

ELETROFLOTAÇÃO APLICADA À REMOÇÃO DE METAIS PESADOS CONTIDOS EM EFLUENTES LÍQUIDOS

Maurício Leonardo Torem ⁽¹⁾

Fabiola Oliveira da Cunha ⁽²⁾

Rui de Góes Casqueira ⁽³⁾

Resumo

O tratamento dos efluentes líquidos provenientes dos diversos ramos da atividade industrial, e que contêm metais pesados, presentes em baixas concentrações (entre 10^{-7} moles.dm⁻³ e 10^{-4} moles.dm⁻³), tem sido objeto de freqüentes estudos que visam viabilizar tecnicamente algumas operações unitárias já conhecidas. Uma dessas técnicas é a flotação. Esta técnica pode ser aplicada no tratamento de efluentes líquidos contendo metais pesados como sendo uma etapa terciária ou de polimento, que vem se apresentando como uma alternativa tecnicamente viável e que apresenta uma série de variações técnicas adaptáveis às mais diversas situações físico-químicas. A geração de diminutas bolhas de ar por via eletrolítica tem sido objeto de detalhado estudo e os resultados apresentados confirmam a eficiência da técnica e sua potencial aplicação industrial. Este trabalho apresenta o estado-da-arte da técnica da eletroflotação e da sua versatilidade.

Palavras-chave: Eletroflotação; Metais pesados; Meio-ambiente.

Removal of heavy metal from liquid effluents using the electroflotation technique

Abstract

The treatment of liquid effluents deriving from many different industrial activities containing toxic and/or heavy metals in very low concentrations (between 10^{-7} to 10^{-4} moles.dm⁻³) has been a main concern to improve some well known unit operations. One of these techniques is the flotation. It can be used on the liquid effluent treatment which may contain heavy metals as a tertiary degree. Among several techniques, the electroflotation system has been studied in order to apply this operation in the removal of heavy metals from liquid streams where the concentration is very low. The electrolytic generation of gas bubbles has been analyzed as a special point and the results sustain its versatility and its potential industrial application. The aim of this paper is to present a review on the subject depicting the fundamental aspects of this versatile method.

Key-words: Electroflotation; Heavy metals; Environment.

I INTRODUÇÃO

A contaminação de corpos d'água por metais pesados (Pb, Cd, As, Hg, etc...) vem recebendo uma grande atenção por parte dos ambientalistas no que diz respeito a sua toxicidade no meio aquático e à vida humana. A poluição por metais pesados resulta de diferentes atividades econômicas, a maioria delas industriais, muito embora fontes como atividades agrícolas e a disposição de rejeitos domésticos também contribuem para a liberação de metais pesados no ambiente.⁽¹⁾

Esses elementos são liberados ou transportados em ambientes aquáticos ou terrestres, principalmente sob a forma dissolvida ou como particulados, e podem alcançar altas concentrações, particularmente próximo ao ponto de lançamento dos efluentes.

Os metais sob a forma dissolvida podem apresentar-se como íons simples ou complexos, quelatos organometálicos não ionizados ou complexados. As partículas em suspensão podem ser constituídas de compostos como hidróxidos, óxidos, silicatos, etc., e raramente, como metais individuais.

Dentre os metais, a literatura define 59 elementos como metais pesados, sendo que deste total 17 são classificados como altamente tóxicos. Dentre estes, nove têm recebido atenção

⁽¹⁾ Professor Associado – Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia / Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio.

⁽²⁾ Eng. Químico, MC em Engenharia Química - Aluno de Doutorado em Engenharia Metalúrgica no Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia / Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio.

⁽³⁾ Eng. Químico, MC em Engenharia Química – DC em Engenharia Metalúrgica no Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia / Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio.

especial pelo seu grau de toxicidade e pelas taxas que estão sendo introduzidas no meio ambiente. A Tabela 1 apresenta a classificação dos metais pesados mais importantes pelo grau de toxicidade e pelas taxas de introdução no ambiente.⁽¹⁾

Tabela 1. Metais pesados mais importantes pelo grau de toxicidade e pelas taxas de introdução no ambiente.⁽¹⁾

Metais classificados como muito tóxicos e rapidamente absorvidos pelos organismos	Metais importantes pelas elevadas taxas de introdução no meio ambiente
Ag*, Au*	Ag
Bi, Cd	Cd
Co, Cu	Cu
Hg*, Ni	Hg
Pb, Pd*	Ni
Pt*, Sb	Pb
Se*, Sn*	Sb
Te*, Tl*	Sn
Zn	Zn

* - alquil - metais estáveis em sistemas aquosos e passíveis de serem biometilados

As principais atividades antropogênicas, que geram efluentes industriais, contendo concentrações significativas de metais pesados, são apresentadas na Tabela 2 e no Quadro 1.

Os efluentes líquidos industriais possuem uma composição química bastante complexa contendo compostos orgânicos e inorgânicos. O método mais utilizado no tratamento de efluentes líquidos, contendo matéria orgânica, é o biológico. No entanto, a presença de compostos inorgânicos pode inibir este processo. Neste caso, é necessário realizar uma etapa de tratamento químico antes da realização do tratamento biológico, visando a remoção desta carga inorgânica.

O tratamento clássico de efluentes, contendo metais pesados, gerados pelas indústrias, envolve processos físico-químicos de precipitação, troca iônica, adsorção e extração por solventes. Porém, estas técnicas tradicionais são inadequadas para a descontaminação de grandes volumes de efluentes contendo metais pesados em baixas concentrações, devido à baixa eficiência operacional e aos elevados custos de extração resultantes deste processo.^(2,4)

Tabela 2. Atividades industriais que geram emissão de poluentes metálicos.^(2,3)

	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Sn	Zn
Papel								
Petroquímica								
Indústria eletrolítica								
Fertilizantes								
Processamento de petróleo								
Siderurgia								
Metais não ferrosos								
Veículos automotores e aviões								
Vidro, cimento, cerâmica								
Têxtil								
Curtimes								
Termoeletrônicas								

Diante de uma política ambiental cada vez mais severa, onde se tem buscado o estabelecimento de padrões de concentração cada vez menores para os poluentes presentes nos efluentes, as indústrias têm sido levadas a ajustar os processos existentes pela adoção de procedimentos visando a menor geração ou maior remoção de elementos tóxicos dos efluentes industriais. Como a recuperação de íons metálicos, a partir de soluções diluídas, utilizando métodos clássicos é ineficiente, e levando em consideração a política ambiental atual, métodos alternativos vêm sendo investigados, como por exemplo, a flotação iônica, visando

a melhoria da qualidade ambiental e a recuperação de alguns compostos que possuam algum valor econômico.

O processo de flotação, que pode ser classificado em flotação iônica, de precipitados e de colóides sorventes (conforme apresentado na Figura 1) pode ser empregado em soluções diluídas (lixívia, recidagem, efluentes, etc.), contendo íons metálicos na ordem de 10^{-7} a 10^{-4} moles.dm⁻³, de indústrias minero-metalúrgicas, alimentícias, químicas, etc., desde que os íons possam ser flotados e concentrados. Nesta técnica, espécies metálicas, chamadas de coligantes, interagem com um coletor adicionado no sistema. Com a passagem de ar (na forma de bolhas ascendentes), o produto da interação coletor-coligante, chamado de "sublate", adsorve-se na superfície da bolha e é arrastado e retido na espuma, sendo removido fisicamente. A maior vantagem desta técnica, especialmente quando existem grandes volumes de efluentes a serem tratados, deve-se ao fato da quantidade de coletor requerida ser proporcional à quantidade de íons metálicos presentes e não ao volume de rejeito. Por outro lado, a maior desvantagem é a diminuição da eficiência do processo com o aumento da força iônica do sistema devido à presença de diversos compostos inorgânicos e orgânicos.⁽⁵⁾ Esta desvantagem restringe a aplicabilidade das técnicas de separação por espumas ao tratamento de efluentes líquidos, uma vez que estes efluentes, geralmente, apresentam alta força iônica.

Ao final do processo de flotação iônica, o coletor e o metal podem ser recuperados e recidados tornando o processo muito mais viável economicamente. Além disso, o metal também pode ser estabilizado ("inertizado") o suficiente para ser disposto em bacias de rejeitos.⁽⁷⁾ O complexo coletor-ligante, gerado no processo, pode ser decomposto através de precipitação com hidróxidos ou sulfetos ou eletrólise.⁽⁷⁾

Devido às rigorosas políticas ambientais, o tratamento de efluentes de indústrias químicas, minero-metalúrgicas, de alimentos, de corantes e o tratamento de esgotos estão se tornando aplicações cada vez mais freqüentes da flotação. Zabel,⁽⁸⁾ Zoubolis, Matis e Stalidis⁽⁹⁾ estudam a aplicação de várias técnicas de flotação, inclusive a flotação iônica, de precipitados e de colóides sorventes no tratamento de águas residuais. Devido aos resultados positivos obtidos, estes pesquisadores apontam estas técnicas como sendo adequadas a essa área de atuação.

Quadro 1. Principais fontes e impactos de alguns metais pesados.⁽⁶⁾

Metal	Fontes principais	Impactos na saúde e no meio ambiente
Chumbo	<ul style="list-style-type: none"> - indústria de baterias automotivas, chapas de metal semi-acabado, canos de metal, "cable sheating", aditivos em gasolina, munição; e - indústria de reciclagem de sucata de baterias automotivas para reutilização de chumbo. 	<ul style="list-style-type: none"> - prejudicial ao cérebro e ao sistema nervoso em geral; - afeta o sangue, rins, sistema digestivo e reprodutor;¹ - eleva a pressão arterial; e - agente teratogênico (que acarreta mutação genética).
Cádmio	<ul style="list-style-type: none"> - fundição e refino de metais como zinco², chumbo e cobre; e - derivados de cádmio são utilizados em pigmentos e pinturas, baterias, processos de galvanoplastia, solda, acumuladores, estabilizadores de PVC, reatores nucleares. 	<ul style="list-style-type: none"> - é comprovadamente um agente cancerígeno, teratogênico e pode causar danos ao sistema reprodutor.
Mercúrio	<ul style="list-style-type: none"> - mineração³ e o uso de derivados na indústria e na agricultura; e - células de eletrólise do sal para produção de cloro. 	<p><u>Intoxicação aguda:</u> efeitos corrosivos violentos na pele e nas membranas da mucosa, náuseas violentas, vômito, dor abdominal, diarreia com sangue, danos aos rins e morte em um período aproximado de 10 dias.</p> <p><u>Intoxicação crônica:</u> sintomas neurológicos, tremores, vertigens, irritabilidade e depressão, associados à salivação, estomatite e diarreia; descoordenação motora progressiva, perda de visão e audição e deterioração mental decorrente de uma neuroencefalopatia tóxica, na qual as células nervosas do cérebro e do córtex cerebelar são seletivamente envolvidas.</p>
Cromo	<ul style="list-style-type: none"> - curtume de couros, galvanoplastia. 	<p>Dermatites, úlceras cutâneas, inflamação nasal, câncer de pulmão e perfuração do septo nasal.</p>
Zinco⁴	<p>metalurgia (fundição e refino), indústrias de reciclagem de chumbo</p>	<p>Sensações como paladar adocicado e secura na garganta, tosse, fraqueza, dor generalizada, arrepios, febre, náusea, vômito</p>

¹ Crianças são especialmente vulneráveis aos efeitos do chumbo. Mesmo quantidades relativamente pequenas de chumbo podem causar rebaixamento permanente da inteligência em crianças, potencialmente resultando em desordens para leitura, distúrbios psicológicos e retardamento mental. Outros efeitos em crianças incluem doenças nos rins e artrite.

² Minerais de zinco constituem a principal fonte de cádmio. Este elemento é obtido durante os processos eletrolíticos de fundição utilizados para refino de zinco e outros metais. Todos os concentrados de zinco apresentam como constituinte menor e inevitável de 0,1 a 0,3% de cádmio. Apesar de seu uso na indústria ter aumentado nos últimos 50 anos, a elevada toxicidade do cádmio tem restringido seu uso tanto nas aplicações já existentes como no desenvolvimento de novas tecnologias.

³ A mineração contribui com 50% e o restante provém de atividades industriais (catálise, fabricação de equipamentos elétricos, pintura e fabricação de pesticidas).

⁴ A maior parte dos efeitos tóxicos do zinco relaciona-se à sua combinação com outros metais pesados e contaminação durante os processos de extração e concentração de zinco. As cinzas do metal nunca são completamente puras, podendo estar misturadas a outros metais como cádmio e mercúrio.

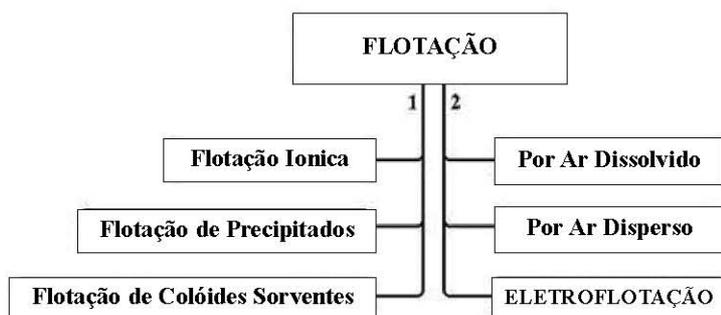


Figura 1. Classificação dos processos de flotação.

Uma característica que classifica o processo de flotação é o método de formação de bolhas, que pode ser por ar dissolvido, por ar disperso e o método eletrolítico. A área de conhecimento que engloba as separações de emulsões ou de partículas coloidais em solução aquosa é objeto de estudo de diversos segmentos industriais, como o de petróleo, alimentos e papel e celulose. A necessidade de se obter um método rápido e eficiente para atuar nessas separações vem motivando pesquisas para desenvolver métodos alternativos aos processos convencionais.⁽¹⁰⁾ A técnica da eletroflotação mostra-se extremamente versátil e competitiva com as técnicas de sedimentação que requerem grandes áreas e volumes para operação. É também competitiva em relação às outras técnicas de flotação, como flotação por ar dissolvido e flotação por ar disperso. As unidades de eletroflotação são menores e mais compactas, necessitam de menor manutenção e custo operacional que outras unidades de flotação.⁽¹⁰⁾

O processo de eletroflotação depende principalmente da geração de gases hidrogênio e oxigênio durante a eletrólise da água. As bolhas de gás formadas na superfície dos eletrodos imersos na solução entram em contato com as gotas de óleo (no caso de emulsões) e, então, a partícula óleo-gás ascende no líquido para a superfície onde o óleo pode ser facilmente retirado com um escumador.⁽¹¹⁾ A eletroflotação possui três principais vantagens: a primeira é que as bolhas de gás formadas a partir da eletrólise são extremamente pequenas e de tamanho uniforme; contudo, existem trabalhos que divergem quanto à melhor uniformidade da distribuição de tamanhos das bolhas formadas por eletrólise (eletroflotação) comparando com a flotação por ar dissolvido.⁽¹¹⁾ Segundo, a variação da densidade de corrente possibilita o controle da variação da concentração das bolhas de gás no meio líquido, que por sua vez aumenta a probabilidade de colisão entre as bolhas de gás e as partículas ou gotas. Terceiro, a seleção do eletrodo adequado (ou a seleção da superfície adequada do eletrodo) permite configurar o sistema para um processo específico qualquer.⁽¹¹⁾

A literatura fornece um número significativo de trabalhos que demonstram a viabilidade da técnica do processo de eletroflotação aplicada à remoção de partículas coloidais ou de emulsões.^(11,12) Grande parte dos trabalhos utiliza anodos solúveis, como Fe ou Al, combinados com catodos de Pt e agentes de floculação, cuja função é melhorar cineticamente o processo e poucos estudos empregam anodos insolúveis.⁽¹¹⁾

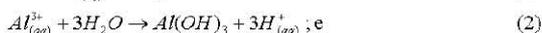
É importante ainda comentar um fenômeno que é abordado com frequência na literatura e que está inserido no escopo deste trabalho, a coagulação e a eletrocoagulação. A coagulação é um fenômeno onde as partículas coloidais eletricamente carregadas são neutralizadas pela mútua colisão com os contra íons e são então aglomeradas, em alguns casos precedendo a etapa de sedimentação. O agente coagulante é adicionado na solução na forma de uma substância química adequada. O mecanismo de coagulação, que é um assunto de intensa pesquisa,⁽¹³⁾ dá-se primeiramente com a redução da carga superficial até o ponto onde as partículas coloidais, previamente estabilizadas pela repulsão eletrostática, possam se aproximar o suficiente para que as forças de van der Waals as unam e as mantenham unidas, permitindo a agregação. A redução da carga superficial é consequência da diminuição do potencial repulsivo da dupla camada elétrica pela presença de um eletrólito de carga elétrica oposta. No processo de eletrocoagulação, o agente coagulante é gerado *in situ* através da oxidação eletrolítica de um ânodo de material apropriado.^(11,12)

De modo mais conciso, a eletrocoagulação pode ser dividida nas seguintes etapas:

1. formação do agente coagulante através da oxidação eletrolítica de um “eletrodo de sacrifício”;
2. desestabilização das partículas coloidais ou quebra das emulsões; e
3. agregação da fase desestabilizada para formar os flocos.

O mecanismo de eletrocoagulação é altamente dependente da composição química do meio aquoso, especialmente da condutividade. Além disso, outros parâmetros como pH, composição química e tamanho e concentração das partículas também influenciam o processo.⁽¹³⁾ O mecanismo de remoção de íons por eletrocoagulação envolvendo o alumínio está representado a seguir, visto que esse metal (juntamente com o ferro) é amplamente usado em tais processos.

A dissolução eletrolítica do anodo de alumínio produz as espécies monomérica catiônicas Al^{3+} e $Al(OH)_2^+$ em pH baixo, que em valores de pH apropriados são transformadas em $Al(OH)_3$ e, finalmente, polimerizadas em $Al_n(OH)_{3n}$, de acordo com as equações químicas 1 a 3:



Contudo, dependendo do pH do meio, outras espécies iônicas como $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ e $Al(OH)_4^{-}$ também podem estar presentes no sistema. Examinando o diagrama de equilíbrio Eh-pH, revela-se que, sob condições apropriadas, podem se formar várias formas poliméricas do Al^{3+} , como exemplo, as estruturas dimeras e poliméricas complexas apresentadas na Figura 2.⁽¹³⁾

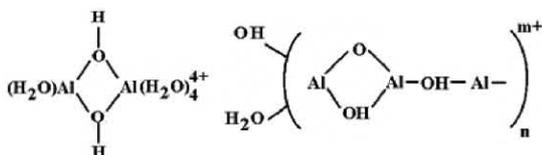
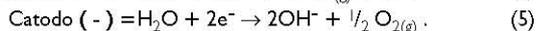
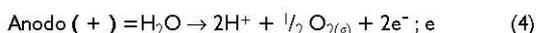


Figura 2. Estruturas dimeras (à esquerda) e poliméricas (à direita), ambas completas.

Em diversas aplicações industriais e ambientais, o uso de diminutas bolhas de gás funciona como agente nas separações sólido-líquido ou como colaborador nas transferências de massa e calor entre as fases. A eletroflotação é um método de flotação comumente usado na indústria mineral para a separação de partículas muito pequenas presentes em solução aquosa.⁽¹⁴⁾ Nesse método, as moléculas de água são divididas em seus constituintes moleculares através da aplicação de uma corrente elétrica com a imersão de eletrodos em uma solução a ser tratada. Bolhas de H_2 são formadas no catodo e bolhas de O_2 são formadas no anodo. Esse método gera bolhas com diâmetro na faixa de 22-50mm, dependendo das condições experimentais.⁽¹⁴⁾ As bolhas formadas durante a eletrólise são geradas conforme as reações redox que ocorrem nos eletrodos (Equações 4 e 5):



O tamanho das bolhas formadas em tais processo (flotação por ar dissolvido e eletroflotação) e bem como a sua distribuição normal, é um parâmetro controlado por algumas variáveis que interferem nesses parâmetros e que são freqüentemente estudadas. Burns, Yiacoumi e Tsouris⁽¹⁴⁾ examinam alguns dos fatores que interferem no tamanho das bolhas produzidas pelos

processos de eletroflotação e flotação por ar dissolvido. Os efeitos da voltagem aplicada, da corrente e da força iônica são estudados na eletroflotação e o efeito da pressão é estudado na flotação por ar dissolvido. Na eletroflotação, a vazão de gás produzido aumenta em função da voltagem aplicada, conforme apresenta a Figura 3, onde também se observa que a vazão de gás aumenta com o aumento da força iônica do sistema.

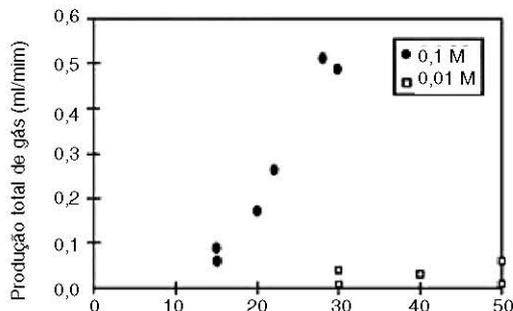


Figura 3. Vazão total de gás em função da voltagem aplicada.⁽¹⁴⁾

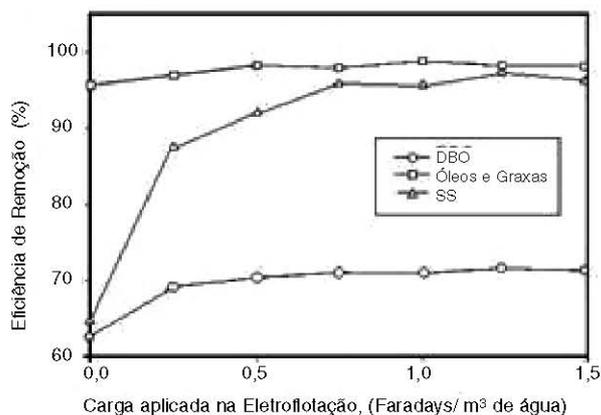


Figura 4. Efeito da carga aplicada na eletroflotação: DQO inicial = 1520mg/l; óleos/graxas=250 mg/l; ss = 228 mg/l; condutividade=1290 μ S/cm; pH = 6,94; temperatura. = 30,4°C; tempo = 15 min; carga aplicada na electrocoagulação = 2,49 F/m³ de água.⁽¹⁵⁾

Diversos trabalhos são encontrados na literatura em que são analisadas individualmente vários parâmetros envolvidos no processo de eletroflotação, conforme apresentam as Figuras 4, 5, 6 e 7.

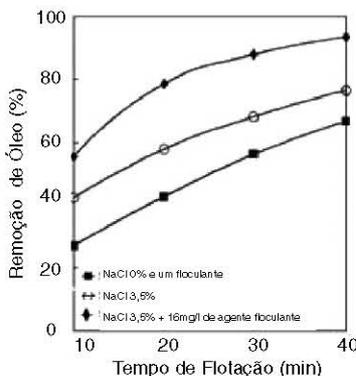


Figura 5. Efeito da adição do agente floculante e da adição de NaCl na porcentagem de remoção de óleo.⁽¹²⁾

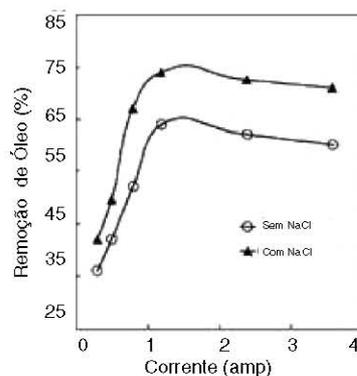


Figura 6. Efeito da corrente na porcentagem de remoção, tempo de flotação = 40 min e concentração de óleo = 1050 mg/l.⁽¹²⁾

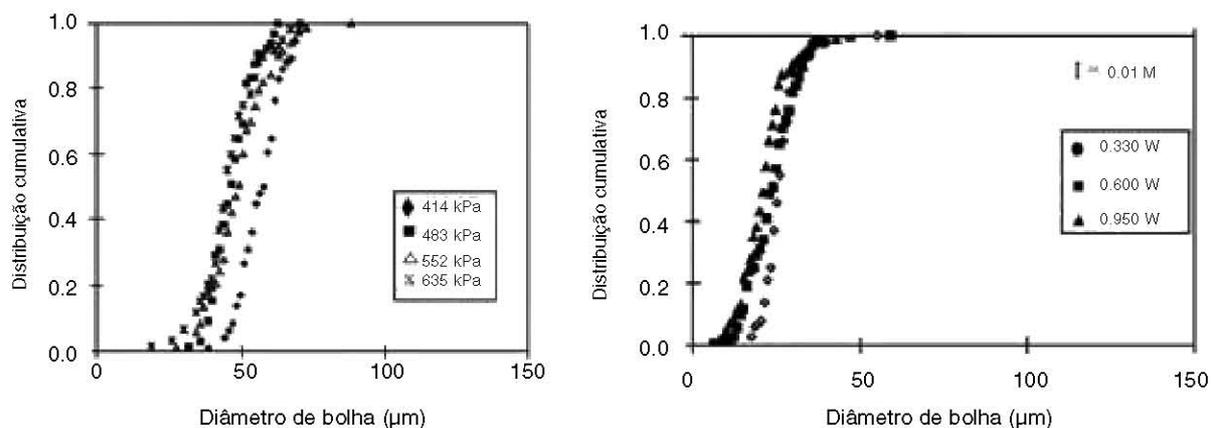


Figura 7 Distribuição cumulativa de tamanho de bolhas na flotação por ar dissolvido (esquerda) e eletroflotação.⁽¹⁴⁾

2 CONCLUSÕES

As atividades industriais, em função das suas características intrínsecas, são potencialmente poluidoras. O desenvolvimento de técnicas/procedimentos, que busquem a minimização do impacto ambiental do lançamento dos seus efluentes líquidos nos corpos receptores, permitirá a preservação do meio ambiente ao mesmo tempo em que irá garantir a continuidade das atividades industriais respeitando a legislação ambiental vigente. Desta forma, a eletroflotação, observando que diversos trabalhos encontrados na literatura confirmam a

viabilidade da técnica, é uma técnica com potencial reconhecido na comunidade científica, carecendo, porém de um estudo mais detalhado para a melhor compreensão dos mecanismos que governam esta operação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro das Instituições FAPERJ, CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SILVA, M.E.M.C. **Tratamento de efluentes industriais contendo metais pesados através do método de flotação de precipitados**. 1991. 302f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1991.
- FÖRSTNER, U.; WITTMAN, G.T.W. **Metal pollution in the aquatic environment**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 486p.
- SCORZELLI, I.B., **Remoção de cádmio e zinco de soluções muito diluídas por flotação iônica**. 1999, 169p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.
- NERBITT, C.C., DAVIS, T.E., Removal of heavy metals from metallurgical effluents by the simultaneous precipitation and flotation of metal sulfides using column cells. In: INTERNATIONAL EDP SYMPOSIUM ON EXTRACTION AND PROCESSING FOR THE TREATMENT AND MINIMIZATION OF WASTE, 1994, San Francisco, California. Pennsylvania: The Mineral, Metals and Materials Society, 1994. p. 331-342.
- LIN, C-S; HANG, S.-D. Removal of Cu^(TM) from aqueous solution with high ionic strength by adsorbing colloid flotation. **Environment Science Technology**, v.28,n.3, p. 474-478, Mês 1994.
- GREENPEACE. Metais pesados: contaminando a vida. Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/toxicos/pdf/metais_pesados.doc>. Acesso em: 29 abr. 2005.
- DOYLE, F.M., DUYVESTYEN, S; AND SREENIVASARAO, K. The use of ion flotation of metal: contaminated waters and process effluents. In: INTERNATIONAL MINERALS PROCESSING CONGRESS, 19., São Francisco, 1995. **Proceedings...** 1995, v. 4, p. 175-179.
- ZABEL, T.H.F. Flotation in water treatment. In: Mavros, P; Matis, K.A. **Innovations in flotation technology**. Lancashire, Kluwer Academic Publishers, 1992. p. 431-454. (NATO Asi Series. Series E, Applied Sciences, Vol 208)
- ZOUBOLIS, A.I., MATIS, K.A; STALIDIS, G.A. Flotation techniques in waste water. In: Mavros, P. Matis, K.A. **Innovations in Flotation Technology**. Lancashire, Kluwer Academic Publishers, 1992. p. 475-497. (NATO Asi Series. Series E, Applied Sciences, Vol 208)

10. ZOUBOLIS, A.I., MATIS, K.A. Removal of cadmium from dilute solution by flotation. **Water Science Technology**, London, v. 31, n. 3-4, p. 315-326, 1995.
11. HOSNY, A.Y. Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. **Separation Technology**, New York, v. 6, 1, p. 9-17, Feb. 1996.
12. SHEN, F.; CHEN, X.; GAO, P.; CHEN, G. Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater. **Chemical Engineering Science**, New York, v.58, n.3-6, p.987-993, Jan.-Mar. 2003.
13. MOLLAH, M.Y.A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J.R.; COCKE, D.L. Electrocoagulation (EC) – science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, New York, v.84, n.1, p.29-41, Jun. 2001.
14. BURNS, S.E.; YIACOUMI, S.; TSOURIS, C. Microbubble generation for environmental and industrial separations. **Separation and Purification Technology**, New York, v. 11, n.3, p. 221-232, Jul. 1997.
15. CHEN, G.; CHEN, X.; YUE, P.L. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, VA, v.126, n.9, p. 858-863, Sept. 2000.