

ROTAS DE COMINUIÇÃO PARA ITABIRITOS POBRES DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO¹

Neymayer Pereira Lima²
Armando Rodrigues²
Pedro Ferreira Pinto²
Homero Delboni Junior³

Resumo

A exaustão das reservas de elevados teores de Fe no Quadrilátero Ferrífero tem levado ao maior aproveitamento de itabiritos pobres. Visando a maior viabilidade na implantação de projetos, com redução de Capex e Opex, diferentes rotas de cominuição têm sido avaliadas através de testes em escalas de bancada e piloto para amostras de itabiritos pobres com diferentes características granulométricas e resistência a moabilidade (WI operacional). As principais rotas de cominuição estudadas foram: britagem convencional, moagem SAG, prensa de rolos, seguidas de moagem de bolas convencional ou moagem de bolas em moinho vertical. Todas as rotas de cominuição visaram à obtenção de produto final com P95 próximo de 150µm. Os resultados obtidos foram usados para desenvolvimento de engenharia conceitual e análises de *trade off*, totalizando 36 configurações (6 rotas de cominuição x 6 características de itabiritos). Os resultados das análises mostraram redução de Capex e Opex de 15% e 7% respectivamente, para a rota SAG e moagem de bolas convencional para itabiritos pobres com WI operacional igual ou superior a 8 kwh/t em relação à rota de britagem convencional seguida de moagem de bolas. De toda forma a utilização da rota SAG deve ser considerada com ressalvas, pois testes piloto indicaram a elevada sensibilidade da moagem SAG com variações granulométricas da alimentação. Além disto, a vantagem econômica da rota SAG pode ser anulada com a diferença de rendimento operacional em relação à rota de britagem convencional.

Palavras-chave: Rotas de cominuição; Itabiritos pobres.

COMMINUTION ROUTES FOR POOR ITABIRITES FROM THE IRON QUADRANGLE

Abstract

The exhaustion of the reserves with high levels of iron in the Iron Quadrangle has led to greater use of poor itabirites. Aiming at greater viability to implement projects, reducing Capex and Opex, different comminution routes have been evaluated through bench and pilot scales tests using itabirites samples with different particle size distributions and grindability index. Comminution routes studied were: conventional crushing, SAG milling and HPGR, followed by conventional ball milling and vertical milling. All comminution routes aimed at obtaining final product P95 around 150µm. The results were used to develop conceptual engineering and analysis of trade-off, totaling 36 settings (6 comminution routes x 6 itabirites). The results of the analysis showed Capex and Opex reduction of 15% and 7% respectively, for use of SAG and conventional balls milling for compact itabirites when operational WI is greater than 8kwh / t comparing with the conventional conic crusher and ball milling route. Pilot tests indicated the high sensitivity of SAG mill with varying feed particle size. Moreover, the economic advantage of SAG route can be defeated with the difference in operating income compared to the conventional route of crushing.

Key words: Comminution routes; Poor itabirites.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Gerência de Desenvolvimento de Projetos de Tratamento de Minérios, Vale, Brasil.

³ Departamento de Engenharia de Minas, Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A exaustão das reservas com elevados teores de Fe no Quadrilátero Ferrífero e a demanda mundial de minério de ferro tem levado ao desenvolvimento de projetos para aproveitamento dos itabiritos pobres, compactos e friáveis.

Devido ao seu expressivo consumo energético as etapas de cominuição representam a principal fonte de custos operacionais em uma usina de beneficiamento de minério, além de ser responsável também por um percentual expressivo do custo de capital do projeto devido ao grande porte dos equipamentos utilizados.

O consumo energético e o custo de capital das etapas de cominuição se tornam mais significativos na medida em que o minério se torna mais compacto, maior consumo específico de energia, e mais pobre, necessidade de uma maior taxa de alimentação na usina para uma mesma produção do mineral útil.

Dessa forma o estudo e desenvolvimento de rotas de cominuição para os itabiritos com baixo teor de Fe são de fundamental importância para viabilização e otimização dos projetos para beneficiamento desses minérios.

A rota de cominuição tradicionalmente empregada nas usinas de tratamento de minérios de ferro, onde há a necessidade de moagem do ROM para posterior etapa de concentração, é formada por etapas de britagem e peneiramento e moagem de bolas convencional (moinho tubular).

Rotas alternativas de cominuição têm sido avaliadas, visando reduções da quantidade de operações unitárias e consequente redução de CAPEX e OPEX. A moagem SAG e prensa de rolos (HPGR) são opções para substituição de parte das operações de britagem e peneiramento e a moagem de bolas vertical para substituição da moagem de bolas convencional.

A aplicação das rotas alternativas de cominuição foi avaliada para itabiritos pobres com diferentes distribuições granulométricas (compactos, semi compactos e friáveis) e diferentes valores de consumo específico de energia (W_i operacional). Para cada rota estudada foi feita uma comparação entre o custo de capital (CAPEX) e custo operacional (OPEX). Foram realizadas também avaliações qualitativas quanto à estabilidade operacional e a disponibilidade física das rotas estudadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Testes em escala de bancada e piloto foram realizados com amostras de itabiritos considerando as seguintes rotas de cominuição:

- britagens 1^a, 2^a, 3^a e 4^a e 2 estágios de moagem de bolas convencional;
- britagens 1^a, 2^a, 3^a e 4^a, moagem de bolas convencional e moagem vertical;
- britagem 1^a, moagem SAG e moagem de bolas convencional;
- britagem 1^a, moagem SAG, moagem de bolas vertical;
- britagens 1^a e 2^a, HPGR e 2 estágios de moagem de bolas convencional; e
- britagens 1^a e 2^a, HPGR, moagem de bolas convencional e moagem de bolas vertical.

Durante este trabalho, foram avaliados 6 tipos de itabiritos, com teor de Fe próximo a 40%:

- itabirito compacto com W_i operacional de 7,8kWh/t;
- itabirito compacto com W_i operacional de 10,0 kWh/t;
- itabirito semi compacto com W_i operacional de 6,8kWh/t;
- itabirito semi compacto com W_i operacional de 8,8kWh/t;

- itabirito friável com Wi operacional de 5,8kWh/t; e
- itabirito friável com Wi operacional de 7,5kWh/t.

A combinação entre as 6 rotas de cominuição e os 6 tipos de itabiritos gerou 36 fluxogramas, os quais foram desenvolvidos através de engenharia conceitual para análises de *trade off* e outras análises comparativas, visando assim avaliar a rota de maior potencial para cada tipo de itabirito, com menores valores de CAPEX e OPEX. Além disto, foram feitas análises qualitativas de desempenho operacional e estabilidade de processo.

O desenvolvimento do projeto de engenharia conceitual para as 36 opções descritas acima, foi realizado considerando o processamento anual de 60 milhões de *run of mine*, visando à produção anual de aproximadamente 25 milhões de *pellet feed*.

Testes piloto com amostras de grande volume foram realizados para avaliação dos equipamentos de cominuição: britagem convencional, moagem SAG, HPGR, moagem de bolas convencional e moagem de bolas vertical. Além disto, amostras de furos de sonda representativas dos depósitos minerais de cada tipo de itabirito foram submetidas a ensaios de cominuição em escala de bancada para avaliação da variabilidade do consumo energético em cada estágio e tipo de equipamento de cominuição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1, 2 e 3 mostram os fluxogramas das rotas de cominuição avaliadas no estudo. As linhas tracejadas referem-se à opção de moagem 2ª com moinho vertical.

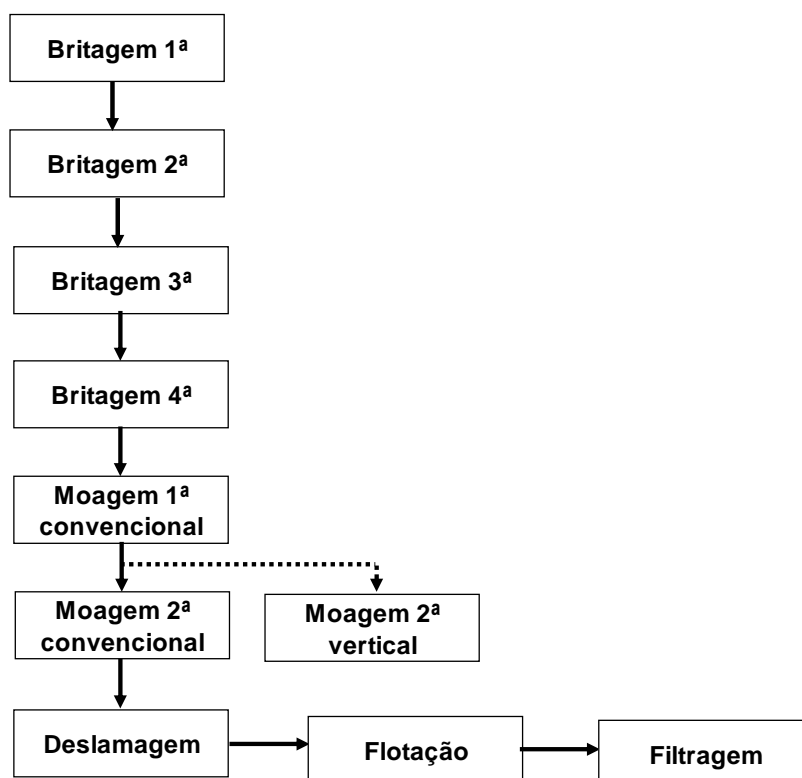


Figura 1. Rota de cominuição convencional com 4 estágios de britagem.

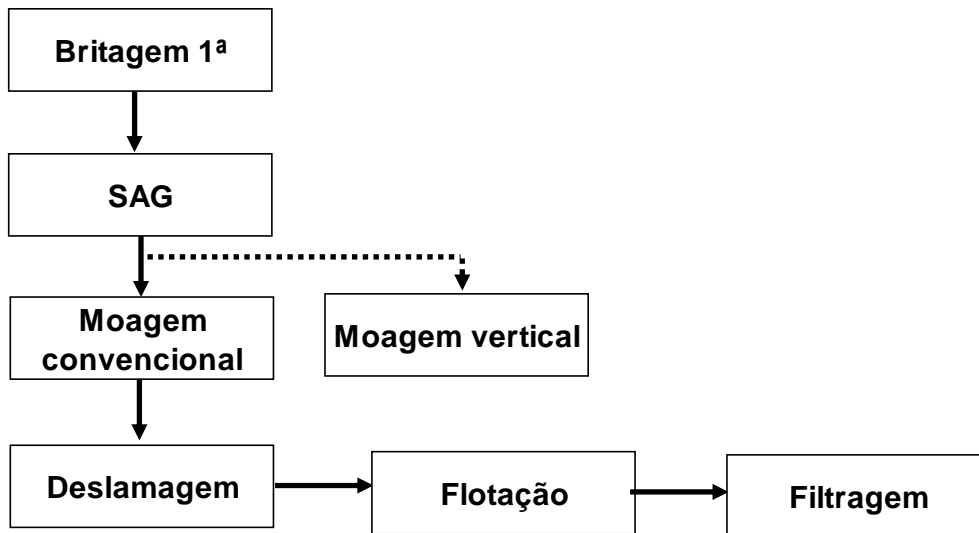


Figura 2. Rota de cominuição com 1 estágio de britagem e moagem SAG.

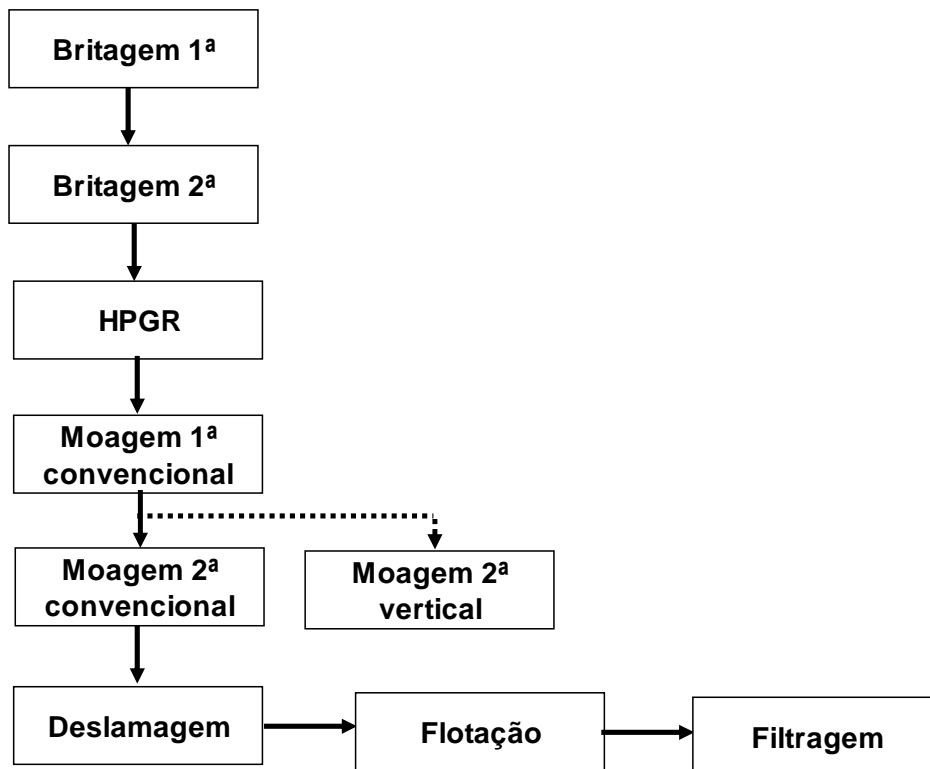


Figura 3. Rota de cominuição com 2 estágios de britagem e HPGR.

A Figura 4 mostra o dimensionamento dos equipamentos de cominuição, a partir da britagem secundária, para cada uma das rotas estudadas considerando uma alimentação anual de 60Mt e um rendimento operacional de 7800 horas por ano. Para os itabiritos friáveis, na rota convencional, foi considerada a alimentação dos britadores quaternários diretamente com o produto da secundária, eliminando assim a britagem terciária.

Tipo de Minério	BWI	Rota de Cominuição	Moinho SAG	Pressa de Rolos	Britadores	Peneiras	Moinho de Bolas	Moinho Vertical
Itabirito Friável	5,8	Convencional	NA	NA	2 Secundários 3 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	NA
		Convencional com Moinho Vertical	NA	NA	2 Secundários 3 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	9 Moinhos 2,2MW cada
		SAG com Moinho de Bolas	2 Moinhos 36'X11' 7,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 24'X36' 10,5MW cada	NA
		SAG com Moinho Vertical	2 Moinhos 36'X11' 7,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	NA	13 Moinhos 2,2MW cada
		HPGR com Moinho de Bolas	NA	2 (1,8mX1,5m) 2,5MW cada	2 Secundários	22 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	NA
		HPGR com Moinho Vertical	NA	2 (1,8mX1,5m) 2,5MW cada	2 Secundários	22 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	9 Moinhos 2,2MW cada
	7,5	Convencional	NA	NA	2 Secundários 3 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	NA
		Convencional com Moinho Vertical	NA	NA	2 Secundários 3 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	11 Moinhos 2,2MW cada
		SAG com Moinho de Bolas	2 Moinhos 36'X11' 7,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	NA
		SAG com Moinho Vertical	2 Moinhos 36'X11' 7,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	NA	18 Moinhos 2,2MW cada
		HPGR com Moinho de Bolas	NA	2 (1,8mX1,5m) 2,5MW cada	2 Secundários	22 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	NA
		HPGR com Moinho Vertical	NA	2 (1,8mX1,5m) 2,5MW cada	2 Secundários	22 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	11 Moinhos 2,2MW cada
Itabirito Semi Compacto	6,8	Convencional	NA	NA	3 Secundários 2 Terciários 5 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 27'X43' 17MW cada	NA
		Convencional com Moinho Vertical	NA	NA	3 Secundários 2 Terciários 5 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 27'X43' 17MW cada	10 Moinhos 2,2MW cada
		SAG com Moinho de Bolas	2 Moinhos 36'X13,5' 10,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 24'X36' 10,5MW cada	NA
		SAG com Moinho Vertical	2 Moinhos 36'X13,5' 10,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	NA	16 Moinhos 2,2MW cada
		HPGR com Moinho de Bolas	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	3 Secundários 2 Terciários	23 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 27'X43' 17MW cada	NA
		HPGR com Moinho Vertical	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	3 Secundários 2 Terciários	23 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 27'X43' 17MW cada	10 Moinhos 2,2MW cada
	8,8	Convencional	NA	NA	3 Secundários 2 Terciários 5 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	6 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	NA
		Convencional com Moinho Vertical	NA	NA	3 Secundários 2 Terciários 5 Quaternários	25 Peneiras 12'X25'	3 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	13 Moinhos 2,2MW cada
		SAG com Moinho de Bolas	2 Moinhos 36'X13,5' 10,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 27'X42' 15,5MW cada	NA
		SAG com Moinho Vertical	2 Moinhos 36'X13,5' 10,5MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	NA	22 Moinhos 2,2MW cada
		HPGR com Moinho de Bolas	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	3 Secundários 2 Terciários	23 Peneiras 12'X25'	6 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	NA
		HPGR com Moinho Vertical	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	3 Secundários 2 Terciários	23 Peneiras 12'X25'	3 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	13 Moinhos 2,2MW cada
Itabirito Compacto	7,8	Convencional	NA	NA	5 Secundários 4 Terciários 7 Quaternários	28 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	NA
		Convencional com Moinho Vertical	NA	NA	5 Secundários 4 Terciários 7 Quaternários	28 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	12 Moinhos 2,2MW cada
		SAG com Moinho de Bolas	2 Moinhos 36'X22' 18MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	NA
		SAG com Moinho Vertical	2 Moinhos 36'X22' 18MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	NA	19 Moinhos 2,2MW cada
		HPGR com Moinho de Bolas	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	5 Secundários 4 Terciários	26 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	NA
		HPGR com Moinho Vertical	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	5 Secundários 4 Terciários	26 Peneiras 12'X25'	2 Moinhos 28'X44' 18,5MW cada	12 Moinhos 2,2MW cada
	10,1	Convencional	NA	NA	5 Secundários 4 Terciários 7 Quaternários	28 Peneiras 12'X25'	6 Moinhos 26'X44' 16MW cada	NA
		Convencional com Moinho Vertical	NA	NA	5 Secundários 4 Terciários 7 Quaternários	28 Peneiras 12'X25'	3 Moinhos 26'X44' 16MW cada	15 Moinhos 2,2MW cada
		SAG com Moinho de Bolas	2 Moinhos 36'X22' 18MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	4 Moinhos 26'X40' 14,5MW cada	NA
		SAG com Moinho Vertical	2 Moinhos 36'X22' 18MW cada	NA	NA	2 Peneiras 12'X25'	NA	24 Moinhos 2,2MW cada
		HPGR com Moinho de Bolas	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	5 Secundários 4 Terciários	26 Peneiras 12'X25'	6 Moinhos 26'X44' 16MW cada	NA
		HPGR com Moinho Vertical	NA	2 (2,0mX1,5m) 3,3MW cada	5 Secundários 4 Terciários	26 Peneiras 12'X25'	3 Moinhos 26'X44' 16MW cada	15 Moinhos 2,2MW cada

Figura 4. Dimensionamento dos principais equipamentos de cominuição.

As Figuras 5 e 6 mostram os resultados das análises de *trade off* (CAPEX e OPEX) das rotas de cominuição em relação à rota de britagem convencional seguida de moagem de bolas para minério com WI operacional de 7,8kWh/t. Os gráficos mostram os valores relativos de CAPEX e OPEX em função do WI operacional.

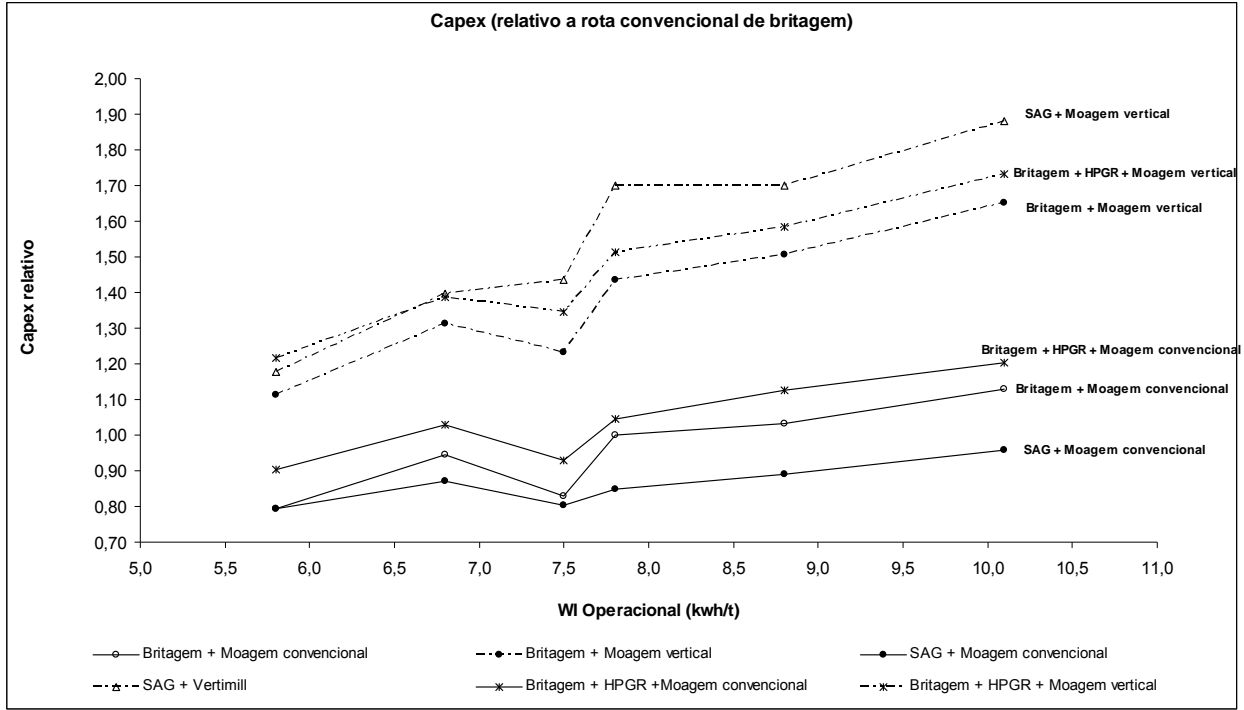


Figura 5. CAPEX relativo à rota de britagem convencional seguida de moagem de bolas em função do WI operacional.

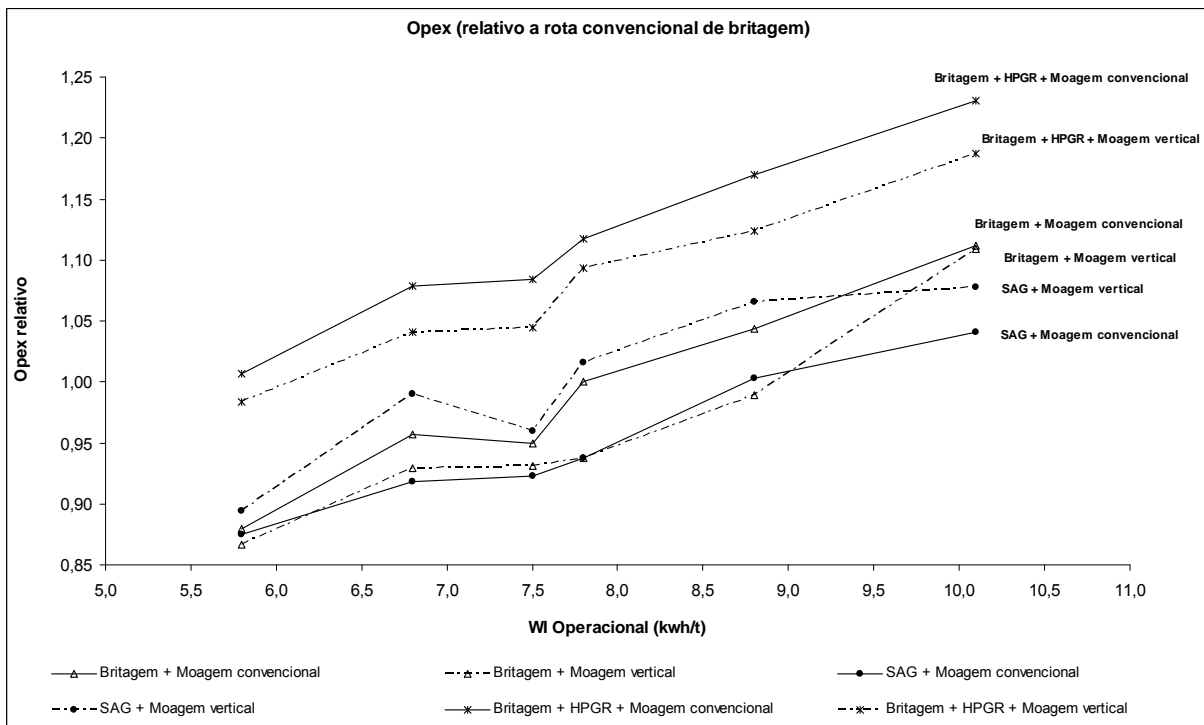


Figura 6. OPEX relativo à rota de britagem convencional seguida de moagem de bolas em função do WI operacional.

As seguintes análises podem ser feitas com base nas Figuras 5 e 6:

- a rota de cominuição de moagem SAG seguida de moagem de bolas apresenta vantagem competitiva para itabiritos com valores de WI operacional superiores a 7,8kWh/t, com redução de aproximadamente 15% do CAPEX e 7% do OPEX;
- a rota de cominuição com utilização da prensa de rolos apresentou maiores valores de CAPEX e OPEX em relação à rota de britagem convencional e moagem SAG; e
- os maiores valores de CAPEX foram obtidos com a utilização da moagem vertical em substituição à moagem de bolas convencional, mesmo considerando ganho energético de 15% em relação à moagem de bolas convencional, conforme verificado nos testes piloto. Em função da baixa potência disponível nos moinhos verticais (3000 HP), houve a necessidade de elevada quantidade destes equipamentos em relação aos moinhos de bolas convencionais.

As análises de *trade off* foram realizadas considerando rendimento operacional (horas úteis de operação por ano) de 89% (7800 horas/ano) para todas as rotas de cominuição.

A rota de cominuição com moagem SAG seguida de moagem de bolas perde a vantagem competitiva em relação à rota de britagem convencional quando seu rendimento operacional é menor ou igual a 86,85% (7608 horas/ano).

A diferença de rendimento é equivalente a 8 dias de paradas adicionais por ano ($7800 - 7608 = 192$ horas = 8 dias). Essas paradas adicionais na rota SAG podem ocorrer em função de paradas para trocas de revestimentos. Estimativas com base em testes de desgaste e abrasividade indicam a necessidade de 2 a 3 trocas de revestimentos nos moinhos SAG quando alimentados com itabiritos do Quadrilátero Ferrífero.

Outro ponto importante em relação à rota SAG é a sensibilidade da operação (consumo energético) para variações granulométricas da alimentação, conforme mostra a Figura 7.

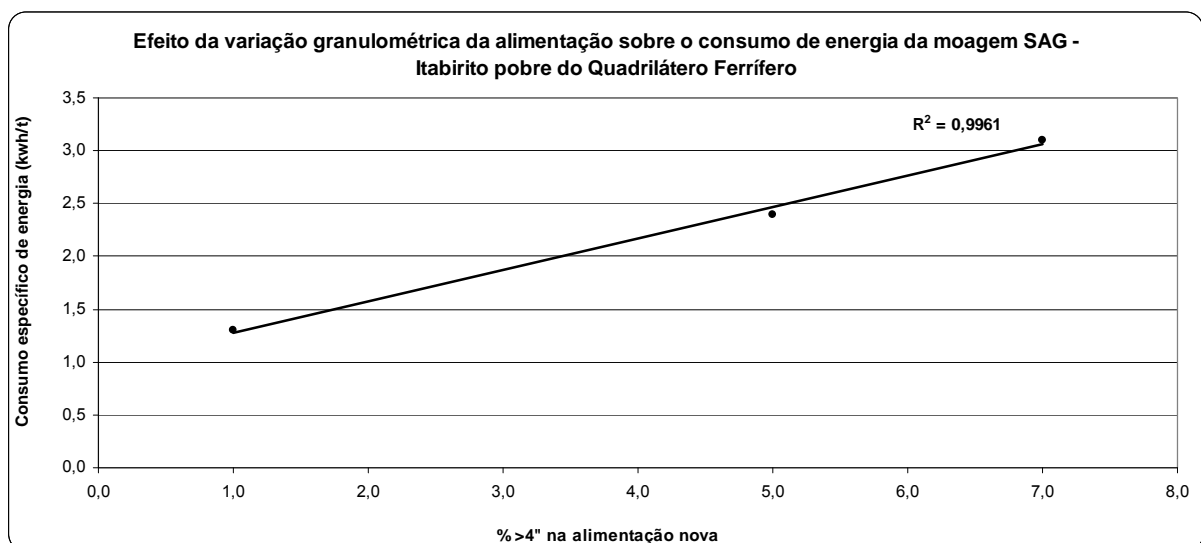


Figura 7. Efeito da variação granulométrica da alimentação sobre o consumo de energia da moagem SAG.

Essa sensibilidade operacional pode levar a oscilações da taxa de alimentação da usina e prejudicar a estabilidade do circuito de flotação, comprometendo a recuperação em massa do circuito.

4 CONCLUSÃO

As seguintes conclusões podem ser retiradas do trabalho:

- a utilização de moinhos verticais em relação aos moinhos de bola não é atrativa do ponto de vista econômico, pois devido à baixa potência (3000 HP) desses equipamentos, é necessária a utilização de um grande número de equipamentos, o que impacta significativamente no CAPEX da instalação.
- a substituição das britagens terciárias e quaternárias por prensas de rolos não mostrou vantagem econômica para nenhum circuito estudado, independente do WI do minério.
- para minérios com WI acima de 7,8kWh/t, a substituição das britagens secundária, terciária e quaternárias por moinho SAG levou a significativa redução de CAPEX e OPEX. Essa redução mostrou tendência de se acentuar com aumento do WI do minério.
- a utilização da rota SAG deve ser considerada com ressalvas, pois uma menor disponibilidade física da instalação em função da necessidade de trocas de revestimentos e uma maior sensibilidade do circuito a variações na granulometria de alimentação podem anular os ganhos econômicos mostrados por esta rota.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ALMEIDA, S.L.M., FIGUEIRA, H.V.O., LUZ, A.B. Cominuição. In: SAMPAIO, J.A., ALMEIDA, S.L.M., LUZ, A.B. *Tratamento de Minérios*. 4.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 113-193
- 2 AUSTIN, L.G. Mill Power Equations for SAG Mills, In: *Minerals and Metallurgical Processing Journal*, V. 7, n. 1, p. 57-62, 1990
- 3 CARRISSO, R.C.C., CORREIA, J.C.G. Classificação e Peneiramento. In: SAMPAIO, J.A., ALMEIDA, S.L.M., LUZ, A.B. *Tratamento de Minérios*. 4.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 197-237
- 4 CHAVES, A.P., PERES, A.E.C Teoria e Prática do Tratamento de Minérios v.3. 2.ed. São Paulo: Signus Editora, 2003. 663p
- 5 DELBONI JR, H. Modelagem e Simulação dos Circuitos de Moagem e Classificação. Apostila do Curso PMI-5004 - Modelagem e Simulação dos Circuitos de Moagem e Classificação. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.
- 6 DELBONI JR, H. Cominuição. In: FERNANDES, F. et al. *Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. P.103-131.
- 7 DONDA, J.D. *Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. (Tese de Doutorado em Engenharia de Minas e Metalúrgica)
- 8 FOGGIATO, B. *Previsão de Desempenho do Circuito de Moagem de Carajás*, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Mineral)
- 9 HERBST, J.A., LO, Y.C., FLINTOFF, B. Size Reduction and Liberation. In: FUERSTENAU, M.C., HAN, K.N. *Principles of Mineral Processing*, 2003, Littleton United States: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2003. p. 119-173

- 10 KOJOVIC, T., MORREL, S., MORRISON, R.D., NAPIER-MUNN, T.J., *Mineral Comminution Circuits; Their Operation and Optimisation*. 2nd Edition. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1999. 413p.
- 11 ROWLAND, A.R. Ball Mill Scale Up – Diameter Factors, In: *Advances in Mineral Processing*, 1986, Louisiana Estados Unidos. Anais... Littleton Estados Unidos: Society of Mining Engineers, 1986. p 605-617.
- 12 SANDVIK. *Manual de Britadores Cônicos*, 2011
- 13 WILLS, B.A., NAPIER-MUNN, T.J. *Mineral Processing Technology*, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 7nd Edition. Elsevier Science & Technology Books: 2006. 444p.