

# BOMBEAMENTO DE ESPUMAS MINERAIS<sup>1</sup>

Andre Falcucci<sup>2</sup>

## Resumo

O bombeamento das espumas provenientes da flotação de minério sempre representou um grande desafio para a indústria mineral. Atualmente as soluções adotadas consistem de uma mistura de engenharia e arte, com muitas soluções sendo adotadas por meio de lições aprendidas no passado e/ou após longos períodos de observação. O projeto e operação de sistemas de bombeamento de espumas devem considerar diferentes fatores além da própria seleção da bomba. O escopo destes sistemas deve iniciar-se no ponto de geração da espuma seguindo até o seu ponto de descarga, passando pelo ponto de alimentação, geometria da caixa, linha de sucção, seleção da bomba e caminhamento da tubulação de recalque. Aspectos referentes aos agentes formadores e estabilizadores de espumas também devem ser considerados. Desta forma, o presente artigo busca apresentar informações de aspecto prático que necessitam ser observados quando este tipo de solução passa a ser considerado.

**Palavras-chave:** Espumas; Bombeamento de espumas.

## MINERAL FROTH PUMPING

### Abstract

Around the world, froth pumping represents a big challenge to mineral process. The solution consists in a mix between art and engineering, with questions answered after long observations periods and lessons learned in the past. The project and operation of the froth pumping systems need to consider different factors. This solution must need to begin on the froth generation point and finishing on the final discharge point, undergoing in sump feed point, sump geometry, pipeline, pump selection and others. Aspects like froth generation agent and froth stability also must need to be consider. The present paper shows practical aspects that must need to be considered when this type of solution is adopted.

**Key words:** Froth; Froth pumping.

<sup>1</sup> *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.*

<sup>2</sup> *Engenheiro de Minas, M.Sc., Vale, Complexo Vargem Grande, MG, Brasil.*

# 1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo, a indústria mineral passou a utilizar o processo de flotação em suas operações. O uso desta tecnologia permitiu o beneficiamento de minérios cada vez mais pobres e complexos. Porém o uso deste novo método de concentração também incorporou um novo fator nas usinas de beneficiamento: a presença de espumas.

O método mais simples para manusear espumas é a utilização de calhas para o seu escoamento por gravidade, porém quando o uso desta alternativa não é possível o uso de bombas se faz necessário. Desta forma, devido ao seu caráter dinâmico, o uso de bombas para o manuseio de polpas espumosas passou a representar um novo desafio para engenheiros, técnicos e operadores de usinas de beneficiamento de minérios em todo o mundo.

Venturelli<sup>(1)</sup> define espumas como dispersões de bolhas de gás em um líquido. Líquidos puros não são capazes de formar espumas estáveis, pois é preciso haver um terceiro componente denominado agente espumante. Tal componente exibe propriedade anfífilica, podendo ser: partículas finas com características superficiais que as mantenham na interface líquido-ar ou, mais comumente, substâncias tensoativas que apresentam uma parte de sua molécula com característica hidrofílica e outra com característica hidrofóbica, fato que confere a estas moléculas a propriedade de adsorver-se em interfaces líquido-ar, causando a diminuição da tensão superficial do líquido. O tensoativo, ou espumante, age diminuindo a energia e facilitando o grande aumento da área superficial do líquido durante a formação da espuma.

Em linhas gerais, as espumas podem ser classificadas em dois tipos. Espumas que podem persistir por um tempo de vida longo são chamadas de espumas metaestáveis ou persistentes, e as espumas que persistem por tempos curtos são espumas transientes. Espumas persistentes são formadas pela presença de solutos que abaixam fortemente a tensão superficial, isto é, aparecem na presença de materiais com elevada atividade de superfície. Porém, segundo Delicato<sup>(2)</sup> somente o abaixamento da tensão superficial não constitui uma condição exclusiva para a formação de espumas. É o balanço de forças o responsável pela estabilidade cinética das espumas.

Apesar da presença de tensoativos diminuírem a tensão superficial da água, a elevada área superficial das bolhas que formam uma espuma leva a uma elevada energia livre de superfície, o que faz com que as espumas, assim como outros sistemas coloidais dispersos, sejam termodinamicamente instáveis.

Para o controle da estabilidade de um filme, é necessário ter o conhecimento a respeito de sua dependência com a concentração do tensoativo e eletrólitos, além da concentração de aditivos. O conhecimento da cinética de adsorção, drenagem do filme, fluxo de difusão, flutuações e forças superficiais também precisam ser considerados quando tratamos da estabilidade de espumas.

Os fatores que podem estabilizar as espumas são frequentemente encontrados no beneficiamento de minérios por meio de processos de flotação. Nestes processos a espuma formada pode ser manuseada sem tratamento prévio ou pode ser suprimida com o auxílio de aditivos químicos. A segunda opção geralmente é evitada, pois o uso de aditivos eleva os custos operacionais, além de aumentar a exposição a riscos relacionados à saúde e segurança e riscos ambientais. Desta forma, a opção de manuseio da espuma sem tratamento prévio torna-se uma alternativa mais viável e desafiadora.

Para o manuseio deste material, o projeto e operação de sistemas de bombeamento de espumas devem considerar diversos fatores além da própria seleção da bomba. O escopo destes sistemas deve iniciar-se no ponto de geração da espuma seguindo até o seu ponto de descarga, passando pela geometria da caixa e da linha de sucção, seleção da bomba, caminhamento da tubulação de recalque e ponto de alimentação da caixa. A utilização de bombas para o manuseio de espumas deve considerar o fato de que a presença do ar contido na polpa deve ser reduzido ao máximo antes de sua entrada no bocal de sucção da bomba. A partir deste momento os princípios da hidráulica passam a prevalecer no sistema.

Segundo Abulnaga,<sup>(3)</sup> o erro mais comum é utilizar o fator de espuma somente como um multiplicador da vazão. Esta abordagem viola um princípio fundamental da termodinâmica, esquecendo-se do fato de que gases e o próprio ar são fluidos compressíveis. Em outras palavras, quando bolhas passam pelo rotor da bomba estas são comprimidas e seu diâmetro reduzido. O fato é que o dimensionamento de bombas de espuma deve considerar uma análise completa de todo o sistema.

## 2 SISTEMA DE MANUSEIO

### 2.1 Caixa de Bomba

As caixas de polpa/espumas compõem uma parte primordial para o bom desempenho das operações de bombeamento deste tipo de material.

O desenho das caixas de polpa precisa considerar fatores como ponto de chegada do material, geometria da caixa, comprimento e inclinação da linha de sucção, tempo de residência da caixa, sistema quebra espuma dentre outros.

A caixa de polpa deve ser a mais alta possível e o tempo de residência o maior possível, de forma que o ar retido na polpa tenha tempo de ascender e chegar a superfície, liberando o ar. Considerando a velocidade de sedimentação e o NPSH limite da bomba.

A chegada de material na caixa deve ocorrer da maneira mais suave possível a fim de reduzir a turbulência e evitar a sucção direta de ar pela bomba e, conseqüentemente, a perda de desempenho do sistema (Figura 1). Diversas soluções podem ser adotadas para evitar esta ocorrência. A principal recomendação é a alimentação tangencial, porém, este tipo de solução é eficaz quando a polpa apresenta velocidade suficiente para se distribuir pela parede da caixa, liberando o ar retido no interior da polpa. Quando esta velocidade não é suficiente, algumas outras soluções podem ser adotadas, dentre elas estão à montagem de uma caixa para redução de velocidade de chegada ou a utilização de uma placa defletora montada a 45° graus no interior da caixa. Esta placa tem a função de “abrir” a espuma e aumentar a área de contato da polpa com a atmosfera eliminando o ar livre no seu interior.

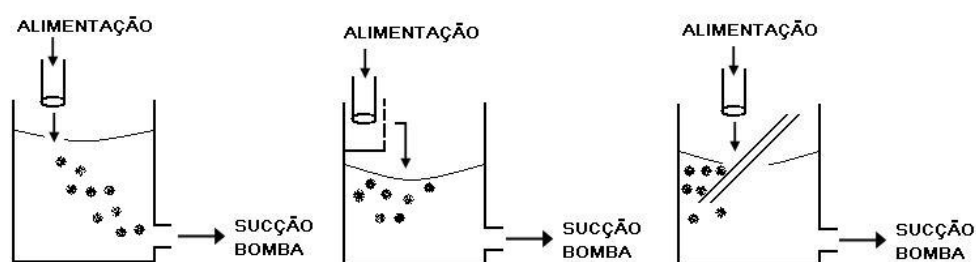
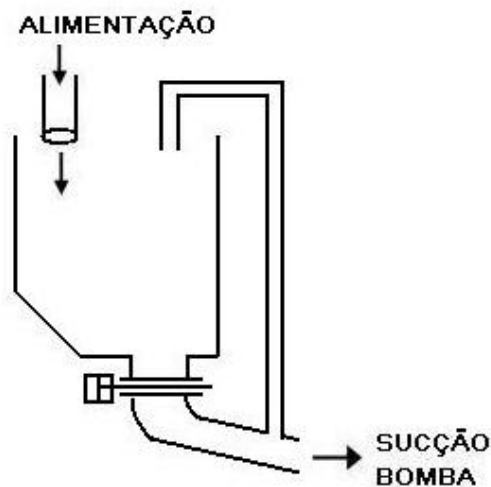


Figura 1. Caixa redutora de velocidade.

Adicionalmente, a chegada do material deve ser o mais distante possível do bocal de sucção, normalmente a 180° de distância. Outra recomendação, é que caixas de espuma devem operar com somente um conjunto de bomba. Operações com dois ou mais conjuntos montados em uma única caixa resultam em perdas significativas no desempenho do sistema. Os fatores que levam a esta perda ainda não foram completamente entendidos e explicados.

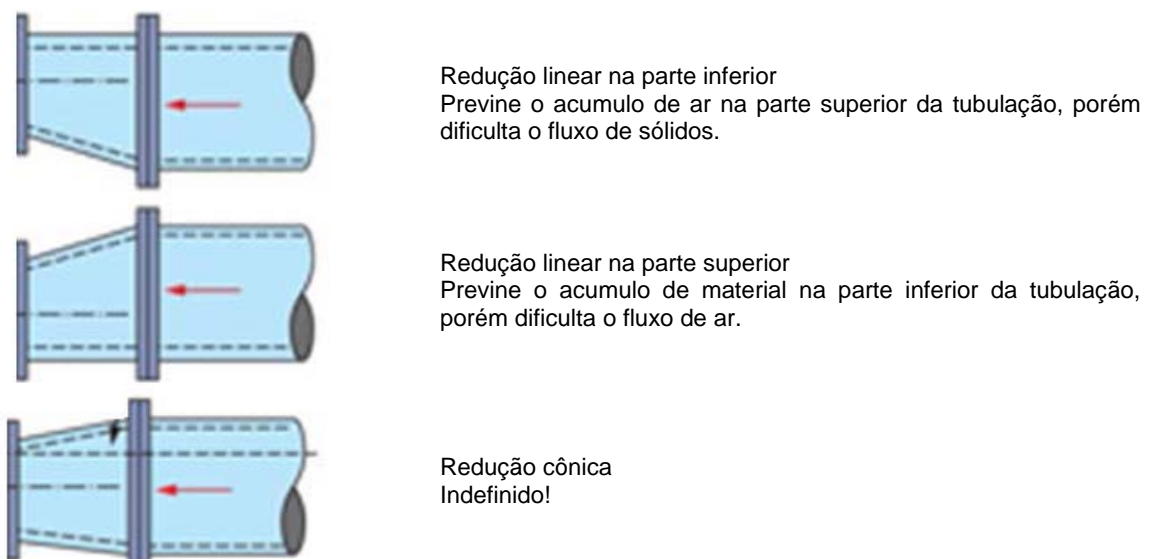
Quando tratamos da interligação entre o conjunto caixa e bomba, este deve ser o mais curto possível a fim de evitar o bloqueio pelo acúmulo de ar na sucção. Este bloqueio é conhecido como “air lock” e basicamente trata-se do acúmulo de ar na linha de sucção devido ao colapso das bolhas na entrada da bomba.

Dentre as soluções possíveis estão a inclinação da linha de sucção, saída da sucção pela parte inferior da caixa, a montagem de um “vent” ou as três soluções simultâneas (Figura 2).



**Figura 2.** Caixa com “vent” e sucção inclinada para eliminação de ar.

Normalmente, se faz necessário o ajuste entre os diâmetros do bocal de sucção da caixa e o diâmetro de sucção da bomba (redução). Os efeitos deste elemento não podem ser desprezados e precisam ser melhor entendidos. Sobre este assunto cabem algumas observações propostas por Williams:<sup>(4)</sup>



**Figura 3.** Geometria de reduções na linha de sucção das bombas.

As atuais bombas de espuma têm a característica de possuir o bocal de sucção com grande diâmetro para facilitar a entrada de material e o bocal de recalque com diâmetro normal. No uso de bombas de espuma com montagem em série, a interligação das bombas deve ser observado com especial atenção de forma que expansões muito bruscas sejam evitadas. Outra alternativa proposta por Williams<sup>(4)</sup> pode ser a montagem de uma sucção estendida conforme ilustrado na Figura 4.



**Figura 4.** Sucção estendida.

## 2.2 Chuveirinho

O princípio desta solução é reduzir ao máximo a presença de espumas antes de sua chegada no bocal de sucção da bomba. Uma solução largamente empregada é a montagem de “chuveiros quebra espuma” no topo da caixa (Figura 5), porém esta solução só tem seu efeito maximizado quando o ar retido na polpa tem tempo de ascender e chegar à superfície do tanque. Desta forma, a água aspergida na caixa pode efetuar a quebra mecânica da espuma.



**Figura 5.** Chuveiro quebra espumas montado no topo da caixa.

Algumas operações utilizam a montagem dos chuveiros quebra espuma na calha de transbordo das células e colunas de flotação (Figura 6).



**Figura 6.** Chuveiro quebra espuma na calha de transbordo da célula de flotação.

Outra solução empregada é a utilização de injeção de água na sucção da bomba, direcionando para o olho do rotor, mas esta opção coloca em risco as partes mecânicas do equipamento devido ao desgaste da tubulação e o risco da mesma ser projetada para o rotor, podendo causar danos ao rotor, revestimento e carcaça da bomba.

### 3 EQUAÇÕES DE EQUIVALÊNCIA

As equações de equivalência de Roteaux são por há muito conhecidas e aplicadas na análise de sistemas de bombeamento. Pelas equações propostas a vazão tem uma relação linear com a rotação (Equação 1), quadrática com a pressão (Equação 2) e cúbica com a potência (Equação 3). Porém, quando aplicadas ao de bombeamento de espumas uma divergência significativa entre os valores calculados e medidos no campo pode ser observada.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad \text{Eq. 1}$$

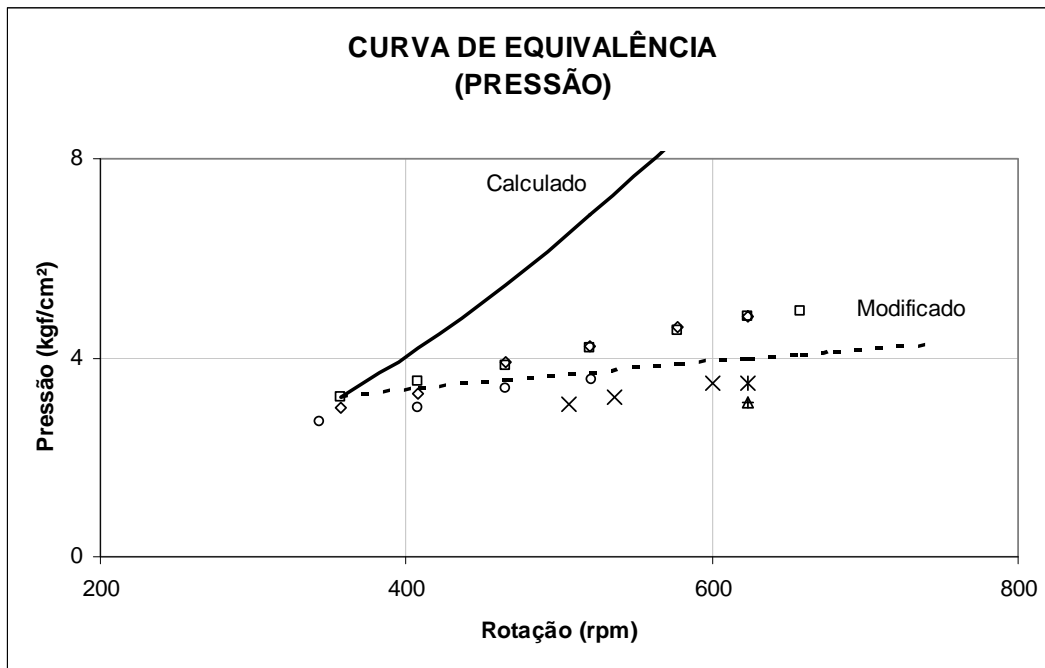
$$\frac{n_1}{n_2} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^2 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad \text{Eq. 3}$$

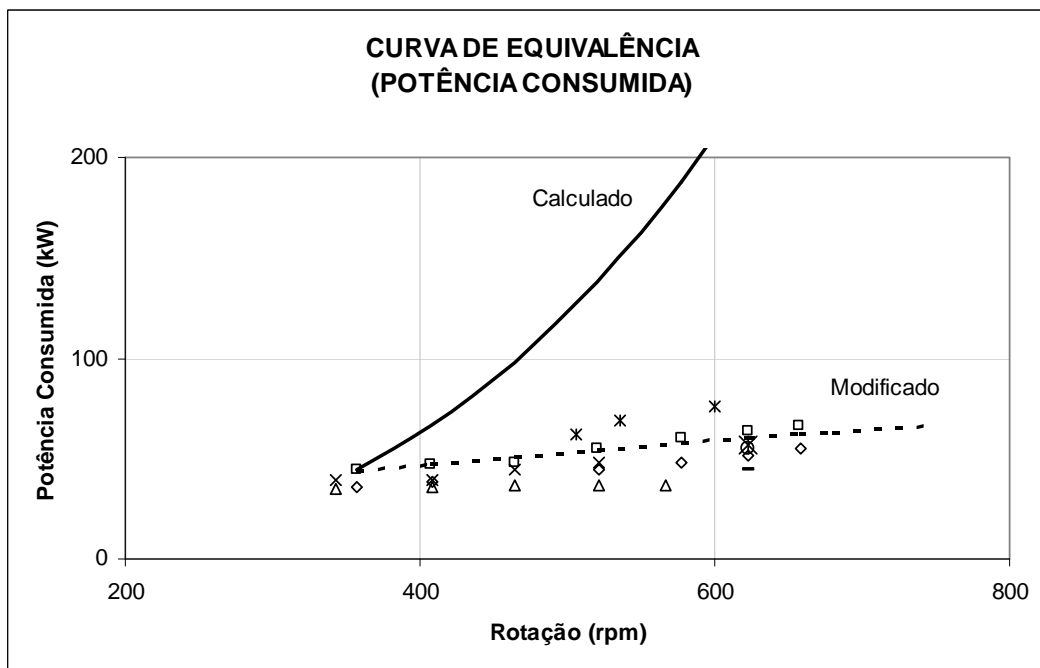
Onde:

- n: Rotação;
- Q: Vazão;
- P: Pressão; e
- N: Potência

Os gráficos abaixo (Figuras 7, 8 e 9) ilustram a análise de oito sistemas de bombeamento de espumas provenientes da flotação de minério de ferro, onde é possível observar uma discrepância entre os valores calculados e medidos no campo. Para os sistemas ilustrados os expoentes que melhor se ajustam as equações de Roteaux são de 0,4 para a vazão, 2,6 para a pressão e 1,8 para a potência consumida.



**Figura 7.** Curva de equivalência para pressão de recalque.



**Figura 8.** Curva de equivalência para a potência consumida.

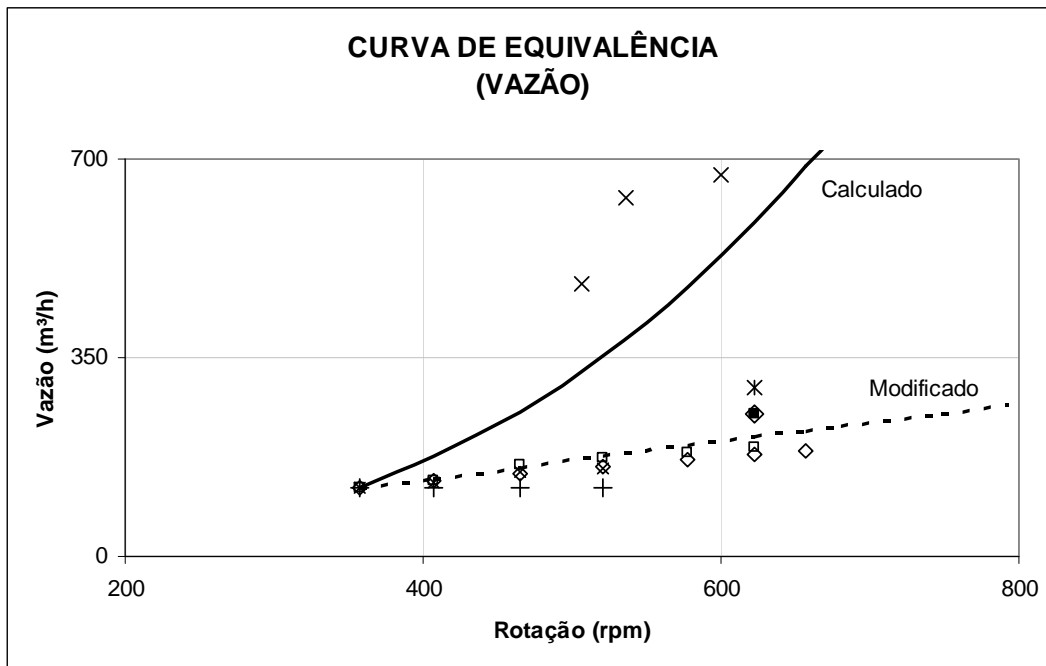


Figura 9. Curva de equivalência para a vazão.

Dentre os desafios atuais do bombeamento de espumas, esta o desenvolvimento de equações que possam descrever os fenômenos envolvidos no seu bombeamento.

#### 4 BOMBAS

Quando tratamos especificamente da bomba de espumas, fatores como posição de montagem da bomba, velocidade do rotor e desenho isométrico da tubulação de recalque devem ser considerados.

A posição da bomba deve evitar o acúmulo e recirculação de material no interior da carcaça devido ao ar livre no interior na bomba. Desta forma a montagem inclinada da bomba pode favorecer de forma significativa a eliminação deste ar, considerando o fato de que no bocal de descarga encontra-se a região de maior pressão no interior da bomba (Figura 10).

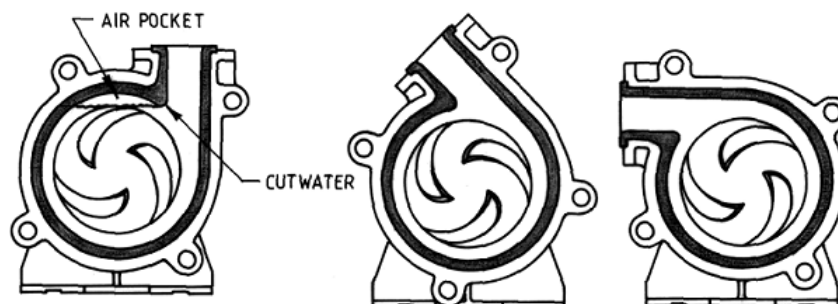


Figura 10. Posição de montagem de bombas (Warman).<sup>(5)</sup>

O projeto de bombeamento de espumas também deve considerar o caminhamento da tubulação de forma que o número de singularidades seja reduzido ao máximo e a altura manométrica também. Alturas superiores a 25~28mca devem ser evitadas.



## 5 ROTAÇÃO

O bombeamento de polpas espumosas é fortemente afetado pela velocidade de rotação da bomba e o seu ajuste pode ser a solução mais simples e rápida. Conforme visto anteriormente, nem sempre o aumento da rotação resulta em aumento da vazão em uma relação linear. Quando a rotação é aumentada, o fenômeno de bloqueio por ar na sucção é potencializado e a partir de certo instante ocorre uma brusca oscilação na pressão da linha de recalque (Figura 11).

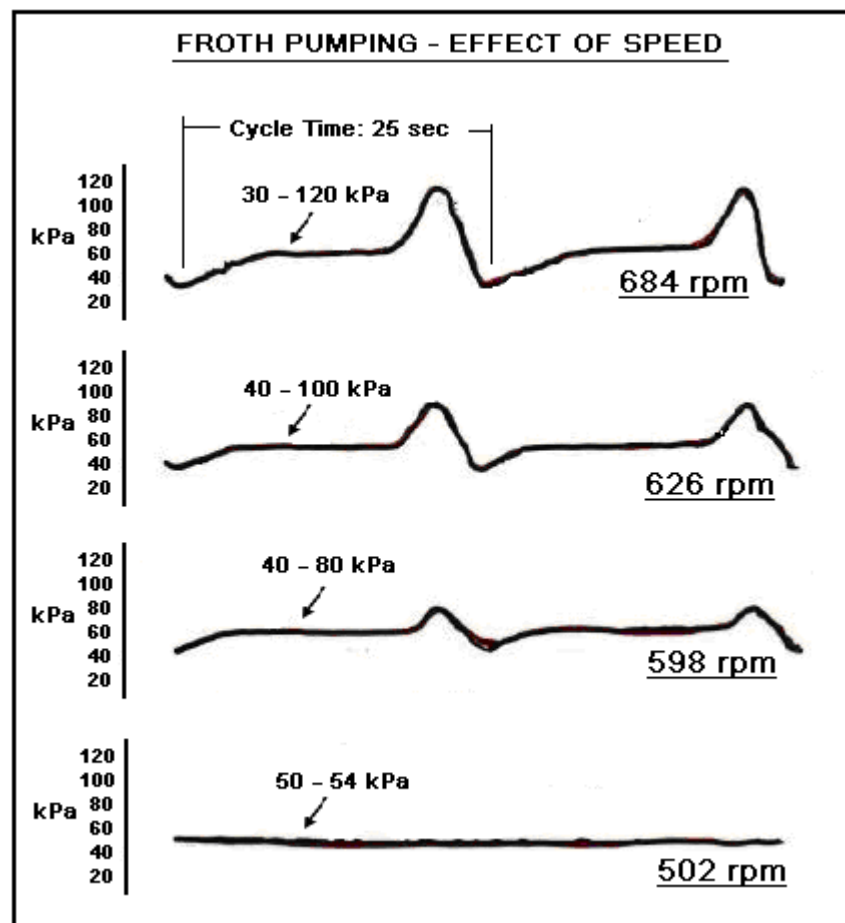


Figura 11. Efeito da velocidade de rotação (Adaptado de Williams).<sup>(4)</sup>

Via de regra, para o bombeamento de espumas, quanto menor a rotação da bomba mais estável será a pressão e melhor a condição de bombeamento.

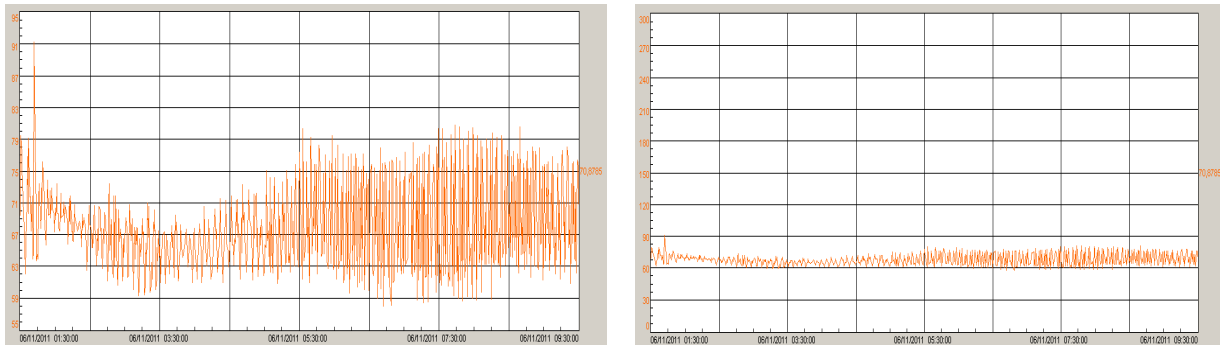
## 6 AUTOMAÇÃO E CONTROLE

O sistema de automação e controle representa uma parte de grande importância nas operações de bombeamento de espumas. A prática comum utiliza medidores tipo ultrasônico para a medição e controle de nível de caixas de polpa. Via de regra estes medidores são utilizados como elemento de controle da rotação da bomba, através da interligação com o inversor de frequência.

Porém este tipo de instrumento é fortemente impactado pela presença da camada de espumas e apresenta grande oscilação na medição quando aplicado em polpas espumosas (Figura 12). Esta oscilação acarreta uma atuação errada da malha de

controle e como consequência na rotação da bomba, impactando na estabilidade da operação.

Para caixas com polpas espumosas o mais indicado são medidores tipo bóia ou por pressão diferencial. Estes tipos de medidores suavizam as oscilações de medição e permitem uma atuação mais precisa da malha de controle, evitando mudanças repentinas na rotação da bomba.



**Figura 12.** Controle de nível das caixas.

O bom funcionamento do sistema de automação e controle também está diretamente relacionado com o tempo de residência da caixa. O volume da caixa deve ser suficiente para que o inversor de frequência tenha tempo para atuar na redução e/ou aceleração da rotação da bomba. O derivativo do inversor de frequência deve ser ajustado de forma que a curva de aceleração/redução da bomba tenha tempo de resposta suficiente para evitar transbordos por nível alto ou parada por nível baixo.

Medidores de vazão tipo magnético também são afetados pela presença de espumas e apresentam medições com fortes oscilações. Uma boa alternativa pode ser a instalação de um transdutor de pressão na linha de recalque. Este transdutor irá fazer uma leitura direta da altura manométrica e irá permitir o cálculo da vazão com relativa precisão.

## **7 ESPUMA**

### **7.1 Fator de Espuma**

Atualmente a forma mais aceita para o cálculo do fator de espuma é o método proposto pelo principal fornecedor de bombas, que basicamente considera a altura da camada de espumas em relação à interface. O fator de espuma calculado entra como um multiplicador direto da vazão. O procedimento proposto encontra-se descrito no Weir Minerals Technical Bulletin #28 (Weir).<sup>(6)</sup>

Este método é muito eficaz para o dimensionamento da bomba, porém apresenta algumas limitações, pois não considera o fato de que ao longo do processo, o volume de ar disperso no sistema vai variando e conseqüentemente o próprio fator de espuma. O desafio está em saber a quantidade de ar contido na polpa no bocal de sucção da bomba. Como exemplo, na usina de beneficiamento de minérios de Vargem Grande, o fator de espuma do rejeito da flotação de minério de ferro varia de 2,5 na calha de transbordo da coluna para 1,6 na linha de sucção da bomba.

## 7.2 Fator de Estabilidade ( $\alpha$ )

Devido à falta de referências na indústria mineral, mais uma vez se faz necessário adaptar procedimentos de outras áreas.

O cálculo do fator de espuma responde a questão referente ao volume de ar presente no sistema, porém não diz nada sobre sua estabilidade. A indústria mineral não utiliza o fator de estabilidade de espumas como um fator preponderante para o bombeamento de espumas, porém, medidas do grau de estabilidade da espuma podem fornecer informações importantes, pois trata da “qualidade” da espuma, ajudando no desenvolvimento de soluções para sua eliminação antes de sua entrada na bomba.

Segundo Delicato<sup>(2)</sup> as medidas de estabilidade de espumas podem ser realizadas sob condições dinâmicas ou estáticas. A primeira corresponde a uma situação na qual as velocidades de formação e destruição da espuma se igualam e uma situação de equilíbrio dinâmico é alcançada. No caso da medida em condições estáticas, nenhum processo de regeneração é realizado, seja na reposição do líquido, gás ou agitação; deixa-se apenas a espuma colapsar e a velocidade de formação de espumas é zero durante as medidas.

Os principais métodos utilizados para formação e medidas de estabilidade de espumas são o método dinâmico de Bikerman, e os dois métodos estáticos: Teste de Ross-Miles e o Método de Bartsch.

O cálculo do fator de estabilidade ( $\alpha$ ) aqui proposto utiliza o método de Bartsch adaptado por Falcucci e Turrer<sup>(7)</sup>, onde a polpa foi condicionada em uma proveta de 2.000mL, em pH 7,1 e pH 12,3 e depois foi adicionado o agente espumante (amina). Após a agitação, com auxílio de um plunger, traçou-se a curva da altura da camada de espuma em função do tempo (Figura 13) e com o auxílio da equação (Equação 4) o fator pode ser determinado (Figura 14).

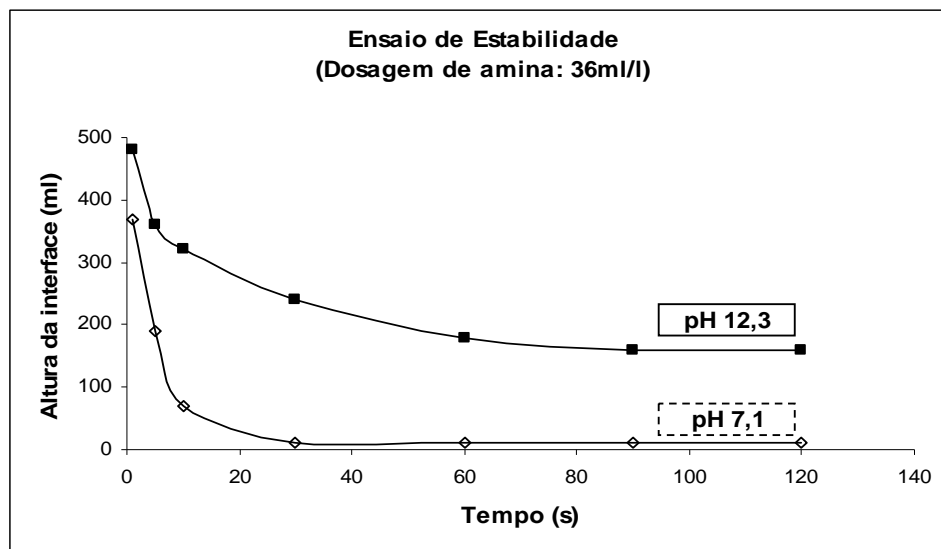


Figura 13. Curva do teste de estabilidade de espumas com adição de amina (adaptado de Falcucci e Turrer).<sup>(7)</sup>

$$\frac{H}{H_0} \longleftrightarrow -\alpha \times \log \left( \frac{t}{t_{1/2}} \right)$$

Eq. 4

Onde:

- H: Altura da interface
- $H_0$ : Fator de normalização da altura da interface
- $\alpha$ : Fator de estabilidade da espuma.
- t: tempo
- $t_{1/2}$  : Fator de normalização do tempo.

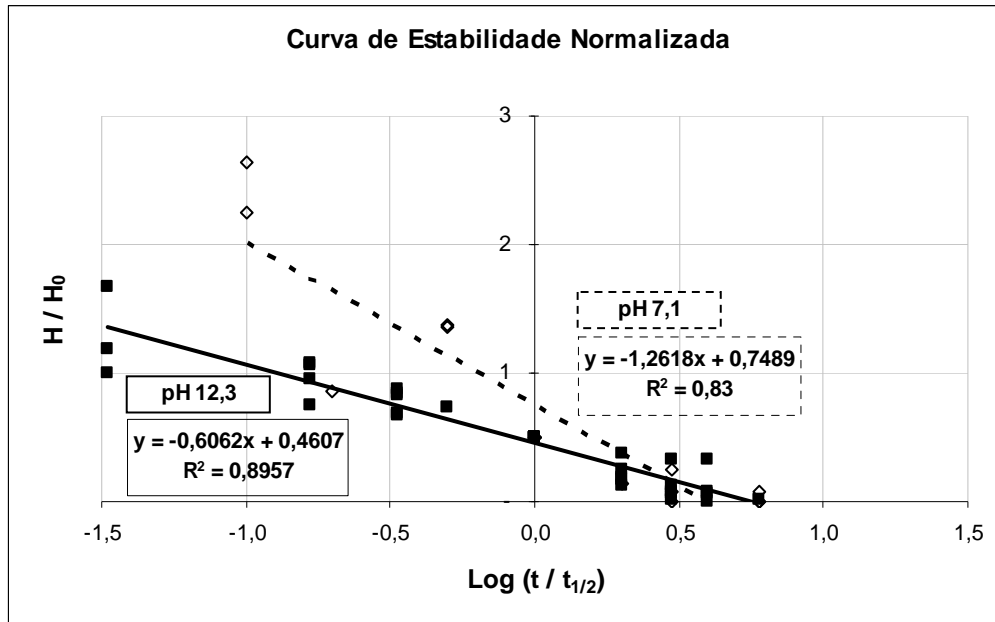


Figura 14. Curva normalizada para determinação do fator de estabilidade.

Observando o exemplo apresentado, a polpa condicionada com 36ml/l de amina em pH 12,3 apresenta um fator de estabilidade de 0,60 e a polpa condicionada em pH 7,1 apresenta um fator de estabilidade 1,26. Vale lembrar de que quanto mais baixo o fator  $\alpha$ , mais estável é a espuma.

A medida da estabilidade da espuma pode ser útil na determinação do tempo de residência da caixa, comprimento da tubulação de alimentação, no posicionamento de chuveiros quebra espuma dentre outras coisas.

## 8 CONCLUSÃO

O bombeamento de polpas com a presença de espumas representa um grande desafio para a indústria mineral.

O presente documento não tem a pretensão de apresentar soluções prontas e definitivas para o bombeamento de espumas, mas sim reunir informações e observações de aspecto prático que necessitam ser observados quando este tipo de solução passa a ser considerado.

Diversos avanços já foram conseguidos nesta área, porém, ainda existe muito a ser feito. Atualmente o bombeamento de espumas consiste em uma mistura de engenharia e arte, com muitas soluções sendo adotadas após longos períodos de observação e lições aprendidas no passado.

Ainda existem pontos que precisam ser abordados e melhor entendidos, dentre eles podemos citar o fenômeno de bloqueio por ar na sucção (air lock), a medição eficaz da vazão e o desenvolvimento de equações que consigam descrever de maneira mais precisa os fenômenos envolvidos no bombeamento de espumas.

Outro fator que jamais pode ser desconsiderado é a presença do agente espumante. Ganhos significativos podem ser obtidos através do conhecimento dos seus mecanismos de atuação e suas relações com concentração e dosagem.

## REFERÊNCIAS

- 1 VENTURELLI, V. H. Estudo da atividade antiespumante de ésteres etílicos derivados de óleos vegetais. Dissertação de Mestrado, FFCLRP, USP, Ribeirão Preto, SP, 2008.
- 2 DELICATO, T. Drenagem de espumas gás-líquido e influência da presença de partículas e anti-espumantes. Dissertação de Mestrado, FFCLRP, USP, Ribeirão Preto, SP, 2007.
- 3 ABULNAGA, B. E. Slurry Systems Handbook. McGraw-Hill Books, New York, NY, 2002.
- 4 WILLIAMS, P. Suction side considerations for slurry and froth pump. Calgary Pump Symposium, Calgary, AB, 2011.
- 5 WARMAN INTERNATIONAL LTD. Warman Slurry Pumping Handbook, Sidney Australia: Warman International, 2000.
- 6 WEIR MINERALS. Pumping Froth. Weir Minerals Technical Bulletin No.28 – Version 2, Sidney Australia: Warman International, 2008.
- 7 FALCUCCI A., TURRER H.D.G. The effect of pH on froth properties. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas e 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Belo Horizonte, MG, 2013.