

OTIMIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DE MOINHO DE BOLAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO DEM*

Flávia Vargas¹
Thiago Nunan²
Homero Delboni Junior³

Resumo

Os revestimentos de moinhos de bolas desempenham duas funções principais no processo de moagem: proteger a carcaça do ambiente agressivo que ocorre no interior do moinho e transmitir energia à carga de bolas. Diante disso, a otimização tem, portanto, o desafio de prolongar a vida útil do perfil e otimizar o desempenho do moinho. Algumas características do revestimento, como relação A/B, número e altura de *lifter* e ângulo de ataque são extremamente relevantes na eficiência do processo de moagem. Por meio da análise do histórico das variáveis de processo, e com auxílio de simulações DEM, esses parâmetros foram otimizados no revestimento do moinho W, localizado na usina de concentração de Vazante. A otimização proporcionou redução da variabilidade da potência entre o período final e inicial da vida útil do revestimento e, como consequência, maior estabilidade da capacidade de processamento do circuito no período pós troca. Além disso, houve um aumento de vida útil do perfil otimizado que operou 21.604 horas, valor 25% superior ao praticado até então. Com isso, demonstrou-se ser possível a otimização simultânea de desempenho e da vida útil de revestimentos.

Palavras-chave: Otimização; Revestimento de moinhos; Simulação DEM.

MILL LINERS OPTIMIZATION USING DEM MODELLING

Abstract

Ball mill liners perform two main functions in grinding process: protect the mill shell from the aggressive milling environment and delivery input power to the charge. When it comes to liners optimization the challenge are to prolong the service life and improve grinding performance. Some liners characteristics such as A / B ratio, lifters number, lifter height, and attack angle are extremely relevant to grinding process. By analyzing process data, and through DEM simulations application, these parameters were improved on W-mill liner, located at Vazante concentration plant. The new profile promoted a reduction of power variability between the final and the initial life cycle intervals and, therefore, better stability to circuit operation. In addition, the new liner service life reached 21,603 hours, 25% higher compared to the previous one in use. This optimized profile therefore proved to be able to improve its functions by achieving superior process performance combined with longer service life.

Keywords: Mill liners; DEM modelling; Optimization liner design.

¹ Engenheira de Minas, mestranda, Engenheira de Processo, Processo, NEXA, Vazante, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Químico, M.Sc, Gerente de Processo, Processo, NEXA, Vazante, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, PhD, Professor, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos de moinhos de bolas desempenham duas funções no processo de moagem: proteger a carcaça do ambiente agressivo que ocorre no interior do moinho e transmitir energia à carga de bolas, proporcionando seu levantamento [1]. A otimização tem, portanto, o desafio de prolongar a vida útil do perfil e otimizar o desempenho do moinho.

Enquanto que para alcançar maior vida útil são desenvolvidas soluções combinando diferentes materiais, para alavancar o desempenho da moagem é necessário otimizar a geometria do revestimento.

Taggart (1945) comenta que a geometria do revestimento, combinada às características da polpa, determina a movimentação da carga de corpos moedores. Em moinhos de bolas, podem ser instalados diferentes tipos de perfis como onda simples, onda dupla, hi-low ou hi-hi. Independentemente do perfil, um dos parâmetros mais importantes no *design* é o quociente entre o espaçamento das barras e a altura destas, conhecido como relação A/B. A figura 1 ilustra essa relação segundo Powell (2006).

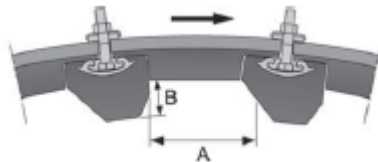


Figura 1. Relação A/B.

O efeito da variação da relação A/B na capacidade e consumo energético é investigado em [2]. A figura 2 mostra os resultados obtidos pelo autor e permite concluir que valores entre 4 e 4,5 para relação A/B são considerados adequados.

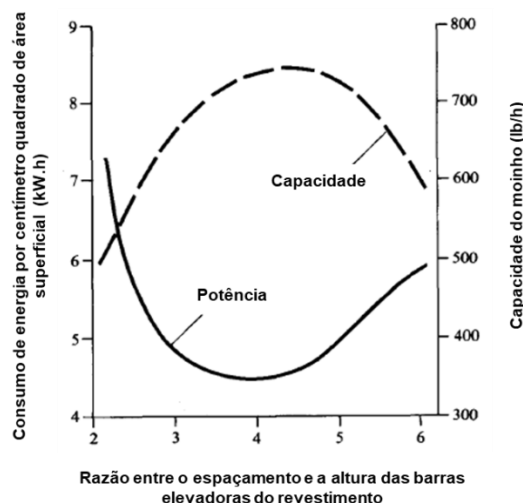


Figura 2. Efeito da relação A/B na capacidade e consumo energético do moinho

Com o desgaste do revestimento ocorre variação na relação A/B e aumento do diâmetro interno do moinho, o que pode aumentar a potência consumida em até 6% [3]. Nem sempre a maior potência se converte em maior capacidade, pois ao final da vida útil o revestimento pode não ser efetivo em levantar a carga de bolas devido à perda de altura de *lifter*. Em muitas operações ocorre uma redução significativa de

desempenho durante 10 a 25% do período inicial e 5 a 10% do período final da vida útil do revestimento [4].

Portanto, para otimizar o revestimento é necessário avaliar seu comportamento ao longo de toda a vida útil de forma a mitigar perdas, especialmente nos períodos inicial e final da operação.

Atualmente existem no mercado programas de simulação computacional em duas ou três dimensões que auxiliam na busca pela melhor solução para cada moagem em particular.

As simulações DEM, desde os anos 90, vêm sendo largamente utilizadas como ferramenta para previsão do comportamento da carga de bolas e sua relação com o revestimento utilizado. A partir da manutenção da velocidade de rotação e grau de enchimento constantes, o método é utilizado para variar a altura do *lifter* e evidenciar a relação entre parâmetros do revestimento e a trajetória da carga de bolas [5]. A figura 3 apresenta os resultados.

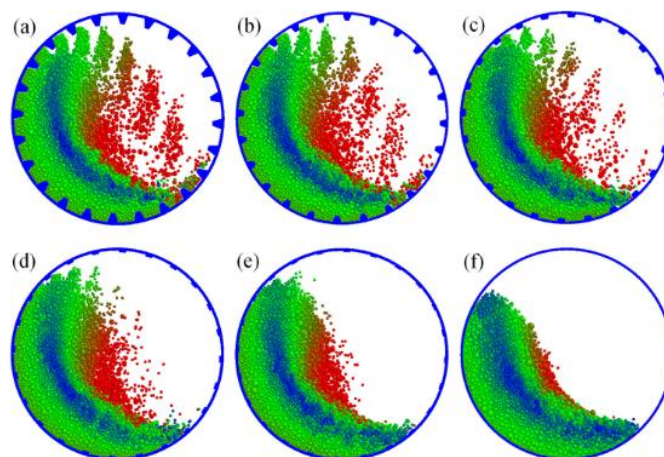


Figura 3- Efeito da altura do lifter: a) 25mm, b) 17 mm, c) 10 mm, d) 5 mm e) 3 mm e f) 0mm

O efeito da redução do *lifter* no levantamento da carga de bolas é claro e prejudicial ao processo de moagem.

A junção do efeito dessas variáveis, aliada ao grau de enchimento, proporcionam diferentes regimes de moagem [6].

O regime de cascata ocorre com maior frequência em situações de baixa velocidade de rotação, e com revestimentos mais lisos. Nele, as bolas se movimentam da região do “ombro” da carga e rolam sobre a superfície livre até atingir a posição do “pé”. A figura 4 demonstra esse efeito.

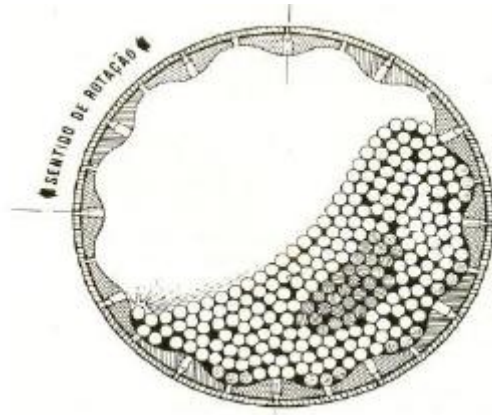


Figura 4 - Carga de corpos moedores em regime de cascata

Com o aumento da velocidade de rotação e revestimentos mais acentuados, proporcionando aos corpos moedores energia suficiente para que se desprendam do “ombro” da carga e caiam na região do “pé”, ocorre o movimento conhecido como regime de catarata. A figura 5 apresenta esse regime.

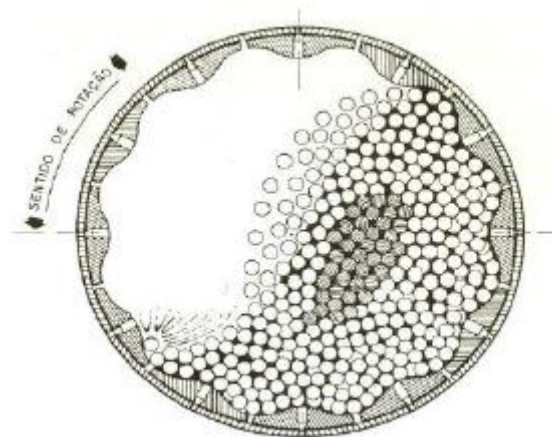


Figura 5- Carga de corpos moedores em regime de catarata

Os dois regimes de movimentação da carga ocorrem de modo simultâneo durante o processo de moagem, no entanto, o número de corpos moedores em catarata aumenta à medida que a velocidade de rotação aumenta e/ou que revestimentos com maior altura de *lifter* são utilizados.

Na planta de Vazante, propriedade da Nexa Resources, o comportamento da potência do moinho W indicava que o revestimento utilizado poderia ser otimizado. Nessa ocasião o perfil utilizado era onda simples simétrico, fabricado em borracha com insertos metálicos e vida útil de 16.000 horas. A figura 6 apresenta o perfil.

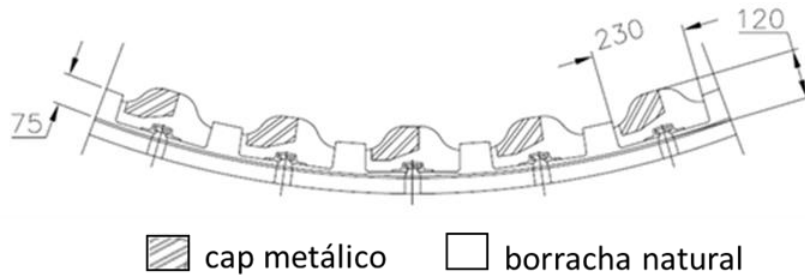


Figura 6 - Perfil onda simples simétrica

A figura 7 mostra o comportamento da potência antes e depois da troca de revestimentos realizada em maio de 2014.

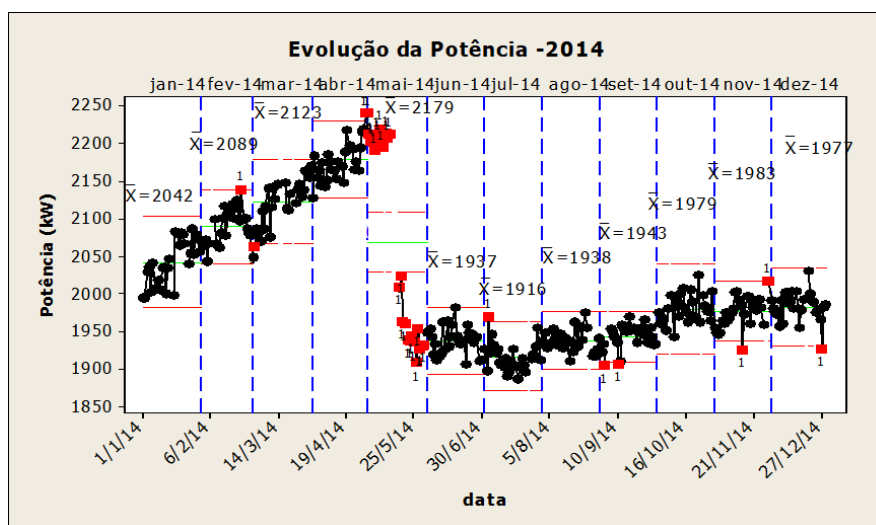


Figura 7- Comportamento da potência em 2014

Observa-se um intenso ganho de potência nos meses finais da vida útil do perfil e uma perda significativa nos meses iniciais. Essa variabilidade é prejudicial ao processo e motivou a otimização desse perfil com objetivo principal de reduzir o impacto da troca no comportamento da moagem W.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

O histórico das variáveis de processo do circuito de moagem foi acessado por meio da interface do Excel com o sistema PIMS, um *software* de coleta e armazenamento de dados. O tratamento de dados, gráficos e análises estatísticas foi realizado no *software* Minitab 16.

O revestimento onda simples foi avaliado através de diferentes índices, como: relação A/B, altura do *lifter*, área para transporte de polpa e comportamento qualitativo da carga moedora. Os mesmos índices foram utilizados para o desenvolvimento de um perfil otimizado.

Foram realizadas simulações DEM com auxílio do *software* Rocky DEM.

O revestimento otimizado foi instalado industrialmente e para comparações de desempenho foram utilizados dados referentes a potência (kW), capacidade (t/h) e qualidade (retido acumulado na malha 100#) do circuito W no período anterior e posterior à troca de revestimento.

2.2 Resultados e Discussão

O perfil onda simples apresentava relação A/B igual a 1,8, valor inferior ao recomendado pela literatura. Com esse perfil a área disponível para transporte de polpa é muito baixa, igual a 8.837 mm². A altura do *lifter* é de 45mm e o ângulo de ataque igual a 35°.

A figura 8 apresenta o resultado das simulações DEM para o perfil onda simples. Para a demais variáveis utilizadas na simulação foram considerados os valores praticados na moagem W.

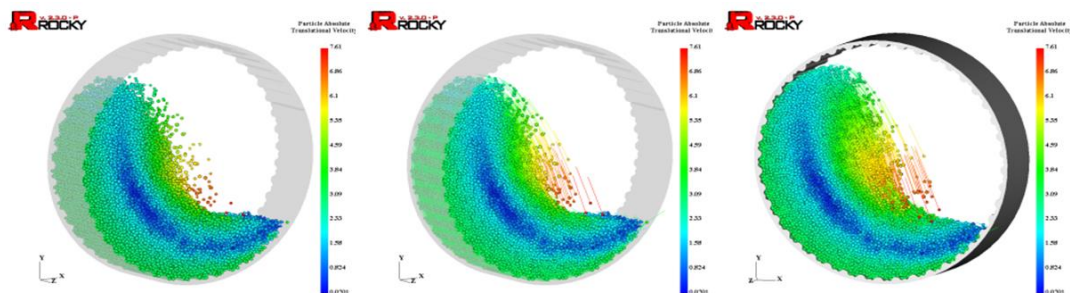


Figura 8 - Simulação DEM para perfil onda simples

As cores apresentadas refletem a velocidade dos corpos moedores nessa região, sendo que as partículas em vermelho são as que possuem maior velocidade, seguidas por aquelas nas cores amarelas, verde e azul claro. A região em azul mais escuro é conhecida como zona morta de moagem, já que teoricamente essa região não apresenta movimentação da carga, ou seja, não contribui para moagem.

A análise desses resultados indica uma baixa movimentação da carga moedora, com reduzido levantamento e extensa região de zona morta. É possível observar ainda que esse perfil não proporciona energia suficiente para o arremesso das bolas no pé da carga. A simulação indica que o regime prioritário de moagem é cascata, com poucos corpos moedores em catarata.

Mantendo-se constantes as variáveis de processo e número de *lifters*, foram realizadas diversas simulações DEM variando a relação A/B, área de transporte e ângulo de ataque do revestimento.

Os melhores resultados foram alcançados com a utilização de um perfil hi-low ilustrado na figura 9.

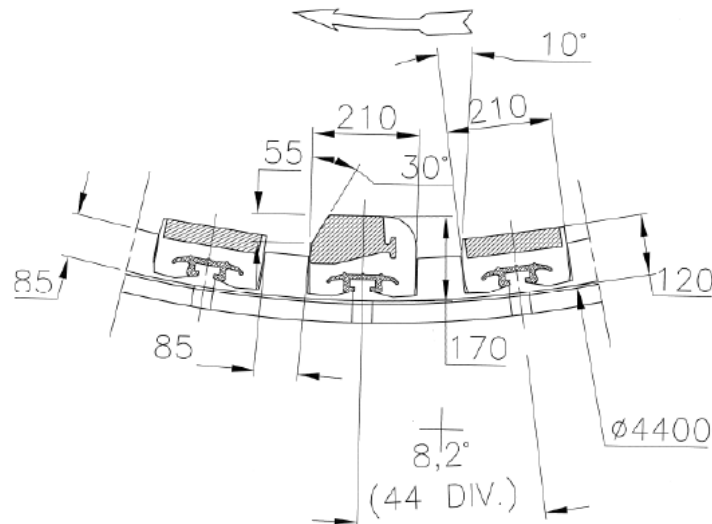


Figura 9 - Perfil de revestimento hi-low

A área de transporte com perfil hi-low é aproximadamente duas vezes maior que a alcançada com o perfil onda simples. Além disso, a relação A/B é o dobro, gerando um *lifter* 40 mm maior. O ângulo de ataque é de 30°, inferior ao do perfil onda simples.

O revestimento hi-low, em função da maior altura da placa, proporciona uma redução no diâmetro interno do moinho W. Considerando os revestimentos novos, o diâmetro passa de 4,18 metros para 4,12 metros.

A redução do diâmetro interno tem como consequência a redução da potência de trabalho, no entanto, como o *lifter* é maior, a tendência é de maior levantamento da carga de bolas, e, portanto, maior ocorrência de eventos de impactos.

Essa situação é comprovada pela análise da movimentação da carga de bolas na simulação DEM desse cenário, apresentada na figura 10.

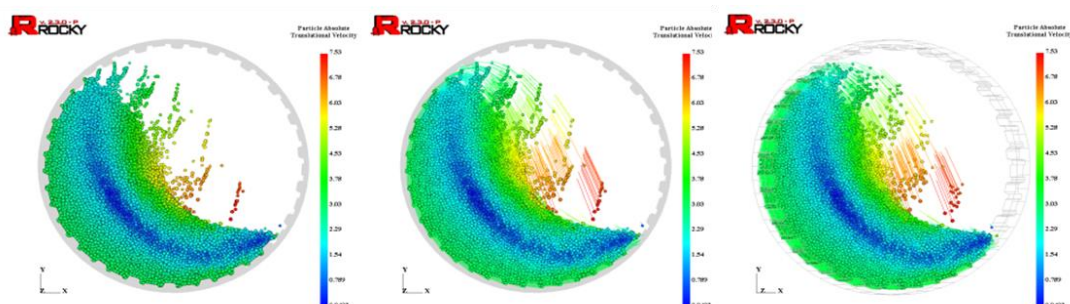


Figura 10 - Simulação DEM para perfil hi-low

Para esse perfil, observa-se elevada movimentação da carga moedora (bolas), com alto levantamento e arremesso exatamente no pé da carga. A frequência de bolas no regime de catarata aumentou em relação à simulação apresentada na figura 8. Pode-se verificar também uma redução na região de zona morta de moagem.

A comparação das simulações permite concluir que o perfil hi-low é mais adequado para a aplicação, pois a partir do maior levantamento da carga é capaz de

proporcionar maior frequência de quebra por cisalhamento e impacto, aumentando a relação de redução nas frações grosseiras da alimentação. Além disso, a simulação indica também uma redução da zona morta com o uso desse perfil, o que favorece a geração de finos no interior do moinho.

A figura 11 sobrepõe os dois perfis para fins de comparação.

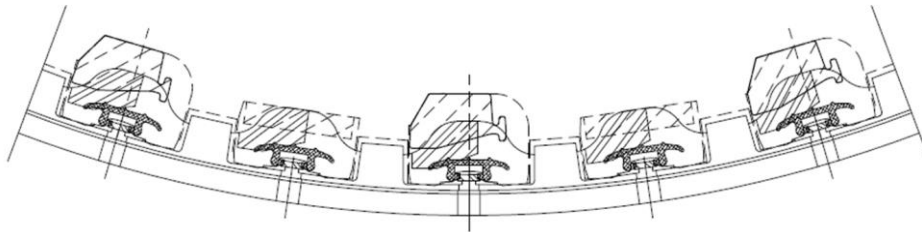


Figura 11 - Sobreposição dos perfis onda simples e hi-low

Além de melhor desempenho, o perfil hi-low apresenta maior expectativa de vida útil, igual a 20.000h.

Diante disso, o perfil foi fabricado e instalado na moagem W em substituição ao revestimento onda simples na data de 31/05/16.

A figura 12 apresenta o comparativo para potência entre as trocas realizadas em 2014 (troca 1) e em 2016 (troca 2).

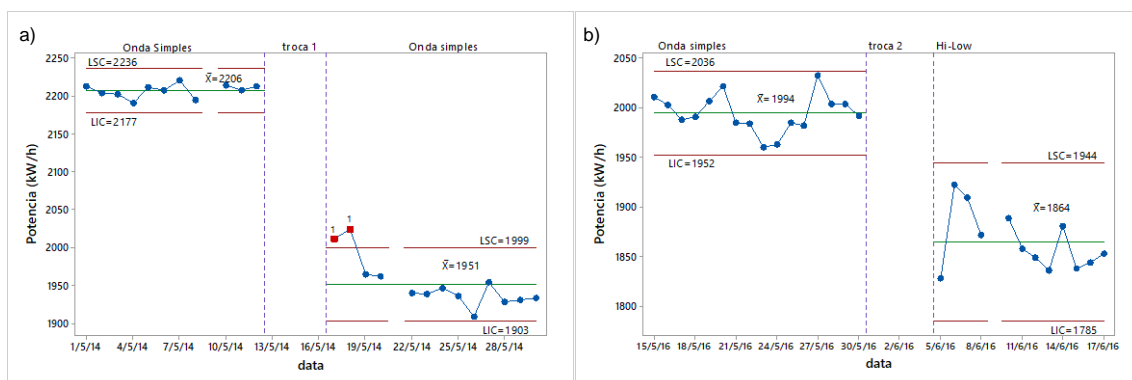
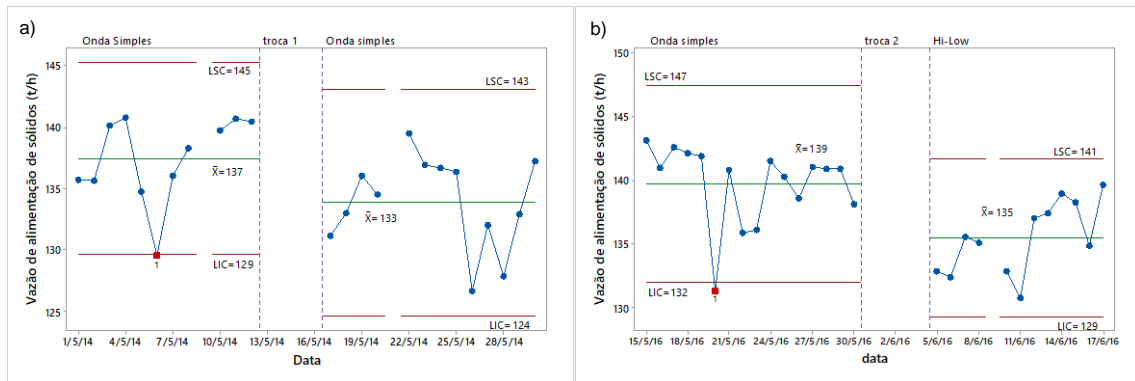


Figura 12 - Comparativo de potência nas trocas de 2014 em a) e 2016 em b)

A redução da potência de trabalho, observada na figura 12, é função da redução do diâmetro interno do moinho e é indesejada no processo. A geometria do revestimento hi-low tem como objetivo mitigar esse efeito, a partir de um maior levantamento da carga e aumento dos eventos de quebra por impacto e cisalhamento, conforme previsto nas simulações DEM.

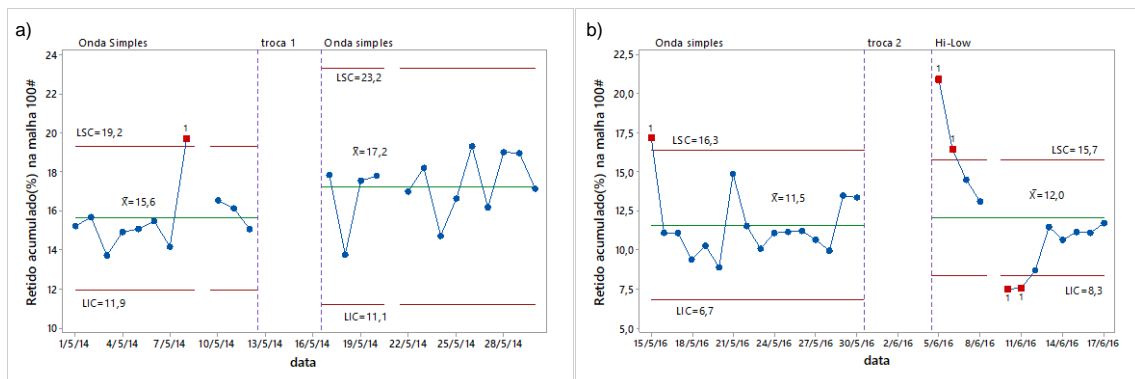
Na figura 13 pode-se observar o comportamento da capacidade de alimentação do circuito nos mesmos períodos.



É possível perceber que em 2016, com a implantação do revestimento hi-low, o efeito negativo da queda de potência na capacidade foi menor. Na figura 13a) observa-se uma redução média na alimentação nova de 4 t/h acompanhada de um aumento de três pontos nos limites de variação do processo após a troca.

Em 13b) a redução da vazão média de alimentação de sólidos foi de 4 t/h, exatamente o mesmo valor após a troca pelo revestimento onda simples em 2014. Apesar disso, observa-se um processo de moagem mais estável após a troca, quando comparado com 2014. A variação do processo após a troca não aumentou, apresentando pelo contrário, uma redução de três pontos.

A figura 14 apresenta o comportamento da qualidade do produto do circuito nas trocas analisadas nesse trabalho.



A piora na qualidade do produto da moagem W observada em 14a) é consequência da queda da potência. Como em 14b) esse efeito foi mitigado por uma maior eficiência de movimentação da carga, proporcionada pelo revestimento hi-low, observa-se a manutenção da qualidade de produto do circuito.

3 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados indicam que o revestimento possui papel relevante na eficiência operacional do circuito de moagem. No entanto, no ambiente industrial não é possível isolar essa influência de outros fatores relevantes para o processo, o que torna a análise comparativa de diferentes perfis uma tarefa ingrata.

No moinho W, observou-se uma maior ineficiência da moagem no período final da vida útil nas duas trocas de revestimento investigadas nesse trabalho, independentemente do perfil adotado.

Este fato comprova a relevância do papel do revestimento no levantamento da carga moedora e sua influência na produção de finos do circuito.

Os indicadores para avaliação de desempenho de revestimentos adotados nesse trabalho (relação A/B, simulações DEM, altura do *lifter*) conduziram ao desenvolvimento de um perfil com melhores resultados e devem ser considerados em qualquer trabalho de otimização.

Na moagem W, foi alcançada a redução da variabilidade na potência entre o período final e inicial da vida útil do revestimento e, como consequência, maior estabilidade da capacidade de processamento do circuito após a troca.

Além disso, houve um aumento de 25% de vida útil. Enquanto o perfil onda simples simétrica apresentou vida útil de 17.235 horas, o hi-low mostrou resultados de 21.604 horas trabalhadas.

Agradecimentos

Agradecemos a Nexa Resouces pelo apoio a esse trabalho. Agradecemos também aos fornecedores de revestimento para moinhos por compartilharem do nosso entusiasmo e contribuírem para o alcance da melhor solução.

REFERÊNCIAS

- 1 Powell, M.S.; Hilden, M.M.; Werasekara, N.; Yahyaei, M.; Toor, P.; Franke, J.; Bird M. A more holistic view of mill liner management. In: 11th Mill Operators Conference. Hobart, Outubro, 2012.
- 2 Howat, D.D.; vermeulent, L. A. The design of linings for rotary mills: a major factor in the throughput and consumption of energy and metal. In: J. S. Afr. Inst. Min. Metal/., vol. 86, no. 7. Jul. 1986. pp. 251-259.
- 3 Beraldo J. L. Moagem de minérios em moinhos tubulares. São Paulo: Edgar Blucher LTDA;1987.
- 4 Yahyaei, M. Powell, M.S. Toor P.Tuxford A., Limpus A. Relining efficiency and liner design for improved plant performance. Miner Eng, 83 (2015), pp. 64-77
- 5 Xiaolei B., Guoqiang W., Hongdi W., Shuai W., Lv W. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: experimental study and DEM simulation. Miner. Eng., 105 (1 May 2017), pp. 22-35
- 6 Taggart A. F. Handbook of Mineral Dressing Ores and Industrial Minerals. John Wiley and Sons, 1945.