

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE BOLHAS EMPREGANDO ELETROFLOTAÇÃO

F.A. Lemos, A. J.B.Dutra

Universidade Federal do Rio de Janeiro – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
– Coppe Caixa Postal 68505 – Rio de Janeiro - CEP 21949-972
Tel. 21 26528512, e-mail: lemos@metalmat.ufrj.br

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi caracterizar a distribuição de tamanhos de bolhas aplicando a técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo (LALLS - *Low Angle Laser Light Scattering*), também conhecida como difração laser, que consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que podem ser relacionados ao diâmetro da partícula. Para a realização dos ensaios de difração a laser, foi construída uma célula eletrolítica com capacidade para 1,0 litro de solução, sendo utilizada uma chapa de aço inoxidável com 8,5 cm de diâmetro como catodo, e tela de titânio revestido com RuO_2 como anodo. Foi estudada a influência do tipo e concentração do eletrólito suporte, pH, densidade de corrente e concentração de oleato de sódio na distribuição de tamanhos de bolhas. Os resultados obtidos indicaram que as micro-bolhas de oxigênio e hidrogênio apresentaram um d_{50} variando entre 40 a 100 μm dependendo das condições operacionais. Os ensaios também mostraram que o aumento da concentração do eletrólito suporte, o incremento da densidade de corrente e a elevação do valor do pH da solução, contribuíram para menores valores das distribuições de tamanhos de bolhas. Os testes realizados para verificar a influência do tipo de eletrólito suporte indicaram que soluções contendo íons sulfato apresentaram menores distribuições de tamanho quando comparado com o íon cloreto. O aumento da concentração de oleato de sódio promoveu um incremento do tamanho médio das bolhas, que pode ser atribuído ao fato da técnica de difração a laser não operar satisfatoriamente em meios opacos.

PALAVRAS-CHAVE: eletroflotação, tamanho de bolhas, micro-bolhas

1. INTRODUÇÃO

A eletroflotação tem sido largamente empregada no tratamento de efluentes, geralmente associada ao processo de coagulação. Contudo, os estudos empregando a eletroflotação no beneficiamento de minérios são escassos.

Ao contrário da eletrocoagulação, que utiliza anodos que fornecem íons a solução, geralmente de alumínio ou ferro que irão atuar como agente coagulante, a eletroflotação emprega eletrodos inertes e tem por finalidade a geração de microbolhas de hidrogênio e oxigênio que apresentam diâmetros inferiores a 100 μm .

A técnica de eletroflotação é altamente versátil e competitiva quando comparada com tanques agitados para o tratamento de efluentes. Este processo também se mostra competitivo quando comparado com outras técnicas de flotação, tais como a flotação por ar dissolvido (FAD) e flotação por ar disperso (Mansour e colaboradores, 2007).

A técnica de eletroflotação apresenta três vantagens principais. Primeiro, as bolhas de gás formadas na eletrólise são extremamente finas e uniformes. Segundo, a variação da densidade de corrente possibilita variar a concentração de bolhas no meio de flotação, e desta forma, aumentar a possibilidade da colisão bolha-partícula, e finalmente, a apropriada seleção de eletrodos e eletrólitos permite a otimizar das condições para um processo de separação específico (Hosny, 1996).

Em soluções ácidas, a evolução de hidrogênio ocorre de forma diferente do que em soluções alcalinas. Enquanto que no primeiro caso, os íons de hidrônio (H_3O^+) são as fontes de H_2 , no segundo caso é assumido que os elétrons são diretamente adicionados às moléculas de água. Desta forma, o pH é um parâmetro crucial no processo de geração de bolhas. Segundo Inan e colaboradores (2004) para uma faixa de densidade de corrente de 10 a 40 mA/cm^2 , o diâmetro médio das bolhas de hidrogênio ficou entre 15 a 30 μm e 45 a 60 μm para as bolhas de oxigênio.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para medir o tamanho de bolhas. Uma forma geral para classifica-los leva em consideração a forma com que os sensores entram em contato com as bolhas, podendo ser intrusivos e não-intrusivos. A primeira categoria apresenta maiores erros devido à interferência da ferramenta no processo de medida. Por outro lado, as medidas não-intrusivas proporcionam uma observação visual com a posterior captura de bolha.

O método mais simples e mais amplamente utilizado para caracterização do tamanho de bolhas é a análise de imagem. Contudo, na maioria dos casos, esta técnica requer aparatos experimentais complexos, além de consumir muito tempo na análise dos resultados. Mesmo dispondo de modernas câmeras digitais, a literatura relata que geralmente se torna difícil produzir e reproduzir dados suficientes para gerar distribuições de tamanhos de bolhas (em movimento) em diferentes condições operacionais. Outra dificuldade de aplicação desta técnica decorre das irregularidades nas formas das bolhas geradas, fugindo da esfericidade (Rodrigues e Rubio, 2003).

Na área de processamento mineral, os dispositivos de flotação usualmente empregados não geram microbolhas, mas bolhas que geralmente apresentam diâmetros médios entre 600 e 2500 μm . Segundo a maioria dos pesquisadores, a falta de um tamanho médio de bolhas no interior das células é a uma das principais razões da captura de partículas finas ser ineficiente, acarretando perdas consideráveis, sendo um antigo problema da indústria mineral, especialmente para partículas minerais inferiores a 13 μm (Teixeira e Rubio, 2007).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método empregado para determinação do tamanho de bolhas se baseou na técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo (LALLS - *Low Angle Laser Light Scattering*). Este método de análise de tamanho de partículas, também conhecido como difração laser, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados ao diâmetro da partícula, ou seja, quanto menor o tamanho da partícula, maior o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa uma população de partículas. Atualmente esta técnica é uma das mais populares para caracterizar distribuições de tamanho de partículas, dispersas em meio líquido ou em forma de pó seco.

2.1. Materiais

Para a determinação da distribuição das microbolhas geradas por eletroflotação foi construída uma célula eletrolítica com capacidade para 1,0 litro de solução, sendo utilizada uma chapa de aço inoxidável com 8,5 cm de diâmetro como catodo, e tela de titânio revestido com RuO₂ como anodo que foi conectada a uma fonte de alimentação da marca Icel – Manaus, modelo PS 6100. Nos ensaios foi utilizado o analisador de tamanho de partículas da Malvern Instruments modelo Mastersizer 2000, que possui faixa de diâmetro de 0.02µm to 2000 µm.

Dentre as informações geradas pelo analisador de tamanho de partículas estão a curva acumulativa que corresponde ao resultado acumulado abaixo de um dado diâmetro e a curva de frequência que mostra valores característico da curva $d_{0,1}$ (valor do tamanho de partícula abaixo do qual se situam 10% da amostra), $d_{0,5}$ e $d_{0,9}$.

2.2. Métodos

Preparação dos eletrólitos: As soluções foram preparadas com reagentes químicos fornecidos pela Vetec, dissolvidos em água deionizada.

Geração de microbolhas: Foi construída uma célula eletrolítica em acrílico, utilizando chapa de aço inoxidável como catodo e tela de titânio revestida com RuO₂ como anodo. A distância entre os eletrodos foi a mínima possível, cerca de 3 mm, visando reduzir a tensão da célula. A aplicação e controle da corrente foi realizada por uma fonte de marca Icel.

Medida do tamanho de bolhas: A distribuição das microbolhas geradas empregando a técnica de eletroflotação foi determinada em um analisador de tamanhos de partículas da Malvern Instruments modelo Mastersizer 2000SM. Este equipamento possui uma faixa de análise compreendida entre 0,1 a 2000 µm. A rotação do agitador foi mantida em torno de 1000 rpm visando evitar a formação de bolhas devido a entrada de ar. As medidas foram realizadas quando a obscuração se encontrava próximo a 10%. O procedimento operacional empregado foi baseado na metodologia desenvolvida por Couto e colaboradores (2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição dos tamanhos das bolhas geradas por eletroflotação pôde ser determinada de uma maneira rápida e confiável empregando a técnica de difração a laser.

No presente trabalho foi estudada a influência do eletrólito suporte, densidade de corrente, pH da solução, concentrações do eletrólito e do coletor no tamanho das microbolhas geradas empregando a técnica de eletroflotação .

A Figura 1 mostra que os eletrólitos contendo K_2SO_4 e Na_2SO_4 , geraram bolhas menores quando comparados com solução preparada com $NaCl$. A maior condutância iônica dos sais formados por ânions divalentes pode ter influenciado o processo de formação de bolhas reduzindo os tempos de nucleação e escape das bolhas para o seio da solução.

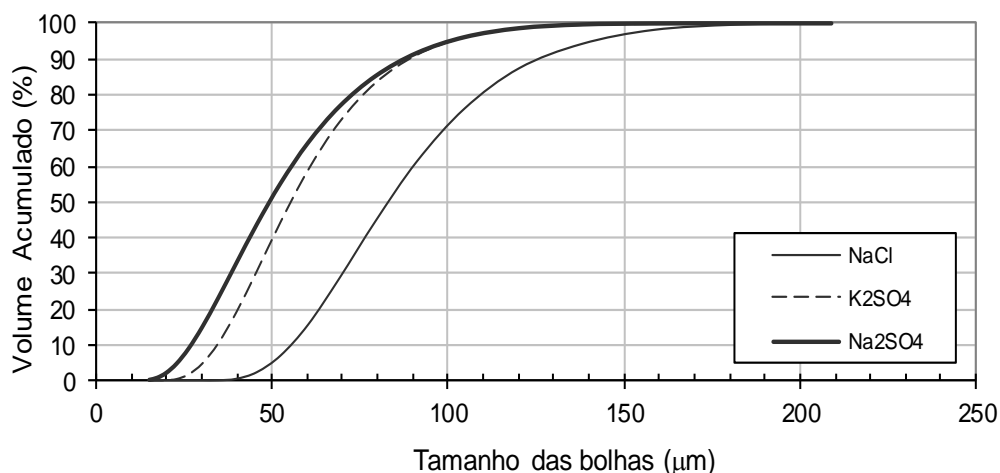


Figura 1: Variação do tamanho de bolhas empregando diferentes tipos de eletrólitos empregando densidade de corrente catódica empregando de 1283 A/m^2 .

O incremento na concentração de Na_2SO_4 empregado como eletrólito suporte promoveu decréscimo do diâmetro médio das bolhas conforme ilustrado na Figura 2, este fato pode ser atribuído a elevação da condutância iônica da solução. Essa mesma tendência foi observada nos estudos desenvolvidos por Chen (2004) e Burn e colaboradores (1997).

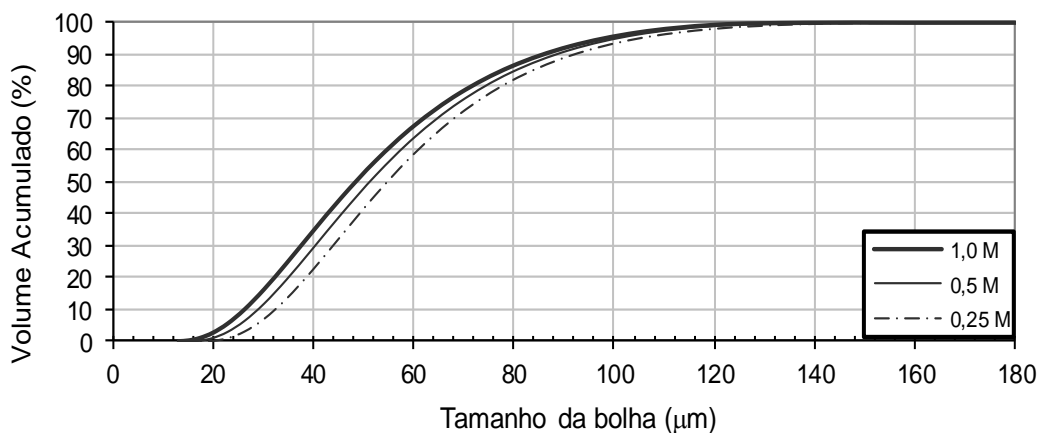


Figura 2: Variação do tamanho de bolhas em função da concentração de Na_2SO_4 , empregando densidade de corrente catódica empregando de 1283 A/m^2 .

A decomposição da água sofre influência do pH do meio, como pode ser visto nas reações apresentadas na Tabela 1 juntamente com os potenciais de redução.

Tabela 1: Reações de decomposição da água e seus respectivos potenciais em diferentes meios reacionais (Bard e colaboradores, 1985).

Reações	Potenciais	Meio reacional
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	$E = -0,414 \text{ V}$	Neutro
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$E_B^0 = -0,828 \text{ V}$	Alcalino
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$E^0 = 1,229 \text{ V}$	Ácido
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$E^0 = 0,815 \text{ V}$	Neutro
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	$E_B^0 = 0,401 \text{ V}$	Alcalino

A Figura 3 mostra que ocorreu um discreto decréscimo no tamanho médio das bolhas com a elevação do valor do pH da solução. Esse fato vai de encontro ao relatado por Chen e colaboradores (2004) e pode estar relacionado a adoção de diferentes técnicas para determinação da distribuição de bolhas.

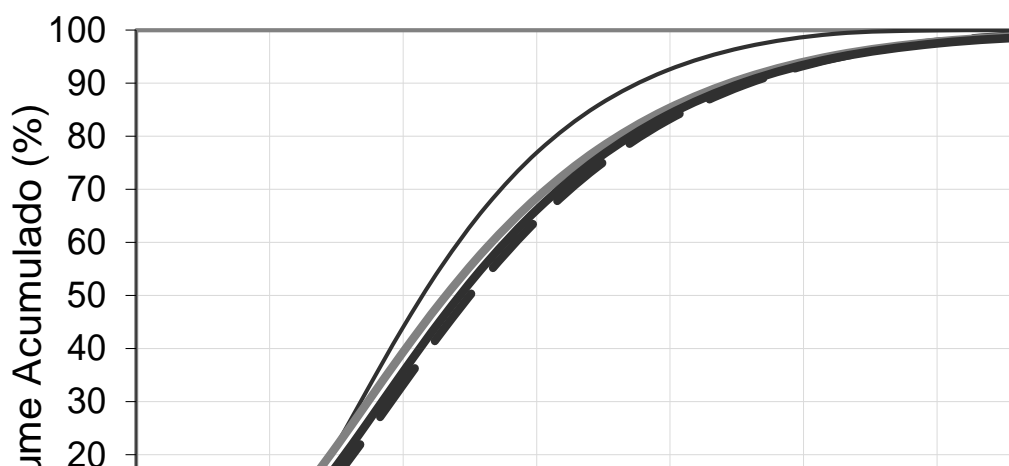


Figura 3: Variação do tamanho de bolhas em função do pH em solução 1,0M de Na_2SO_4 . e densidade de corrente de 1283 A/m^2 .

Os ensaios de difração a laser mostraram que o incremento da densidade de corrente promoveu redução no diâmetro médio das microbolhas (Figura 4), fato que corrobora os resultados obtidos por Chen e colaboradores (2004).

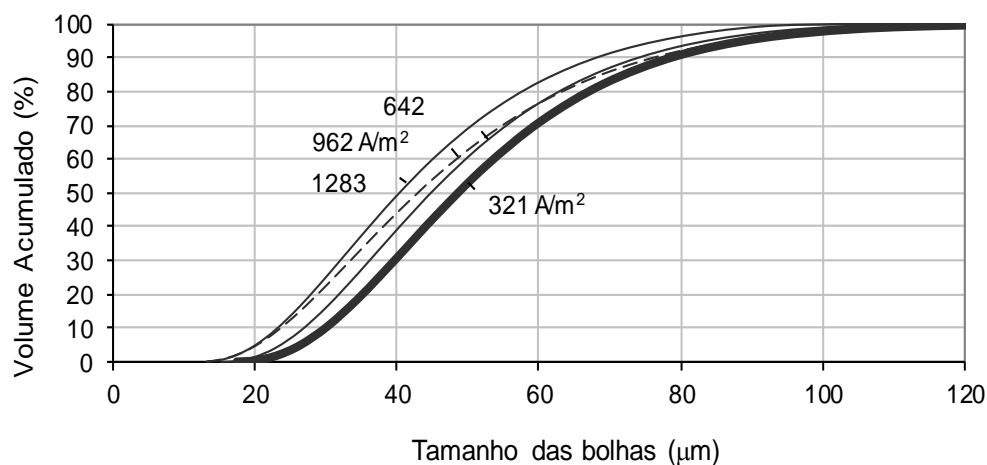


Figura 4: Variação do tamanho de bolhas em diferentes densidades de correntes catódicas empregando solução 1,0 M de Na_2SO_4 .

O trabalho de Grau e colaboradores (2005) cita que a elevação da concentração de surfactante até o limite da concentração crítica de coalescência (CCC) reduz o tamanho das bolhas, em função desses reagentes diminuírem a coalescência das bolhas. Como pode ser visto na Figura 5 esta tendência não foi observada no presente trabalho, onde o aumento da concentração de oleato de sódio promoveu um incremento do tamanho médio das bolhas. Cabe salientar, que os eletrólitos contendo concentrações de oleato de sódio ficaram turvas devido a presença do eletrólito suporte e pode ser uma explicação para essa divergência, em decorrência da técnica de difração a laser não operar satisfatoriamente em meios opacos.

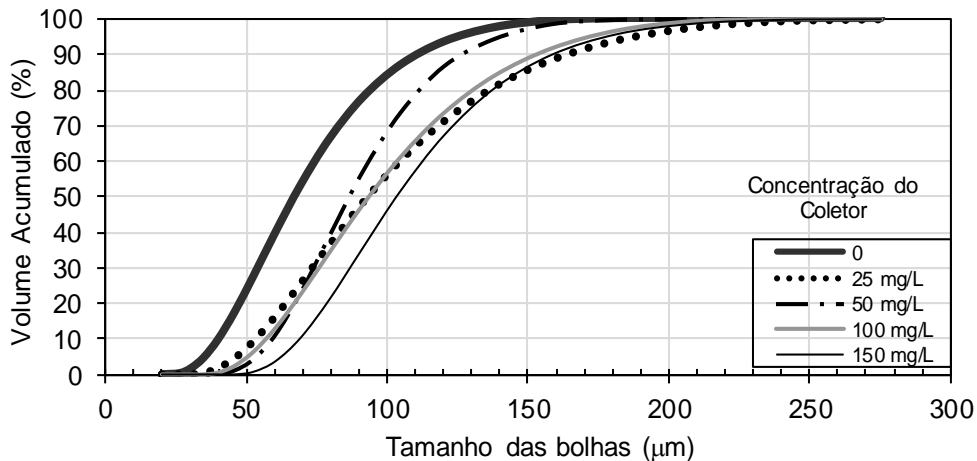


Figura 13: Variação do tamanho de bolhas em função da concentração de oleato de sódio empregando solução 1,0M de Na_2SO_4 . e densidade de corrente de 1283 A/m^2 .

A Tabela 2 apresenta os resultados de $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ e $d_{0,9}$ das bolhas geradas por eletroflotação em diferentes condições operacionais empregando a técnica de difração a laser.

Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos para determinação do tamanho de bolhas utilizando a técnica de difração a laser.

Parâmetros e Condições		$d_{(0,1)}$ (%)	$d_{(0,5)}$ (%)	$d_{(0,9)}$ (%)	Observações
Concentração de Na_2SO_4 (M)	0,25	32,43	54,72	91,97	Densidade de corrente de 1.325 A/m^2 .
	0,5	28,98	51,23	88,37	
	1,0	26,27	48,40	85,74	
pH	4,0	26,04	49,99	91,74	Solução de Na_2SO_4 1,0M e densidade de corrente de 1.325 A/m^2 .
	6,7	26,27	48,40	85,74	
	8,0	23,90	48,21	92,54	
	10	22,77	46,40	88,90	
Eletrólito	NaCl	56,01	84,15	133,87	Densidade de corrente: 994 A/m^2 .
	K_2SO_4	34,48	55,34	88,94	
	Na_2SO_4	27,11	49,48	88,80	
Densidade de corrente (A/m^2)	331	34,51	56,58	95,72	Solução de Na_2SO_4 0,25 M
	664	30,81	51,42	85,00	
	994	27,54	50,45	93,77	
	1,325	26,04	49,99	91,74	
Concentração de coletor (oleato de sódio)	25	64,63	107,46	176,74	Densidade de corrente: 497 A/m^2 . em solução de Na_2SO_4 0,25 M
	50	51,73	84,28	124,48	
	100	56,98	91,41	152,02	
	150	68,89	101,25	158,43	

5. CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego da difração a laser na caracterização do tamanho e distribuição das bolhas geradas por eletroflotação, indicaram que os $d_{0,5}$ obtidos situaram entre 10 a 130 μm , o que está de acordo com os dados fornecidos em outros trabalhos que utilizaram outras técnicas. Este fato sugere que a difração a laser pode ser uma alternativa viável para caracterização de microbolhas.

Os resultados obtidos indicaram que ensaios realizados com eletrólitos suportes contendo íons divalentes apresentaram microbolhas com $d_{0,5}$ menores. Também foi observado que o aumento da concentração do eletrólito suporte promoveu a formação de microbolhas menores.

Os experimentos mostraram que a elevações na densidade de corrente e no valor do pH da solução favorecem a formação de microbolhas menores.

A limitação da técnica de difração a laser em determinar tamanhos de microbolhas em soluções turvas mostra a necessidade de realização de estudos complementares para adequar o sistema coletor-eletrólito suporte.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concessão da bolsa e taxa de bancada que viabilizaram a realização das atividades experimentais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Couto, H. J. B., Nunes D. G., Neumann R., França S. C. A. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. **Minerals Engineering**, v.22, pp. 330–335, 2009.

Hosny, A. Y. “Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique” **Separations Technology**, v.6, pp. 9-17, 1996.

Inan H., Dimoglo, A., Şimşek, H., Karpuzcu, M. “Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation” **Separation and Purification Technology**, v. 36, pp. 23–31, 2004.

Mansour, L. B., Ksentini I., Elleuch, B. “Treatment of wastewaters of paper industry by coagulation–electroflotation” **Desalination** 208, pp. 34–41, 2007.

Rodrigues, R.T., Rubio, J. “New basis for measuring the size distribution of bubbles”., **Minerals Engineering**, v.16, pp. 757–765, 2003.

Rodrigues R. T., Rubio, J. DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **Int. J. Miner. Process.** v.82, pp. 1–13, 2007.