

DESENVOLVIMENTO DE COLETORES EFETIVOS NO CONTROLE DE ESPUMA E REMOÇÃO DE SILICATOS EM MINÉRIOS CARBONATADOS

ALBINO, K.I.P.¹, SVENSSON, M.², GUSTAFSSON, J-O.², LIMA, O.A.¹

¹AkzoNobel Surface Chemistry, Itupeva – SP, Brasil. kelly.albino@akzonobel.com,
odair.lima@akzonobel.com

²AkzoNobel Surface Chemistry, Stenungsund, Suécia. magnus.svensson@akzonobel.com, jan-
olof.gustafsson@akzonobel.com

RESUMO

A qualidade da espuma (volume, estabilidade e mineralização) é considerada um dos principais fatores de desempenho de coletores em plantas de flotação. A formação excessiva e alta estabilidade da espuma ocasiona dificuldades de bombeamento, custos com aplicação de anti-espumantes e problemas com órgãos ambientais. A AkzoNobel tem trabalhado continuamente no desenvolvimento de coletores que possam contribuir para solucionar problemas relacionados à espuma, mantendo o desempenho metalúrgico do processo. Neste trabalho foi estudado o comportamento da flotação (i.e. teor, recuperação e qualidade de espuma) em minério carbonatado rico em calcita com ganga silicatada. A fim de alcançar êxito nessa tarefa, um coletor customizado foi desenvolvido para esse tipo específico de minério. O desenvolvimento desse novo coletor foi possível devido ao desenvolvimento de novos componentes adicionados à formulação do coletor, que lhe conferem características únicas. Os resultados mostraram que o coletor desenvolvido especificamente para este minério foi capaz de reduzir o teor de SiO₂ de 4,53% para 0,24% com uma alta recuperação. Além do alto desempenho metalúrgico foi possível melhorar a qualidade da espuma, obtendo-se um volume controlado, de fácil quebra e uma espuma bem mineralizada.

PALAVRAS-CHAVE: flotação; coletores; qualidade de espuma.

ABSTRACT

Froth quality (volume, stability and mineralization) is considered one of the main performance factors of collectors in industrial flotation plants. The excessive froth formation and its high stability lead to difficulties in the pumping of the floated material, costs due to the application of defoamers and also environmental problems with authorities. AkzoNobel has continuously worked on the developing of new collectors that can contribute to solve froth related problems but without jeopardize the flotation performance. In this work was investigated the flotation behavior (i.e. grade, recovery and froth quality) when treating a rich carbonaceous ore, mainly calcite containing silicates as non-valuable minerals. In order to fulfill this task, a tailor-made collector was developed for this purpose. The development of this tailor-made collector was feasible due to the development of new chemicals that provide unique features to the collector. The results showed that the tailor-made collector could reduce the grade of SiO₂ from 4.53% down to 0.24% and achieving a high recovery. Those results are practically the same obtained by another cationic collector which has no addition of the new chemical component in its formulation. Additionally, this new collector could also improve the froth quality, generating a controlled volume of a loaded froth which presented a continuous and quick breakage.

KEYWORDS: flotation; flotation collectors; froth quality.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da espuma é de fundamental importância quando se trata de sistemas de flotação. A espuma gerada na flotação constitui-se de um sistema trifásico, composto por bolhas de ar com partículas sólidas dispersas sobre elas. Revisões interessantes sobre o estado da arte no que diz respeito às características de espumas em circuitos de flotação têm sido publicadas na literatura especializada (Hunter *et al.*, 2008; Farrokhpay, 2011; Ata, 2012).

A formação excessiva de espuma e/ou sua alta estabilidade pode gerar sérios problemas em um circuito industrial de flotação. Tais problemas podem variar desde a utilização de altas dosagens de anti-espumantes para controlar a espuma, aumentando dessa forma os custos associados ao processo, até o comprometimento do funcionamento adequado de alguns equipamentos, como bombas de polpa (Tsatouhas *et al.*, 2006). Em alguns casos, a alta estabilidade da espuma da flotação pode implicar em problemas ambientais com autoridades governamentais.

De acordo com Schwarz *et al.* (2002) apud Tsatouhas *et al.* (2006) a estrutura e estabilidade das espumas geradas na flotação dependem principalmente do tipo e concentração do espumante utilizado e da quantidade e natureza das partículas suspensas na fase espuma, em que se destacam a hidrofobicidade e o tamanho dessas partículas. Outros parâmetros como qualidade da água de processo, parâmetros de dispersão de ar e ângulo de contato das partículas também podem afetar a estabilidade da espuma (Farrokhpay e Zanin, 2012). O tema relacionado à estabilidade da espuma em circuitos de flotação é de forma alguma trivial, e tem sido amplamente investigado por vários pesquisadores (Pugh, 1996; Tao *et al.*, 2000; Barbian *et al.*, 2003; Farrokhpay e Zanin, 2012; Aktas *et al.*, 2008; Wiese *et al.*, 2011; Wang e Yoon, 2006). No entanto, segundo Farrokhpay e Zanin (2012), ainda não se chegou a um consenso a respeito de um critério quantitativo de estabilidade da espuma na flotação, que possa relacioná-la com condições operacionais de forma a permitir a adoção de estratégias de controle a fim de otimizar o desempenho do processo de flotação.

A estabilidade da espuma em sistema bifásico está estreitamente relacionada com a energia superficial livre da interface ar/água, de forma que surfatantes desempenham um papel importante na estabilidade de uma espuma (Wang e Yoon, 2006). No caso da flotação de minerais, especificamente na flotação de silicatos, as aminas e seus derivados são os coletores utilizados em circuitos industriais para promover a remoção desses minerais do mineral de minério. Em alguns casos, como na separação de silicatos de minério carbonatado rico em calcita, devido aos pH's de flotação e condicionamento do coletor, e às características de dissociação e hidrólise das aminas, estas atuam como espécie coletora e também como espumante (Fuerstenau *et al.*, 1985). No entanto, dependendo dos vários fatores anteriormente mencionados, pode haver a formação ou de uma espumação excessiva, ou de uma espuma com alta estabilidade ou ambos.

A AkzoNobel Surface Chemistry – ANSC tem trabalhado intensamente no desenvolvimento de novos coletores para flotação de minerais. Um dos principais objetivos a ser alcançado, além do desempenho do processo, é a obtenção de uma espuma de qualidade no que diz respeito a sua estabilidade e volume. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar e discutir resultados de testes de flotação em que foram testadas duas formulações como agentes coletores, quais sejam Coletor A e Coletor B. As duas formulações são à base de misturas de derivados de aminas. O Coletor A é uma formulação composta de produtos já utilizados no mercado, enquanto que o Coletor B é uma mistura de novos produtos desenvolvidos especificamente para controlar o volume de espuma e modular sua estabilidade, sem prejudicar o desempenho metalúrgico da flotação. O minério utilizado nos testes de flotação foi uma amostra de minério carbonatado, rico em calcita, com ganga silicatada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Amostras de minério

Amostras de minério carbonatado rico em calcita, apresentando granulometria com 20% retido em 297 μm e ganga silicatada, foram utilizadas nos testes de flotação ilustrados neste trabalho. A homogeneização do material foi feita a partir de pilhas alongadas, sendo retiradas as amostras para alimentação da flotação. A Tabela I reúne os resultados de análises químicas da alimentação da flotação, determinadas por Fluorescência de Raios X.

Tabela I.– Análise química por FRX da alimentação da flotação.

%CaO	44,5	%Al ₂ O ₃	0,41
%MgO	8,19	%Fe ₂ O ₃	1,42
%SiO ₂	4,53	%PF	38,2

2.2 Coletores utilizados nos testes de flotação

Dois tipos de coletores foram utilizados neste trabalho: 1) um coletor à base de uma mistura de derivados de aminas e eteraminas, Coletor A, e; 2) um coletor à base derivados de aminas, em que foi adicionado um componente cuja função é alterar a qualidade da espuma, sem prejudicar o desempenho da flotação, Coletor B. A Tabela II sumariza algumas propriedades dos coletores usados nos testes de flotação.

Tabela II. Propriedades físicas dos coletores usados nos testes de flotação.

Coletor	Aspecto ^(*)	Viscosidade ^(*) , cP	Densidade ^(*) , kg/m ³	pH ^(**)
A	Líquido	140	918	11
B	Líquido	84	878	11

(*) Determinado a 25°C. (**) Referente a uma solução 10% p/v.

Ambos os coletores foram adicionados na forma de soluções a uma concentração de 1% p/v. Os testes de flotação foram conduzidos até a exaustão da espuma. A Tabela III traz as condições operacionais dos testes de flotação.

Tabela III. Condições operacionais dos testes de flotação.

Sólidos no cond, %	30	pH cond do coletor	9,2
Sólidos na flotação, %	30	pH da flotação	9,2
Tempo cond coletor, min	1	Dosagem coletor, g/t	300

2.3. Comportamento da espuma em sistema bifásico: testes em Tubo Ross-Miles

De forma complementar às observações, feitas em tempo real, sobre a qualidade da espuma gerada nos testes de flotação, foram realizados testes comparativos de estabilidade de espuma utilizando o Tubo Ross-Miles, de acordo com a norma ASTM – D1173 – 07 “Standard Test Method for Foaming Properties of Surface-Active Agents”. A literatura especializada reporta que partículas sólidas afetam o comportamento da espuma gerada em sistemas de flotação (Hunter *et al.*, 2008; Schwarz *et al.* (2002) apud Tsatouhas *et al.* (2006); Massinaei *et al.*, 2009). Por outro lado, a estabilidade da espuma da flotação é, de acordo com Wang e Yoon (2006), largamente dependente da estabilidade da espuma em um sistema bifásico. Dessa forma, a combinação judiciosa de ensaios em tubo Ross-Miles clássico, portanto sistemas bifásicos (líquido+ar), com a observação do

comportamento da espuma em testes de flotação de bancada, podem ser úteis na caracterização da espuma gerada na flotação, ou seja, em sistemas trifásicos (líquido+ar+sólidos).

2.4. Comportamento da espuma em sistema trifásico: Testes em Coluna AkzoNobel

Para investigar o comportamento da espuma gerada na flotação, ou seja, em um sistema trifásico, a AkzoNobel desenvolveu um equipamento específico para a realização de tais testes, ou seja, a investigação do volume e estabilidade da espuma gerada na flotação. Tal equipamento é constituído de uma coluna de acrílico transparente, adaptada a uma base que contém um impelidor que pode ser acionado em uma dada rotação. Ar é injetado, a uma vazão pré-determinada, pela base da coluna. A fim de simular um sistema real de flotação, as condições operacionais são mantidas o mais próximo possível dos testes de flotação realizados em laboratório. Uma vez ajustadas as condições operacionais, o teste é iniciado e a altura da camada de espuma gerada durante cada teste é monitorada em função do tempo. Para avaliar a estabilidade da espuma, o ar é desligado sendo então monitorado o decréscimo da camada de espuma ao longo do tempo. A Tabela IV apresenta as condições utilizadas para os testes de espuma na coluna AkzoNobel.

Tabela IV. Condições operacionais dos testes de espuma realizados em coluna AkzoNobel.

Cond sólidos no cond, %	30	Dosagem coletor, g/t	300
Tempo cond coletor, min	1	Rotação, rpm	830
pH cond do coletor	9,0 – 9,5	Vazão de ar, L/min	1,0

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Desempenho metalúrgico da flotação

A Figura 1 ilustra os resultados obtidos nos testes de flotação reversa de calcita com os dois tipos de coletores investigados neste trabalho. Pode ser observado na Figura 1 que ambos os coletores utilizados são efetivos na remoção de sílica do minério de carbonato, propiciando a obtenção de um concentrado de minério rico em CaO. A recuperação metalúrgica de CaO foi de 87,11% e 86,6% com os coletores A e B, respectivamente. No entanto, também pode ser observado na Figura 1, que há uma grande diferença no comportamento das espumas geradas nos testes de flotação quando cada um dos coletores é utilizado. Com o Coletor A é observado um maior volume de espuma logo após o término da flotação, enquanto que quando se utiliza o coletor Coletor B, tal comportamento não é mais observado. Em outros termos, observa-se a formação de um volume consideravelmente menor de uma espuma bem mineralizada. Além disso, a utilização do coletor Coletor B possibilitou a obtenção de um concentrado final com menor teor de sílica, mantendo praticamente constante todos os outros parâmetros de desempenho metalúrgico. A partir da observação da espuma gerada em cada teste de flotação, foi possível notar que o coletor Coletor B, além de promover a formação de um menor volume de espuma, também proporciona uma quebra mais rápida.

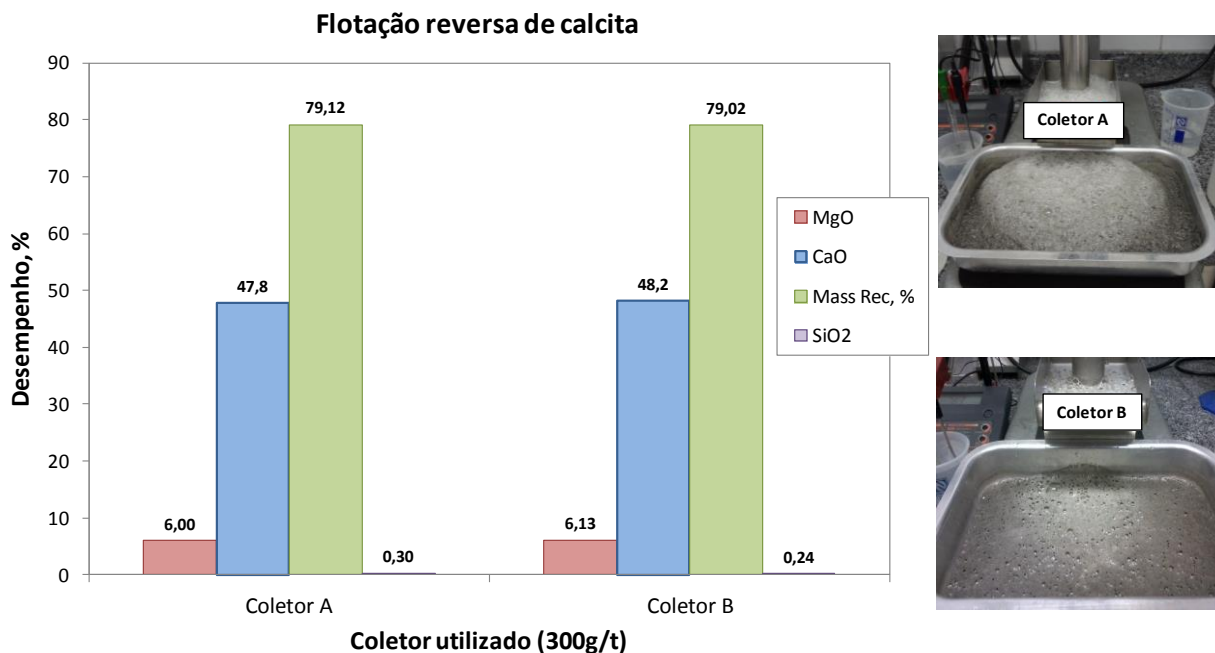


Figura 1. Desempenho da flotação utilizando os coletores A e B.

3.2. Testes para avaliação da qualidade de espuma em sistema bifásico

A fim de complementar as observações feitas durante os testes de flotação, sobre o volume e estabilidade das espumas geradas com os dois tipos de coletores utilizados, foram realizados testes em tubo Ross-Miles. A Figura 2 ilustra o comportamento das espumas bifásicas obtidas em tubo Ross-Miles utilizando-se o Coletor A e o Coletor B. No eixo das ordenadas está representada a altura atingida pelas espumas, adimensionalizada pela sua altura inicial H_0 .

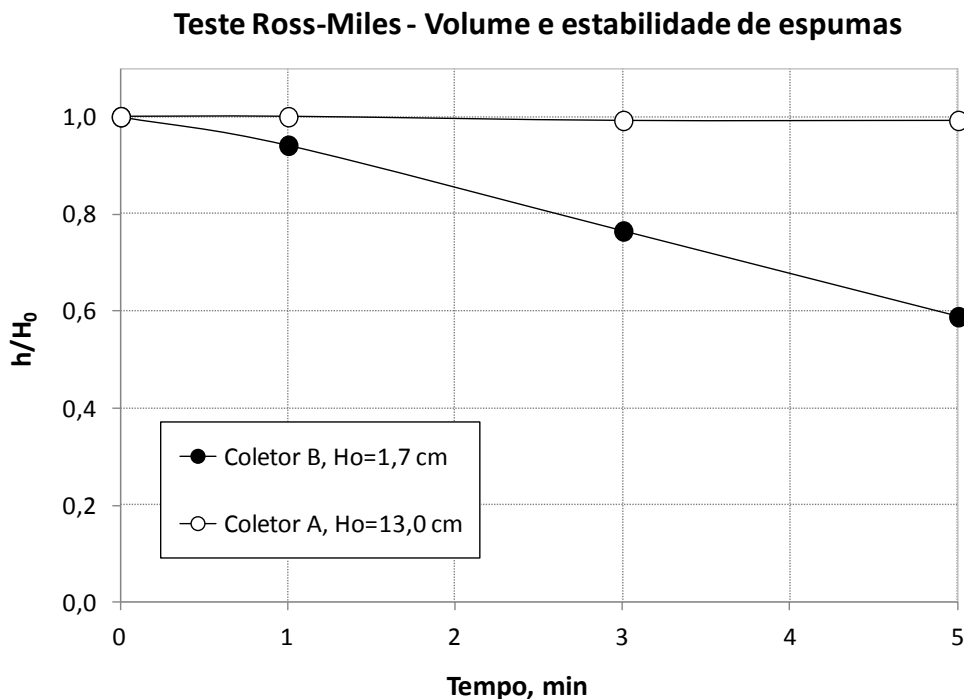


Figura 2. Resultados comparativos de volume e estabilidade de espumas em tubo Ross-Miles.

Pode ser observado na Figura 2, que os resultados dos testes de volume e estabilidade de espumas obtidos no tubo Ross-Miles corroboraram as observações a respeito do comportamento das espumas geradas nos testes de flotação, que foram realizadas durante a execução de cada experimento. Pode ser observado que o Coletor B gera menos volume de espuma - devido à sua menor altura inicial, e também uma espuma menos estável, devida a sua quebra rápida logo após sua formação, enquanto que o Coletor A apresenta uma velocidade de quebra muito mais lenta.

3.3 Testes para avaliação da qualidade de espuma em sistema trifásico

A fim de confirmar as observações feitas durante os testes de flotação, sobre o volume e estabilidade das espumas geradas com os dois tipos de coletores utilizados, foram realizados testes na Coluna AkzoNobel. A Figura 3 ilustra o comportamento das espumas trifásicas obtidas utilizando-se o Coletor A e o Coletor B. No eixo das ordenadas está representada a altura atingida pelas espumas.

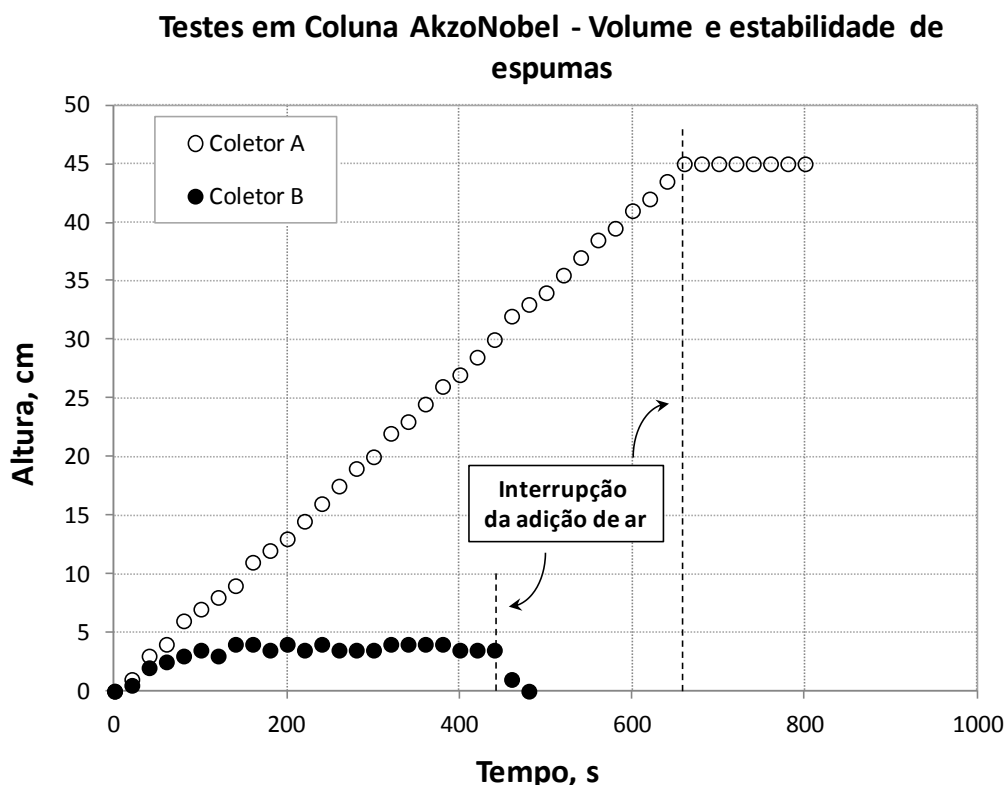


Figura 3. Resultados comparativos de volume e estabilidade de espumas em Coluna AkzoNobel.

A Figura 3 mostra que os resultados dos testes realizados na coluna AkzoNobel corroboraram as observações visuais da espuma feitas durante os testes de flotação, conforme ilustra a Figura 1. Os resultados obtidos na coluna AkzoNobel também estão de acordo com aqueles obtidos em Tubo Ross-Miles, como ilustrado na Figura 2. Nos testes realizados na coluna AkzoNobel, observa-se que, à medida que ar é injetado no sistema, o volume de espuma gerada pelo Coletor A aumenta continuamente até que a injeção de ar seja interrompida. A partir desse ponto ($t = 660$ s), a espuma gerada pelo coletor A apresenta-se estável. Por outro lado, nos testes feitos com o Coletor B, a altura da espuma gerada permanece estável mesmo durante a adição de ar ao sistema, e quebra facilmente após cessar a adição de ar ($t = 440$ s). Adicionalmente, a altura máxima da camada de espuma, durante a adição de ar, alcançada quando utilizado o Coletor B é consideravelmente menor que a alcançada quando utilizado o Coletor A.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o novo coletor de silicatos, Coletor B, desenvolvido pela AkzoNobel Surface Chemistry, tem a propriedade de atuar como um controlador da qualidade da espuma, melhorando sua quebra e também diminuindo seu volume, sem prejudicar o desempenho da flotação. Tal característica pode representar um ganho real em sistemas industriais de flotação, uma vez que tem o potencial de eliminar o uso de anti-espumantes, melhorar o bombeamento do material flutuado além de minimizar o uso de mão-de-obra para limpar o excesso de espumas na planta de beneficiamento.

5. REFERÊNCIAS

AKTAS, Z., CILLIERS, J.J., BANFORD, A. W. Dynamic froth stability: Particle size, airflow rate and conditioning time effects. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 87, Issues 1–2, p. 65-71, 2008.

ATA, S. Phenomena in the froth phase of flotation — A review. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 102 – 103, p. 1-12, 2012.

BARBIAN, N. , VENTURA-MEDINA, E., CILLIERS, J. J. Dynamic froth stability in froth flotation. *Minerals Engineering*, vol. 16, p. 1111–1116, 2003.

FARROKHPAY, S., ZANIN, M. An investigation into the effect of water quality on froth stability. *Advanced Powder Technology*, vol. 23, p. 493-497, 2012.

FARROKHPAY, S. The significance of froth stability in mineral flotation — A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 166, p. 1-7, 2011.

FUERSTENAU, M. C., MILLER, J. D., KUHN, M. C. Chemistry of flotation. In *Chemistry of Flotation*, p. 18. Ed. FUERSTENAU, M. C., MILLER, J. D., KUHN, M. C., SME, New York, 1985.

HUNTER, T. N., PUGH, R. J., FRANKS, G. V., JAMESON, G. J. The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances Colloid Interface Science*, vol. 137 (2), p.57-81, 2008.

MASSINAEI, M., KOLAHDOOZAN, M., NOAPARAST, M., OLIAZADEH, M., YIANATOS, J., SHAMSADINI, R., YARAHMADI, M. Froth zone characterization of an industrial flotation column in rougher circuit. *Minerals Engineering*, vol. 22, p. 272–278, 2009.

PUGH, R. J. Foaming, foam films, antifoaming and defoaming. *Advances Colloid Interface Science*, vol. 64, p. 67-142, 1996.

SCHWARZ, S., GRANO, S., FORNASIERO, D., RALSTON, J. Froth behavior in the presence and absence of model quartz particles. In: *Proceedings of WCPT4—World Congress on Particle Technology*, Sydney, Paper 290, 2002.

TAO, D., LUTTRELL, G., YOON, R.-H. A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 59, p. 25–43, 2000.

TSATOUHAS, G., GRANO, S. R., VERA, M. Case studies on the performance and characterisation of the froth phase in industrial flotation circuits. *Minerals Engineering*, vol. 19, p. 774–783, 2006.

WANG, L., YOON, R. -H. Stability of foams and froths in the presence of ionic and non-ionic surfactants. *Minerals Engineering*, vol. 19, p. 539-547, 2006.

WIESE, J., HARRIS, P., BRADSHAW, D. The effect of the reagent suite on froth stability in laboratory scale batch flotation tests. *Minerals Engineering*, vol. 24, p. 995–1003, 2011.