

DIMENSIONAMENTO DA PERNA BAROMÉTRICA DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO SCAVENGER APLICADO À MELHORIA NA ESTABILIDADE OPERACIONAL *

Alexandre Camilo Leles de Figueiredo¹

Luiz Flávio Pereira Costa²

Antônio Eduardo Clark Peres³

Resumo

A ineficiência no controle do nível da interface polpa/espuma da coluna de flotação, do estágio *scavenger* da etapa de flotação em células mecânicas de grande volume (*tank cell*) da Samarco, mostrou-se vertiginosamente prejudicial ao processo, elevando o teor de ferro no rejeito para patamares superiores a 20%. A partir de um balanço de massas elaborado, cálculos hidráulicos foram realizados e mostraram que o diâmetro instalado de 6" dos tubos e válvula do sistema de controle estava adequado às condições do processo produtivo. Entretanto, fez-se necessária a redução na altura da perna barométrica de 4,6m para 2,6m. Essa adequação diminuiu consideravelmente a variabilidade do controle operacional de nível, reduziu o teor de ferro no rejeito de 24,86% para 18,92% e aumentou a recuperação de ferrona etapa de flotação de 97,90% para 98,74%. Uma análise dos efeitos principais mostrou que, para se atender maiores vazões de polpa, caso o processo necessite, uma redução na altura da perna barométrica se fará necessária e que a elevação da concentração volumétrica de ar no interior da coluna de flotação implica na necessidade de diminuir esta altura.

Palavras-chave: interface polpa/espuma, perna barométrica, coluna de flotação, recuperação de ferro

DIMENSIONAL DESIGN OF THE BAROMETRIC LEG OF A SCAVENGER FLOTATION COLUMN APPLIED TO IMPROVEMENT IN OPERATIONAL STABILITY

Abstract

The inefficiency in controlling the level of the slurry/froth interface of the scavenger stage column of the flotation step at Samarco was severely impairing the process, increasing the iron content in the tailings to levels above 20%. From an elaborate mass balance, hydraulic calculations were performed and showed that the installed diameter of 6" of the tubes and valve of the control system was adequate for the conditions of the production process. However, it was necessary to reduce the height of the barometric leg from 4.6m to 2.6m. This adequacy considerably decreased the variability of the level control, reduced the iron content in the tailings from 24.86% to 18.92% and increased the iron recovery in the flotation stage from 97.90% to 98.74%. An analysis of the main effects showed that, in order to meet higher pulp flow rates if the process requires a reduction in the height of the barometric leg will be necessary and that the increase of the volumetric concentration of air inside the flotation column implies in the need to decrease this height.

Keywords: slurry/froth interface, barometric leg, column flotation, iron recovery

- ¹ Engenheiro de Minas, Engenheiro Especialista, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.
- ² Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processos, Samarco Mineração S/A, Mariana, MG, Brasil.
- ³ Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Mestre em Ciências Técnicas Nucleares, Ph.D. em Engenharia Mineral, Professor Emérito, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na Samarco Mineração S/A, a flotação em colunas representa um processo fundamental para o beneficiamento de minério de ferro. De modo geral, as colunas são utilizadas em duas etapas distintas: 1) para o tratamento de finos provenientes do circuito da deslamagem; 2) e para a obtenção das especificações químicas finais *nopellet feed*. No Concentrador 01, em particular, uma coluna é utilizada como estágio *scavenger* de uma etapa de flotação em células mecânicas de grande volume (*tank cell*). Esta etapa, por sua vez, tem por objetivo promover a segunda separação entre os minerais de ferro e aganga, sendo posterior, dentre as etapas de concentração, à flotação convencional e anterior à flotação *cleaner* realizada em colunas. O fluxograma do Concentrador 01 da Samarco pode ser visualizado na figura 1.

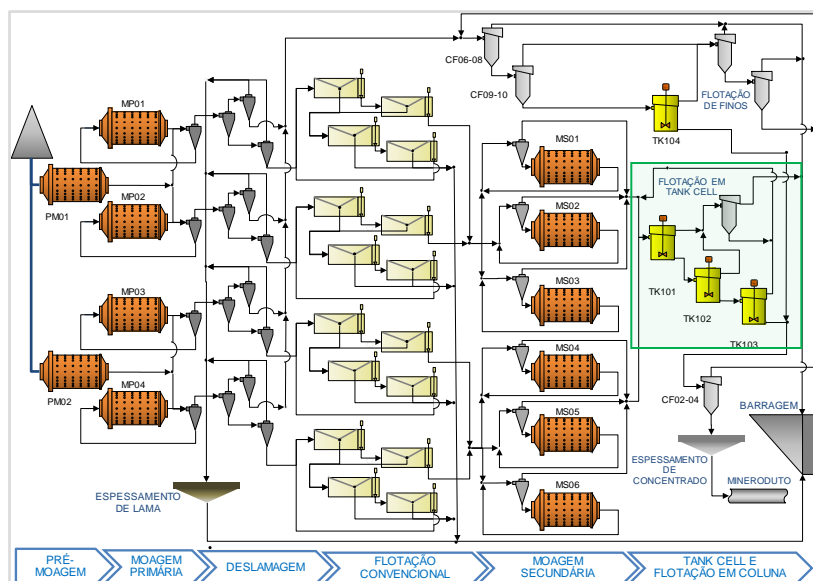


Figura 1. Fluxograma do Concentrador 01 da Samarco Mineração S/A.

A motivação deste projeto surgiu a partir de problemas evidenciados de ineficiência no controle do nível da interface polpa/espuma da colunado estágio *scavenger* da etapa de flotação em células mecânicas de grande volume (*tank cell*). Segundo AQUINO et al. (2010), a altura da camada de espuma é uma variável bastante eficaz na busca de maior seletividade no processo de flotação. Camadas maiores são usadas quando o processo requer alta seletividade entre as espécies hidrofóbicas e aquelas hidrofílicas. Além disso, a interface polpa/espuma deve ser bem definida e manter-se o mais constante possível, caso contrário pode comprometer significativamente o processo de flotação em termos de recuperação e seletividade.

O gráfico da figura 2 mostra a grande variabilidade de abertura da válvula de descarga (linha em tom de azul) e do nível real da interface polpa/espuma (linha em tom de vermelho) da coluna durante operação.

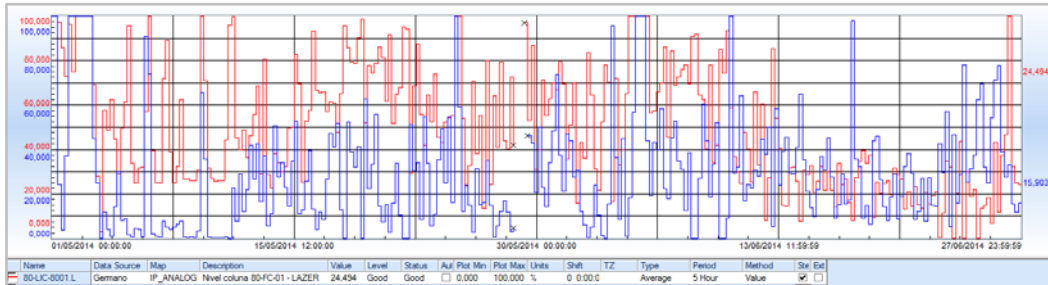


Figura 2. Abertura da válvula de descarga (linha em tom de azul) e nível real da interface polpa/espuma da coluna (linha em tom de vermelho).

Na prática operacional, o que foi percebido é que ora a coluna vertia polpa, ou seja, não formava uma camada de espuma, ora a coluna não descarregava o seu rejeito pelo *overflow*. A variabilidade apresentada mostrou-se vertiginosamente prejudicial ao processo, elevando o teor de ferro no rejeito do circuito para patamares superiores a 20% (máximo estipulado para atender o orçamento de recuperação de ferro global da planta e a produção de concentrado), como pode ser visualizado na figura 3.

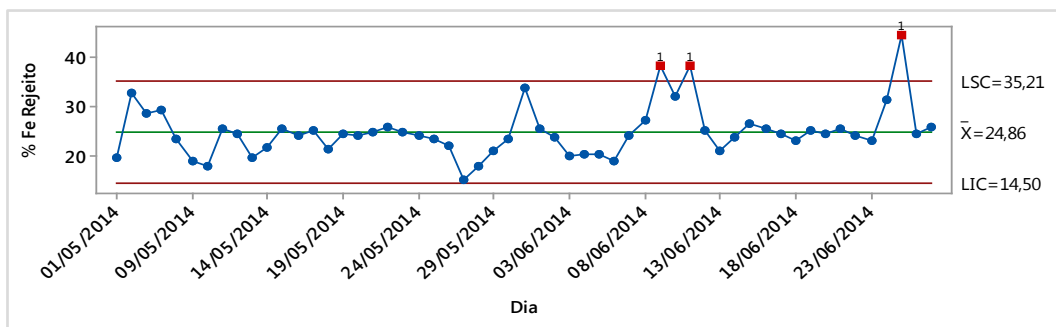


Figura 3. Teor de ferro no rejeito do circuito de flotação em células mecânicas de grande volume (*tank cell*).

Diante do exposto, o presente trabalho objetiva apresentar um novo dimensionamento para o sistema de controle de nível da interface polpa/espuma da coluna do estágio *scavenger* do circuito de flotação em células de grande volume do Concentrador 01 da Samarco, abrangendo-se a escolha do diâmetro ideal da tubulação e válvula de controle, bem como a altura máxima da perna barométrica na descarga do equipamento.

1.1 Princípios fluidodinâmicos

1.1.1 A equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli descreve o comportamento do escoamento de fluidos incompressíveis, com propriedades uniformes e em regimes permanentes. Ela é utilizada para, entre outras aplicações em hidráulica, quantificar velocidades de escoamento de descarga de reservatórios, estimar a velocidade de um escoamento

através de uma restrição à sua passagem e medir velocidades de escoamentos e os correspondentes caudais (MOREIRA, 2007). A equação é expressa como:

$$-\frac{w_e}{g} + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + \Delta h \quad (1)$$

Sendo: w_e a energia de eixo total necessária para o transporte do fluido; g a aceleração gravitacional ($g = 9,81m/s^2$); p_1 e p_2 as pressões nos pontos 1 e 2, respectivamente; γ o peso específico do fluido ($\gamma = \rho \times g$); ρ a densidade do fluido; v_1 e v_2 as velocidades de escoamento do fluido nos pontos 1 e 2, respectivamente; Z_1 e Z_2 as alturas dos pontos 1 e 2, respectivamente, em relação à cota inicial; e Δh a perda de carga total no escoamento.

1.1.2 Perda de carga

Refere-se à perda de energia dinâmica do fluido devido à fricção das partículas do fluido entre si e contra as paredes da tubulação que os contenha. Um dos métodos frequentemente utilizados para estimar as perdas de cargas distribuídas é através da equação de Hazen-Williams, comumente é empregada no transporte de água e esgoto em canalizações diversas com diâmetro acima de 50mm (BARRAL, 2018).

$$\Delta h = L \times \frac{10,641}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D_i^{4,87}} \quad (2)$$

Sendo: Δh a perda de carga total (m); C um coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação do tubo e das condições de sua parede interna (valores na figura 4); L o comprimento total da tubulação (m); D_i o diâmetro interno do tubo (m); Q a vazão volumétrica do fluido (m^3/s).

Tipo de Tubo	C
Aço soldado com 30 anos de uso	75
Aço soldado com 20 anos de uso	90
Ferro fundido, usado.	90
Ferro fundido, com 15 anos de uso	100
Aço galvanizado, usado.	100
Aço galvanizado com costura.	125
Aço galvanizado sem costura, novo.	130
Cobre e latão.	130
Plástico PVC, até 75mm	125
Plástico PVC, até 100mm	135
Plástico PVC, mais de 100mm	140

Figura 4. Coeficiente C para os diferentes tipos de tubo (BARRAL, 2018).

Na literatura são encontrados outros métodos para estimar a perda de carga total no escoamento, tais como aquele de Darcy-Weisbach, de determinação do comprimento equivalente e em função da carga cinética. Entretanto, este trabalho resumir-se-á a utilizar a Equação de Hazen-Williams devido, principalmente, à sua simplicidade, quando comparada a outros métodos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

2.1.1 Dados do processo e balanço de massas

A obtenção dos dados do processo para o dimensionamento do sistema de controle de nível da interface polpa/espuma se dará a partir do balanço de massas a ser elaborado para a etapa de flotação em células de grande volume. Para elaboração deste balanço serão coletados: 1) os dados diários dos teores de ferro da alimentação, concentrado e rejeito dos estágios armazenados nos *softwares* MES e BILMAT; 2) os dados bi-horários do percentual de sólidos em massa da alimentação do circuito. A taxa de alimentação do circuito será considerada aquela máxima possível, ou seja, para operação do Concentrador 01 em condições normais e sem restrições. A figura 5 apresenta a distribuição granulométrica obtida a partir da amostragem do material de alimentação da coluna *scavenger* da etapa de flotação em células de grande volume.

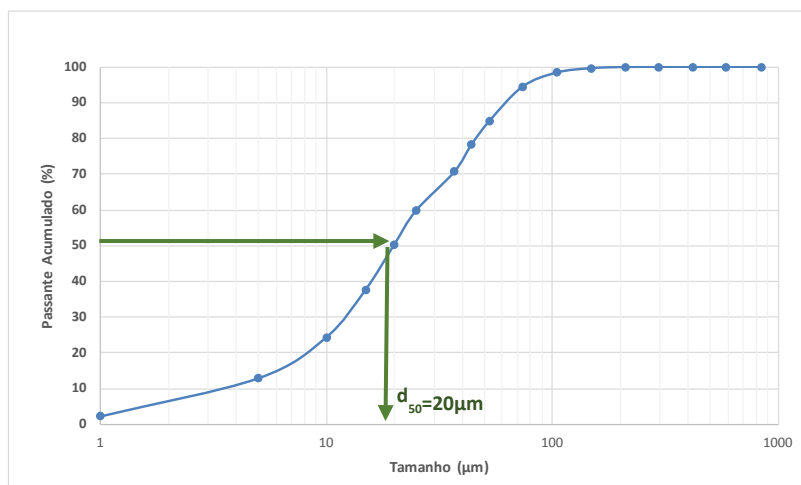


Figura 5. Distribuição granulométrica do material de alimentação da coluna *scavenger* da etapa de flotação em células de grande volume.

2.1.2 Especificação do diâmetro de válvulas e tubos

A velocidade de transporte de uma polpa heterogênea deve atender a duas exigências: 1) ela deve ser suficientemente grande para produzir a turbulência necessária para manter os sólidos em suspensão; 2) e ela deve ser a menor possível para reduzir o atrito com as paredes do tubo e, conseqüentemente, reduzir a perda de carga. Segundo CHAVES et al. (2002), existem fórmulas que permitem estimar com razoável aproximação os valores das velocidades críticas de deposição. MADER (1987) apresenta a seguinte equação:

$$v_d = FL \times \sqrt{\left[2 \times g \times D_i \times \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right) \right] \times \left(\frac{c_m}{0,45} \right)^{1/3}} \quad (3)$$

Sendo: v_d a velocidade crítica de deposição; g a aceleração gravitacional ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$); ρ_s e ρ_l as densidades dos sólidos e do líquido, respectivamente; D_i o

diâmetro da tubulação; c_m a concentração mássica de sólidos da polpa (razão entre a massa de sólidos e a massa total); e FL o fator função da granulometria, da diluição de polpa e do coeficiente de uniformidade. Na figura 6 são apresentados os gráficos do fator FL para materiais uniformes e não uniformes.

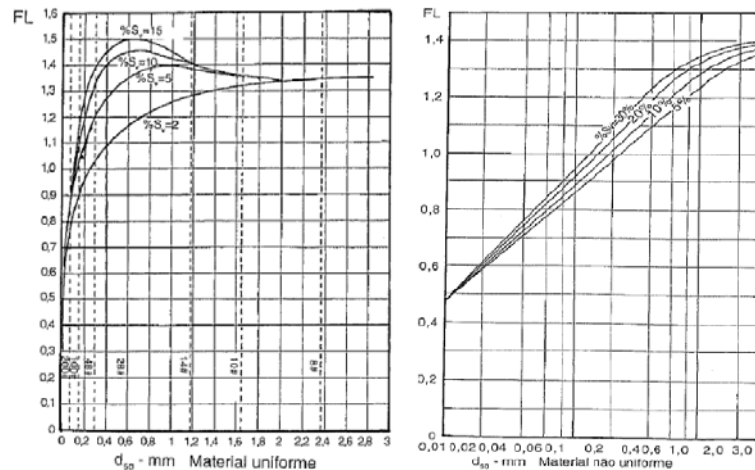


Figura 6. Gráficos do fator FL para materiais uniformes, à esquerda, e não uniformes, à direita (CHAVES et al., 2002).

Segundo Chaves (2002), utiliza-se o coeficiente de uniformidade (C_u) para definir se uma polpa é uniforme ou não uniforme, sendo:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4)$$

- Se $C_u < 5$ a amostra é muito uniforme.
- Se $5 < C_u < 15$ a amostra é uniforme.
- Se $C_u > 15$ a amostra é não uniforme.

Onde: d_{60} é o tamanho médio de 60% das partículas; e d_{10} é o tamanho médio de 10% das partículas.

A velocidade no escoamento deverá ser maior do que a velocidade crítica ($v \gg v_d$). Segundo CRANE (1978), a velocidade média através seção transversal de um tubo é determinada pela equação:

$$Q = v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 = \text{constante} \quad (5)$$

Sendo: Q a vazão volumétrica de polpa; v_1 e v_2 as velocidades de escoamento nos pontos 1 e 2, respectivamente; e A_1 e A_2 as áreas na seção transversal nos pontos 1 e 2, respectivamente.

2.1.3 Especificação da máxima altura da perna barométrica

A equação de Bernoulli será utilizada para verificar até qual altura ocorrerá o escoamento da polpa na vazão volumétrica necessária ao processo produtivo. Para obtenção da expressão da máxima altura da perna barométrica serão consideradas as premissas de instalação apresentadas na figura 7.

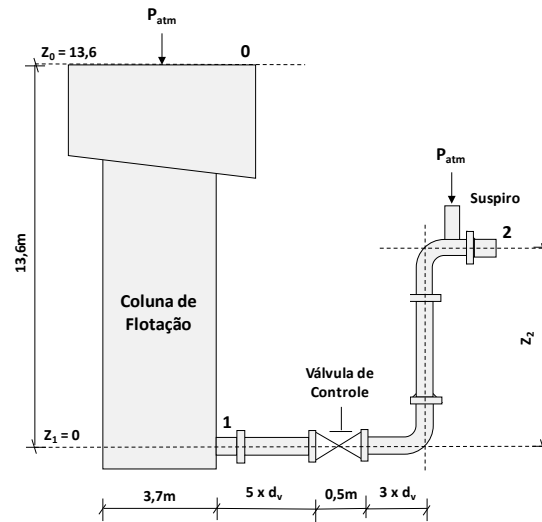


Figura 7. Dimensões da coluna circular e critérios de dimensionamento para válvula, tubulação e perna barométrica.

A equipe de Instrumentação/Automação da Samarco adota como melhor prática de instalação um comprimento mínimo da tubulação antes da válvula de controle 5 vezes maior do que o diâmetro dessa válvula. Já o comprimento mínimo após esse instrumento deve ser três vezes maior do que seu diâmetro.

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos 0 e 1 mostrados na figura acima, obtém-se:

$$p_1 = \rho \times g \times \left(Z_0 - \frac{v_1^2}{2 \times g} \right) \quad (6)$$

Considerou-se: $w_e = 0$, pois não há energia de eixo para transporte da polpa (bombas movidas por motores, por exemplo); $p_0 = 0$ por se tratar da pressão atmosférica; $Z_1 = 0$, já que é a cota mínima; e $\Delta h \rightarrow 0$, uma vez que, devido ao grande diâmetro da coluna, a velocidade de escoamento v_0 tenderá a ser quase nula.

Utilizando-se, desta vez, a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 apresentados na figura, tem-se:

$$Z_0 - \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \Delta h \quad (7)$$

Sendo: $w_e = 0$, pois não há energia de eixo para transporte da polpa (bombas movidas por motores, por exemplo); $p_2 = 0$, pois a coluna descarrega na pressão atmosférica; $v_1 = v_2$; e $Z_1 = 0$, já que é a cota mínima.

Finalmente, substituindo-se as equações 2 e 6 na equação 7 e considerando que $L = (8 \times d_v) + L_v + Z_2$, obter-se-á a expressão para determinar a máxima altura da perna barométrica.

$$Z_2 = \frac{\{[(2 \times g \times Z_0) - v_1^2] \times C^{1,85} \times D_i^{4,87}\} - \{g \times Q^{1,85} \times [(170,256 \times d_v) + (21,282 \times L_v)]\}}{2 \times g \times \{[C^{1,85} \times D_i^{4,87}] + (10,641 \times Q^{1,85})\}} \quad (8)$$

2.1.4 Verificação do desempenho da etapa de flotação

Para verificação do desempenho da etapa de flotação, serão verificados os indicadores de teor de ferro no rejeito, bem como a recuperação de ferroantes e após a adequação das instalações do sistema de controle de nível da interface polpa/espuma da coluna de flotação. O *software* Minitab será usado para a geração de gráficos e para aferir a redução da variabilidade.

2.1.5 Análise de efeitos principais

Um efeito principal está presente quando diferentes níveis de um fator afetam a resposta de maneira diferente. Gera-se um gráfico de efeitos principais em que se cria a média de resposta para cada nível de fator conectado por uma linha. Para realizar essa análise, será utilizado o *software* Minitab.

2.2 Resultados e discussões

2.2.1 Dados de processo

A figura 8 apresenta o balanço de massas do circuito de flotação em células de grande volume a partir do qual serão extraídos os dados de processo para o dimensionamento do sistema de descarga da coluna *scavenger*.

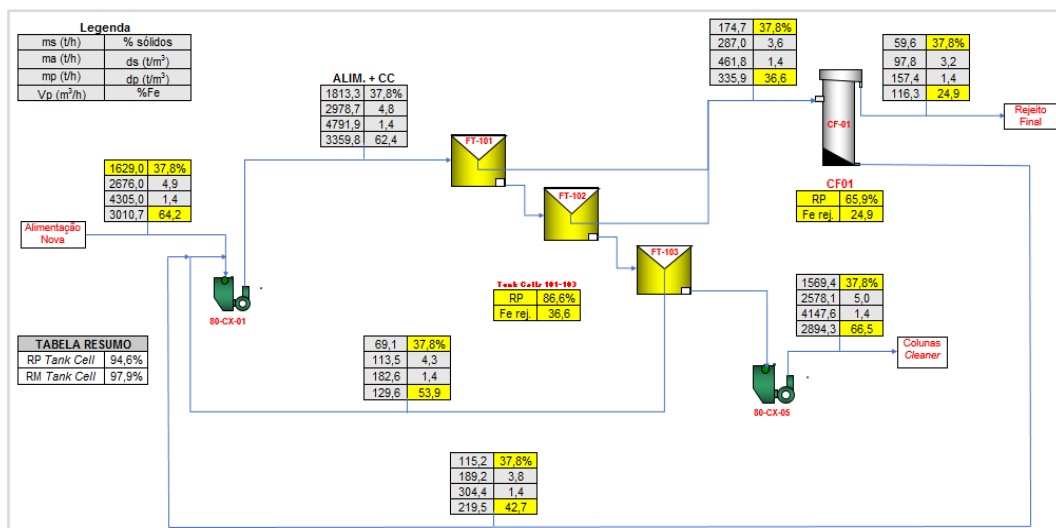


Figura 8. Balanço de massas do circuito deflotação em células de grande volume.

2.2.2 Escolha do diâmetro dos tubos e da válvula de controle

A tabela 1 apresenta as principais características dos tubos instalados na perna barométrica da coluna *scavenger* do circuito de flotação em células de grande volume.

Tabela 1. Características dos tubos instalados na perna barométrica

Diâmetro Tubo (pol)	Espessura Tubo (mm)	Espessura Revestimento (mm)	Diâmetro Interno Tubo (mm)
6	4,5	10	123,4

O primeiro passo realizado foi verificar se o diâmetro instalado atenderia as condições de processo, comparando-se a velocidade de escoamento obtida com aquela crítica de deposição. Os cálculos são apresentados a seguir:

$$v_1 = v_2 = \frac{Q}{A} = \frac{4 \times Q}{3600 \times \pi \times D_i^2} = \frac{4 \times 219,52}{3600 \times \pi \times (0,1234^2)} \cong 5,10 \text{ m/s}$$

$$v_d = 0,6 \times \sqrt{\left[2 \times 9,81 \times 0,1234 \times \left(\frac{3,80 - 1,0}{1,0} \right) \right] \times \left(\frac{0,3784}{0,45} \right)^{1/3}} \cong 1,47 \text{ m/s}$$

O fator FL foi obtido a partir da figura 6. De acordo com a distribuição granulométrica apresentada na figura 5, $C_u = 25/3 \cong 8,33$ (coeficiente de uniformidade), portanto, como $5 < C_u < 15$, a amostra é considerada uniforme. Conforme pode ser percebido, para tubos de 6" de diâmetro (0,1234m de diâmetro interno) tem-se a condição $v > v_d$ satisfeita, além de uma velocidade de escoamento aceitável. Diante do exposto, optou-se por manter o diâmetro. É importante salientar que a válvula de controle instalada também possui um diâmetro de 6", não sendo necessário realizar alteração. Para o cálculo da máxima altura da perna barométrica será considerado o diâmetro interno da válvula de controle como sendo igual àquele dos tubos.

2.2.3 Cálculo da máxima altura da perna barométrica

A altura máxima da perna barométrica foi determinada substituindo-se os valores de cada variável na equação 8, conforme é apresentado a seguir.

$$Z_2 = \frac{\left\{ \left[(2 \times 9,81 \times 5,0) - 5,10^2 \right] \times 140^{1,85} \times 0,1234^{4,87} \right\} - \left\{ 9,81 \times \left(\frac{219,52}{3600} \right)^{1,85} \times [(170,256 \times 0,1234) + (21,282 \times 0,5)] \right\}}{2 \times 9,81 \times \left\{ (140^{1,85} \times 0,1234^{4,87}) + \left[10,641 \times \left(\frac{219,52}{3600} \right)^{1,85} \right] \right\}} \dots$$

$\therefore Z_2 \cong 2,95 \text{ metros}$ (altura máxima permitida para atender as condições de processo).

O comprimento da válvula de controle, $c_v = 0,5 \text{ m}$, foi obtido a partir de medição física de campo. A altura Z_0 utilizada no cálculo foi aquela corrigida, uma vez que aproximadamente 58% do volume da coluna de flotação é preenchido por ar devido à adição realizada no processo. A tabela 2 mostra como este valor foi corrigido.

Tabela 2. Altura de polpa Z_0 corrigida devido à concentração volumétrica de ar

Altura de Polpa (m)	Conc. Vol. de Ar na Coluna (%)	Espessura da Camada Espuma (m)	Altura Corrigida de Polpa (m)
13,6	58,0%	1,6	5,0

Baseado no cálculo acima, foi programada e realizada uma parada da coluna *scavenger* do circuito de flotação em células de grande volume, reduzindo fisicamente a altura da perna barométrica de 4,6m para, aproximadamente, 2,6m.

2.2.4 Desempenho da etapa de flotação

Na figura 9 pode-se visualizar a redução na variabilidade de abertura da válvula de descarga (linha em tom de azul) e do nível real da interface polpa/espuma (linha em tom de vermelho) da coluna durante operação após adequação.

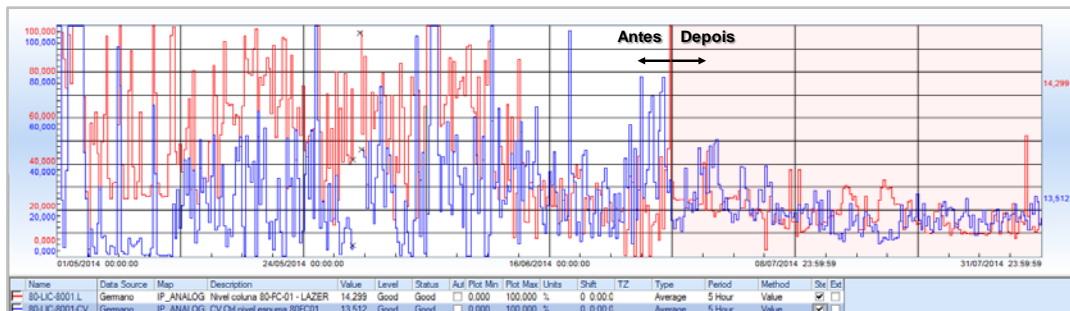


Figura 9. Variabilidade de abertura da válvula de descarga (linha em tom de azul) e do nível real da interface polpa/espuma (linha em tom de vermelho) da coluna durante operação antes e depois da adequação da altura da perna barométrica.

Como consequência da maior eficiência no controle do nível da interface polpa/espuma da coluna, ocorreu uma queda no teor médio de ferro do rejeito no circuito de flotação em células mecânicas de grande volume de 24,86% do período base analisado para 18,92% no mês seguinte de operação do Concentrador 01, passando a ser inferior ao máximo de 20% especificado em orçamento. Além disso, a variabilidade para o parâmetro de performance da planta foi reduzida após a adequação do controle, conforme é mostrado pela redução da amplitude dos limites inferior e superior de controle do gráfico da figura 10.

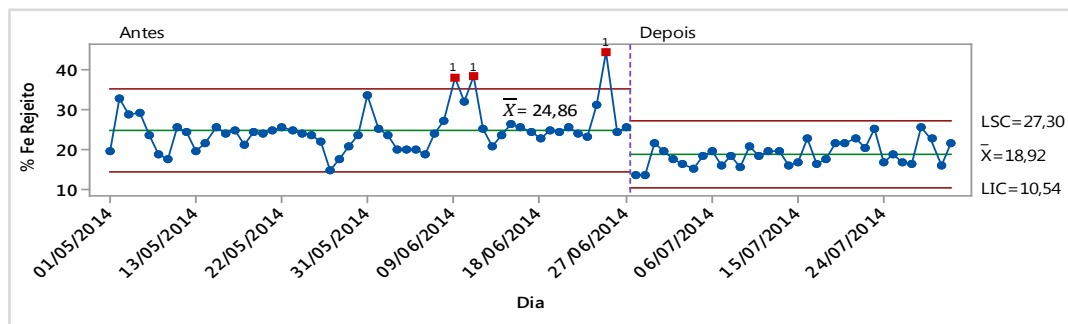


Figura 10. Teor de ferro no rejeito do circuito de flotação em células mecânicas de grande volume antes e após a adequação da perna barométrica da descarga da coluna.

A redução supracitada no teor de ferro do rejeito elevou a recuperação média de ferro de 97,90% do período base analisado para 98,74% no mês seguinte. Da mesma forma que o teor de ferro no rejeito, a variabilidade para a recuperação de ferro foi reduzida após a adequação do controle, como é mostrado pela redução da amplitude dos limites inferior e superior de controle do gráfico da figura 11.

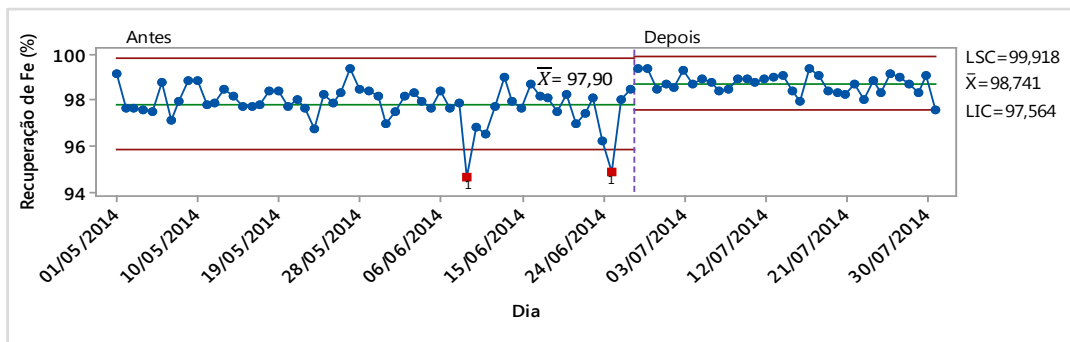


Figura 11. Recuperação de ferro no rejeito do circuito de flotação em células mecânicas de grande volume antes e após a adequação da perna barométrica da descarga da coluna.

2.2.5 Avaliação dos efeitos principais

A figura 12 apresenta um gráfico dos principais efeitos causados pelas variáveis de processo mais comuns do cotidiano operacional do Concentrador 01 (vazão de polpa, Q , e concentração volumétrica de ar no interior da coluna de flotação, c_{ar} , este último parâmetro relacionado à adição de ar na coluna para coleta da ganga silicática) na altura da perna barométrica. Vale salientar que este gráfico só é válido para as condições de instalação informadas anteriormente de diâmetros e comprimentos do trecho horizontal.

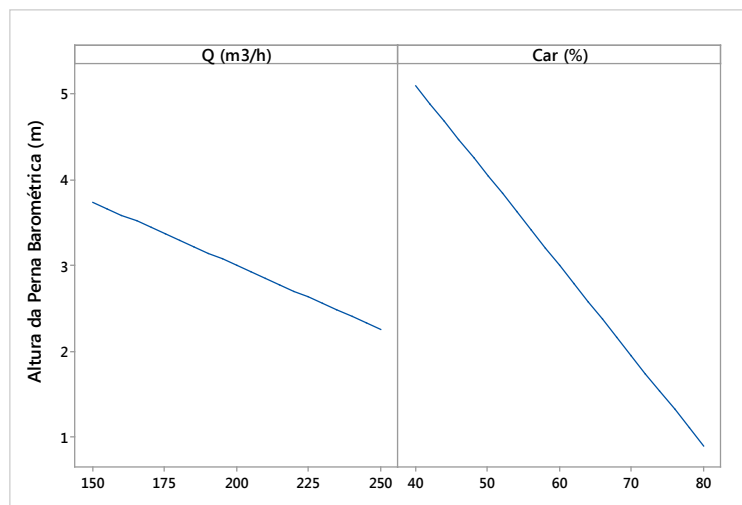


Figura 12. Efeitos principais das variáveis de processo na altura da perna barométrica para o diâmetro de tubos e válvula de controle instalados.

Para se atender a aumentos de vazão de polpa, caso o processo requeira, uma redução na altura da perna barométrica se fará necessária. A variável de maior impacto mostrada foi a concentração volumétrica de ar no interior da coluna de flotação. Seu aumento implica em ter que reduzir a altura da perna barométrica, já que haverá uma diminuição da densidade aparente interna da coluna e, conseqüentemente, da pressão de fundo (p_1). Isso gera um ponto de atenção, uma vez que se trata de um parâmetro comumente alterado na prática operacional.

3CONCLUSÃO

Os cálculos hidráulicos realizados mostraram que o diâmetro instalado de 6" dos tubos e válvula do sistema de controle de nível de interface polpa/espuma da coluna *scavenger* do circuito de flotação estava adequado às condições do processo produtivo. Entretanto, fez-se necessária a redução na altura da perna barométrica de 4,6m para 2,6m. Esta adequação diminuiu consideravelmente a variabilidade do controle operacional de nível, reduziu o teor médio de ferro no rejeito de 24,86% para 18,92% e aumentou a recuperação média de ferro da etapa de flotação de 97,90% para 98,74%.

Uma análise dos efeitos principais mostrou que, para se atender maiores vazões de polpa, caso o processo requeira, uma redução na altura da perna barométrica se fará necessária e que a elevação da concentração volumétrica de ar no interior da coluna de flotação implica em redução dessa altura.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPEMIG e PROEX-CAPES pelo apoio ao PPGEM.

REFERÊNCIAS

AQUINO, J.A., OLIVEIRA, M.L.M. Flotação em Coluna. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.M.A(Ed.). Tratamento de Minérios, CETEM, Rio de Janeiro, p. 515-556, 2010.

BARRAL, M.F. Perda de Carga: Notas de Aula. 30p. [página da internet]. São Paulo: ESALQ, Universidade de São Paulo [acesso em 28 abr. 2018]. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Fernando/leb472/Aula_7/Perda_de_carga_Manuel%20Barral.pdf.

CHAVES, A.P., NAKAE, T., SALGADO, O.R. In: CHAVES, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 2.ed. São Paulo: Signus Editora; 2002, p. 84-140. Bombeamento de Polpas.

CRANE, C. Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe. New York: Crane CO; 1978.

MADER, W.R. Bombeamento de Polpa: Apostila. Belo Horizonte: EPC; 1987.

MOREIRA, M.A. A Equação de Bernoulli da Hidráulica. Paraná: Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2007. (Apostila do Curso de Engenharia Industrial).