitas com diferentes granulometrias (grossos e finos).

Tradicionalmente, o dimensionamento de moinhos para a indústria mineral é realizado com base no índice de trabalho de Bond (W_i – Work index)[1]. O ensaio padrão de Bond é realizado em moinho com características pré-definidas e em via seca, com posterior aplicação de fatores de correção propostos por Bond e Rowland para dimensionamento do equipamento [2]. A moagem da bauxita geralmente é feita em condições específicas de processo, como presença de alta temperatura e meio alcalino. Estas duas condições alteram significativamente a cominuição da bauxita, tornando mais fácil o seu processo de moagem e exigindo menos energia quando comparado a um processo a seco ou via úmida sem aumento de temperatura ou adição de reagentes alcalinos.

Safonov et al. [3] realizaram um estudo para avaliar o efeito de parâmetros de processo na moabilidade e índice de Bond considerando dois tipos de bauxita em função da composição: gibbsita e diásporo. Os ensaios foram realizados em moinhos de Bond e Hardgrove adaptados para testar os seguintes cenários: via seca, meio úmido e meio úmido alcalino em diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que para a bauxita rica em gibbsita, o W_i de Bond reduziu em 45-49% para a condição via úmida em temperatura ambiente quando comparado ao teste realizado via seca. A redução foi ainda maior ao se considerar o aumento de temperatura e meio alcalino. Para a bauxita rica em diásporo, também foi observada a mesma tendência, porém com taxas de redução diferentes. Dessa forma, o índice de moabilidade da bauxita pode ser corrigido de via seca para uma nova condição considerando um fator de correção empírico (equação 1), que depende das características do meio e do tipo de bauxita [4].

$$W_i \text{ de Bond}_{\text{corrigido}} = \frac{W_i \text{ de Bond}_{\text{padrão}}}{k} \quad (\text{Equação 1})$$

O moinho objeto desse estudo opera em circuito aberto, via úmida em meio alcalino e temperatura ambiente.

O trabalho consistiu em amostragem no circuito de moagem, coleta de dados do sistema historiador da planta, realização de W_i de Bond e granulometria e cálculos utilizando a teoria de Bond e modelo de potência. A partir dos resultados, foi possível analisar o comportamento da moagem frente a diferentes condições, assim como conhecer as limitações do circuito.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ETAPA 1: Amostragem e Coleta de Dados

Atualmente a planta de moagem é alimentada com um determinado blend (Blend A) formado a partir de minérios com diferentes granulometrias e Wi. Durante visita à planta foi realizada a amostragem no circuito aberto de moagem juntamente com a coleta de dados do sistema historiador da planta (taxa de alimentação e potência consumida). Foram coletadas amostras de polpa na descarga do moinho em intervalos de 15 minutos durante 1 hora e, em seguida, a correia de alimentação do moinho foi parada para coleta de amostra da alimentação.

Os dados de taxa de alimentação (tph) e potência consumida (kW) durante a amostragem foram disponibilizados pelo cliente para uso nos cálculos [5]. Após a coleta de amostras, o moinho foi esvaziado posteriormente e parado para realização de medições internas (comprimento, diâmetro e carga de barras/bolas). A Tabela 1 apresenta as condições operacionais do moinho no momento da amostragem.

Tabela 1 – Condições operacionais do moinho barras/bolas no momento da amostragem.

Condições Operacionais	
Taxa de alimentação (tph – base úmida)	260
Umidade (%) - alimentação	11
Velocidade, rpm (% da crítica)	13 (55)
Carga de barras, %	27,2
Carga de bolas, %	27,8
Consumo médio de potência, kW	1144,6
Potência instalada, kW	1500
Utilização de potência, %	76,7
F ₈₀ , μm	56195
P ₈₀ , μm	280

2.2 ETAPA 2: Testes de laboratório

Diferentes amostras de bauxita com diferentes granulometrias foram enviadas para o laboratório Metso em Sorocaba para formação de novos blends e posterior realização de testes de análise granulométrica e WI de Bond (barras e bolas). A amostra coletada (Blend A) na alimentação do moinho durante a visita também foi enviada a Sorocaba para realização de análise granulométrica e WI de Bond (barras e bolas), representando o caso base. Não foi autorizada a divulgação de quantidade e detalhes das amostras enviadas, assim como as proporções que constituem cada blend.

A Figura 1 mostra as curvas granulométricas dos blends formados analisados.

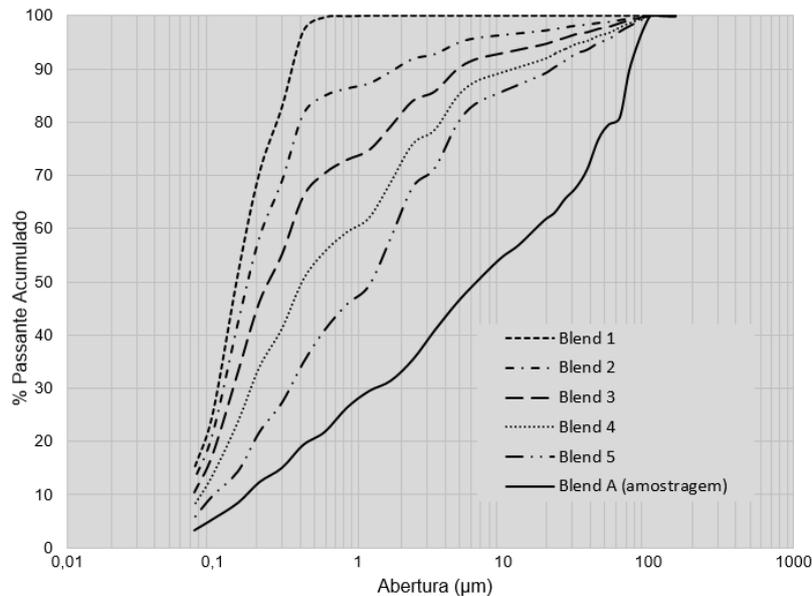


Figura 1 – Granulometria das amostras analisadas.

A Tabela 2 apresenta os valores de F80 para cada blend, assim como os resultados dos testes de WI de barras e de bolas executados conforme procedimento de Bond [1].

Tabela 2 - Valores de F80 e WI.

Amostras	F80 (µm)	WI barras (kWh/t)	WI bolas (kWh/t)
Blend 1	280 µm	*	*
Blend 2	405 µm	*	4,6
Blend 3	1,8 mm	*	8,1
Blend 4	3,7 mm	*	9,2
Blend 5	4,9 mm	18,0	11,0
Blend A (amostragem)	56 mm	16,8	11,0

*Impossibilidade de realização/conclusão do teste devido à restrição de granulometria da amostra.

A amostra de polpa coletada na descarga do moinho no momento da visita teve a distribuição granulométrica realizada no site pela equipe do cliente, com **P80** igual a **280 µm**. O P80 adequado para a etapa subsequente à moagem é de aproximadamente 300 µm, de acordo com informações do cliente.

2.3 ETAPA 3: Cálculos – Teoria de Bond e Modelo de Potência

Conforme descrito anteriormente, foi utilizado um fator de correção (Fator K) para o ajuste da moabilidade da bauxita em meio alcalino a partir dos resultados de Wide Bond obtidos em laboratório. O Fator K da bauxita foi obtido através do caso base (amostragem realizada), calculado em função da potência medida no momento da amostragem da potência prevista por Bond. Por falta de informações mais detalhadas, foi assumido que o fator K se mantém constante para todas as blends. A verificação completa dessa suposição exigiria testes experimentais a longo prazo. No entanto, os valores K calculados para moagem de barras e bolas são próximos

dos calculados nos estudos utilizados como referência, fornecendo assim uma verificação razoável dos resultados.

A moagem de barras é adequada para alimentação com F80, em média, entre 20 mm e 4 mm, sendo mais eficiente para moagem grosseira. O funcionamento do moinho de barras consiste na separação das barras pelas partículas grossas junto à entrada, abrindo o feixe de barras. Próximo à descarga, o tamanho das partículas já está reduzido e, portanto, o feixe de barras já está mais fechado. Em consequência, as partículas minerais movem-se livremente no espaço entre barras enquanto este é maior do que o seu tamanho. Quando ele se torna igual, as partículas são retidas e fraturadas e os fragmentos voltam a se mover até serem retidos e cominuídos novamente, de maneira cíclica e sucessiva. Além do moinho de barras gerar por si só pequena quantidade de finos, na maior parte do tempo as partículas finas se movem no espaço entre barras sem sofrer cominuição (CHAVES, 2009). Dessa forma, a fração fina praticamente não sofre fragmentação no compartimento de moagem de barras, se movendo no espaço entre barras. A moagem efetiva desse material ocorrerá no compartimento de moagem de bolas, que provoca uma fragmentação mais fina do minério.

Dessa forma, uma vez que foi possível apenas concluir o teste de Wi de barras para o Blend 5 (Tabela 2) devido a quantidade excessiva de finos nos demais blends, a potência requerida calculada para os blends foi realizada considerando apenas a moagem da fração grossa no compartimento de barras e considerando que a fração de minério fino se move através do moinho sem sofrer fragmentação.

A avaliação do circuito envolveu cálculos utilizando a fórmula de Bond e o modelo de potência com o objetivo de verificar o efeito de variáveis operacionais e de dureza e granulometria do minério no moinho. Uma série de cálculos de potência necessária do moinho foi realizada para as condições no momento da amostragem e considerando outros cenários, investigando o efeito de variáveis operacionais e de dureza do minério. A fórmula de Bond e os fatores de correção descritos por Rowland (2002) foram utilizados para os cálculos de potência requerida (equação 2).

$$P = T \cdot 10 Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \times EF_1 \times EF_2 \times \dots \times EF_8 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que,

- T : Taxa de produção do moinho, t/h
- Wi : Índice de trabalho de Bond para moinho de barras ou de bolas
- F₈₀ : Tamanho em que 80% é passante na alimentação, μm
- P₈₀ : Tamanho em que 80% é passante no produto, μm
- EF₁₋₈: Fatores de correção

Para estimar potência consumida, foram utilizadas as equações 3 e 4 abaixo [6] [7].

$$P_{(Barras)} (kW) = 1,752 \cdot D^{0,34} \cdot (6,3 - 5,4 \cdot V_R) \cdot C_F \quad (\text{Equação 3})$$

$$P_{(Bolas)}(kW) = \left(4,879 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot V_B) \cdot C_F \cdot \left(1 - \frac{0,1}{29 - 10 \cdot C_F}\right) + S_S\right) \cdot 1,16 \quad (\text{Equação 4})$$

Em que,

- D : Diâmetro interno, m
- C_F : Fração da velocidade crítica C_s, %
- V_R : Carga de barras, %
- V_B : Carga de bolas, %

A potência calculado moinho (1153,7 kW) para o caso base em função das dimensões, velocidade de rotação e carga de corpos moedores (equações 3 e 4) está coerente com a média de potência consumida registrada durante a amostragem (1144,6 kW). O índice de trabalho operacional calculado com as potências medida e calculada foram 8,9 kWh/t e 9,0 kWh/t, respectivamente. A potência consumida calculada para os compartimentos de barras e de bolas foi de, respectivamente, 401 kW e 753 kW. Esses valores indicam uma proporção de consumo de potência de 34,8% para o compartimento de barras e de 65,2% para o compartimento de bolas.

O cálculo da potência requerida utilizando a fórmula de Bond (equação 2) para ambos os compartimentos (barras e bolas) buscou maximizar a taxa de alimentação do moinho e manter o P80 de 300 µm considerando a potência disponível (401 kW para barras e 753 kW para bolas), atingindo uma granulometria ótima de transferência entre os compartimentos para cada cenário. Os resultados são apresentados na Tabela 3 e Figura .

Tabela 3 – Resultados.

Compartimento de barras						
	Blend A (caso base)	Blend 1	Blend 2	Blend 3	Blend 4	Blend 5
Wi de barras da amostra (kwh/t)	16,9	*	*	*	*	18,0
Wi de barras utilizado (kwh/t)	16,9	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Fator K - bauxita	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Wi de barras (kwh/t) - corrigido	8,6	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
F80 da amostra (µm)	56195	280	405	1800	3690	4930
F80 utilizado (µm)	-	4930	4930	4930	4930	4930
P80 da fração grossa (µm)	-	**	**	1961	1892	1928
P80 resultante (µm)	1806	**	**	733	1393	1928
Taxa horária base seca (t/h) - Fração grossa	-	**	**	245,0	235,5	240,0
Taxa horária base seca (t/h) - resultante	231,4	**	**	490,0	314,0	240,0
Potência requerida (kW)	401	**	**	401	401	401
Compartimento de bolas						
Wi de bolas (kwh/t)	11,1	*	4,6	8,1	9,2	11,1
Fator K - bauxita	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Wi de bolas (kwh/t) - corrigido	7,5	*	3,1	5,5	6,2	7,5
F80 (µm)	1806	**	**	733	1393	1928
P80 (µm)	280	**	**	300	300	300
Taxa horária base seca (t/h)	231,4	**	**	490,0	314,0	240,0
Potência requerida (kW)	753	**	**	753	753	753

* Teste sem convergência de resultados.

** Amostra com granulometria extremamente fina. Não recomendado alimentar no moinho.

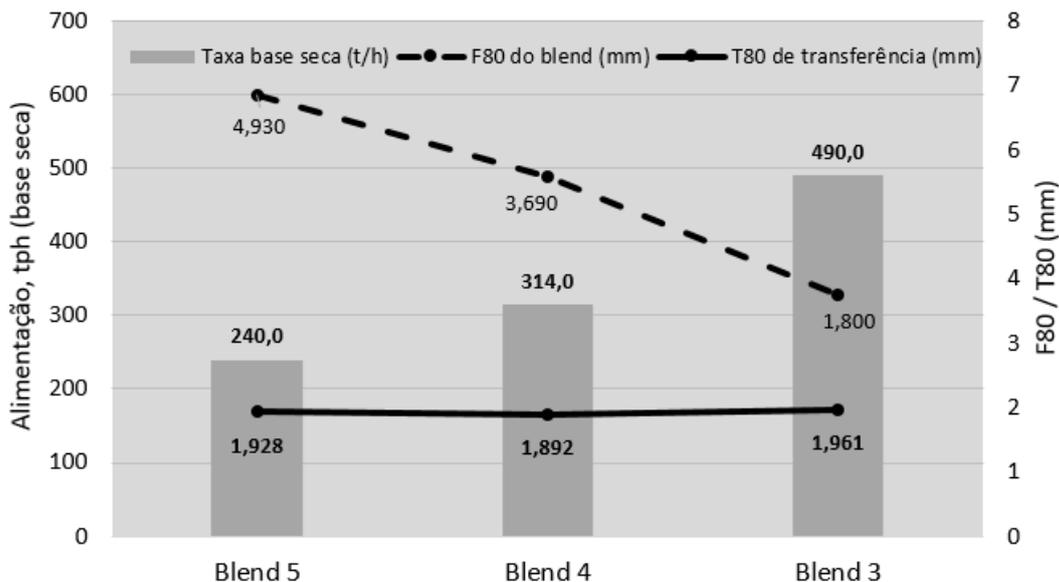


Figura 2 - Resultados da avaliação das amostras ao alimentar o moinho.

A Tabela 3 e a Figura 2 mostram que a medida que a granulometria de alimentação (F80) no moinho se torna mais fina, maior é taxa de alimentação (t/h) para uma mesma potência consumida e P80 de 300 μm . No compartimento de bolas, tal comportamento também é influenciado pela diminuição no valor de W_i a medida que o blend se torna mais fino.

Com o objetivo de avaliar possíveis efeitos na moagem caso as características da bauxita mudem e sejam diferentes daquelas originalmente especificadas para o moinho, foram considerados novos cenários envolvendo variação de W_i e granulometria de alimentação (F80). O W_i é uma característica do material em que não é possível calcular um valor intermediário proporcional quando se tem um blend com a mistura de dois ou mais minérios diferentes com W_i conhecidos. Dessa forma, não é possível analisar os efeitos no blend das variações de dureza nos minérios originais, separadamente. Para cada blend, haverá um valor de W_i que não é possível prever a não ser que faça o teste em laboratório. Dessa forma, a variação de W_i considerada é o valor resultante do blend, sem avaliar as variações de forma individual nos minérios. O mesmo pode-se afirmar para a relação entre W_i de barras e de bolas para uma mesma amostra. Não é possível saber com certeza qual será o valor do W_i de bolas caso o W_i de barras aumente em uma determinada proporção. Por essa razão, a avaliação dos diferentes cenários foi realizada de forma isolada para o compartimento de barras e para o compartimento de bolas. No entanto, é importante ressaltar que a capacidade do moinho para uma dada amostra deve ser resultante do equilíbrio dos dois compartimentos, respeitando sempre aquele que limita a taxa de produção. Dessa forma, para a avaliação de novos cenários utilizando a equação 2, foi considerada uma granulometria de transferência fixa (1,8 mm) do compartimento de barras para o compartimento de bolas. Os resultados são apresentados na Figura e Figura .

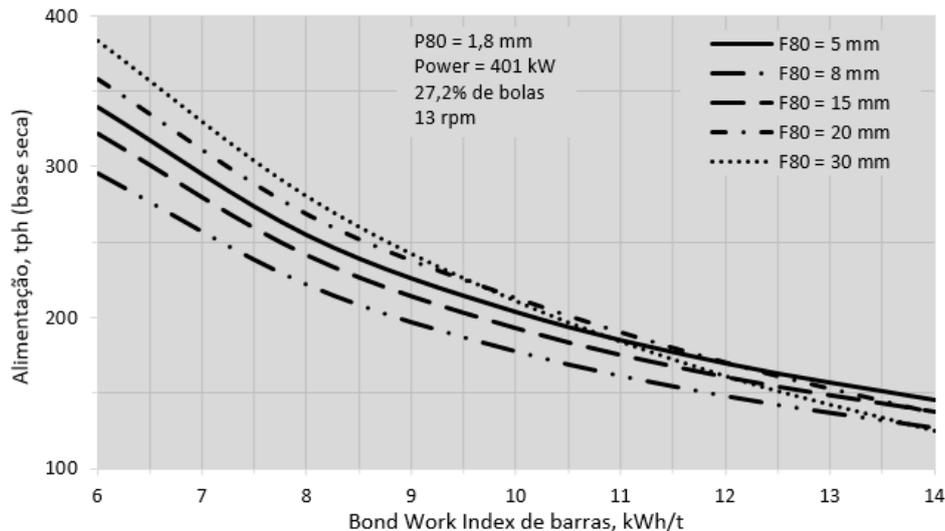


Figura 3 - Resultados da avaliação de novos cenários para o compartimento de barras.

A Figura mostra que para um dado valor de F80 na moagem de barras, a taxa de alimentação (t/h) no compartimento de barras diminui à medida que o valor de Wi aumenta, ou seja, para um minério mais duro a capacidade do moinho cai para um mesmo P80 (1,8 mm) e potência consumida (401 kW). Fazendo uma comparação entre as curvas para diferentes granulometrias de alimentação (F80), observa-se que para menores valores de Wi é possível processar mais material quando o F80 é maior, até um certo limite. Na faixa entre Wi 9 kWh/t e 13 kWh/t esse comportamento muda e a curva com menor F80 (5 mm) passa a ter uma taxa de alimentação maior quando comparada com os outros valores de F80. Esse comportamento no moinho de barras ocorre devido a dois fatores que influenciam fortemente no cálculo de potência requerida do moinho, relacionados à baixa relação de redução e à energia necessária para quebrar partículas maiores. Em resumo, ao se comparar uma alimentação grosseira e uma fina alimentando um moinho de barras, ambas com baixo valor de Wi, com a alimentação grosseira será possível processar mais material do que com a alimentação mais fina. Isso ocorre porque o moinho de barras é mais eficiente para moagens grosseiras e quando se tem uma relação de redução maior e um tamanho adequado de alimentação. Além disso, a energia necessária para quebrar as partículas maiores não vai ser muito grande uma vez que o Wi do material é baixo. Ou seja, para a alimentação mais fina tem-se uma baixa relação de redução, o que leva a fatores de correção maiores para o cálculo da potência requerida na equação de Bond. De forma geral, para cada valor de Wi e F80, considerando um mesmo P80 e potência requerida, a Figura mostra as diferentes taxas de alimentação esperadas.

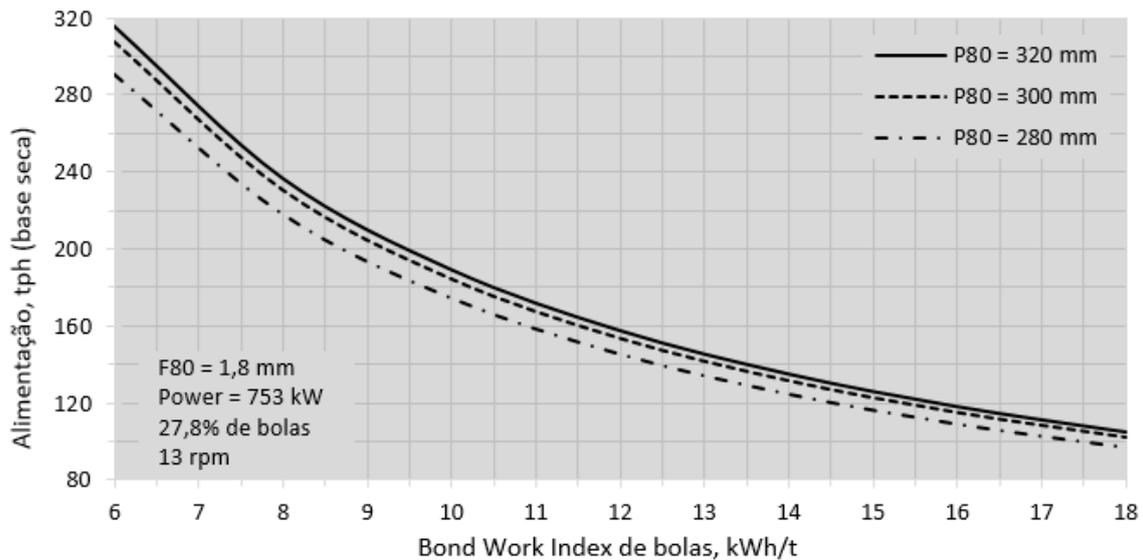


Figura 4 - Resultados da avaliação de novos cenários para o compartimento de bolas.

A Figura mostra que para um dado P80 na moagem de bolas, a taxa de alimentação é reduzida ao se aumentar o Wi, de forma semelhante ao que ocorre na moagem de barras. Considerando diferentes valores de P80 (280, 300 e 320 μm), observa-se que quanto menor é o P80 desejado, menor é a taxa de alimentação no compartimento de bolas. De forma geral, a Figura apresenta as taxas de alimentação estimadas ao variar o Wi e o P80.

3 CONCLUSÃO

Os blends 1 e 2 apresentaram um F80 extremamente fino, com granulometria próxima à granulometria necessária para a etapa subsequente à moagem. Sendo assim, não é recomendado trabalhar com esses dois blends para alimentar o moinho, até porque a moagem de barras não é efetiva para moagem fina e no compartimento de bolas a granulometria de alimentação sofreria uma sobre moagem excessiva, gerando muitos finos. Adicionalmente, ao se trabalhar com quantidade excessiva de finos no moinho, a viscosidade de polpa e, conseqüentemente, a reologia (deformação e escoamento do fluido) podem ser alteradas, podendo interferir no desempenho de moagem e de descarga de polpa. Dessa forma, é aceitável trabalhar com as amostras 4 e 5 na alimentação da moagem sem causar efeitos negativos significativos. Já para a amostra 3, apesar dos cálculos terem mostrados que é possível processar uma taxa maior e obter o produto final atendendo a especificação de P80 igual a 300 μm com a potência disponível, é possível que nesse cenário a viscosidade da polpa já se altere e possa interferir negativamente no processo de moagem e de descarga da polpa. Portanto, apesar dos cálculos mostrarem que é possível processar uma taxa maior nessas condições, a alimentação do moinho com a amostra 3 não é recomendada.

Os resultados apresentados para diferentes cenários ao variar F80, Wi e P80 nos compartimentos de bolas e barras mostram a variação da taxa de alimentação no moinho. De forma geral, se o Wi e/ou F80 da amostra/blend aumentam, é esperado que a taxa de alimentação do moinho seja menor, porém ressalta-se exceções no compartimento de barras. Da mesma forma, para um mesmo Wi e F80, a taxa de alimentação é reduzida caso seja necessário produzir um material mais fino. Dessa forma, é possível avaliar o impacto de vários cenários diferentes.

REFERÊNCIAS

- 1 BOND, F.C. The Third Theory of Comminution. Transactions AIME, May, 1952; p. 484-494.
- 2 CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Volume 3. São Paulo: Signus Editora / Brasil Mineral, 2009; p. 173-178.
- 3 SAFONOV, A. I., SUSS, A. G., PANOVA, A. V., LUK'YANOV, I. V., KUZNETSOVA, N. V., DAMASKIN, A. A. Effect of process parameters on the grindability and Bond index of bauxites and alumina-bearing ores. Metallurgist, 2009, v. 53, n. 1-2, p. 57-61.
- 4 MUCSI, G., CSÓKE, B., SOLYMÁR, K. Grindability characteristics of lateritic and karst bauxites. International Journal of Mineral Processing, 2011, p. 96-103.
- 5 DEURSEN, V.C., SENO JR, R., MORENO, R., FRANC, T. The Votorantim Metais bauxite rod-ball grinding mil. ICSOBA, 2015.
- 6 BOND, F.C. Crushing and Grinding Calculations. Allis Chalmers Publication, 1961.
- 7 ROWLAND, C.A. Selection of Rod Mills, Ball Mills and Re grind Mills, in: Mular, A.L., Halbe, D.N. & Barratt, D.J. (Eds.), Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Volume 1. SME, Littleton, 2002; p. 710-754.