

FECHAMENTO DE CIRCUITOS DE MOAGEM COM PENEIRA DE ALTA FREQUÊNCIA¹

Klaydison Carlaile Silva²
Nilson Nedes de Paula³
Marcos Henrique dos Reis⁴
Rodrigo Fina Ferreira⁵

Resumo

O presente trabalho visa estudar a opção de fechamento de circuitos de moagem aplicado em minério de ferro utilizando peneiras de alta frequência. O estudo contemplou testes piloto de moagem, realizados no Centro de Pesquisas Tecnológicas da Vale, localizado a 35 Km de Mariana-MG na Mina de Alegria. Para desenvolvimento deste estudo, utilizou-se uma amostra típica de itabirito compacto. De forma a estabelecer parâmetros de comparação para avaliação de desempenho, realizou-se também um teste piloto de moagem contemplando o fechamento do circuito com hidrociclone. Os resultados obtidos até o momento são promissores, apresentando uma redução no consumo energético superior a 50%. Testes adicionais serão realizados para confirmação e otimização dos resultados alcançados.

Palavras-chave: Moagem; Consumo energético; Peneiramento; Alta frequência.

CLOSING GRINDING CIRCUITS WITH HIGH-FREQUENCY SCREEN

Abstract

The present work aims to study the option of closing grinding circuits using high-frequency screens with application in iron ore. The study contemplates the grinding pilot test, conducted at the Technological Survey Center of the Vale Company, located 35 km from Mariana City in the Alegria Mine. Was used for this study, a typical sample of compact itabirite. In order to establish benchmarks for performance evaluation, were also carried out a pilot test contemplating closing the circuit with hydrocyclone. The results obtained so far are promising, showing a 50% gain in power consumption. Additional tests will be performed to confirm and optimize outcomes.

Key words: Grinding; Power consumption; Screening; High-frequency.

- 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 de Processo, Gerência Desenvolvimento Processo, Belo Horizonte, Vale, Brasil.*
- ³ *Engenheiro de Processo, Gerência Desenvolvimento Processo, Mina Alegria, Vale, Brasil.*
- ⁴ *Técnico Especializado, Gerência Desenvolvimento Processo, Mina Alegria, Vale, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro de Processo, Gerência Desenvolvimento Processo, Mina Alegria, Vale, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão da Literatura

A cominuição é um conjunto de operações de redução de tamanho de partículas minerais, executada de maneira controlada e de modo a cumprir objetivos pré-definidos: permitir o manuseio do material, obtenção da liberação adequada dos minerais a serem separados, obtenção da granulometria adequada ao processo subsequente e adequação da granulometria do produto às especificações de mercado. A moagem é o último estágio de um processo de cominuição onde as partículas são reduzidas de tamanho através de uma combinação de mecanismos em ambiente a seco ou a úmido. Para que uma partícula seja fraturada é necessário que seja submetida a uma força que exceda sua resistência. A forma pela qual a partícula se fratura depende de sua natureza e do modo como a força é aplicada. Nos moinhos tubulares ocorrem simultaneamente os diversos tipos de fratura, sendo a predominância de um ou outro tipo em função das variáveis de processo. Ha três tipos principais de fraturas:⁽¹⁾

- abrasão - ocorre quando a força é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Há a concentração local de esforços, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com o surgimento de uma distribuição granulométrica de partículas finas ao lado da partícula original, cujo diâmetro é pouco diminuído. Esse tipo de fratura pode ser provocado por atrito entre as partículas ou de bolas com as partículas;
- compressão - ocorre quando a força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Assim, a força é pouco superior a resistência da partícula. Desse tipo de fratura resultam poucos fragmentos de grande diâmetro. Esse tipo de fratura ocorre em britadores de mandíbulas, giratórios, cônicos e em moinhos quando as partículas são comprimidas entre dois ou mais corpos moedores, ou partículas maiores; e
- impacto - ocorre quando a força é aplicada de forma rápida e em intensidade muito superior a resistência da partícula, como acontece, por exemplo, com britadores de Impacto ou em moinhos, nas zonas de queda das bolas ou barras. Resulta dessa fratura uma distribuição granulométrica de partículas finas.

Durante muito tempo, os processos de cominuição foram amplamente estudados em relação à energia consumida, o que é lógico devido ao fato da energia representar uma parcela importante nos custos de cominuição. Assim, para expressar a reação entre a energia consumida no processo e a granulometria do produto têm sido empregadas, ao longo do tempo varias leis. Para o referido trabalho foi utilizado a Equação de Bond.

1.2 Equação de Bond

Foi desenvolvida em 1952, após uma intensa campanha de ensaios de laboratório e correlações industriais. É uma lei empírica, a qual Bond pretendeu dar um apoio teórico ao preconizar que a energia consumida na cominuição seja proporcional ao comprimento das fissuras iniciais que se desenvolvem no fraturamento. Após sua formulação e, devido ao fato de levar a resultados ajustados aos reais, a Equação de Bond passou a ser amplamente utilizada na seguinte expressão:

$$W = WI(10/\sqrt{P} - 10/\sqrt{F})$$

em que:

- W : energia aplicada, em kWh/t curta;
- WI : designado como *Work Index*, em kWh/t curta; e
- P, F : tamanho em micrometros, em que passam 80% da massa do produto e da alimentação, respectivamente.

O *Work Index*, segundo Bond, é uma constante do material representando a energia necessária para cominuir de uma granulometria representada por um diâmetro infinito a uma representada por 80% passante em 100 micrometros. A consideração da energia como uma função do trabalho de moagem, entretanto, tem validade em condições bastante limitadas. Deve-se considerar, primeiramente, que o trabalho útil de moagem, ligado a uma função do diâmetro, é uma fração muito reduzida da energia consumida nos equipamentos de cominuição. Assim, a maior parte da energia consumida é devido a perdas nos equipamentos, o que vem demonstrar a estreiteza da aplicabilidade das chamadas Equações de cominuição. Entretanto, para um mesmo tipo de equipamento em condições semelhantes de operação, essas leis podem ter aplicações, como ocorre, por exemplo, com a Equação de Bond em relação aos moinhos de barras e de bolas.⁽¹⁾

1.3 Aspectos Gerais do Estudo

Usualmente no tratamento de minério de ferro, os circuitos de moagem são fechados com hidrociclones. Porém, já existem aplicações de peneira de alta frequência fazendo esta mesma função. Na Rússia a mineradora KMaruda opera uma mina de minério com *run of mine* de aproximadamente 34% de Fe. O processo de enriquecimento desse minério é realizado via concentração magnética em três estágios, sendo que, antes da alimentação do segundo, existem duas linhas de moagem operando com dois moinhos de bola em cada e circuito fechando com hidrociclones. Foram realizados testes em escala industrial, substituindo os hidrociclones por peneiras de alta frequência montadas com tela de 100 μm . Os resultados obtidos foram bastante promissores, apresentando ganho no consumo energético da moagem superior a 50% e aumento absoluto de 2,2% na recuperação metálica da concentração magnética.⁽²⁾

O presente trabalho visa estudar o fechamento de circuitos de moagem utilizando peneiras de alta frequência (PAF) ao invés de hidrociclones. No Brasil, a aplicação de circuitos de moagem no tratamento do minério de ferro, aumentou muito nos últimos anos e tende em continuar aumentando, uma vez que, as principais jazidas de minério de ferro apresentam baixos teores de Fe, elevados teores de SiO_2 e baixo grau de liberação do principal mineral de ganga (quartzo). Para tanto, é necessário o emprego de moagem em malha que possibilite a geração de produtos nas etapas subsequentes de concentração, com qualidade compatível às exigências de mercado.

2 OBJETIVOS

Comparar a performance entre circuitos de moagem fechados com peneira de alta frequência e circuitos convencionais de moagem fechados com hidrociclones.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo consistiu basicamente na escolha de uma amostra padrão para realização de dois testes pilotos de moagem em circuito fechado: o primeiro contemplando na classificação dois hidrociclones e o segundo uma peneira de alta frequência. A malha de moagem para esses dois testes foi 0,15 mm. Os testes foram realizados nas instalações piloto do Centro de Pesquisas Tecnológicas (CPT) de minério de ferro da Vale da Gerencia de Desenvolvimento de Processos de Tratamento de Minério (GADMF), localizadas na Mina de Alegria em Mariana, MG, Brasil.⁽³⁾

O equipamento de moagem utilizado nos testes foi um moinho de bolas tipo overflow com 5' (1,54 m) de diâmetro x 3,12' (0,95 m) de comprimento. A classificação do primeiro teste foi realizada em dois estágios contemplando um hidrociclone convencional de 4" em cada. A classificação do segundo teste foi realizada em uma única etapa contemplando uma peneira de alta frequência tipo Multi Feed com tela de 106 µm. Os principais parâmetros adotados para a moagem desses dois testes são apresentados na Tabela 1.⁽³⁾

Tabela 1. Principais parâmetros adotados na moagem

Parâmetros	Teste 01 Moagem/Hidrociclone	Teste 02 Moagem/PAF
Grau de enchimento (%)	28	33
% de sólidos alim. moinho	75,96	64,84
Carga de bolas (kg)	2712	2301

Para desenvolvimento deste estudo, utilizou-se uma amostra típica de itabirito compacto oriunda de uma das minas da Vale localizada no Quadrilátero Ferrífero. A amostra de *run of mine* foi britada em 12,5 mm, homogeneizada e dividida em duas alíquotas: uma para o teste de moagem com hidrociclone e a outra para o teste de moagem com PAF (peneira de alta frequência). A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica dessas alíquotas. Nota-se que a alimentação da moagem do teste com PAF ficou um pouco mais fina que a do teste com hidrociclone. Devido à dificuldade em manusear amostra com alta granulação, entende-se que essa diferença é aceitável e atende aos objetivos dos testes.⁽³⁾

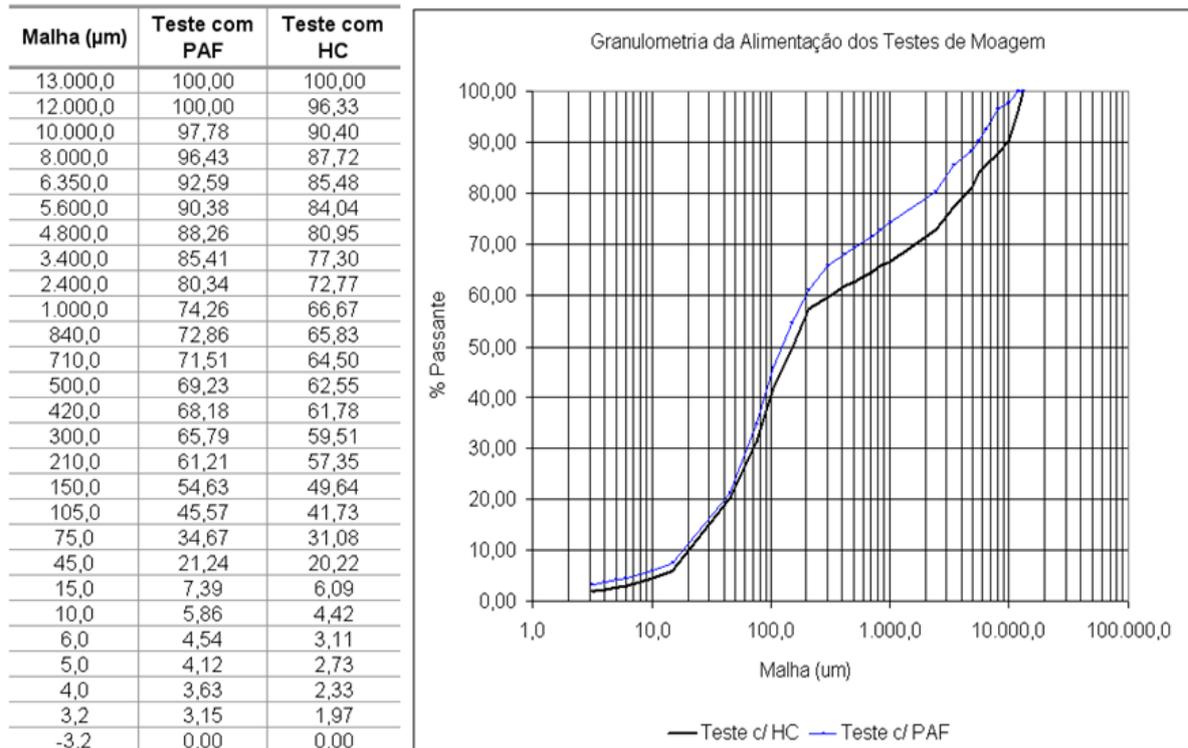


Figura 1. Distribuição granulométrica da alimentação da moagem.

As Figuras 2 e 3 apresentam fluxogramas simplificados dos circuitos utilizados nesses dois testes piloto.

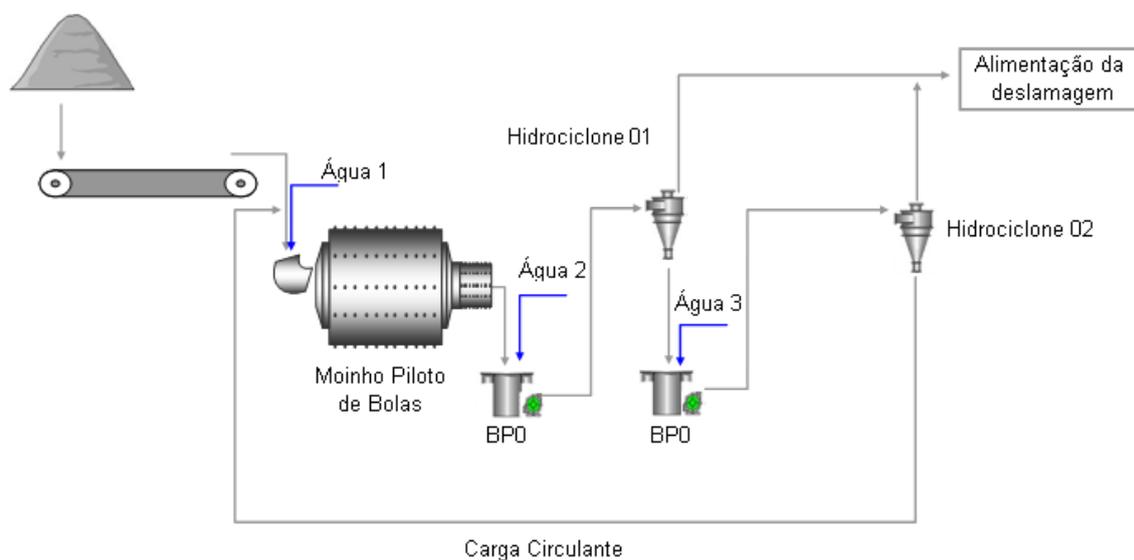


Figura 2. Fechamento do circuito de moagem com hidrociclone.

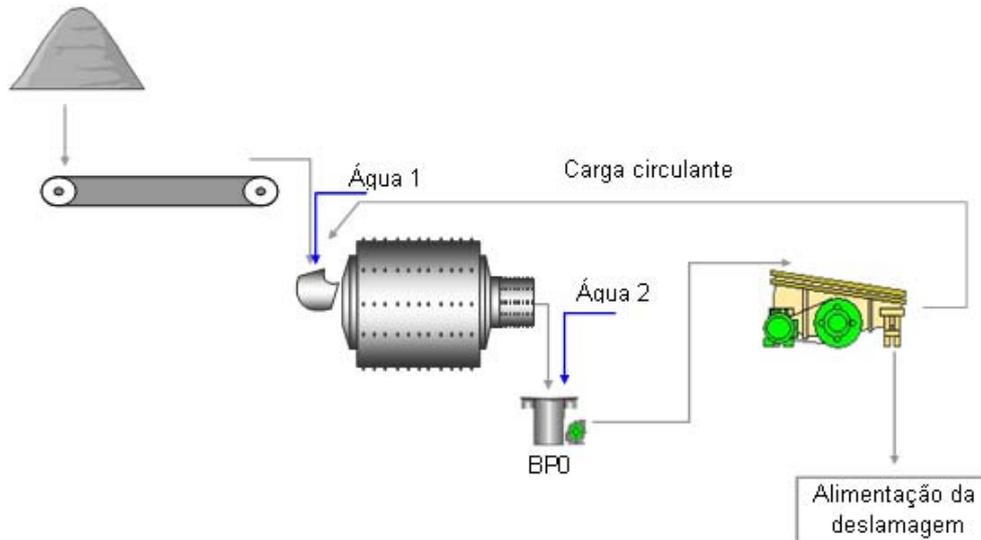


Figura 3. Fechamento do circuito de moagem com PAF.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2 e 3 apresentam os principais resultados obtidos nos dois testes piloto. Nota-se que a diferença absoluta do percentual menor que 0,15 mm entre o produto moído e a alimentação total é de 17,71% para o teste de moagem com hidrociclone e 21,93% para o teste de moagem com PAF, evidenciando-se assim, uma maior moagem nesse último teste. Comparando o percentual de lama (partículas menores que 10 µm) entre a alimentação nova e o produto moído, percebe-se que, o teste com hidrociclone apresenta um aumento de 131% contra 149% no teste com PAF. Isso pode ser explicado pelo fato do teste com PAF ter moído mais que o teste com hidrociclone.

Tabela 2. Principais resultados do teste piloto de moagem com hidrociclone

Fluxo	% Massa	Taxa (t/h)	% Sólidos	% < 0,15 mm	% < 0,010 mm
AL Nova	100,00	5,22	95,94	49,64	4,42
OS Trommel	1,93	0,10	89,56	0,91	0,19
US Trommel	231,85	12,10	75,91	60,76	5,85
OF HCCL 1	68,72	3,59	36,73	91,99	14,23
UF HCCL 1	163,12	8,51	82,06	47,61	2,32
OF HCCL 2	29,34	1,53	22,89	94,80	10,10
UF HCCL 2	133,78	6,98	81,95	37,26	0,62
Produto Classific.	98,07	5,12	32,59	92,83	12,99
Produto moído	233,78	12,20	76,00	60,26	5,80
AL Total	233,78	12,20	76,00	42,56	2,25

Tabela 3. Principais resultados do teste piloto de moagem com PAF

Fluxo	% Massa	Taxa (t/h)	% Sólidos	% < 0,15 mm	% < 0,010 mm
AL Nova	100,00	10,61	94,09	54,63	5,86
OS Trommel	0,43	0,05	89,83	5,97	1,01
US Trommel	153,71	16,32	64,03	58,52	8,76
OS Peneira	54,15	5,75	44,28	2,84	0,10
US Peneira	99,57	10,57	30,75	91,63	12,53
Produto Classific.	99,57	10,57	30,75	91,63	12,53
Produto Moído	154,15	16,36	64,08	58,37	8,74
Al. Total	154,15	16,36	64,08	36,44	3,84

A Tabela 4 e Figura 4 apresentam um comparativo dos principais resultados obtidos. Tomando como base o teste piloto de moagem fechando o circuito com peneira de alta frequência, nota-se uma redução significativa no percentual de carga circulante (133,78% para 54,15%) e aumento da taxa (t/h) de alimentação (5,22 t/h para 10,61 t/h). Remetendo-se assim, a uma redução no consumo energético superior a 50% (3,63 kWh/t para 2,11 kWh/t), que se apresenta como o principal ganho desse estudo, uma vez que, para os demais parâmetros não foi identificado ganhos.

Tabela 4. Comparação de Resultados

Parâmetros	Moagem com HC	Moagem com PAF
Alimentação Nova (t/h)	5,22	10,61
Carga Circulante (%)	133,78	54,15
OS Tromel (t/h)	0,10	0,05
Produto Classificação (% > 0.15 mm)	7,06	8,37
Produto Classificação (% < 0.010 mm)	12,99	12,53
Consumo Energético (kWh/t Alim)	3,63	2,11
Grau de Enchimento (%)	28	33

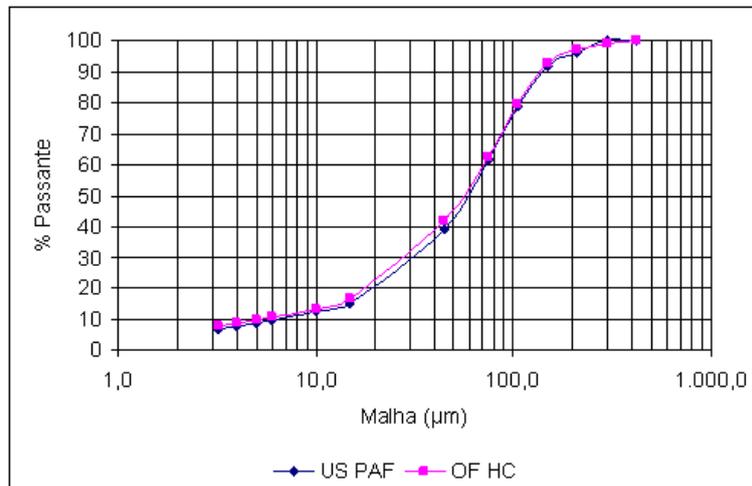


Figura 4. Distribuição Granulométrica do Produto da Classificação.

Diante da diferença apresentada na distribuição granulométrica das amostras que alimentaram respectivamente os testes com hidrociclone e PAF, realizou-se uma simulação utilizando o *software Usimpac*. Nessa simulação considerou-se para o teste com PAF a mesma granulometria de alimentação e o mesmo grau de enchimento (28%) do teste com hidrociclone. O objetivo foi verificar se o ganho obtido no consumo energético seria confirmado com a equalização da granulometria de alimentação dos dois testes. Antes de iniciar a simulação, calibrou-se o *USIMPAC* com informações oriundas do balanço de massas do teste piloto com PAF, adotando como premissa partição em massa de 35% para oversize da peneira (valor obtido no teste piloto). A Tabela 5 apresenta os principais resultados dessa simulação. Nota-se que, o consumo energético da simulação considerando as premissas supracitadas aumentou muito pouco em relação ao resultado do teste piloto (2,11 kWh/t – Teste Piloto para 2,22 kWh/t - Simulação), o que de certa forma, ratifica o ganho no consumo energético apresentado na Tabela 3.

Tabela 5. Calibração e Simulação do Teste com PAF

Calibração				
Fluxo	Massa (t/h)	% Passante Acumulado		
		150 µm	1000 µm	10 µm
Alimentação Nova	10,61	58,20	77,83	9,43
Alimentação Total	16,36	38,61	71,37	6,20
Descarga do Moinho	16,36	58,35	85,71	8,05
Alimentação da PAF	16,31	58,35	85,71	8,05
OS Trommel	0,05	58,35	85,71	8,05
US PAF	10,56	88,79	100,00	12,30
OS PAF	5,75	2,44	59,45	0,23

Balanco de Massas				
Fluxo	Massa (t/h)	% Passante Acumulado		
		150 µm	1000 µm	10 µm
Alimentação Nova	10,61	58,20	77,83	9,43
Alimentação Total	16,36	38,75	70,27	6,16
Descarga do Moinho	16,36	58,42	84,43	8,79
Alimentação da PAF	16,32	58,52	84,60	8,76
OS Trommel	0,05	25,34	25,91	20,38
US PAF	10,57	88,80	100,00	13,47
OS PAF	5,75	2,84	56,28	0,10

Simulação				
Fluxo	Massa (t/h)	% Passante Acumulado		
		150 µm	1000 µm	10 µm
Alimentação Nova	8,60	49,64	66,67	4,42
Alimentação Total	13,28	32,86	66,24	2,92
Descarga do Moinho	13,28	57,80	87,78	7,19
Alimentação da PAF	13,24	57,80	87,78	7,19
OS Trommel	0,04	57,80	87,78	7,19
US PAF	8,56	88,30	100,00	11,03
OS PAF	4,68	2,04	65,44	0,16
Consumo energético			2,22 kW/ton	
Partição p/ OS PAF			35%	

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos resultados obtidos no teste de moagem com peneira de alta frequência terem sido promissores, apresentando, em relação ao teste com hidrociclone, uma redução no consumo energético de 3,63 kWh/t para 2,11 kWh/t, é importante ressaltar que um único teste piloto não é suficiente para confirmar qualquer benefício advindo da adoção deste equipamento no circuito de moagem..

As simulações realizadas no *software USIMPAC*, confirmaram a tendência de ganho no consumo energético quando do fechamento do circuito de moagem com PAF para o teste em questão, porém, a adoção deste tipo de circuito em usinas de tratamento de minério de ferro depende de uma campanha bem mais extensa de testes e de estudos econômicos.

Estima-se um maior custo de investimento (CAPEX) na aplicação de peneiras de alta frequência para fechamento de circuitos de moagem. Quanto ao OPEX (custo operacional), é necessário verificar se a redução do consumo energético obtida no teste piloto é suficiente para cobrir o maior CAPEX.

Neste ponto, é importante lembrar que, em um circuito de moagem para minério de ferro, nem sempre o consumo energético é o maior custo envolvido, o consumo de

corpo moedor e revestimento possuem grande peso na composição do OPEX do circuito de moagem (peso este, às vezes, maior que o custo da energia). Outro fator importante que deve ser considerado quando da análise da aplicação de peneiras de alta frequência em substituição a hidrociclones em circuito de moagem, é a maior capacidade/flexibilidade de ajuste do circuito com hidrociclones. Pode-se controlar com maior facilidade a carga circulante utilizando-se hidrociclones caso haja alterações nas características de moabilidade e/ou performance do moinho. (mesmo que para tanto haja um engrossamento do corte, que muitas vezes pode não significar perda na qualidade do produto final). Novos testes piloto serão realizados para confirmação e otimização dos resultados obtidos até o momento.

REFERÊNCIAS

- [1] MAIA, G.S. (2002). Introdução à Moagem: Manual de Treinamento. Material elaborado para treinamento de pessoal – Mina Timbopeba, Mariana-MG, Vale, Gerência Geral de Tecnologia – GETEK, 2002.
- [2] STEVEN, B.V.; JOBE, E.W.; LAERCIO, G.A. Fine Sizing With The Derrick Stack Sizer Screen. Tucson, Arizona, USA, 2009, p. 8-9.
- [3] PAULA, N.N. Teste Piloto de Moagem com Peneira de Alta Frequência. Relatório Técnico do Centro de Pesquisas Tecnológicas, Complexo Mariana, Mina de Alegria, Mariana-MG, Dezembro de 2010.