

TRATAMENTO DE PARTÍCULAS MINERAIS FINAS E ULTRAFINAS POR ELETROFLOTAÇÃO

E.P. Santos¹, F.A. Lemos¹, A.J.B. Dutra¹

¹Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ
Cidade Universitária – Centro de Tecnologia – Rio de Janeiro, RJ, 21945-970.

E-mail: adutra@metalmat.ufrj.br

RESUMO

A baixa recuperação na flotação de partículas minerais finas e ultrafinas continua sendo um dos principais desafios da área de processamento mineral. Diversos autores têm descrito, detalhadamente, as dificuldades existentes em relação ao processo de flotação. A flotação convencional das partículas finas e ultrafinas juntamente com as partículas grossas é ineficiente devido a fenômenos que derivam de suas características intrínsecas, tais como: pequena massa, alta superfície específica e alta energia superficial. As técnicas emergentes existentes para o aumento da recuperação de finos e ultrafinos são baseadas em novos conceitos de otimização da “captura” de partículas por bolhas, através do aumento da probabilidade de colisão bolha-partícula, injetando bolhas médias (100 – 600 μm) ou pequenas (< 100 μm) na célula de flotação. Dentre as técnicas existentes para a geração de bolhas pequenas, estão a flotação por ar dissolvido (FAD) e a eletroflotação (EF). A EF emprega microbolhas de oxigênio e hidrogênio, geradas a partir da decomposição eletrolítica da água, com diâmetro variando entre 20 a 50 μm , valores inferiores aos obtidos na FAD. As bolhas de gás geradas a partir do processo eletrolítico são mais homogêneas e são uniformemente dispersas na célula de flotação. As unidades de EF são pequenas e compactas e apresentam baixos custos de manutenção e funcionamento, quando comparadas a outros processos de flotação. Diversos estudos tem demonstrado a viabilidade do processo de EF aplicado ao tratamento de águas e de efluentes industriais, porém poucos trabalhos abordam a utilização desta técnica na área de processamento mineral. A EF pode ser uma excelente alternativa para o tratamento de partículas minerais finas e ultrafinas. Este trabalho apresenta uma revisão de literatura da utilização da eletroflotação aplicada ao tratamento destas partículas problema.

PALAVRAS-CHAVE: finos, ultrafinos, microbolhas, eletroflotação

1. PROBLEMAS DA RECUPERAÇÃO DE PARTÍCULAS FINAS E ULTRAFINAS

O progressivo esgotamento dos depósitos minerais e o aumento da preocupação com a conservação dos recursos não renováveis tem forçado o setor mineral a recuperar minérios de baixos teores e finamente disseminados. Essa disseminação requer uma moagem excessiva para liberação dos minerais, o que torna possível a separação seletiva, levando a geração e, conseqüentemente, a necessidade de processamento de partículas finas e ultrafinas.

A baixa recuperação na flotação de partículas minerais finas e ultrafinas continua sendo um dos principais desafios da área de processamento mineral (Trahar, 1981). Diversos autores (Collins e Read, 1971; Trahar e Warren, 1976; Trahar, 1981; Sivamohan, 1990; Rubio *et al.*, 2003) têm descrito, detalhadamente, as dificuldades existentes em relação ao processo de flotação. A flotação convencional das partículas finas e ultrafinas juntamente com as partículas grossas é ineficiente devido a fenômenos que derivam de suas características intrínsecas, tais como: pequena massa, alta superfície específica e alta energia superficial.

Os principais problemas que se observam na flotação dessas frações são: baixa probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas, dificuldade de superar a barreira energética entre elas, arraste mecânico, recobrimento por ultrafinos de ganga (*slime coating*), elevado consumo de reagentes, rigidez excessiva da espuma, e baixa seletividade na adsorção de reagentes, além de aspectos como composição e oxidação superficial das partículas, alterações mineralógicas e íons dissolvidos na água de processo (Song *et al.*, 2001). Todos esses fatores contribuem para uma diminuição da velocidade de flotação e da recuperação e um aumento no consumo de reagentes. Por outro lado, as partículas grossas apresentam o problema contrário devido a sua massa elevada e baixo grau de liberação, que leva a uma baixa hidrofobicidade.

Normalmente as partículas ultrafinas, com tamanho menor que 10 μm , têm baixa eficiência de colisão com bolhas de ar e são susceptíveis ao mecanismo de arraste hidrodinâmico. Este mecanismo não distingue as partículas hidrofílicas das hidrofóbicas e está estritamente relacionado com a recuperação de água. Alguns trabalhos (Trahar, 1981; Warren, 1985; Subrahmanyam e Forssberg, 1990) observaram uma relação linear entre a recuperação de água e a mineral, introduzindo os conceitos de grau de arraste hidrodinâmico e recuperação real, que é a obtida somente através do mecanismo bolha-partícula.

De acordo com Rubio *et al.*,(2004) em qualquer sistema de flotação existe uma determinada faixa de tamanho de partículas para a qual se deve dispor de uma distribuição de tamanho de bolhas adequada para que a “captura” de partículas pelas bolhas seja maximizada. Para uma ampla distribuição granulométrica de partículas, teoricamente necessita-se de uma distribuição de tamanho de bolhas correspondente. Isto não ocorre nas condições atuais de flotação em usinas de tratamento de minérios e por isso, a recuperação das partículas minerais finas e ultrafinas é normalmente baixa.

As células de flotação convencionais geram bolhas com tamanho da ordem de 600 a 2000 μm . Alguns difusores podem gerar bolhas de tamanho médio (100 a 600 μm), porém ainda insuficiente para a flotação de partículas ultrafinas (Yoon, 1993).

As técnicas emergentes existentes para o aumento da recuperação de finos e ultrafinos são baseadas em novos conceitos de otimização da “captura” de partículas por bolhas, através do aumento da probabilidade de colisão bolha-partícula pelo aumento da distribuição de tamanho de bolhas na célula, com injeção de bolhas médias (100 – 600 μm) ou pequenas (< 100 μm) (Song *et al.*, 2001; Rubio *et al.*, 2003).

Muitos estudos tem reportado que a recuperação de partículas de diâmetro entre 1 e 10 μm tem aumentado com a diminuição do tamanho de bolhas, já que ocorre um aumento significativo da eficiência de colisão entre as bolhas e as partículas (Nguyen *et al.*, 2006; Sarrot *et al.*, 2007).

Técnicas alternativas têm sido desenvolvidas para a geração de bolhas finas e ultrafinas, como as técnicas de flotação por ar dissolvido (FAD) e eletroflotação (Ketkar *et al.*, 1991; Burns *et al.*, 1997).

2. TAMANHO DAS BOLHAS GERADAS NO PROCESSO DE ELETROFLOTAÇÃO

A eletroflotação emprega microbolhas de oxigênio e hidrogênio geradas a partir da decomposição eletrolítica da água. Neste processo, o diâmetro das bolhas formadas pode variar de 20 a 50 μm , valores abaixo dos obtidos na flotação por ar dissolvido (Venkatachalam *et al.*, 1992; Burns *et al.*, 1997).

As bolhas de gás geradas eletroliticamente são menores que as bolhas utilizadas nos processos de flotação convencional. Estas bolhas são mais homogêneas e uniformemente dispersas na célula de flotação.

O tamanho das bolhas produzidas por eletroflotação é influenciado por uma série de fatores, tais como: densidade da corrente, material dos eletrodos, tipo e concentração do eletrólito suporte e pH da polpa (Glembotskii *et al.*, 1973; Ketkar *et al.*, 1991).

No caso do pH da polpa, estudos mostram que pequenas bolhas de hidrogênio são obtidas em pH neutro ou pouco alcalino, e que o tamanho das bolhas de oxigênio de menor diâmetro são obtidas em pH pouco ácido e crescem com o aumento do valor do pH (Venkatachalam *et al.*, 1992; Ben Mansour *et al.*, 2007; Montes-Atenas *et al.*, (2010). Segundo Venkatachalam *et al.*, (1992), em meio alcalino as bolhas de hidrogênio são de aproximadamente 20 μm , enquanto que as bolhas de oxigênio podem ser de até 200 μm .

A influência da densidade de corrente na geração de bolhas é muito importante no processo de separação de partículas, pois o aumento da densidade de corrente ocasionará uma maior liberação de gás. Quanto à variação no tamanho das bolhas em diferentes densidades de corrente, existem estudos conflitantes na literatura (Venkatachalam *et al.*, 1992).

Estudos reportam um aumento do tamanho das bolhas de hidrogênio com o aumento da densidade da corrente provocado possivelmente pela coalescência das bolhas (Janssen e Hoogland, 1970; Landolt *et al.*, 1970; Ben Mansour *et al.*, 2007; Sarkar *et al.*, 2010).

Por outro lado, Venczel(1970) *apud* Venkatachalam *et al.*, (1992) descobriu que o tamanho das bolhas diminuiu com a redução da densidade de corrente. Estudos realizados por Ketkar *et al.*, (1991), mostraram que os diâmetros das bolhas de hidrogênio e oxigênio diminuiriam com o aumento da densidade da corrente, utilizando diferentes eletrodos, o que está de acordo com a teoria da nucleação e crescimento de uma nova fase sobre um eletrodo (Walsh e Herron, 1991).

Em densidade de corrente mais baixa (125 $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$) foi possível obter bolhas de hidrogênio com valores entre 34 e 49 μm e bolhas de oxigênio com valores entre 48 e 50 μm . Já em densidade de corrente mais alta (375 $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$) o diâmetro das bolhas de hidrogênio variaram entre 22 a 37 μm , e de 38 a 42 μm para as bolhas de oxigênio.

Segundo Inan *et al.*, (2004), para uma faixa de densidade de corrente de 10 a 40 mA/cm^2 , o diâmetro médio das bolhas de hidrogênio e oxigênio variou entre 15 a 30 μm e 45 a 60 μm , respectivamente.

De acordo com Venkatachalam *et al.*, (1992) a influência do material do catodo no tamanho das bolhas de hidrogênio é extremamente pronunciada em meio ácido e menos acentuada em meio

alcalino. Já em meio neutro, o material do catodo não interfere no tamanho das bolhas de hidrogênio. O tamanho das bolhas geradas por eletroflotação altera com a mudança no material do eletrodo, como mostrado na Figura 1.

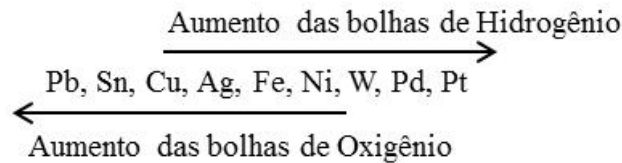


Figura 1. Influência do tipo de material no tamanho das bolhas geradas eletroliticamente (adaptada de Venkatachalam *et al.*, 1992)

Em seu estudo, Chen (2004) mostrou que o tipo de eletrodo e a densidade da corrente interferem no diâmetro das bolhas geradas por eletroflotação. Como pode ser visto na Tabela I, as menores bolhas de hidrogênio foram geradas em pH neutro. Por outro lado, as menores bolhas de oxigênio são produzidas em meios ácidos.

No estudo de Bhaskar Raju e Khangaonkar (1984) as bolhas de oxigênio formadas pelo eletrodo de platina foram estimadas em uma faixa entre 10-45 μm .

Tabela I. Tamanho de bolhas em diferentes valores de pH e eletrodos (adaptada de Chen, 2004)

pH	Bolhas de Hidrogênio (μm)			Bolhas de Oxigênio (μm)
	Material do catodo			Material do anodo
	Platina	Aço	Carbono	Platina
2	45 – 90	20 – 80	18 – 60	15 – 30
7	5 – 30	5 – 45	5 – 80	17 – 50
12	17 – 45	17 – 60	17 – 60	30 – 70

3. RECUPERAÇÃO DE PARTÍCULAS MINERAIS FINAS POR ELETROFLOTAÇÃO

A aplicação da eletroflotação para a recuperação de finos de minérios tem sido objeto de investigação desde 1946, quando foi inicialmente aplicada no beneficiamento mineral na antiga União Soviética. Recentemente novas pesquisas têm sido realizadas devido ao aumento da demanda de minérios e das baixas eficiências das técnicas convencionais de flotação para o processamento de finos e ultrafinos de minérios (Miettinem *et al.*, 2010).

Bhaskar Raju e Khangaonkar (1984) estudaram a eletroflotação de finos de calcopirita (~4 μm) em tubo de Hallimond modificado, utilizando eletrodos de platina e de cobre (catodos) e de platina (anodo). Neste estudo foram variados a densidade da corrente, o pH da solução, a concentração do coletor (dietilditiofosfato de sódio), bem como o tipo de bolhas geradas eletroliticamente, oxigênio ou hidrogênio. Os resultados da flotabilidade dos finos de calcopirita na ausência e na presença do coletor, utilizando bolhas geradas eletroliticamente (oxigênio e hidrogênio) e bolhas geradas a partir de cilindro de oxigênio puro, respectivamente, não apresentaram resultados satisfatórios. Porém, foi possível observar que os estudos, na ausência do coletor, utilizando as bolhas de oxigênio geradas eletroliticamente apresentaram maior flotabilidade (~ 64%) quando comparados com os estudos

utilizando bolhas de hidrogênio geradas eletroliticamente, que apresentaram flotabilidade da ordem de 48%. Os autores mostraram ainda que foi possível recuperar 75-81% dos finos de calcopirita utilizando a eletroflotação em pH 9,0, com bolhas de hidrogênio e densidade de corrente na faixa de 49-196 mA.cm². Os resultados com bolhas de oxigênio foram semelhantes, onde a recuperação foi de 74-81% dos finos de calcopirita, na mesma faixa de pH, porém com densidade de corrente 56-223 mA.cm².

Bhaskar Raju e Khangaonkar (1982) estudaram a eletroflotação de partículas finas de calcopirita (< 20 µm) em um tubo de Hallimond modificado, utilizando etilxantato de potássio (coletor), sulfato de sódio (eletrólito suporte) e dois sistemas de eletrodos: platina(anodo)-cobre(catodo) e Grafite(anodo)-cobre(catodo). Neste estudo foram variados os tipos de bolhas geradas eletroliticamente, oxigênio ou hidrogênio, a densidade da corrente, o pH da solução e a concentração do coletor. Os estudos no sistema platina(anodo)-cobre(catodo) mostraram que foi possível a recuperação de 72-92% dos finos de calcopirita, utilizando bolhas de oxigênio, para uma concentração do coletor de 140 mg.L⁻¹, no pH 8,0 e densidades da corrente que variaram entre 50-200 mA.cm². Os autores compararam estes resultados com os do estudo da flotabilidade da mesma amostra em um tubo de Hallimond convencional com bolhas geradas a partir de cilindro de oxigênio puro, nas mesmas condições, obtendo recuperações da ordem de 33%. Com a utilização de bolhas de hidrogênio, nas mesmas condições, obtiveram recuperações que variaram entre 30-61%. Já os estudos no sistema Grafite(anodo)-cobre(catodo), mostraram que foi possível a recuperação de 36-68% dos finos de calcopirita, utilizando bolhas de hidrogênio, para uma concentração do coletor de 140 mg.L⁻¹, no pH 8,0 e densidades da corrente que variaram entre 50-200 mA.cm². Os autores concluíram que as pequenas bolhas geradas na eletroflotação são eficientes para a recuperação de partículas finas de calcopirita. As bolhas de oxigênio geradas a partir do processo eletrolítico promoveram uma maior flotabilidade destes finos, resultado de uma interação bolha-partícula mais rápida.

Ketkar *et al.* (1991) estudaram a eletroflotação de partículas finas e ultrafinas de quartzo em um tubo de Hallimond modificado. Os reagentes utilizados foram o sulfato de cobre (ativador), oleato de sódio (coletor) e sulfato de sódio (eletrólito). Neste estudo foram avaliados a influência dos tamanhos das bolhas de oxigênio e hidrogênio, geradas eletroliticamente, a densidade da corrente (125 a 325 A.m⁻²), pH (7 a 10,5), concentração do coletor (0,2 a 2,5 mg.L⁻¹), densidade da polpa (0,5 a 5%), tipo de eletrodo (aço inoxidável – catodo – e a platina – anodo – em diferentes malhas) e o tamanho das amostras de quartzo puro (-30+20 µm, -20+10 µm e -10+4 µm) obtidas por decantação. Os estudos com a amostra de quartzo fino (-30+20 µm) mostraram que é possível a recuperação de 94%, utilizando bolhas de hidrogênio, para uma concentração do coletor de 2,5 mg.L⁻¹, no pH 9,0, densidade de polpa de 0,5% e densidade da corrente de 250 A.cm². Os autores concluíram que a recuperação de quartzo fino é elevada com o aumento da densidade de corrente em todas as frações testadas. Dependendo do tamanho de partículas utilizado é necessária a utilização de eletrodos específicos. De acordo com os autores, melhores resultados para a fração de partículas finas (-10+4 µm) foram obtidos com placa de aço inoxidável (catodo), enquanto para frações de tamanho um pouco maiores (-20+10 µm) as melhores recuperações foram obtidas com malha do catodo de 200 mesh. Já para as frações mais “grossas” (-30+20 µm) melhores flotabilidades foram encontradas com malha do catodo de 100 mesh, utilizando elevada densidade de corrente (375 A.cm²).

Llerena *et al.* (1996) estudaram a eletroflotação de partículas finas de esfarelita (< 25µm) em uma célula de bancada adaptada com um par de eletrodos de aço inoxidável 304 (115 µm de diâmetro). Os reagentes utilizados foram o sulfato de sódio pentahidratado (123 mg.L⁻¹ - ativador), sulfato de sódio (0,12 M - eletrólito suporte), Aero 343 – xantato isopropílico de sódio (192 mg.L⁻¹ - coletor) e hidróxido de sódio e ácido sulfúrico (reguladores de pH). As densidades da corrente utilizadas foram 5 A ou 50 mA.cm⁻². O estudo avaliou a influência da relação gases eletrolíticos (H₂ e/ou O₂)-pH, na recuperação dos finos de esfarelita. Os resultados mostraram que com a utilização de bolhas de hidrogênio foi possível a obtenção de recuperações próximas a 100% dos finos de esfarelita na faixa de pH entre 2,5 e 4,0 para um tempo de aproximadamente de 4 minutos. Os estudos realizados com bolhas de oxigênio apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com bolhas de hidrogênio, recuperação de 100% dos finos de esfarelita em pH 4. Os autores compararam estes

resultados com os do estudo da flotabilidade, da mesma amostra, em célula de bancada convencional utilizando bolhas geradas a partir de difusores, nas mesmas condições, obtendo recuperações inferiores. Os autores concluem que esta diferença pode ser atribuída provavelmente pela diferença dos tamanhos das bolhas geradas nos dois processos. As bolhas geradas no processo convencional a partir de difusores (200 μm) são bem maiores do que as bolhas geradas no processo eletrolítico (16 a 31 μm). Porém, de acordo com os autores, a eletroflotação da dos finos de esfarelita nas melhores condições encontradas, necessitam de uma elevada quantidade de energia (65 kWh.m³) quando comparadas com a flotação convencional (3 kWh.m³).

Sarkar *et al.* (2010) estudaram a eletroflotação de ultrafinos de sílica (~ 13 μm) em célula de flotação (Denver) modificada, utilizando eletrodos de aço inoxidável (catodo) e de carbono (anodo). Os autores compararam a flotação com bolhas de hidrogênio geradas eletroliticamente, com as bolhas geradas por difusores na flotação convencional. Neste estudo foram avaliados o pH da suspensão (9 a 10,5), o fluxo de gás (4 a 8 L.min⁻¹), a concentração do Brometo de Cetil Trimetil Amônio - CTAB (4,4x10⁻⁶ a 27,4x10⁻⁶ - coletor), do Metil Isobutil Carbinol - MIBC (29 ppm – espumante) e do sulfato de sódio (0,005 a 0,1M – eletrólito). Foram mantidos constantes a densidade da corrente, a concentração de sólidos (2%), o tamanho de partícula e a velocidade de agitação. As melhores recuperações (~ 75%) dos ultrafinos de sílica na flotação convencional utilizando bolhas geradas por difusores foram obtidas na faixa de pH 9,5 a 10,0. Os estudos também mostraram que as recuperações destes ultrafinos, para ambos os tipos de geração de bolhas, aumentaram com a elevação do fluxo dos gases e da concentração do coletor, enquanto que o aumento da concentração do sulfato de sódio promoveu uma diminuição da recuperação da sílica em ambos os sistemas. Os autores mostraram que com a utilização das bolhas de hidrogênio no processo de flotação, foi possível obter recuperações dos ultrafinos de sílica da ordem de 95%.

4. CONCLUSÃO

Conforme literatura descrita no presente relato, a eletroflotação mostra-se uma alternativa para o tratamento de partículas minerais finas e ultrafinas, principalmente pelo fato de gerar bolhas menores (20 a 50 μm) que as bolhas utilizadas nos processos de flotação convencional (600 a 2000 μm), aumentando eficiência de colisão entre as bolhas e as partículas. Entretanto, novos estudos devem ser realizados para comprovar a eficácia da técnica, bem como avaliar o consumo energético desta alternativa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ben Mansour, L., Ksentini, I., Elleuch, B., 2007. Treatment of wastewaters of paper industry by coagulation–electroflotation. *Desalination* 208 (1-3), 34-41.

Bhaskar Raju, G., Khangaonkar, P.R., 1982. Electroflotation of chalcopryrite fines. *International Journal of Mineral Processing* 9 (2), 133–143.

Bhaskar Raju, G., Khangaonkar, P.R., 1984. Electroflotation of chalcopryrite fines with sodium diethyldithiocarbamate as collector. *International Journal of Mineral Processing* 13 (3), 211–221.

Burns, S. E., Yiacoumi, S., Tsouris, C., 1997. Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Separation and Purification Technology* 11 (3), 221-232.

Chen ,G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* 38 (1), 11-41

- Collins, D. N., Read, A. D., 1971. The treatment of slimes. *Mineral Science and Engineering* 3, 19-31.
- Glembotskii, V.A., Mamakov, A.A., Sorokina, V.N., 1973. Size of gas bubbles formed under electroflotation conditions. *Elektronnaya Obrabotka Materialov* 5, 66–68.
- Inan, H., Anatoly Dimoglo, Simsek, H., Karpuzcu, M., 2004. Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation. *Separation and Purification Technology* 36(1), 23-31
- Janssen, L.J.J., Hoogland, J.G., 1970. The effect of electrolytically evolved gas bubbles on the thickness of the diffusion layer. *Electrochimica Acta* 15, 1013–1023.
- Ketkar, D.R., Mallikarjunan, R., Venkatachalam, S., 1991. Electroflotation of quartz fines. *International Journal of Mineral Processing* 31 (1–2), 127–138.
- Landolt, D., Acosta, R., Muller, R.H., Tobais, C.W., 1970. An optical study of cathodic hydrogen evolution in high rate electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society* 117 (6), 839–845
- Llerena, C., Ho, J.C.K., Piron, D.L., 1996. Effect of pH on electroflotation of sphalerite. *Chemical Engineering Communication* 155, 217–228.
- Miettinen, T., Ralston, J., Fornasiero, D., 2010. The limits of fine particle flotation. *Minerals Engineering* 23(5), 420-437
- Montes-Atenas, G., Garcia-Garcia, F.J., Mermillod-Blondin, R., Montes, S., Effect of suspension chemistry onto voltage drop: Application to electro-flotation. *Powder Technology* 204 (1), 1-10.
- Nguyen, A.V., George, P., Jameson, G.J., 2006. Demonstration of a minimum in the recovery of nanoparticles by flotation: theory and experiment. *Chemical Engineering Science* 61 (8), 2494–2509.
- Rubio, J., Capponi, F., Matiolo, E., Nunes, D., Guerrero, C. P., Berkowitz, G., 2003. Advances in flotation of mineral fines. In: *Proceedings XXII International Mineral Processing Congress*, 1014-1022.
- Rubio, J., Capponi, F., Matiolo, E., Rosa, J. J., 2004. Avanços na flotação de finos de minérios sulfetados de cobre e molibdênio. In: *XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*. Florianópolis-SC. 2, 69-78.
- Sarkar, M.S.K.A., Donne, S.W., Evans, G.M., 2010. Hydrogen bubble flotation of silica. *Advanced Powder Technology* 21 (4), 412–418.
- Sarrot, V., Huang, Z., Legendre, D., Guiraud, P., 2007. Experimental determination of particles capture efficiency in flotation. *Chemical Engineering Science* 62 (24), 7359–7369.
- Sivamohan, R., 1990. The problem of recovering very fine particles in mineral processing - A review. *International Journal of Mineral Processing* 28, 247-288.
- Song, S., Lopez-Valdieso, A., Reyes-Bahena, J. L., Lara-Valenzuela, C., 2001. Floc flotation of galena and sphalerite fines. *Minerals Engineering* 14 (1), 87-98.
- Subrahmanyam, T. V., Forssberg, E.F.S., 1990. Fine particle processing: Shear flocculation and carrier flotation - A review. *International Journal of Mineral Processing* 30 (3-4), 265-286.

Trahar, W. J., 1981. A rational interpretation of role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing* 2, 289-327.

Trahar, W. J., 1981. A rational interpretation of role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing* 2, 289-327.

Trahar, W. J., Warren, L. J., 1976. The flotability of very fine particles - A review. *International Journal of Mineral Processing* 3 (2), 103-131.

Venkatachalam, S., 1992. Electrogenerated Gas Bubbles in Flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 8, 47-55.

Warren, L. J., 1985. Determination of the contributions of true flotation and entrainment in batch flotation tests. *International Journal of Mineral Processing* 14 (1), 33-44.

Walsh, F.C., Herron, M.H., 1991, Electrocrystallization and electrochemical control of crystal growth: fundamental considerations and electrodeposition of metals. *Journal of Physics D: Applied Physics* 24 (2), 217-229.

Yoon, R.H., 1993. Microbubble flotation. *Minerals Engineering* 6 (6), 619-630.