



TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS DA INDÚSTRIA EXTRATIVA POR ELETROCOAGULAÇÃO¹

Antonio Gutiérrez Merma²
Lórgio Valdiviezo Gonzales³
Maurício Leonardo Torem⁴

Resumo

Neste trabalho, é avaliada a quebra de emulsões quimicamente estabilizadas de óleo em água pelo processo de eletrocoagulação. O estudo foi dirigido no efeito dos principais parâmetros de operação na taxa de redução da demanda química de oxigênio (DQO): concentração inicial do óleo; densidade de corrente; separação entre eletrodos; pH da solução. As curvas de remoção mostraram que o processo de eletrocoagulação exibe três fases: (1) Fase de latência, (2) Fase reativa, (3) Fase estável. Os resultados mostraram que o tempo para atingir a fase reativa – tempo de latência – diminui com maiores valores de densidade de corrente e menores valores de pH. As espécies responsáveis pela quebra da emulsão, seriam o $\text{Al}(\text{OH})_3$ e os cátions poliméricos de hidróxido de alumínio – espécies predominantes numa faixa de pH entre 4,5 e 9,5 sendo a coagulação por varredura o mecanismo de remoção. Finalmente foi visto que a concentração inicial de óleo e a separação entre os eletrodos não apresentam um efeito significativo na porcentagem de remoção do poluente, sendo que a última afeta de forma considerável o consumo energético.

Palavras-chave: Eletrocoagulação; Emulsões; Águas oleosas; Tratamento de efluentes.

ELECTROCOAGULATION OF OILY WATERS PRODUCED IN THE MINERAL AND EXTRACTIVE INDUSTRY

Abstract

In this work, the electrocoagulation technique was studied in order to treat chemically stabilized concentrated oil-water emulsions. This study was mainly focused on the effects of operating parameters on the reduction rate of chemical oxygen demand (COD): initial pH, current density, reaction time, electrode distance and inlet concentration. The removal curves showed that the electrocoagulation process exhibits three phases: (1) an initial phase, (2) a reactive phase and (3) a steady-state phase. The results showed that the period to reach the reactive phase decreased as the current density increased and the pH values decreased. It is suggested that the main destabilization mechanism is the sweep coagulation and the bridging flocculation through the aluminum hydroxide precipitates and the polymeric cations hydroxoaluminum respectively, which are the predominant species in the pH range 5 – 9,5. Finally it was observed, that inlet oil concentration and distance between electrodes did not present any significant effect on the treatment efficiency but the last could reduce significantly the power consumption, for the conditions taken in this work.

Key words: Electrocoagulation; Environment; Wastewaters; Oily waters.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Químico, Aluno de Doutorado do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio

³ Eng. Metalúrgico, Aluno de Doutorado do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio

⁴ Eng. Metalúrgico, DSc., Professor Associado do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio

1 INTRODUÇÃO

Devido ao incremento da rigidez dos regulamentos ambientais na descarga de efluentes é necessário o desenvolvimento de novas técnicas efetivas para o tratamento de efluentes. As técnicas eletroquímicas têm sido bastante abordadas devido à versatilidade, segurança, baixo consumo de reagentes químicos, baixa produção de lamas, entre outras.

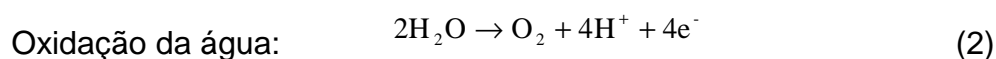
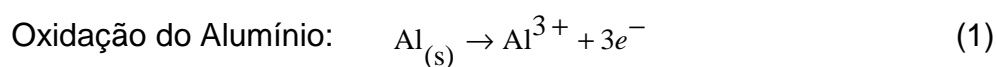
As indústrias minero-metalúrgicas geram efluentes que contêm alto conteúdo de emulsões óleo-água. Esses efluentes apresentam-se de resíduos líquidos que tem diversas funções tais como: lubrificação, resfriamento, limpeza e prevenção de corrosão nos equipamentos e veículos envolvidos nessas indústrias.

Um adequado tratamento desses efluentes é necessário para melhorar a separação do óleo e re-uso de água. Na literatura encontramos a descrição de diferentes processos para o tratamento desses efluentes, mas, os mais comumente usados são: desestabilização química (coagulação convencional),⁽¹⁾ desestabilização eletroquímica (eletrocoagulação), ultrafiltração, microfiltração e adsorção em carvão. Os processos biológicos são menos usados, pois esses efluentes têm presença de biocidas que prevêm a degradação do poluente, os mesmos também requerem um grande espaço. Os caros processos de destilação são uma alternativa quando o efluente é poluído com compostos solúveis os quais não podem ser removidos por outras técnicas.⁽²⁾ A coagulação química não é um processo adequado nesses casos, devido à baixa porcentagem na remoção de finos causada pela presença de gotinhas de óleo finamente disperso.⁽³⁾ O processo de eletrocoagulação tem sido estudado nas últimas duas décadas como um efetivo método para a remoção de espécies iônicas solúveis (Particularmente metais pesados),⁽⁴⁾ matéria orgânica, sólidos suspensos e colóides, tintas e inclusive arsênico de efluentes industriais.

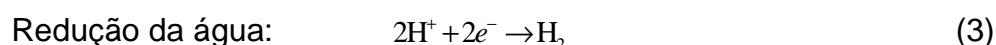
A eletrocoagulação envolve a geração de um coagulante in-situ pela dissolução do material do ânodo. Essa reação também considera a evolução de bolhas de hidrogênio desde o cátodo.⁽¹⁾ Segundo Daneshvar, Khataee e Ghadim⁽⁵⁾ também pode existir um processo de deposição metálica no cátodo.

As seguintes são as principais reações que acontecem no processo de eletrocoagulação quando são usados ânodos de alumínio:

Ânodo:



Cátodo:



Conforme incrementa o tempo de eletrólise, a força iônica do sistema e o pH incrementam e os cátions eletro gerados reagem com os íons OH^{-} – subprodutos da geração de gás hidrogênio no cátodo – para produzir uma gama de diferentes espécies metálicas.⁽¹⁾ Sendo que o material do ânodo é alumínio liberam-se íons



$Al_{(aq)}^{3+}$ que em solução e junto aos íons hidroxila formam diversas espécies tais como: $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_2^{2+}$, $Al_3(OH)_5^{4+}$, $Al(OH)_3$, além de íons poliméricos. Devido às dificuldades relacionadas à caracterização das diferentes espécies de alumínio em solução, somente foram consideradas três principais categorias: espécies monoméricas, poliméricas e precipitados. Foram construídos diagramas de predominância e Eh-pH (Figura 1), os quais fornecem uma idéia de predominância das espécies presentes e a partir disso a determinação dos possíveis mecanismos de eletrocoagulação.

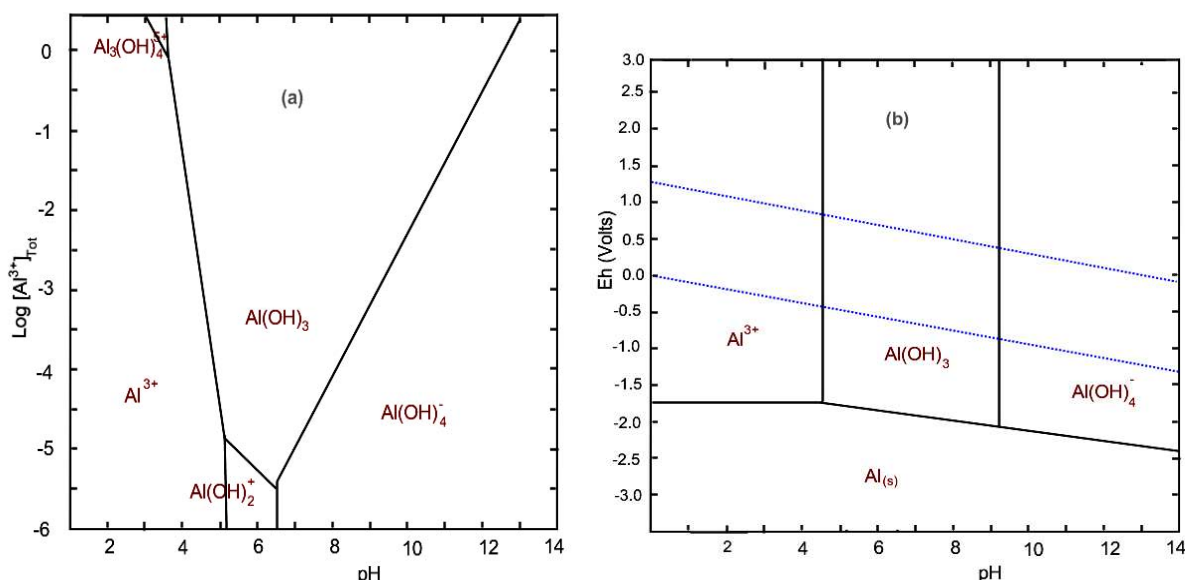


Figura 1. a) Espécies de alumínio em solução – Diagrama de Predominância; b) Diagrama de equilíbrio Eh – pH, considerando ao $Al(OH)_3$ como a fase sólida para uma atividade de alumínio dissolvido de 10^{-3} M e 298K.

De acordo com Moreno Casillas et al.⁽⁶⁾ a eletrocoagulação pode envolver as seguintes etapas sucessivas:

- geração de íons metálicos no ânodo; eletrólise da água produzindo bolhas de O_2 no ânodo e H_2 no cátodo;
- hidrólise dos íons metálicos e geração de polímeros assim como outras espécies metálicas;
- Desestabilização do poluente, partículas em suspensão, quebra de emulsões e agregação de fases desestabilizadas;
- formação de precipitados entre os cátions e os íons OH^- , junto com a adsorção do poluente desestabilizado na superfície do precipitado; e
- flotação ou precipitação dos sólidos suspensos formado e posterior remoção.

As etapas da eletrocoagulação são visualizadas na Figura 2.

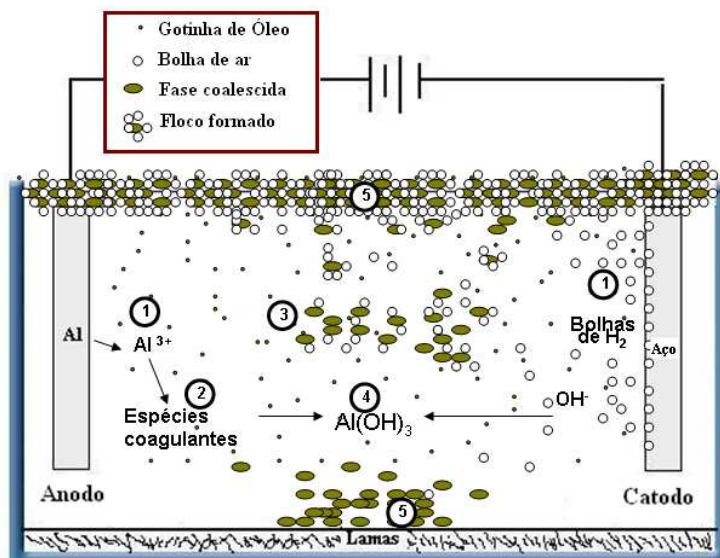


Figura 2. Estágios da eletrocoagulação.

Neste trabalho, um dispositivo de eletrocoagulação foi usado para o tratamento de efluentes oleosos da indústria mineradora. Foi estudada a influência de diferentes condições operacionais no desempenho do processo através de medidas da demanda química de oxigênio (DQO). Sendo consideradas as seguintes variáveis: pH, densidade de corrente, tempo de reação, separação entre eletrodos e concentração inicial do óleo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

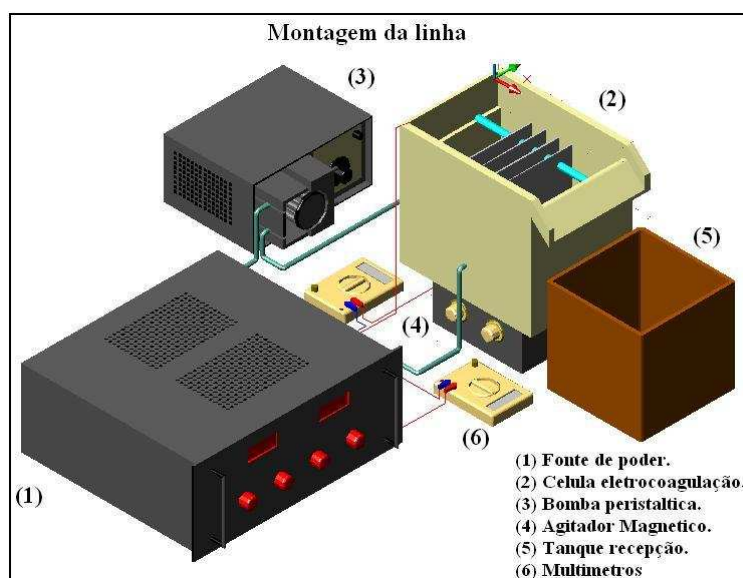


Figura 3. Linha experimental de eletrocoagulação.

2.1 Emulsões Óleo em Água

Para preparar um litro de emulsão sintética misturaram-se 3 g de óleo lubrificante Shell Talpa 30 e água destilada, através de um misturador mecânico, com uma velocidade de 1500 RPM (MARCONI mod.-MA148), durante 8 horas. Durante a mistura, foi adicionado 1g de surfactante oleato de sódio (Valor que supera a

concentração crítica micelar do respectivo surfactante) para dar uma estabilidade química às gotículas de óleo. Finalmente foi adicionado o eletrólito (NaCl) para melhorar a condutividade do meio. A estabilidade da emulsão foi comprovada por medidas de potencial zeta, tendo um valor médio de -70 mV, valor esse indicaria uma boa estabilidade da emulsão, observou-se também um valor médio de pH próximo de 8,7. A emulsão foi armazenada num tanque de vidro de 5.000 mL e mantida sob mistura por meio de um agitador magnético (FISATOM mod.-752 - 250 rpm).

2.2 Equipamento Experimental

A linha experimental do sistema de eletrocoagulação pode ser visto na figura 3. O sistema consiste de uma célula eletroquímica, uma fonte de tensão (TECTROL mod.-TCA-30-10XR1A), um agitador magnético (FISATOM mod.-752 - 250 rpm). Foram usados dois multímetros digitais para medir o passo da corrente no circuito e o potencial aplicado. O pH também foi monitorado por meio de um pH-metro (Analyser pH 300M). Todas as experiências foram realizadas sob temperatura ambiente (25 ± 1 °C) e condições galvanostáticas.

A célula de eletrocoagulação de material acrílico (espessura de parede = 10mm) tem as seguintes dimensões: comprimento: 150 mm, largura: 190 mm, altura: 170 mm. O reator foi equipado com 4 eletrodos, dois anodos de alumínio e dois catodos de aço inox 316L, trabalhando em forma monopolar - paralelo, o espaçamento entre os eletrodos variou desde 5 até 40 mm. As dimensões dos eletrodos são as seguintes: comprimento: 120 mm, largura: 130 mm, espessura: 1 mm, os mesmos foram perfurados com furos de 5 mm de diâmetro em toda a superfície, isso foi feito para aumentar o transporte de massa no interior dos eletrodos e evitar o superaquecimento da solução, além de facilitar a liberação dos gases gerados. Tomando em conta o volume ocupado pelo agitador no fundo da célula e o volume dos eletrodos, o volume de trabalho do reator foi de 4500 mL.

2.3 Procedimento Experimental

2.3.1 Montagem da célula de EC

Os anodos de alumínio foram pesados antes de cada experiência. Ajustou-se a separação entre eletrodos os quais tem uma configuração monopolar em paralelo.

2.3.2 Ajuste dos Valores desejados de pH

A célula de eletrocoagulação foi preenchida com a emulsão sintética, até os eletrodos ficarem totalmente imersos, os valores desejados de pH foram fixados usando-se alíquotas de HCl ou NaOH sob agitação constante.

2.3.3 Início da experiência

Iniciou-se a experiência desde o momento que foi ligada a fonte de poder (tempo zero) para dar passo ao fluxo de corrente na célula de EC. As experiências foram realizadas sob condições galvanostáticas o que quer dizer que a voltagem é variada mantendo uma corrente elétrica constante, assim, sabendo a área dos eletrodos, mantemos a densidade de corrente desejada fixa em qualquer instante.



2.3.4 Análise das amostras

A duração de cada experiência foi de 90 minutos, em cada experiência realizou-se a coleta das amostras no tempo zero e com intervalos de 5 minutos. Em cada uma dessas amostras realizaram-se medidas de DQO pelo método HACH, medidas dos valores de pH, medidas de potencial zeta. Finalmente foram pesados os anodos após cada experiência. A quantidade de alumínio dissolvido na eletrólise foi obtida por diferença do peso inicial e final dos anodos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.2 Aspectos Gerais

Para avaliar o progresso da eletrocoagulação e a porcentagem de remoção do óleo emulsionado foram usados os valores de DQO (demanda química de oxigênio) medidos nos intervalos de tempo determinados.

As curvas de remoção mostraram que o processo de eletrocoagulação exhibe três fases:

- fase de latência, onde a concentração da DQO não diminui já que não foi atingida a concentração requerida de alumínio em solução para dar início à quebra da emulsão;
- fase reativa, nesta observa-se uma rápida redução da concentração da DQO devido à instabilidade da emulsão; e
- fase estável, em que não se consegue alcançar maior remoção do poluente.

Os resultados mostraram que o tempo para atingir a fase reativa – tempo de latência – diminui com maiores valores de densidade de corrente e menores valores de pH. Esse tipo de curvas também foram observadas nos trabalhos de Khemis et al.⁽⁷⁾ e Holt, Barton e Mitchell.⁽⁸⁾

O tempo da fase de latência pode ser considerado como o tempo mínimo requerido para dar início à quebra da emulsão, juntando o tempo da fase de latência com o da fase reativa obtemos o tempo necessário requerido para um efetivo tratamento da emulsão por eletrocoagulação.

O tempo de operação foi de 90 minutos, mas determinou-se um tempo ideal de tratamento com 70 minutos. Tempo com o qual se encontraram valores de porcentagem de remoção superiores a 90% para todas as experiências; quando o tempo de operação supera os 70 minutos se observou um aquecimento na temperatura da solução.

3.3 Efeito da Densidade de Corrente

Os resultados dessas experiências podem ser vistos na Figura 4, quando baixos valores de densidade de corrente são empregados ($0,5 \text{ mA.cm}^{-2}$ – 1 mA.cm^{-2}) o tempo de latência superou os 90 minutos, já quando foram usados maiores valores de densidade de corrente ($8,89 \text{ mA.cm}^{-2}$ – $17,79 \text{ mA.cm}^{-2}$) o tempo foi reduzido até valores de 10 minutos para $17,79 \text{ mA.cm}^{-2}$. Esse fenômeno pode ser explicado da seguinte forma: a quantidade de alumínio em solução (taxa de oxidação do anodo) aumenta junto com a densidade de corrente de acordo com a lei de Faraday, por tal, o tempo para alcançar a quantidade necessária de alumínio em solução é diminuído conforme sejam usados maiores valores de densidade de corrente. Em decorrência obtiveram-se baixos valores na porcentagem de remoção quando foram usados baixos valores de densidade de corrente, apesar de ser atingida a concentração de

alumínio necessária existem outras espécies de alumínio em solução as quais causariam essa baixa remoção.

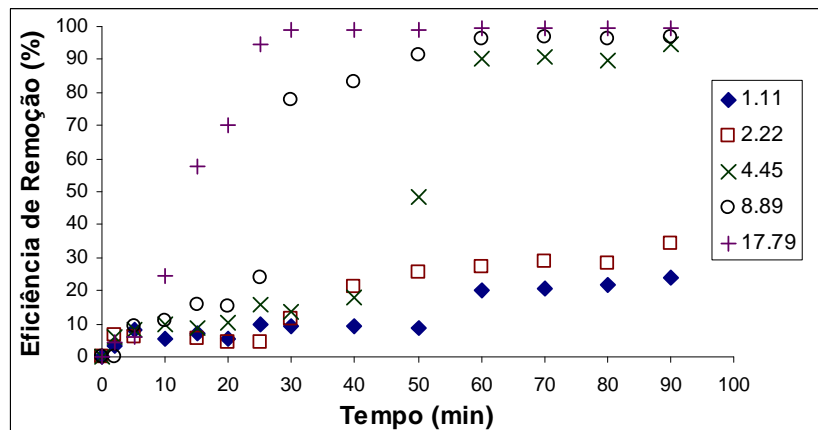


Figura 4. Variação da porcentagem de remoção com o tempo de eletrocoagulação a diferentes densidades de corrente. $i = (1,11, 2,22, 4,45, 8,79, 17,79) \text{ mA.cm}^{-2}$; [Oleato de sódio] = 1g.L^{-1} ; [óleo] = 3g.L^{-1} , [NaCl] = 3g.L^{-1} ; $d=10\text{mm}$; $\text{pH}=8,7$.

Observa-se que maiores valores de densidades de corrente permitem obter menores períodos de latência, e, portanto o tempo global para completar o tratamento é diminuído. Assim, podemos dizer que o incremento da corrente elétrica ou densidade de corrente, não influencia a porcentagem de remoção do processo, e sim, diminui o tempo para atingir a máxima remoção possível.^(4,7,9,10)

O valor médio da eficiência de corrente na dissolução de alumínio foi $(121,86 \pm 1,64)\%$ acima do nível teórico (lei de faraday). Esse excesso na dissolução do alumínio pode ser relacionado à dissolução química em presença de cloro como observado no trabalho de Bensadok et al.⁽¹¹⁾ Sabendo o valor de eficiência de corrente e o tempo de extensão da fase latente, conseguimos calcular a quantidade real de alumínio necessária para dar início à quebra da emulsão, sendo: $(0,14 \pm 0,01) \text{ gL}^{-1}$.

3.4 Efeito da Separação entre Eletrodos

Nas Figura 5 e 6, pode ser visto o efeito que causa a separação entre eletrodos na porcentagem de remoção do óleo assim como o valor específico do consumo energético do processo respectivamente.

Nestas experiências não foi observada uma variação relevante da porcentagem de remoção do óleo da emulsão, obtendo os mesmos resultados para todos os valores de distancia entre eletrodos, na Figura 6 podemos observar que o valor do consumo energético incrementou desde $0,82 \text{ kWh kg}^{-1}$ até $2,06 \text{ kWh kg}^{-1}$ quando se usaram valores de 5 mm e 40 mm respectivamente. Daneshvar, Khataee e Ghadim⁽⁵⁾ explicaram que ao aumentar o afastamento dos eletrodos incrementa a resistência ôhmica do sistema.

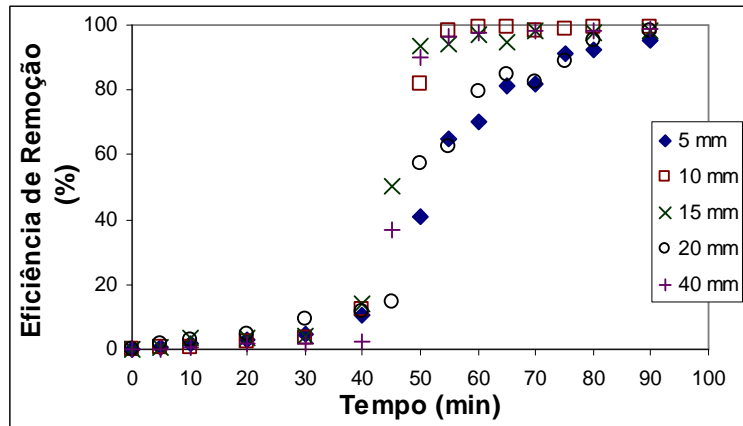


Figura 5. Efeito da separação entre eletrodos na eficiência de remoção de óleo. $d = (5, 10, 15, 20, 40)$ mm; $i = 4,45 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; [Oleato de sódio] = $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; [óleo] = $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; [NaCl] = $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; pH = 8,7.

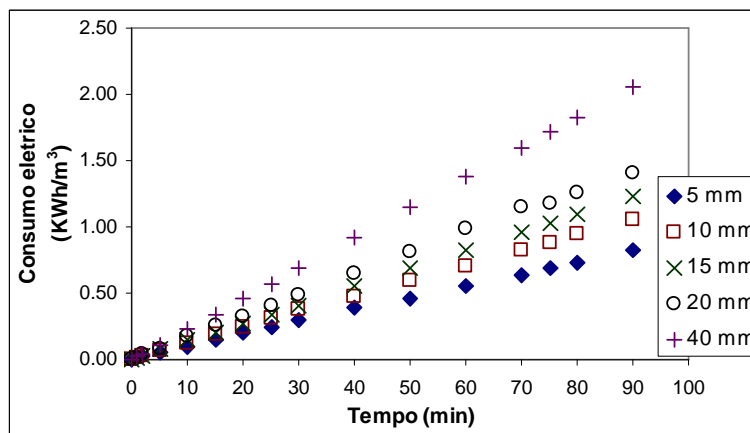


Figura 6. Efeito da distância entre eletrodos no consumo de energia; $d = (5, 10, 15, 20, 40)$ mm; $i = 4,45 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; [Oleato de sódio] = $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; [óleo] = $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; [NaCl] = $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; pH = 8,7.

3.5 Efeito do pH Inicial

O pH é um dos fatores mais importantes afetando o desempenho do processo de eletrocoagulação, pra examinar o seu efeito foram desenvolvidas experiências variando-se os valores de pH na faixa de 4 até 12. Na Figura 7 podemos encontrar o resultado destas experiências, com valores de pH menores que 8 observou-se porcentagens de remoção acima de 98%, de acordo com a literatura as espécies predominantes na faixa de pH 5 – 9,5 são os cátions poliméricos de hidróxido de alumínio e o precipitado hidróxido de alumínio, para valores de pH menores que 5 as espécies predominantes são espécies monoméricas – essas espécies incluem Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ – as quais seriam as responsáveis da desestabilização da emulsão nessas faixas de pH. Para maiores valores de pH (10,8 e 12) observou-se uma porcentagem de remoção de 54,35% e 19,6% respectivamente, sendo que com valores de pH acima de 9,5 a espécie predominante é $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Então, com maiores valores de pH, menor presença dos cátions poliméricos e/ou precipitado e assim menores valores de remoção.

Diagramas termodinâmicos indicam a predominância de espécies metálicas a diferentes condições, espécies que foram mencionadas anteriormente para cada caso de experiências, avaliando os diagramas predominantes e os resultados experimentais, encontramos que as espécies que causariam a quebra seriam as espécies catiônicas poliméricas de hidróxido de alumínio e o precipitado de hidróxido

de alumínio, com tal podemos supor que os mecanismos de quebra da emulsão seriam a ponte interparticular e a coagulação por varredura respectivamente, o que também é indicado no trabalho de Cañizares et al.⁽²⁾

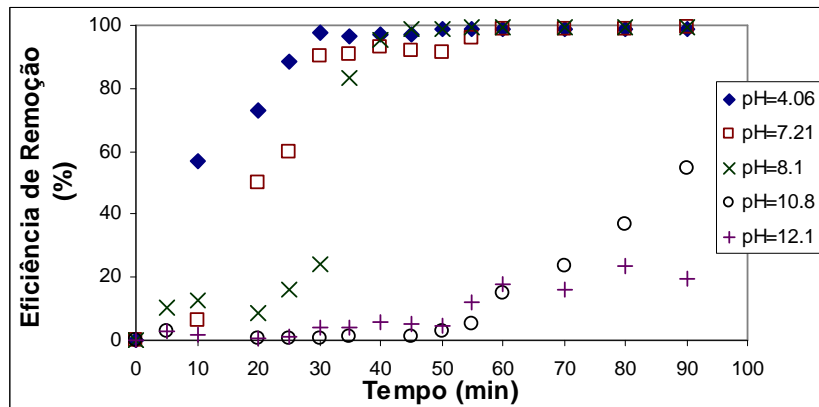


Figura 7. Efeito do pH inicial na porcentagem de remoção do óleo; pH=4, 7,2, 8, 10,8, 12; $i=4,45\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$; [Oleato de sódio]= $1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; [óleo]= $3\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, [NaCl]= $3\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $d=10\text{mm}$.

Outro efeito mencionado na literatura sobre a eletrocoagulação é a dita neutralização do pH. Podemos observar a partir da figura 8 que quando se usaram emulsões com valores de pH entre 4 e 9, o pH final da solução incrementa até um valor entre 8 e 9; efeito também visto por Tezcan Um, Koparal e Ogutveren.⁽¹²⁾ Já quando trabalhamos com pH acima de 10, o pH final tende a diminuir. Esse efeito apresentado pelo pH e as respectivas explicações, podem ser encontrados em outros trabalhos como em Cañizares et al.,⁽²⁾ Mouedhen et al.,⁽⁴⁾ Daneshvar, Khataee e Ghadim,⁽⁵⁾ Chen,⁽⁹⁾ Arslan-Alaton et al.;⁽¹³⁾ o incremento do pH ocorre devido à maior liberação de íons OH^- .

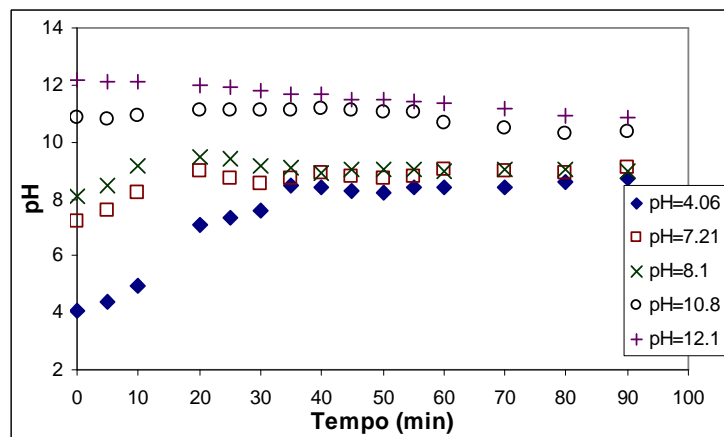


Figura 8. Variação do pH durante a eletrólise; pH=4, 7,2, 8, 10,8, 12; $i=4,45\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$; [Oleato de sódio]= $1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; [óleo]= $3\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, [NaCl]= $3\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $d=10\text{mm}$.

3.6 Efeito da Concentração de Óleo Inicial

Nessas experiências trabalhou-se na seguinte faixa de valores da concentração de óleo: $0,5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ – $10\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Na Figura 9 podem ser vistos os resultados, não se observou nenhum efeito relevante na porcentagem de remoção do óleo, mas quando mudamos os valores de porcentagem de remoção por DQO em ppm (Figura 10) observamos claramente que a concentração inicial do óleo não influencia



na quebra da emulsão já que em todos os casos a fase reativa apresenta-se na faixa de 40 minutos a 50 minutos.

Com altas concentrações de óleo (10 g.L⁻¹) observa-se uma fase inicial com maior inclinação, o que seria a remoção de óleo livre da emulsão, isso devido à menor estabilidade da emulsão por ter elevada concentração de óleo.

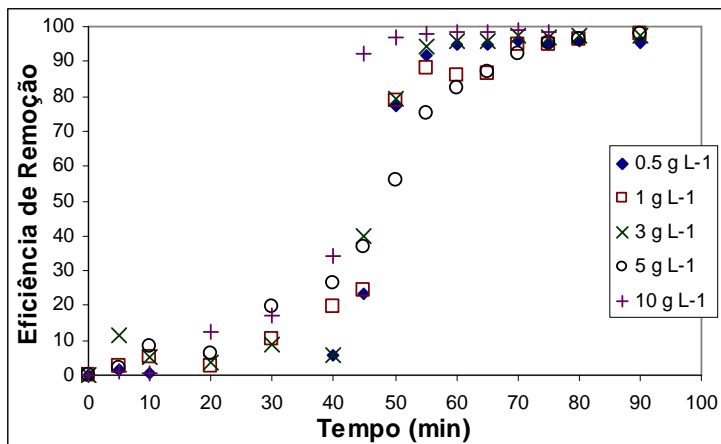


Figura 9. Efeito da concentração de óleo inicial na porcentagem de remoção de óleo; [óleo]= (0,5, 1, 3, 5, 10) g.L⁻¹; $i=4,45\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$; [Oleato de Sódio]=1g.L⁻¹; [NaCl]=3g.L⁻¹; d=10mm, pH=8,7.

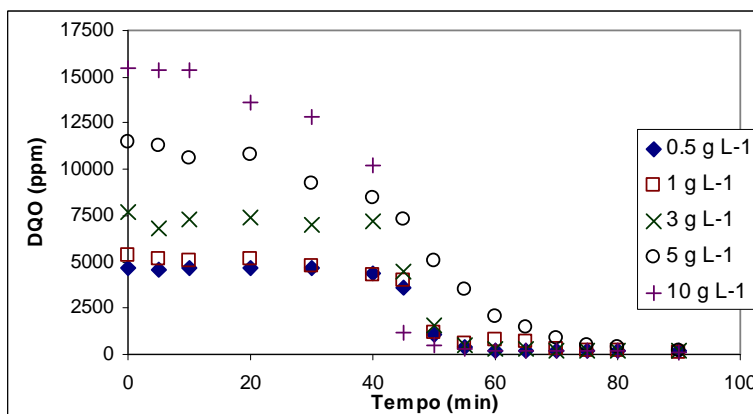


Figura 10. Efeito da concentração de óleo inicial na remoção de COD; [óleo]= (0,5, 1, 3, 5, 10) g.L⁻¹; $i=4,45\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$; [Oleato de Sódio]=1g.L⁻¹; [NaCl]=3g.L⁻¹; d=10mm, pH=8,7.

4 CONCLUSÕES

A eletrólise deste tipo de soluções com eletrodos de alumínio resultou numa neutralização dos valores de pH, diminuindo até valores próximos de 10 quando o pH inicial foi alcalino e aumentando até um valor entre 8 e 9 quando o valor inicial do pH foi ácido ou neutro. As curvas de remoção mostraram que o processo de eletrocoagulação exibe três fases: Fase de latência, Fase reativa e Fase estável.

As parâmetros mais significantes no processo de eletrocoagulação foram o pH e a densidade de corrente: Os resultados mostraram que a densidade de corrente não influencia na porcentagem de remoção do processo, mas sim no tempo necessário para alcançar uma máxima remoção o qual diminui com o incremento da densidade de corrente, o tempo para alcançar uma remoção de 98% usando 4,45 mA.cm⁻² foi de 60 minutos o mesmo foi diminuído para 25 minutos quando incrementou-se a densidade de corrente para 17,79 mA.cm⁻².



O estudo demonstrou que o pH afeta a porcentagem de remoção do processo, com valores menores que pH 8 observou-se porcentagens de remoção acima de 98%, já para maiores valores de pH (10,8 e 12) observou-se uma porcentagem de remoção de 54,35% e 19,6% respectivamente. As altas porcentagens de remoção são devido à predominância de espécies poliméricas e precipitado de hidróxido de alumínio, enquanto as baixas porcentagens são resultado da menor presença dessas espécies devido ao incremento da predominância da espécie $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ conforme incrementam os valores de pH do meio.

A concentração inicial de óleo e a distancia entre eletrodos não apresentaram nenhum efeito significativo nos valores de porcentagem de remoção. Mas de todo modo a distancia entre eletrodos causa uma diminuição no consumo energético.

Finalmente, é sugerido que o mecanismo que permite a desestabilização da emulsão seria a coagulação por varredura e a ponte interparticular, através do precipitado de hidróxido de alumínio e os cátions poliméricos de hidróxido de alumínio espécies predominantes numa faixa de pH de 4,5 até 9,5.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- 1 Y. Chen-Lu, Electrochemical coagulation for oily water demulsification. *Separation and Purification Technology*, 54, p.388-395, 2007.
- 2 P. Cañizares, F. Martinez, J. Lobato, M.A. Rodrigo, Break up of oil-in-water emulsions by electrochemical techniques. *Journal Hazardous Materials*, 145: 1-2, p.233-240, 2006.
- 3 X. Xu & X. Zhu,. Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. *Chemosphere*, 56, p.889-894, 2004.
- 4 M. Mouedhen, M. Feki, M. De Petris Wery, H.F. Ayedi, Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150:1, p.124-125, 2007.
- 5 N. Daneshvar, A.R. Khataee, A.R. Ghadim, M.H. Rasoulifard, Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *Journal of Hazardous Materials*, 148, p.566-572, 2007.
- 6 H.A. Moreno-Casillas, D.L. Cocke, J.A.G. Gomes, P. Morkovsky, J.R. Parga, E. Peterson., Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and purification Technology*, 56, p.204-211, 2007.
- 7 M.Khemis, J.P.Leclerc, G.Tanguy, G.Valentin, F.Lapicque, Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: Experimental investigations and an overall interpretation model. *Chemical Engineering Science*, 61, p.3602-3609, 2006.
- 8 P.K. Holt, G.W. Barton and C.A. Mitchell, The future of Electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere*, 59, p.355-367, 2005.
- 9 G. Chen, Electrochemical Technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, p.11-41, 2004.
- 10 P.R. Kumar. S. Chaudhari, K.C. Khilar, S.P. Mahajan, Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, 55:9, p.1245-1252, 2004.

- 11 K. Bensadok, S. Benammar, F. Lopicque, G. Nezzal, Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminum plate electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 152:1, p.423-430, 2008.
- 12 U. Tezcan Un, A.S. Koparal, U.B Ogutveren, Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes, *Journal of environmental Management* 90, 428- 433, 2009.
- 13 Arslan-Alaton, I. Kabdash, D. Hanbaba, E. Kuybu., Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 150, p. 166-173, 2008.