

CONTROLE DE PROCESSO NO BOMBEAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO POR MINERODUTO*

*Henrique Dias Gatti Turrer¹
Marcelo Nazaro Silva²
Henrique Lopes Martins Pereira³
Claudio Luis Goulart⁴
José Francisco Cabello Russo⁵
Denilson Rodrigues de Araujo⁶*

Resumo

O complexo industrial do Minas-Rio utiliza um mineroduto com 529 km de extensão para transporte do concentrado de minério de ferro até a unidade industrial da filtragem e porto de embarque do pellet feed. Desde a fase de projeto, testes de realizados em escala de bancada têm fornecido importantes informações para controle da reologia da polpa bombeada. Com base nos resultados desses testes foi possível verificar o efeito da estabilidade da polpa, tipo de controlador de reologia e granulometria dos sólidos na de tensão de escoamento e viscosidade relativa da polpa de concentrado de minério de ferro remoído. O controle de algumas características da polpa bombeada, como granulometria dos sólidos, pH e percentual de sólidos garantiu a obtenção das propriedades reológicas necessárias para o bombeamento seguro através do mineroduto e resultou numa melhora de desempenho significativa ao longo dos anos.

Palavras-chave: minério de ferro, mineroduto, reologia, bombeamento

PROCESS CONTROL IN THE IRON ORE PUMPING THROUGH PIPELINE

Abstract

The Minas-Rio industrial complex uses a pipeline with extension of 529 Km to transport the iron ore concentrate to the filtering industrial complex and exporting port. Since project phase, bench lab tests have provided important information for the pumped slurry rheology control. Based in these tests results was possible to verify the effects of slurry stability, rheology controller type and particle size distribution in the regrinded concentrate yield stress and relative viscosity. Controlling some characteristics of pumped slurry, such as particle size distribution, pH and solids concentration guaranteed to achieve the necessary rheology properties for its safe pumping through pipeline and resulted in a performance improvement over the years.

Keywords: iron ore, pellet feed, pipeline, rheology, pumping.

¹ *Engenheiro de Minas, Doutor, Coordenador de processos, Desenvolvimento de Processos, Iron Ore Brazil, Anglo American, Conceição do Mato dentro, Rodovia MG-10, Km-185, Córrego Pereira, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil*

² *Engenheiro de Produção, Engenheiro de Controle de Processo, Iron Ore Brazil, Anglo American, Conceição do Mato, MG, Brasil.*

³ *Engenheiro Industrial Mecânico, Coordenador de Operação do Mineroduto, Iron Ore Brazil, Anglo American, MG, Brasil.*

⁴ *Gerente do Mineroduto, Iron Ore Brazil, Anglo American, MG, Brasil*

⁵ *Gerente do Desenvolvimento de Processos, Iron Ore Brazil, Anglo American, MG, Brasil*

⁶ *Gerente de Qualidade e Processos, Iron Ore Brazil, Anglo American, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O concentrado de ferro bombeado pelo mineroduto do Minas-Rio da Anglo American totalizou, nos 5 primeiros meses de 2019, quase 8,2 milhões de toneladas. O minério é extraído da jazida da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, MG. O processamento contempla as etapas de cominuição, por britadores de mandíbulas e grelhas, britadores cônicos e peneiras, prensas de rolos, moinhos de bolas e hidrociclones, seguido por deslamagem, flotação, remoagem em moinhos verticais (para adequação da granulometria de transporte), espessamento, bombeamento através de mineroduto, até o município de São João da Barra, RJ, onde é realizada a separação sólido-líquido para embarque, conforme Figura 1.

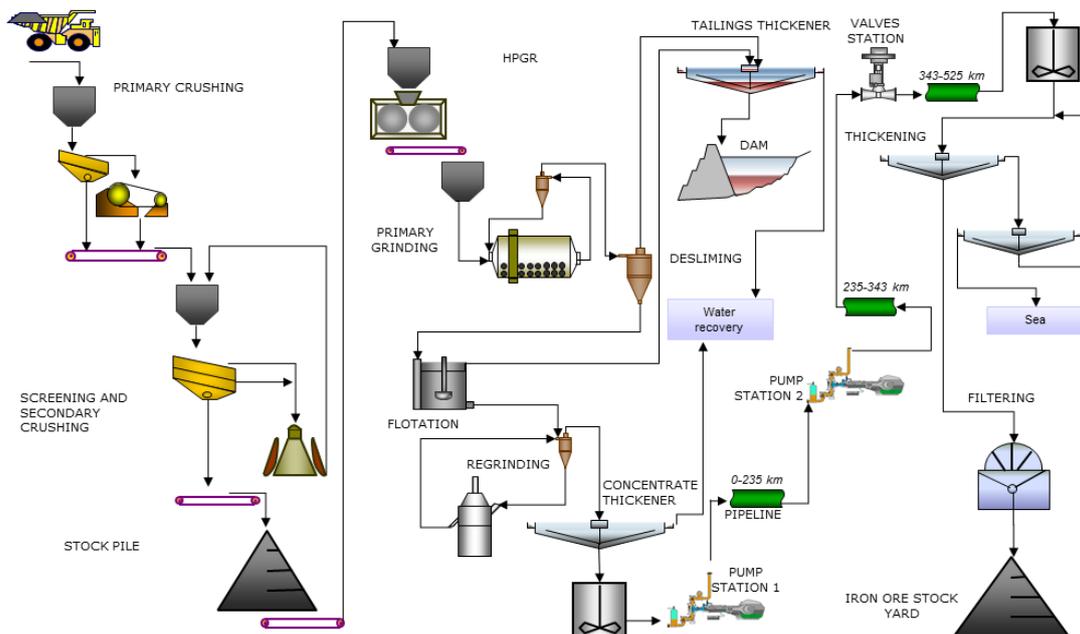


Figura 1. Fluxograma simplificado do processamento mineral no Minas-Rio.

O concentrado, após espessamento, é bombeado por 2 km até os 4 tanques de homogeneização, cada um com 6.173 m³, da estação de bombeamento 1 (EB1). Nesses tanques é feita a dosagem final de cal e são coletadas amostras para monitoramento e controle das condições da polpa a ser bombeado. A EB1 possui 8 bombas de deslocamento positivo GEHO TZPM 2000 que fazem o bombeamento do concentrado até a estação de bombeamento 2. A EB2, por sua vez, possui 10 bombas similares à EB1 e fornece a energia necessária para transporte até o destino final. A EB2 ainda possui 1 tanque igual ao da EB1. O mineroduto também conta com uma estação de válvulas necessária para aliviar a pressão do sistema durante o trecho de declive até o nível do mar. O mineroduto tem diâmetro externo de 26/24 polegadas e foi projetado para bombear minério de ferro, da elevação 774 até 8,3 metros acima do nível do mar. Dez estações (intermediárias) de monitoramento de pressão (PMS), instaladas ao longo da linha, fornecerão os valores on-line para o monitoramento do mineroduto. O perfil de elevação do mineroduto é exibido na Figura 2.

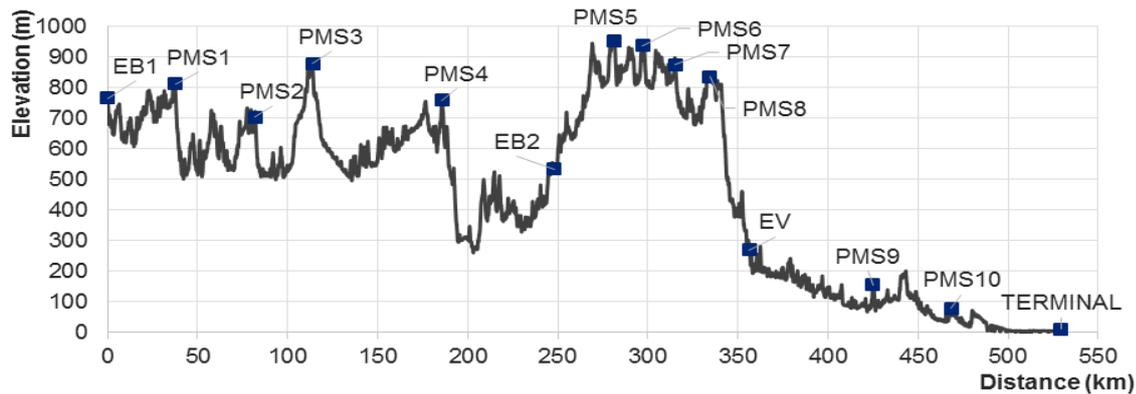


Figura 2. Perfil topográfico do mineroduto (EB=estação de bombas; PMS=estação de monitoramento de pressão; EV=estação de válvulas).

Atualmente a planta de beneficiamento produzindo em ritmo aquém da capacidade do mineroduto. Por isso, são bombeados intercaladamente batches de água e polpa.

O transporte de concentrado de ferro por mineroduto é uma prática comum mundialmente. Outros exemplos de unidades produtoras que o utilizaram são os da Savage River, na Tasmânia, Peija Colorada, no México (Pitts e Aude, 1977) e Samarco no Brasil (Stetler, 1982), entre outros.

Para ser bombeado, o concentrado deve possuir características que garantam o bombeamento seguro do mesmo. A avaliação dessas características pode ser feita através de simulações (Li et al. 2018), ou, como é mais comum, através de testes de laboratório (Sampaio, 2002; Bragança e Silva, 2007). Dentre esses testes, os mais recomendados são os ensaios de reologia, de penetração e ângulo de repouso.

Inúmeras propriedades da polpa e seus constituintes, como por exemplo a hidrofobicidade das partículas minerais (Yang et al., 2018), podem influenciar esses testes. Porém, merecem destaque a distribuição granulométrica, estabilidade da polpa e percentual de sólidos.

A estabilidade da polpa é governada pelas forças atrativas/repulsivas entre partículas descritas pela teoria DLVO estendida (Lins e Adamian, 2000). Dultz et al. (2019) demonstraram que o ponto de isoelétrico (PIE) dos minerais e a proporção entre minerais de diferentes PIE poderiam influenciar a reologia de uma polpa. Scales et al. (1998) apresentam uma revisão sobre os reagentes, inorgânicos e orgânicos, que podem afetar a estabilidade de uma polpa.

Mangesana et al. (2008) demonstraram que a viscosidade aparente e a tensão de escoamento, de areais com d_{50} variando de 300 até 90 μm , aumentaram com a concentração de sólidos e o tamanho das partículas nas diferentes taxas de cisalhamento avaliadas. Waters et al. (2014) identificaram o efeito do adensamento da polpa na viscosidade da mesma, para dois tipos de minérios, Figura 3. O comportamento significativamente diferente na viscosidade da polpa na maior densidade foi atribuída à maior quantidade filossilicatos na amostra A, que atuam na tensão de escoamento.

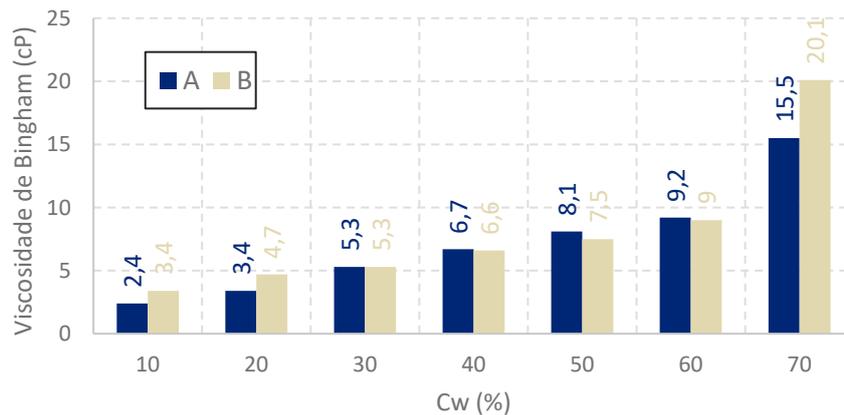


Figura 3. Viscosidade de diferentes minérios em função da concentração de sólidos (adaptado de Waters et al.; 2014).

Li et al. (2018) demonstraram que o bombeamento de partículas de grande tamanho é facilitado pela presença de partículas de pequeno diâmetro, que atuam como um “lubrificante” natural facilitando o escoamento da polpa.

No Minas-Rio, faz-se a adição de cal hidratado e adequação da granulometria do concentrado em moinhos antes do seu transporte pelo mineroduto.

Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados de testes de caracterização tecnológica usados no controle de processo para bombeamento seguro de concentrado de minério de ferro através do mineroduto do Minas-Rio.

2 DESENVOLVIMENTO

Amostras coletadas no processo industrial ou produzidas em escala piloto, com características bem definidas, foram enviadas para laboratório externo. Um reômetro tipo cilindros concêntricos, Haake Viscotester 550, foi utilizado para realização dos testes de reologia. Foram realizadas leituras de tensão de cisalhamento para diferentes taxas de cisalhamento num intervalo pré-determinado. Durante os testes, o percentual de sólidos foi modificado. Diversas variáveis foram testadas e, a seguir, as mais relevantes serão discutidas. A determinação da porcentagem de sólidos, da área superficial específica e da distribuição granulométrica das partículas da amostra se deu, respectivamente, por pesagem e secagem das massas úmidas e secas, peneiramento a úmido e a seco, utilizando a série ASTM/US, e difração a laser, em granulômetro Cilas 1064L, e permeabilímetro de Blaine.

Os testes exibidos na Figura 4 mostraram o efeito da dispersão da polpa nas propriedades reológicas, em diferentes percentuais de sólidos. Nesses testes, a adição de soda resultou na elevação do pH e diminuição da tensão de escoamento. A viscosidade, pouco afetada pela na faixa de pH estudada, foi, assim como a tensão de escoamento, fortemente influenciada pela adição de coagulante orgânico. Esses efeitos podem ser explicados pela alteração da estabilidade da polpa, que atua nos ensaios de reologia.

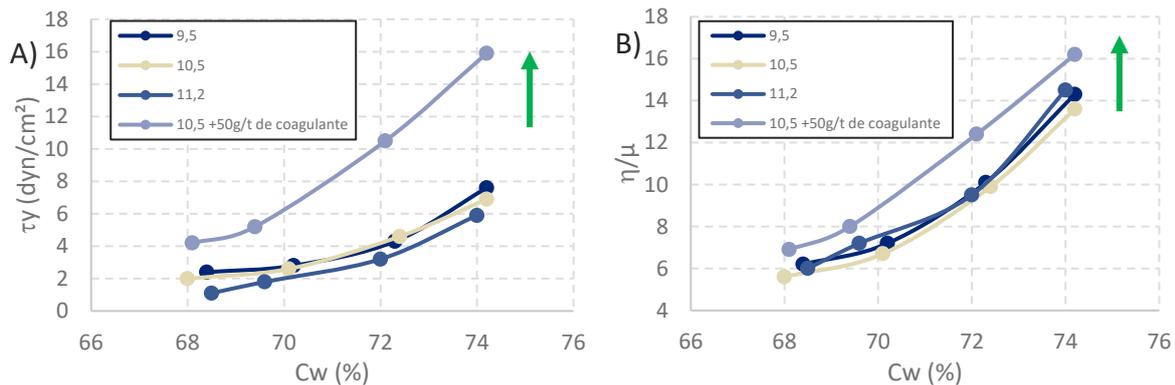


Figura 4. Efeito do pH e da adição de controlador de reologia na tensão de escoamento (A) e viscosidade relativa da polpa (B).

Assim como nos resultados da Figura 4, a reologia foi fortemente afetada pelo percentual de sólidos da polpa. Porém, não foi observado interação significativa dessa variável com outras e, por isso, os demais resultados mostrados de testes executados em laboratório externo, Figura 5 e Figura 6, representam o desempenho obtido com polpas à 70% de sólidos em peso.

Para simular o efeito do cisalhamento da polpa foram realizados testes de reologia em polpas submetidas a um período de agitação. O sistema de agitação foi colocado em um recipiente hermeticamente fechado para simular o ambiente dentro do mineroduto.

Os resultados exibidos na Figura 5 mostraram o efeito de dois reagentes nas propriedades reológicas.

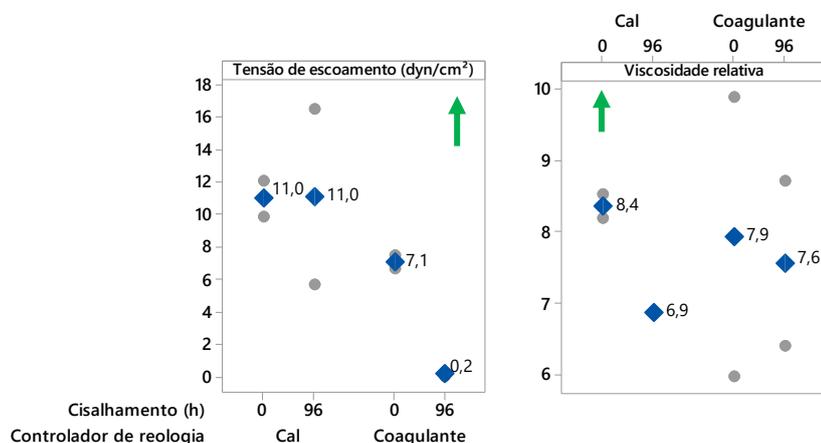


Figura 5. Efeito do tempo de agitação nas propriedades reológicas de polpas com 70% de sólidos em peso.

Algumas amostras passaram por procedimentos ligeiramente diferentes de preparação após a coleta e antes da realização dos testes de reologia. Na Figura 6 cada uma das 3 amostras foi coletada em momentos distintos do processo. Por isso, exibiam características próprias, como composição mineralógica. Além disso, tiveram a granulometria ajustada para apresentar diferentes distribuições granulométricas. A amostra X e Y, produzidas em escala piloto, foram secas a temperatura ambiente e repulpada para, posteriormente, ter a adição de coagulante e floculante, na mesma dosagem praticada pelo espessador de concentrado

industrial, e cal para ajuste de pH. A amostra de polpa Z, por sua vez, foi coletada industrialmente e não passou por nenhum processo de preparação antes dos testes. Análises de variância mostraram que o percentual passante nas malhas de -37 e -10 microns não se mostraram significativos para a viscosidade e tensão de escoamento, indicando a existência de ruídos significativos não considerados. Porém, observou-se uma tendência geral, para uma mesma amostra, de aumento do limite de escoamento em função do percentual de material de menor granulometria.

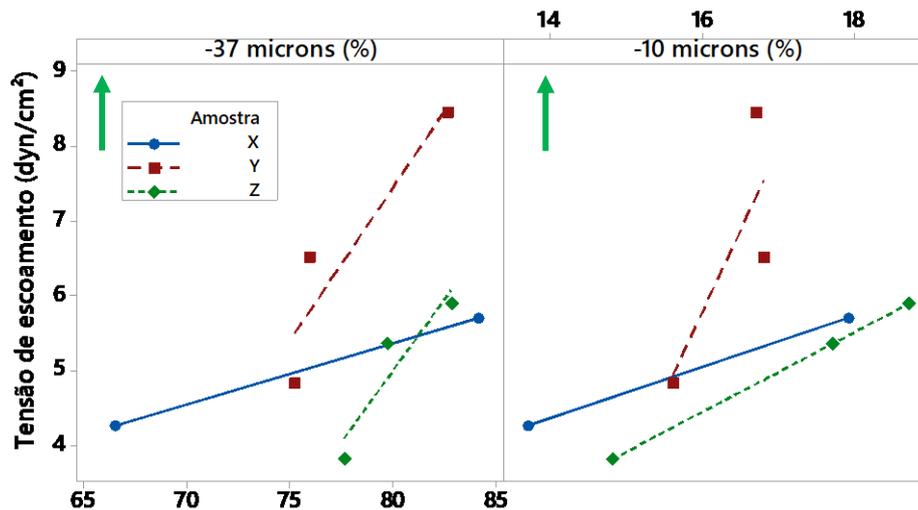


Figura 6. Efeito da granulometria da amostra (passante na peneira de 400#) nas propriedades reológicas de polpas com 70% de sólidos em peso.

A avaliação desses resultados permitiu estabelecer algumas variáveis e limites de controle para garantir a operação segura do mineroduto. Para isso, compostos dos batches de polpa são coletados e submetidos a testes de reologia, em reômetro tipo cilindros concêntricos, Anton Paar RheolabQC. Foram realizadas leituras de tensão de cisalhamento para uma taxa de cisalhamento descendente e que variou dentro de um intervalo pré-determinado, no laboratório da Anglo American localizado na EB1.

Além da diferença nos equipamentos, o procedimento para avaliação da reologia das polpas realizado nos dois laboratórios foi ligeiramente diferente. Isso impossibilita uma comparação direta entre os valores absolutos dos resultados. Contudo, a análise dos dados não ficou comprometida, uma vez que foi feita de forma comparativa para os resultados de um mesmo laboratório.

O histórico de variáveis medidas no laboratório da EB1 demonstra a significativa melhoria ao longo dos anos de todos os parâmetros de processo controlados no mineroduto.

O pH da polpa, Figura 7a, é diretamente influenciado pela concentração de cal na polpa. A cal se desassocia em íons Ca^{++} e CaOH^+ que promovem a coagulação da polpa (Iwasaki, 1980). Estudos com polpas de minério de ferro indicaram que é necessário uma altíssima concentração de íons cálcio, ou, conseqüentemente, pH fortemente alcalino, para que o sistema se torne disperso. Araujo Jr. et al. (2009) mostraram que a faixa ótima de coagulação para o uma polpa de concentrado de

minério de ferro ocorreu entre 11 e 12. Dessa forma, o aumento da média de pH e a redução da variabilidade do mesmo mostrados na Figura 7a são um forte indicativo da melhoria do estado de coagulação da polpa.

A velocidade de sedimentação dos sólidos presentes na polpa, Figura 7b, também é um importante parâmetro de controle. Quanto maior a velocidade, menor o tempo de parada no bombeamento necessário para que ocorra a completa deposição dos sólidos na parte inferior da tubulação. A complexidade na retomada de operação de um mineroduto é diretamente proporcional a quantidade de material sedimentado. Além disso, a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional a velocidade de bombeamento.

A Figura 7c mostra como o percentual de sólidos em peso teve um significativo aumento na média e redução na variabilidade. O efeito disso é extremamente positivo para o bombeamento do material, conforme explicado por Mangesana et al. (2008) e Waters et al. (2014), e demonstrado em todos os resultados realizados em laboratório externo, mas apresentados somente na Figura 4.

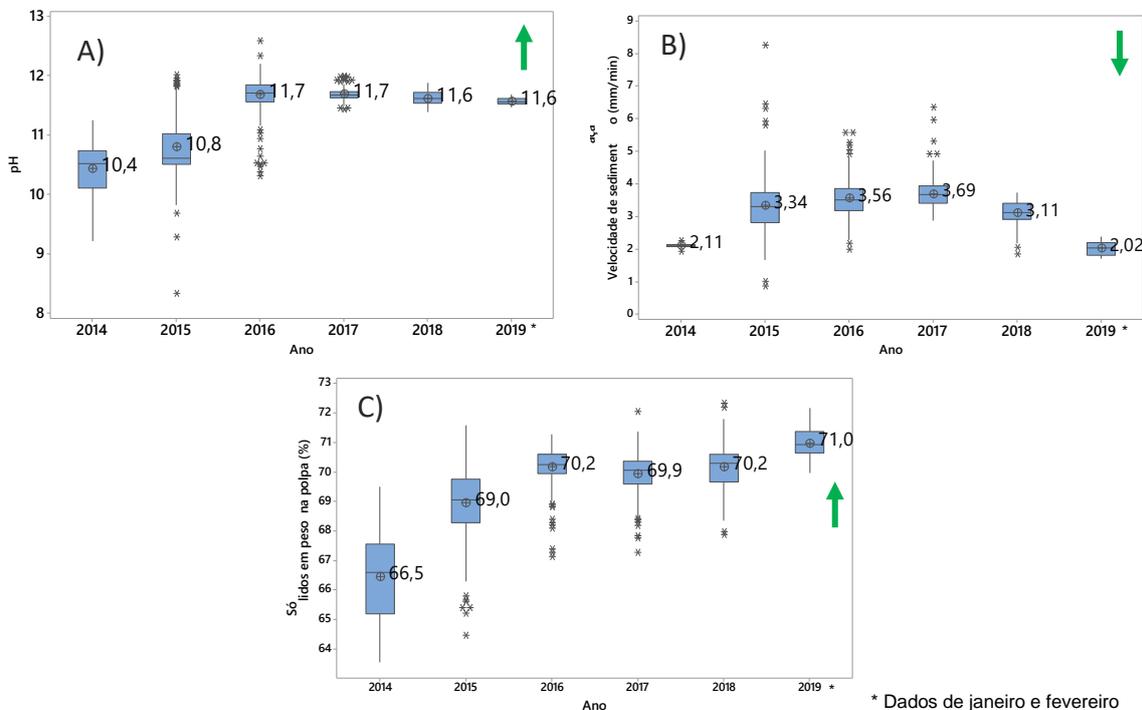


Figura 7. Histórico de pH (a), velocidade de sedimentação (b) e percentual de sólidos em peso (c) dos batches de polpa.

Os parâmetros de controle relativos a granulometria do material, Figura 8 e Figura 9, também indicam a produção de um material com maior facilidade de bombeamento em mineroduto, conforme explicado por Li et al. (2018) e Mangesana et al. (2008) e demonstrado nos resultados das figuras Figura 6.

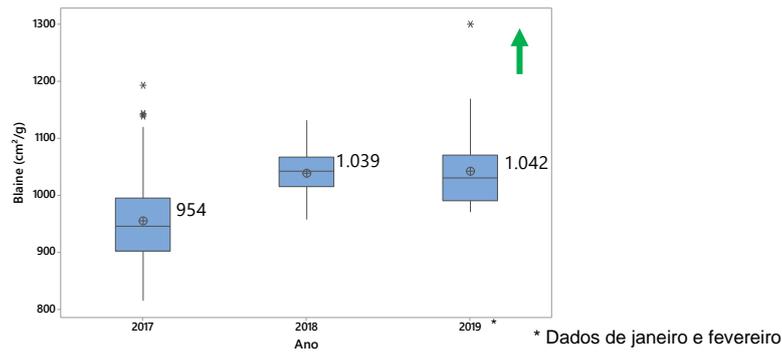


Figura 8. Histórico do índice de Blaine, que indica a proporção de partículas de menor diâmetro nas amostras.

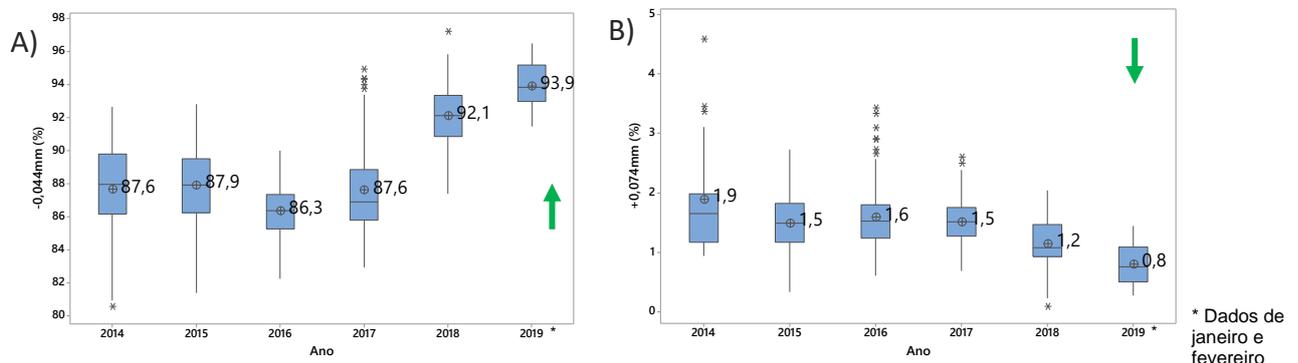


Figura 9. Histórico das variáveis, percentual passante em 44 microns (a) e retido em 74 microns (b), que indicam a proporção de partículas de maior diâmetro nas amostras.

O monitoramento rotineiro desses parâmetros resultou nas características reológicas, Figura 10, necessárias para garantir a segurança e aumento de eficiência do desempenho da operação do mineroduto e.

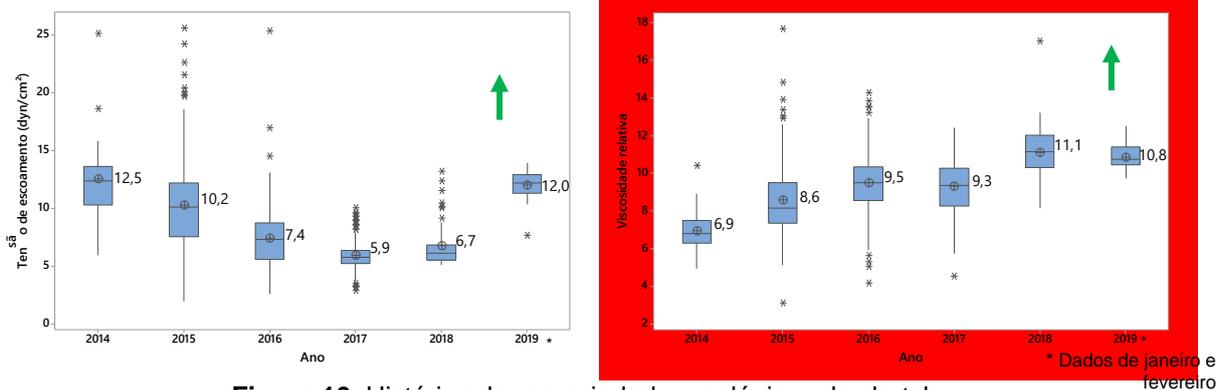


Figura 10. Histórico das propriedades reológicas dos batches

A análise estática dos dados das Figura 7a, Figura 7b , Figura 9 e Figura 10 mostrou que as variáveis que afetaram mais significativamente a reologia das polpas bombeadas desde 2014 até fevereiro de 2019 foram pH e percentual de sólidos em peso, respectivamente, nas tensão de escoamento e viscosidade relativa.

3 CONCLUSÃO

Conclui-se que percentual de sólidos em peso, estabilidade da polpa, tempo de cisalhamento e tamanho das partículas afetam as propriedades reológicas de polpas concentrado remoído de minério de ferro.

Além disso, o controle contínuo das variáveis que afetam a reologia do bombeamento permitiu diminuir a variabilidade da viscosidade e da tensão de escoamento, garantido a segurança da operação de bombeamento do concentrado remoído.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a equipe da Ausenco, que tem suportado todo esse trabalho, em especial aos engenheiros Charleston Dias e Rafael Lima.

REFERÊNCIAS

- 1 ARAUJO JUNIOR, A. M; PERES, A. E. C.; TURRER, H. D. G.; FONSECA, M. C.; BEHRING; R. S.; DOELLINGER, T. M.; PASSIGATI, V. P. (2009) Influência da cal na filtragem e pelotamento. In XXIII ENTMME, Gramado, RS, p.455-461.
- 2 BRAGANÇA, A.C.; SILVA, T.A. (2007) Alternative to lime as a rheology modifier in the transport of iron ore slurry by the Samarco pipeline. Hydrotransport 17. The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy and the BHR Group, p.1-10.
- 3 DULTZ, S.; WOCHE, S.K.; MIKUTTA, R.; SCHRAPE, M.L.; GUGGENBERGER, G. (2019) Size and charge constraints in microaggregation: Model experiments with mineral particle size fractions. Applied Clay Science, v.170, p.29-40.
- 4 IWASAKI, I., SMITH, K. A., LIPP, R. J., SATO, H. (1980) Effect of calcium and magnesium ions on selective desliming and cationic flotation of quartz from iron ores. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, v.II, c.54, p.1057-1082.
- 5 LI, M.Z.; HE, Y.P.; LIU, Y.D.; Huang, C. (2018) Effect of interaction of particles with different sizes on particle kinetics in multi-sized slurry transport by pipeline. Powder Technology, v.338, p.915–930.
- 6 LINS, F.A.F.; ADAMIAN, R. (2000) Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais. Série Tecnologia Mineral, 78, Rio de Janeiro: CETEM, 29p.
- 7 MANGESANA, N.; CHIKUKU, R.S.; MAINZA, A.N.; GOVENDER, I.; VAN DER WESTHUIZEN, A.P.; NARASHIMA, M. (2008) The effect of particle sizes and solids concentration on the rheology of silica sand based suspensions. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v.108, p.237-243.
- 8 PITTS; J.D.; AUDE, T.C. (1977) Iron concentrate slurry pipelines experience and applications. Society of Mining Engineers, AIME, v.262, p.125-133.
- 9 SAMPAIO, D.A. (2002) Estudos das propriedades de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A. e sua influência no potencial de entupimento do mineroduto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, 88p.
- 10 SCALES; P.J.; HEALY, T.W.; BOGER, D.V. (1998) Surfactants, Dispersants, Complexants and Flocculants—The Role of Additives in the Processing of Concentrated Particulate Suspensions in the Mining Industry. AusIMM '98 - The Mining Cycle, p.285-289.

- 11 STETLER, J.J. (1982) Samarco's Iron Ore Slurry Pipeline Transportation System. Mining Engineering, p. 1466-1468.
- 12 WATERS, J.; GOVENDER, I.; MAINZA, A. (2014) A rheological comparison of concentrator slurry streams. In: Anais do XXVII IMPC, 11p.
- 13 YANG, J.; HEINICHEN, N.; VELANKAR, S.S. (2018) The effect of particle wettability on the of rheology particulate suspensions with capillary force. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v.5, p.164-170