

MODELAGEM DA RECUPERAÇÃO DA ÁGUA NO PROCESSO DE FLOTAÇÃO.

L.C.M Montenegro¹, A. E.C. Peres², O.N. Savassi³

1 – Departamento de Engenharia de Minas – Universidade Federal de Minas Gerais. Rua Espírito Santo, 35/101, Centro. CEP 30.160-030. Belo Horizonte - MG
E-mail: lcmm@demin.ufmg.br

2 – Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais. Rua Espírito Santo, 35/206, Centro. CEP 30.160-030. Belo Horizonte - MG
E-mail: aecperes@demet.ufmg.br

3 – Minnovex Technologies Inc. Shepard Ave W. # 6 Toronto – Ontario – Canada M3K 2A2
E-mail: aecperes@demet.ufmg.br

RESUMO

O processo de flotação é inegavelmente o mais importante e versátil método de separação mineral. O desenvolvimento da flotação industrial tornou possível o processamento de depósitos de baixo teor e de alta complexidade mineral, os quais de outra forma não seriam economicamente viáveis.

Os principais mecanismos que atuam no processo de flotação são a flotação verdadeira, ou seja, o transporte devido a adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas e o processo de arraste mecânico. O processo de arraste mecânico é o principal mecanismo de transporte das partículas hidrofílicas para o flotado. Portanto o arraste mecânico tende a diminuir a seletividade do processo de flotação.

Os modelos propostos na literatura utilizam a recuperação da água para prever a recuperação devido ao arraste mecânico. Assim para a modelagem do processo de arraste é necessária uma determinação acurada da recuperação da água. Entretanto não têm sido dada suficiente atenção para o desenvolvimento de um modelo que represente a recuperação da água na zona de coleta e na zona de espuma. O principal objetivo do presente trabalho é a apresentação de um modelo matemático para prever a recuperação da água. O modelo é baseado em variáveis normalmente medidas no processo de flotação e não necessita de nenhuma medida especial para a sua calibração. Os resultados mostram que é possível prever a recuperação da água na zona de coleta e na zona de espuma por meio das variáveis operacionais normalmente medidas no processo de flotação.

PALAVRAS-CHAVE: flotação, modelagem, água, recuperação.

1. INTRODUÇÃO

A flotação em espuma é um processo de separação de partículas sólidas que explora as diferenças entre as características de superfície das várias espécies presentes. Basicamente a flotação envolve a adesão de partículas suspensas em uma polpa a bolhas de ar, provocando assim a levitação de agregados bolha-sólido. Independentemente do equipamento utilizado a flotação envolve uma série de mecanismos de transporte de massa os quais afetam tanto o teor quanto a recuperação do concentrado. Os principais mecanismos de transporte de massa são a adesão da partícula na superfície da bolha (flotação verdadeira) e o arraste mecânico (Subrahmanyam and Forssberg, 1988; Laplante et al., 1989). O transporte de massa por adesão e arraste mecânico pode ser dividido nas seguintes etapas (figura 1):

- i. adesão entre bolhas e partículas hidrofóbicas na região de polpa;
- ii. arraste mecânico de partículas suspensas na região de polpa independente da hidrofobicidade;
- iii. desprendimento de parte das partículas na região da espuma devido à coalescência e/ou colapso das bolhas (as partículas desprendidas ficam suspensas entre as bolhas juntamente com as transportadas por arraste mecânico);
- iv. drenagem de água e de parte das partículas suspensas entre as bolhas na região de espuma;
- v. transporte de partículas aderidas às bolhas para o concentrado;
- vi. transporte água e partículas suspensas entre as bolhas para o concentrado (inclui partículas desprendidas).

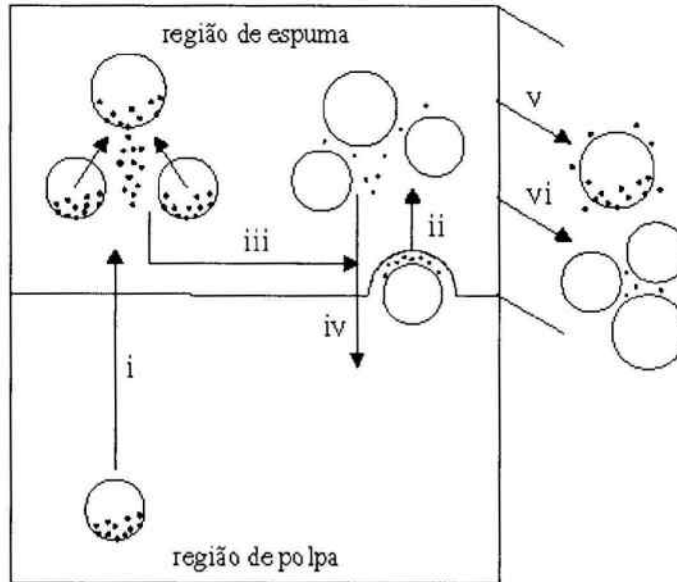


Figura 1 - Transporte de massa no processo de flotação (adaptado de Laplante et al., 1989).

A modelagem do arraste mecânico de partículas suspensas na região de polpa (etapa ii) e a drenagem de parte das partículas suspensas entre as bolhas na região de espuma (etapa iv) são baseadas na recuperação da água. Entretanto, não tem sido dada suficiente atenção para o desenvolvimento de um modelo que represente a recuperação da água na zona de coleta e na zona de espuma.

2. ESTRUTURA DO MODELO

O modelo aqui proposto para a recuperação da água leva em consideração a contribuição individual das regiões de polpa e espuma. Os únicos dados experimentais necessários para a calibração são a recuperação da água, a altura da espuma, fração volumétrica do ar e a vazão volumétrica de ar e da polpa na alimentação.

O modelo considera que a água é transferida da zona de coleta para a zona de espuma através de um mecanismo semelhante ao de um pistão (figura 2). As bolhas fazem o bombeamento da água da zona de coleta para a zona de espuma. Assumindo que existe um volume de polpa entre a bolha e a espuma, o total de água que efetivamente entra na espuma pode ser dada pela seguinte equação:

$$\frac{\text{volume de água que entra na espuma}}{\text{bolha}} = I_{ac} \pi \frac{d_b^2}{4} \Delta H \frac{V_a}{V_{sl}} \quad (1)$$

onde de I_{ac} é a eficiência de transporte da água e representa a fração do volume da polpa que se encontra entre a bolha e a espuma que é efetivamente transferida para a espuma; $\pi \frac{d_b^2}{4} \Delta H$ é o volume da polpa que se encontra entre a bolha e a espuma; d_b é o diâmetro médio da bolha; ΔH é a distância entre a bolha e a espuma; V_a é o volume de água e V_{sl} é o volume da polpa.

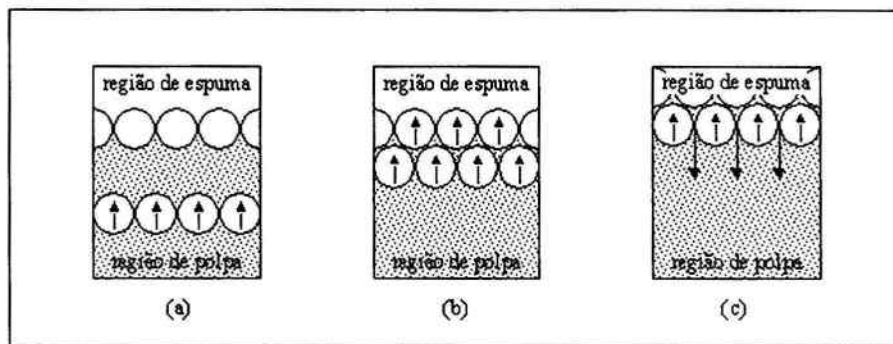


Figura 2 – Etapas do arraste mecânico em uma célula industrial de flotação: a) ascensão de bolhas de ar em direção à região de espuma, b) aprisionamento de água e partículas suspensas nos interstícios que se formam na interface entre as regiões de polpa e espuma, c) formação de uma nova interface e drenagem de água e partículas suspensas da espuma de volta para a polpa (adaptado de Smith e Warren, 1989). (Savassi, 1999).

O número de bolhas geradas em relação ao tempo é dado pela seguinte equação:

$$\frac{\text{bolhas}}{\text{tempo}} = \frac{Q_g}{1/6\pi d_b^3} \quad (2)$$

onde Q_g é a vazão do gás e d_b é o diâmetro médio da bolha.

Assim a taxa com que a água que é enviada para a zona de espuma pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\frac{dV_a}{dt} = - \left(\frac{3I_{ac}}{2d_b} \cdot \frac{Q_g \Delta H}{V_{sl}} \right) V_a \quad (3)$$

A equação é análoga à equação de cinética de primeira ordem e a solução da equação acima toma a seguinte forma:

$$V_a = V_{a_0} \exp \left(- \frac{3I_{ac}}{2d_b} \cdot \frac{Q_g \Delta H}{V_{sl}} \tau_{ac} \right) \quad (4)$$

onde V_{a_0} é o volume inicial de água na polpa e τ_{ac} é o tempo de residência da água na zona de coleta.

Substituindo os termos $V_{sl} = A_c \Delta H$; $J_g = Q_g / A_c$ e $S_b = 6 \frac{J_g}{d_b}$ na equação (4) a relação entre o volume inicial da água e o tempo assume a seguinte forma:

$$V_a = V_{a_0} \exp \left(- \frac{3I_{ac}}{2d_b} \cdot J_g \tau_{ac} \right) = V_{a_0} \exp \left(- \frac{1}{4} I_{ac} S_b \tau_{ac} \right) \quad (5)$$

A equação (5) pode ser rescrita em termos da recuperação da água na zona de coleta como:

$$R_{a_c} = 1 - \exp \left(- \frac{1}{4} I_{ac} S_b \tau_{ac} \right) \quad (6)$$

onde R_{a_c} é a recuperação da água da zona de coleta; S_b é a velocidade superficial de bolhas; I_{ac} é a eficiência de transporte da água pelas bolhas e τ_{ac} é o tempo de residência da água na zona de coleta.

O tempo de residência da água na zona de coleta pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\tau_{ac} = \left[A_c H_c (-\varepsilon_s - \varepsilon_g) \right] / Q_l \quad (7)$$

onde Q_l é a vazão volumétrica de líquido da fração não flotada; A_c é a área da seção transversal da coluna; H_c é a altura da zona de coleta; ϵ_g e ϵ_s são respectivamente a fração volumétrica do gás e a fração volumétrica dos sólidos e τ_{ac} é o tempo médio de residência da água na zona de coleta.

A taxa com que a água é drenada da espuma vai depender do volume de água inicialmente presente na espuma Rubinstein (1995) e Yianatos et al. (1987). Assim podemos supor que a taxa com que a água é drenada da espuma pode ser representada por uma equação diferencial de primeira ordem:

$$\frac{dV_a}{dt} = -\alpha V_a \tag{8}$$

onde V_a é o volume de água na espuma e α é o coeficiente de drenagem da água na região de espuma. A solução da equação (8) em termos da recuperação na zona de espuma é dada por:

$$R_{af} = \exp(-\alpha \lambda_{af}) \tag{9}$$

onde α é o coeficiente de drenagem da água na região da espuma e λ_{af} é o tempo médio de residência da água na espuma. Considerando que o tempo de residência da água na espuma é proporcional ao tempo de residência do ar podemos utilizar a equação (10) (Szatkowski, 1987) para determinar o tempo de residência do líquido na região de espuma:

$$\lambda_{ar} = \frac{h_f}{J_g} \tag{10}$$

onde h_f é a altura da camada de espuma e J_g é a velocidade superficial do gás.

Para o cálculo da recuperação total da água é necessário levar em consideração que existe um reciclo da água da zona de limpeza (espuma) para a zona de coleta. A figura (3) mostra o balanço de massa da água no processo de flotação em coluna. A recuperação total da água pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$R_a = \frac{R_{ac} R_{fc}}{R_{ac} R_{fc} + 1 - R_{ac}} \tag{11}$$

onde R_a é a recuperação total da água; R_{ac} é a recuperação da água na zona de coleta e R_{af} é a recuperação da água na zona de espuma.

Deve-se lembrar que no balanço de massa representado na figura (3) a água de lavagem não está incluída.

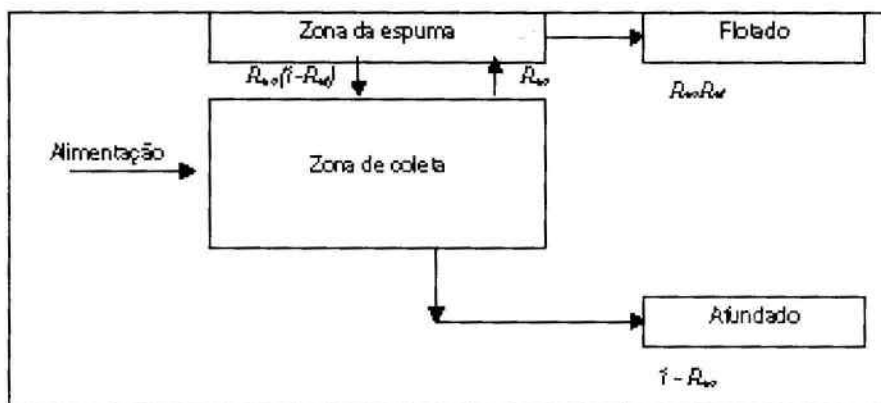


Figura 3 - Balanço de massa da água no processo de flotação em coluna considerando o reciclo da água da região da espuma (zona de limpeza) para a polpa (zona de coleta).

Deve ser enfatizado que os únicos parâmetros a ser calibrados no modelo são a eficiência de transporte da água, $I_{a,r}$, e o coeficiente de drenagem da água na região da espuma, α . Tais parâmetros não variam com mudanças na vazão do ar ou na altura da camada de espuma.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De modo a ilustrar a aplicação do modelo em um caso específico, uma campanha de amostragem foi conduzida em uma coluna de laboratório de 4 cm de diâmetro e 160 cm de altura. A coluna era equipada com um medidor para a vazão de ar e por dois eletrodos paralelos de aço inoxidável, dispostas verticalmente ao longo da coluna, para o controle do nível da polpa e da altura da camada de espuma.

O minério utilizado constituía alimentação de uma coluna "cleaner" industrial com teor fixo de sílica de 0,99 % aproximadamente.

Foram realizados 3 séries de 5 testes, cada série com uma dosagem de coletor (amina a 40, 80 e 160 g/t) e depressor fixas (amido a 250 g/t). A vazão de ar foi variada na faixa de J_g entre 0.2 e 0.5 cm/s, enquanto que a altura da camada de espuma foi variada entre 3 e 12 cm. Foram coletadas amostras para análise química do teor de sílica e ferro (hematita) e porcentagem de sólidos na alimentação, no flotado e no afundado produzidos em cada teste.

O modelo foi então calibrado pelo ajuste simultâneo dos parâmetros I_{a_c} e α , baseando-se na recuperação da água observados nas condições operacionais de cada teste.

4. RESULTADOS e DISCUSSÃO

A comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo é apresentada na figura 4. O coeficiente de correlação (R^2) entre os valores observados e estimados neste caso é superior a 0,90. Assim o modelo consegue agregar a facilidade de calibração com robustez, permitindo investigar com confiança o efeito das condições operacionais sobre a recuperação de água na flotação.

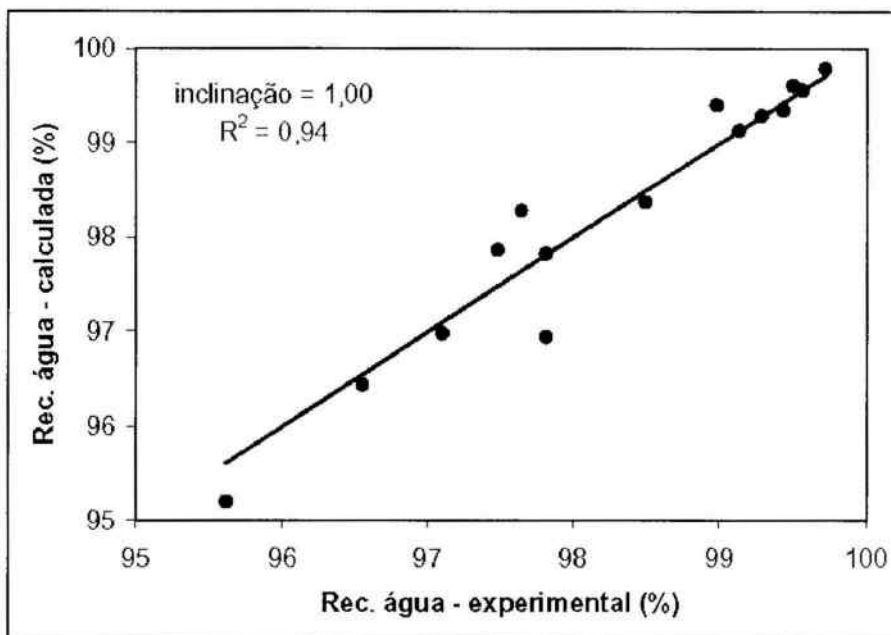


Figura 4 - Comparação entre a recuperação da água no afundado e os valores estimados pelo modelo.

O efeito da dosagem de coletor sobre a eficiência de transporte da água e a constante de drenagem é ilustrado na figura 5. Note que, dentro da faixa investigada, a eficiência de transporte da água não se altera significativamente com a adição do coletor. Por outro lado α , diminui com a adição de coletor, indicando um fortalecimento da estrutura da espuma devido ao aumento da concentração de partículas hidrofóbicas naquela região dificultando a drenagem da água (Dippennar, 1981). A amina na sua forma molecular atua como espumante contribuído para a estabilidade da espuma.

Após a calibração, o modelo pode ser utilizado para prever o efeito das condições operacionais sobre a recuperação da água em condições não analisadas por amostragem direta. A figura 6 e 7 apresenta resultados de simulação para variação da vazão de ar e a altura da espuma para as adições de coletor investigadas. Como era esperado, os resultados de simulação indicam que uma maior recuperação da água no afundado pode ser obtida por redução na vazão de ar ou ainda por um aumento na altura da camada de espuma.

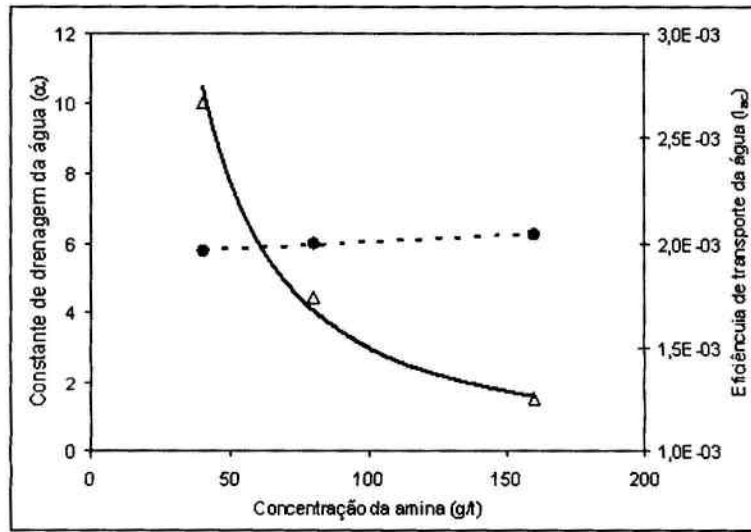


Figura 5 - Efeito da dosagem de coletor sobre a eficiência de transporte da água e a constante de drenagem.

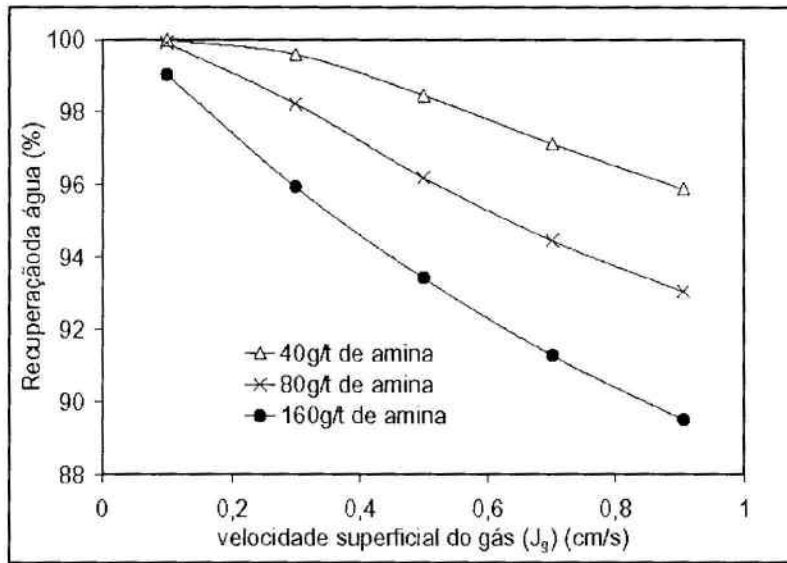


Figura 6 – Efeito da velocidade superficial do gás, J_g , na recuperação da água (vazão da polpa = 50g/s; $h_f = 5$ cm).

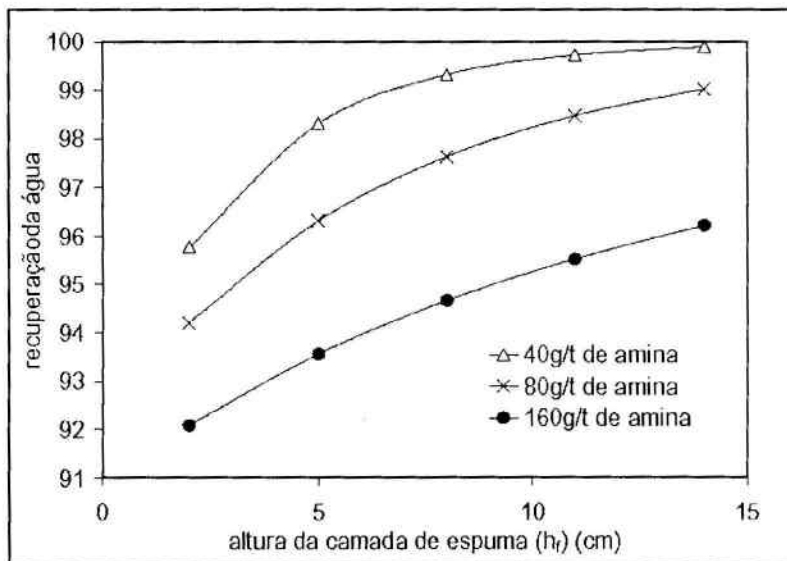


Figura 7 - Efeito da altura da espuma, h_f , na recuperação da água (vazão da polpa = 50g/s; $J_g = 0,52$ cm/s).

5. CONCLUSÕES

Quantificar a recuperação da água na zona de coleta e na zona de espuma é um importante passo para determinar o arraste mecânico de partículas suspensas na região de polpa independente da hidrofobicidade e a drenagem de partículas suspensas entre as bolhas na região de espuma. O modelo para a recuperação da água aqui apresentado é baseado em equações cujas premissas são claramente estabelecidas, apesar de seus parâmetros serem obtidos de forma empírica. O modelo consegue agregar a facilidade de calibração com robustez, permitindo investigar com confiança o efeito das condições operacionais sobre a recuperação da água.

6. REFERÊNCIAS

- Dippenaar A. The Destabilization of Froth by Solids I: The Mechanism of Film Rupture. *International Journal of Mineral Processing*, vol 9, pp 1-14, 1982.
- Falutsu M... Column Flotation Froth Characteristics - Stability of the Bubble Particle System. *International Journal of Mineral Processing*, vol 40, pp 225-243, 1994.
- Laplante, A. R., Kaya, M., Smith, H. W. The effect of froth on flotation kinetics – A mass transfer approach. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, J. S. Laskowski (ed.), 5, pp. 147-168, 1989.
- Rubinstein, J. B. *Column flotation: Processes, designs and practices*. 1. ed. Amsterdam: Overseas Publishers Association, 295, 1995.
- Savassi, O. N. Direct estimation of the degree of entrainment and the froth recovery of attached particles in industrial flotation cells. PhD Thesis, University of Queensland, 1999.
- Subrahmanyam T. V. and Forssberg, K. S. E. Froth Stability, Particle Entrainment and Drainage in Flotation -A Review. *International Journal of Mineral Processing*, 23, pp. 33- 53, 1988.
- Szatkowski, M. Factors Influencing Behaviour of Flotation Froths. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C)*, vol 96, pp 115-122, 1987.
- Yianatos, J. B., Finch, J. A. and Laplante, A. R. Cleaning action in column flotation froths. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C*, 96, Dec., C199-C205, 1987.