

ELETROFLOTAÇÃO APLICADA À RECUPERAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS ULTRAFINAS.

José Farias Oliveira*, Achilles Junqueira B. Dutra e Rupen Adamian

Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – COPPE/UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ
*oliveira@metalmat.ufrj.br

RESUMO

A eletroflotação caracteriza-se pela utilização de micro-bolhas de oxigênio e hidrogênio resultante da decomposição eletrolítica da água, pela passagem de uma corrente elétrica contínua. Em muitos aspectos, a eletroflotação assemelha-se à flotação por ar dissolvido, sendo ambos os processos aplicáveis ao tratamento de efluentes. A utilização de micro-bolhas é uma característica inerente aos dois processos. No entanto, enquanto na flotação por ar dissolvido as bolhas formadas apresentam dimensões na faixa de 40 a 100 μm , na eletroflotação as bolhas são ainda menores, apresentando diâmetro médio da ordem de 30 μm .

No presente trabalho são apresentados resultados de pesquisa referentes à aplicação do processo de eletroflotação como coadjuvante no processamento mineral de partículas finas. Ensaios de flotação foram realizados com aparelhagem especialmente projetada visando estudar a eletroflotação como um sistema de flotação complementar, em escala de bancada. Os resultados obtidos mostraram, por exemplo, que na flotação de um minério de estanho, com alta percentagem de finos, a recuperação poderia ser aumentada em cerca de 15% pela utilização da eletroflotação como coadjuvante.

No tratamento de efluentes, a eletroflotação representa uma alternativa competitiva que vem se consolidando nos anos recentes, um aspecto também abordado no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: eletroflotação, tratamento de efluentes, partículas finas.

I. INTRODUÇÃO

A eletroflotação caracteriza-se pela utilização de micro-bolhas de oxigênio e hidrogênio resultante da decomposição eletrolítica da água, pela passagem de uma corrente elétrica contínua. Em muitos aspectos, a eletroflotação assemelha-se à flotação por ar dissolvido, sendo ambos os processos largamente utilizados no tratamento de efluentes (Ge et al., 2004 e Chen, 2004). Os dois processos baseiam-se na utilização de microbolhas, sendo também semelhantes os equipamentos de separação. No entanto, enquanto na flotação por ar dissolvido as bolhas formadas apresentam dimensões na faixa de 40 a 100 μm , na eletroflotação as bolhas são ainda menores, apresentando diâmetro médio da ordem de 30 μm , dependendo da densidade de corrente.

Do ponto de vista do tratamento de efluentes (Oussedie e Khelifa, 2001 e Muruganathan et al., 2004), a eletroflotação permite ainda a exploração de algumas características importantes: a) permite um arranjo dos eletrodos, de forma a suprir de microbolhas toda a área do tanque de separação; b) a minimização da turbulência, diminuindo as possibilidades de quebra dos flocos eventualmente formados; c) o conseqüente favorecimento das condições de floculação como etapa inicial do processo de flotação.

Em uma revisão do processo de eletroflotação aplicado ao tratamento de efluentes, Bratby e Marais (1977) abordaram algumas questões importantes. São discutidos aspectos referentes ao material de eletrodos e projeto dos mesmos, técnicas experimentais bem como aspectos econômicos de variáveis do processo. Em um trabalho recente, Gao *et al.* (2005) estudaram um processo combinado de eletrocoagulação e eletroflotação que resultou na remoção de cromo de água poluída para valores abaixo de 0,5 mg/L. A remoção de metais pesados foi também estudada por Poon (1997), que demonstrou ser a eletroflotação um método competitivo do ponto de vista econômico para a descontaminação de água subterrânea na remoção de Ni, Pb, Zn e Cu. A utilização combinada da floculação e da eletroflotação foi estudada por Mostefa e Tir (2004), para remoção da fase óleo de emulsões óleo/água. A eficiência de remoção chegou a 99% para uma emulsão contendo 4% (em peso) em condições otimizadas.

A partir do importante trabalho apresentado por Glembotsky *et al.* (1975), foi despertado o interesse da área mineral pela aplicabilidade de eletroflotação na recuperação de finos. Com efeito, esses autores, após uma revisão dos trabalhos desenvolvidos sobre eletroflotação, apresentaram resultados positivos de aplicação da eletroflotação à recuperação de finos de manganês e diamante. Outros aspectos abordados no trabalho citado são:

- a) a homogeneidade de tamanho das microbolhas formadas e a baixa tendência à coalescência dos gases formados, quando utilizados separadamente;
- b) a vantagem da utilização dos gases eletrolíticos para ativar as partículas grosseiras numa flotação combinada com bolhas de ar;
- c) a possibilidade de controle do tamanho das microbolhas pela escolha adequada do material dos eletrodos e pH da solução; por exemplo, com eletrodos de platina em pH = 2, as bolhas de hidrogênio apresentam diâmetro médio de 70 μm , ao passo que em pH = 12, o diâmetro médio é de 30 μm ; as microbolhas de oxigênio, ao contrário, apresentam diâmetro médio de 20 μm e 60 μm , respectivamente.
- d) variação do tamanho das bolhas pelo uso de diferentes materiais catódicos, segundo sua posição na série eletroquímica;
- e) a possibilidade de ativação de minerais específicos (a flotação de pirita, por exemplo, quando efetuada com oxigênio eletrolítico, atingiu 98% de recuperação, ao passo que, com hidrogênio, a flotabilidade foi praticamente nula; o controle deste fenômeno pode levar a uma diminuição apreciável do consumo de reagentes em alguns casos);
- f) a possibilidade de exploração de alterações na composição e nas propriedades dos reagentes de flotação pela ação da eletrólise.

Todos estes fatos levam os citados autores a concluir pelo aspecto promissor da eletroflotação na área mineral, quer no beneficiamento de matérias-primas não tratáveis pelos métodos convencionais, que até mesmo na substituição da flotação convencional em casos particulares.

Bhaskar Raju & Khangaonkar (1982), estudando a recuperação de finos de calcopirita por eletroflotação com hidrogênio e oxigênio separadamente, demonstraram que a eletroflotação com oxigênio apresentava resultados superiores (90% versus 60%, com hidrogênio). Hogan *et al.* (1979), num estudo sobre eletroflotação de cassiterita, concluíram pela baixa eficiência dos gases formados. No entanto, a amostra de minério estudada apresentava uma granulometria entre 7 e 50 μm . Os referidos autores não levaram, aparentemente, em consideração a situação inadequada de flotação das partículas mais grosseiras com microbolhas geradas eletroliticamente.

No presente trabalho, objetivou-se estudar a influência da utilização de microbolhas geradas eletroliticamente na recuperação de ultrafinos. A idéia fundamental foi trabalhar com eletroflotação numa célula com aeração convencional, de forma a gerar eletroliticamente apenas o gás necessário para flotação das partículas finas. Para esta finalidade, foi efetuada uma adaptação em uma célula Denver, de bancada, sendo os ensaios efetuados com amostras de minério primário de cassiterita após diferentes tempos de moagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os ensaios de eletroflotação foi projetada uma aparelhagem visando a estudar a eletroflotação não como uma alternativa à flotação convencional, mas como um sistema coadjuvante. A geração de microbolhas por eletrólise teria, dentro desta concepção, a função de aumentar a recuperação das partículas finas, sendo as partículas intermediárias e grosseiras flotadas por ação do ar introduzido na célula pelos processos convencionais de sub-aeração ou compressão. Foram incorporados à cuba de flotação dois sistemas de eletrodos formados cada um por um anodo e dois catodos, sendo o anodo de tela de platina e os catodos de tela de aço inoxidável. Os eletrodos foram construídos em forma circular com 3,0cm de diâmetro, com tela de 28 meshes e fios de 0,39mm de diâmetro. A distância entre os eletrodos era de 0,7cm. Um minério de cassiterita (Pela Ema, Goiás), contendo 2,9% Sn, foi utilizado nos ensaios de bancada.

Na geração de microbolhas de hidrogênio e oxigênio foi utilizada uma fonte de corrente contínua, marca AVEL, de 10V e 5A. A intensidade de corrente utilizada foi sempre 1 A, o que corresponde no presente caso a uma densidade de corrente de $353,6 \text{ A.m}^{-2}$. Para melhor controle da corrente de alimentação foi incorporado ao circuito um amperímetro com expansão de escala. A Figura 1 apresenta uma vista da disposição geral da aparelhagem e a Figura 2 um detalhe da disposição dos eletrodos na cuba de eletroflotação.

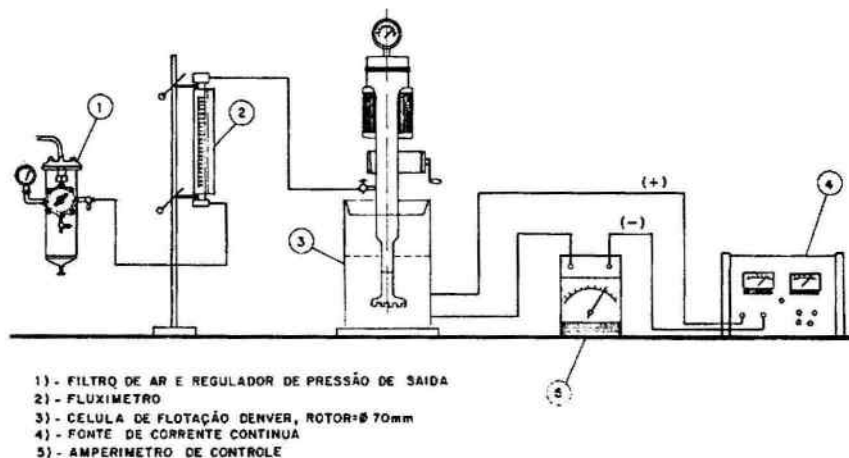


Figura 1 - Aparelhagem para ensaio de flotação convencional e/ou eletroflotação.

Alguns trabalhos anteriores foram empreendidos utilizando uma micro-célula do tipo Hallimond para eletroflotação de minerais isolados (Bhaskar Raju e Khangaonkar, 1982). No presente trabalho, estudos preliminares foram efetuados em uma célula semelhante. Foi possível observar que as microbolhas formadas, tendo um empuxo muito pequeno, subiam muito lentamente ao aderirem às primeiras partículas. Era necessário um tempo determinado para a formação de aglomerados de partículas e bolhas, de dimensões maiores, os quais, ao atingir um tamanho crítico, flutuavam mais rapidamente. Considerou-se, no entanto, que a utilização em uma mesma célula de bolhas de tamanho convencional (0,5 a 1mm) e microbolhas geradas eletroliticamente ($\sim 50 \mu\text{m}$) seria a solução mais adequada para o aumento da recuperação das partículas finas. Para uma melhor avaliação em termos comparativos do efeito da eletroflotação foi projetada a célula de bancada descrita anteriormente.

Hogan *et al.* (1979) estudaram a eletroflotação de um minério de cassiterita contendo 0,6% Sn e distribuição granulométrica entre 7 e 50 μm , utilizando uma célula de eletroflotação exclusiva. Foi utilizada uma célula cilíndrica, com 10 cm de diâmetro, com 2 eletrodos em tela, dispostos horizontalmente próximos à base. Os resultados foram

discutidos em relação à economicidade do processo, sendo enfatizada a baixa eficiência dos gases eletrolíticos utilizados. Entretanto, este fato pode estar relacionado com a dificuldade de flutuação das partículas mais grosseiras (Trahar, 1981) pelas microbolhas geradas eletroliticamente. No que se refere aos materiais dos eletrodos a serem utilizados industrialmente, a experiência da eletroflotação como processo já consagrado no campo do tratamento de efluente pode ser utilizada. Inicialmente, algumas usinas utilizavam eletrodos de alumínio ou aço, como eletrodos de sacrifício, para a geração das microbolhas. Os custos de manutenção e de substituição dos eletrodos eram, obviamente, elevados. Eletrodos de titânio platinado chegaram a ser utilizados, dada a vantagem de uma vida útil bem maior, mas, a um custo quase proibitivo. Outra tendência é a utilização de anodos de titânio revestidos com dióxido de chumbo e catodos de aço inoxidável (Zabel, 1984).

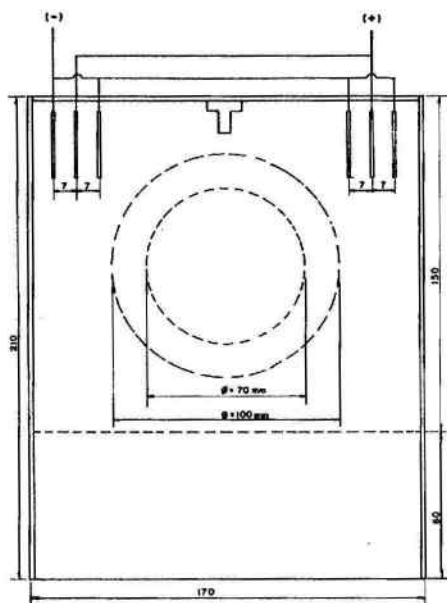


Fig. 2 - Vista superior da disposição dos eletrodos na célula de eletroflotação

3. RESULTADOS

Utilizando-se a aparelhagem descrita e representada nas Figuras 1 e 2, foram realizados ensaios de eletroflotação em escala de bancada com o minério de cassiterita contendo 2,9% Sn. Para fins comparativos, foram realizados ensaios de flotação convencional e eletroflotação em condições semelhantes. Em ambos os casos, os ensaios foram realizados com uma aeração de $9,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ e uma agitação correspondente a 1200 rpm. Os resultados dos ensaios de flotação realizados com Procol CA-540, um sulfosuccinamato de sódio, após diferentes tempos de moagem, estão apresentados na Figura 3. Verifica-se que o aumento da recuperação é mais pronunciado quando a alimentação contém uma percentagem elevada de finos. A figura apresenta também a percentagem em peso da fração $12\mu\text{m}$ contida nos produtos obtidos com diferentes tempos de moagem. Para um tempo de moagem de 90 minutos, que produz 50,3% de material $<12\mu\text{m}$, tem-se um incremento da ordem de 16% na recuperação por eletroflotação. O teor, no entanto, apresentou diferença sensível apenas para produtos de moagem muito fina, correspondentes a 120 e 150 minutos.

Os ensaios com material contendo 50,3% na faixa granulométrica inferior a $12\mu\text{m}$, realizados em diferentes condições de pH, apresentaram um maior incremento na recuperação, pelo efeito da eletroflotação, para valores mais elevados de pH (Figura 4). Em $\text{pH} = 3,0$ este incremento é da ordem de 8%. Em $\text{pH} = 4,0$ passa a 16%, embora com uma pequena redução no teor. A única variável adicional nas operações de eletroflotação em relação àquelas da flotação convencional foi a adição de Na_2SO_4 à polpa para manter a mesma densidade de corrente com tensão constante (9 V), devido à limitação da fonte utilizada. No entanto, ensaios realizados com cassiterita purificada não revelaram influência alguma deste reagente na cinética de flotação da cassiterita, o aumento da recuperação podendo ser creditado, de fato, à presença das microbolhas geradas eletroliticamente. O aumento dos valores da recuperação em função do pH está provavelmente também relacionado com a variação do tamanho das bolhas geradas eletroliticamente (Glembotsky *et al.*, 1975).

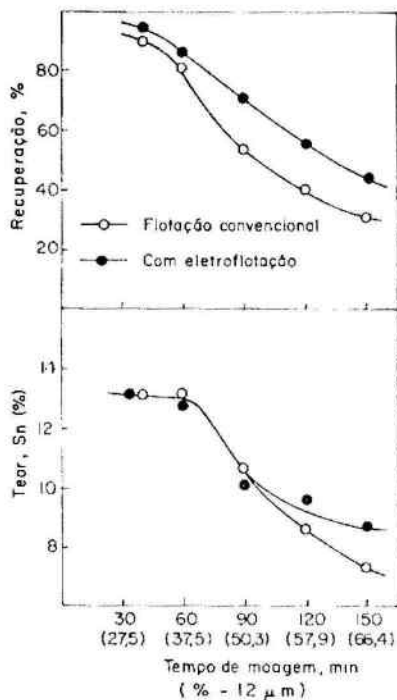


Figura 3 - Incremento na recuperação por eletroflotação para diferentes tempos de moagem do minério de cassiterita, em pH = 4,0 com 300g/t de Procol CA-540

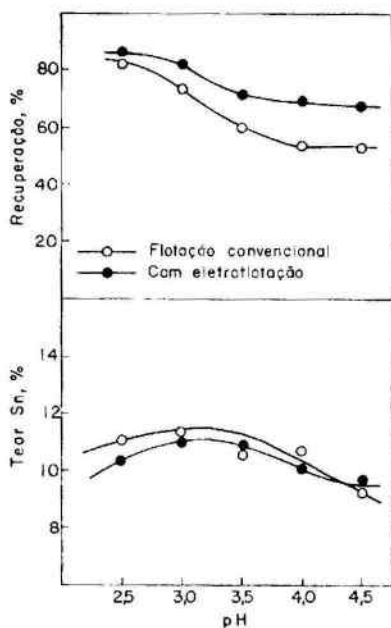


Figura 4 - Recuperação e teor dos concentrados obtidos por flotação convencional e por um sistema misto incluindo eletroflotação, para diferentes valores de pH. Minério de cassiterita moído a 50% -12 μ m. Coletor: Procol CA-540 (300g / t).

4. DISCUSSÃO

A utilização de microbolhas como recurso para a flotação das partículas finas tem suporte na teoria de Reay e Ratcliff (1975) e Flint e Howarth (1971). De fato, substituindo-se a expressão referente à eficiência de colisão (E_c), dada por

$$E_c = \alpha_1 \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (1)$$

na expressão da constante cinética, expressa por $K = \frac{3 \cdot Q \cdot E_c \cdot h}{2 \cdot d_b}$, verifica-se que:

$$K = \frac{3 \cdot \alpha_1 \cdot Q \cdot d_p^2 \cdot h}{2 \cdot d_b^3} \quad (2)$$

onde α_1 = constante, Q = vazão, h = altura de ascensão, e d_b e d_p representam respectivamente o diâmetro das bolhas e das partículas.

Desta forma, sendo a constante cinética inversamente proporcional ao cubo do diâmetro das bolhas (d_b^3), justifica-se trabalhar com um sistema de bolhas tão pequenas quanto possível, desde que os custos adicionais para sua geração sejam balanceados.

Hogan *et al.* (1979), num estudo sobre eletroflotação de cassiterita, enfatizaram o consumo elevado de energia observado em seus experimentos. No entanto, a amostra estudada apresentava granulometria entre 7 e 50 μ m. Considerando-se a geração de bolhas de um tamanho médio de 30 μ m, verifica-se que as partículas mais grosseiras não poderiam ser flotadas eficientemente. Não se levando em consideração as possibilidades de coalescência, bem como de ancoragem de mais de uma bolha numa mesma partícula, seriam necessárias bolhas de aproximadamente 90 μ m para flotar as partículas maiores.

No presente trabalho procurou-se adotar uma concepção diferente, qual seja a de trabalhar com eletroflotação numa célula com aeração convencional, de forma a:

- permitir uma flotação das partículas mais grosseiras pelas bolhas maiores e de maior empuxo;
- minimizar o consumo de energia, gerando eletroliticamente apenas parte do gás necessário para flotação, com o objetivo de atender às partículas finas;
- flotar os agregados constituídos de partículas finas e microbolhas por coalescência com as bolhas maiores introduzidas na célula por aeração.

Observa-se, pela Figura 3, que com o aumento da percentagem da fração < 12 μ m para valores superiores a 50%, tem-se um incremento de 16% na recuperação com a introdução da eletroflotação. Este aumento não pode ser creditado à modificação das condições químicas da polpa pela adição de Na_2SO_4 , de vez que este reagente não provocou alteração na flotabilidade na cassiterita (Oliveira e Adamian, 2005). Tampouco pode ser creditado ao simples aumento da aeração pela eletrólise da água. De fato, trabalhou-se num ponto de máxima recuperação da cassiterita em relação à aeração da célula (Figura 5). Observa-se que um aumento da aeração além de 9 l · min⁻¹ acarretou uma queda nos teores do concentrado, devido ao aumento do arraste de finos representado pelo aumento da água flotada, bem como uma queda na recuperação, devido à perturbação das condições ótimas de dispersão de gás admitido na célula. Assim, o aumento da recuperação deve ser creditado genuinamente ao efeito da eletroflotação. No entanto, um aumento dos teores em relação aos obtidos na flotação convencional foi perceptível apenas para alimentação de material superfino, com mais de 57,9% < 12 μ m (Fig. 3).

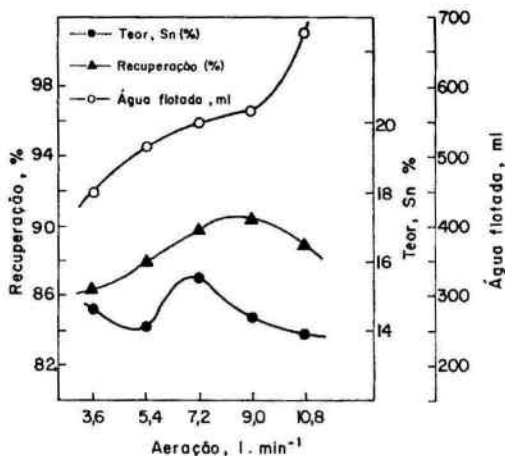


Figura 5 - Efeito da aeração na recuperação e teor dos concentrados obtidos do minério de cassiterita, com 300g/t de Procol CA-540, pH = 4,0 e 10g/t de óleo pinho, com 1200 rpm.

A variação do pH na faixa de 2,5 a 4,5 indicou um maior incremento da recuperação para os valores de pH mais elevados (Figura 4). Glembotsky *et al.* (1975) mencionam a possibilidade de controle do tamanho das microbolhas pela escolha adequada do material dos eletrodos e pH da solução: por exemplo, com eletrodos de platina, em pH = 2, as bolhas de hidrogênio têm diâmetro médio de 70 μm , ao passo que em pH = 12, o diâmetro médio é de 30 μm ; as microbolhas de oxigênio, ao contrário, apresentam diâmetro médio de 20 μm e 60 μm para valor de pH = 2 e pH = 12, respectivamente. O incremento da recuperação da cassiterita para diferentes faixas de pH está, provavelmente, relacionado com o tamanho das bolhas geradas eletroliticamente nas diversas condições.

O consumo de energia envolvido no aumento da recuperação da cassiterita por eletroflotação foi de 0,45kWh por tonelada de minério. Considerando-se o teor de 2,9% de SnO_2 , nos ensaios realizados com 1 kg de minério, um aumento de 16% na recuperação representa 4,64 g de cassiterita recuperada adicionalmente por eletroflotação. Para uma tensão de 9V e uma intensidade de corrente de 1A, o consumo de energia por tonelada de cassiterita adicionalmente recuperada em 3 minutos de flotação corresponde a:

$$E = V.i.t. = \frac{27}{60 \times 4,64} \times 10^3 \text{ kWh/t} = 96,9 \text{ kWh/t} \quad (3)$$

Um consumo de energia dessa ordem, embora elevado, poderá ser exequível, dependendo do custo e disponibilidade da energia elétrica local. Adicionalmente, um estudo visando a minimização do consumo energético seria recomendável.

5. CONCLUSÕES

A utilização de microbolhas geradas eletroliticamente possibilitou um aumento de até 16% na recuperação dos finos de cassiterita, a partir de uma alimentação contendo 50% de material <12 μm . A utilização da eletroflotação como processo coadjuvante à flotação convencional na faixa de pH de 2,5 a 4,5 apresentou maior rendimento para os valores mais elevados de pH. O consumo de energia correspondente ao aumento de 16% na recuperação foi de 96,9 kWh por tonelada de concentrado adicionalmente recuperada, o que representa 0,45 kWh por tonelada de minério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHASKAR RAJU, G. & KHANGAONKAR, P.R. Electroflotation of chalcopyrite fines. *Int. J. of Miner. Processing.*, 9: 133-143, 1982.

- BRATBY, J. & MARAIS, G.V.R. Electrolytic flotation. In: SOLID-LIQUID SEPARATION SCALE-UP. London, Upland Press, 1977. p. 188-197.
- CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 1, 11-41, 2004.
- FLINT, L.R. & HOWARTH, W.J. The collision efficiency of small particles with spherical air bubbles. *Chem. Eng. Sci.*, 26: 1155-1168, 1971.
- GAO, P., CHEN, X., SHEN, F. & CHEN, G., Removal of chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology*, 43: 117-123, 2005.
- GE, J., QU J., LEI P. & LIU H. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*, 36, 1, 33-39, 2004.
- GLEMBOTSKY, V.A.; MAMAKOV, A.A.; ROMANOV, A.M. & NENNO, V.E. Selective separation of fine mineral slimes using the method of electric flotation. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11. Cagliari, 1975.
- HOGAN, P., KUHN, A.T. & TURNER, J.F. Electroflotation studies based on cassiterite ores. *Trans. Inst. Min. Metal.*, 88: C83-C87, 1979.
- MOSTEFA, N.M. & TIR, M. Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operating conditions. *Desalination*, 161: 115-121, 2004.
- MURUGANANTHAN, M., RAJU, B.G. & PRABHAKAR, S. *Separation and Purification Technology*, 40, 1, 69-75, 2004.
- OLIVEIRA, J.F. & ADAMIAN, R. A cinética do processo de flotação e sua importância na recuperação de partículas finas. In: XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2005.
- OUSSEDIK, S. M. & KHELIFA, A. *Desalination*, 139, 1-3, 383, 2001.
- POON, C.P.C. Electroflotation for groundwater decontamination. *Journal of Hazardous Materials*, 55: 159-170, 1997.
- REAY, D. & RATCLIFF, G.A. Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency. *Can. J. of Chem. Eng.*, 51: 178-185, 1975.
- TRAHAR, W.J. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *Int. J. of Min. Processing*, 8 (4): 289-327, 1981.
- ZABEL, T. Flotation in water treatment. In: IVES, K.J. ed. *The scientific basis of flotation*. The Hague, Netherlands, Martinus Nijhoff, 1984. 429 p.