

Comparação dos eletrodos de ferro e alumínio para o tratamento de efluentes da lavagem de máquinas de terminal intermodal por eletrofloculação

Comparison of iron and aluminium electrodes for the treatment of washing effluents from intermodal terminal machines by electroflocculation

Milena Martins Roque

Fatec Praia Grande
milena.roque@fatec.sp.gov.br

Gustavo Oliva Amaral

Fatec Praia Grande
gustavo.amaral2@fatec.sp.gov.br

Cássio Félix de Moura 

Fatec Praia Grande
cassio.moura@fatec.sp.gov.br

Sabrina Martins Boto

Fatec Praia Grande
sabrina.boto@fatec.sp.gov.br

RESUMO

Testes da técnica da eletrofloculação foram realizadas no efluente da lavagem de máquinas de terminais intermodais com eletrodos de ferro (Fe) e alumínio (Al) com o objetivo de determinar qual eletrodo possibilitaria melhor eficiência e viabilidade de taxa de tratamento do efluente. Para a avaliação foram determinados pH, turbidez, condutividade, alcalinidade e acidez. Nesta pesquisa, um reator eletrolítico de pequena escala foi utilizado na unidade experimental de eletrofloculação que consiste em um reator de acrílico, com capacidade de 6 litros, medindo 30 cm x 15 cm x 20 cm, com ponto de coleta de amostra na lateral inferior. A célula eletrolítica possui 6 placas de ferro ou de alumínio dispostas em paralelo com dimensões de 14 cm x 14 cm x 0,2 cm, conectadas a uma fonte externa de energia de corrente alternada. Os resultados demonstraram aumento do pH e da alcalinidade, redução da acidez e da condutividade elétrica para ambos os eletrodos. No entanto, com melhor desempenho para o ferro. Além disso, na análise de turbidez houve uma redução do valor para ambos os eletrodos, notando-se melhores resultados para o eletrodo de ferro. Por fim, frente aos resultados, constatou-se que o ferro apresenta melhor desempenho na eficiência e viabilidade no tratamento de efluente da lavagem de máquinas por eletrofloculação do que o alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrofloculação. Eletrodo. Tratamento. Efluente.

ABSTRACT

Tests of electroflocculation technique were performed on the effluent from waters of intermodal terminal machines with iron (Fe) and aluminum (Al) electrodes aimed at determining which electrode would enable better efficiency and capability of the effluent treatment rate. Regarding the assessment part, pH, turbidity, conductivity, alkalinity and acidity have been determined. In this research, a small scale electrolytic reactor was used in the experimental electroflocculation unit that consists of an acrylic reactor, with a capacity of 6 liters, measuring 30 cm x 15 cm x 20 cm, having a sample collection point on the bottom side. The electrolytic cell has 6 iron or aluminum plates arranged in parallel with dimensions of 14 cm x 14 cm x 0.2 cm connected to an external alternating current power source. The results demonstrate an increase in pH and alkalinity, reduction in acidity and electric conductivity for both electrodes. The iron offered better performance, however, in the turbidity analysis a reduction in the value for both electrodes, was noticed which enabled better results for the iron electrode. Finally, taking into account the results, it was found that iron has a better performance in efficiency and viability in the treatment of machine washing effluent by electroflocculation than aluminum.

KEY-WORDS: *Electroflocculation. Electrode. Treatment. Effluent.*

INTRODUÇÃO

Segundo Rosa (2002), as características do efluente gerado por operações de lavagens de máquinas podem conter óleos e graxas, sólidos em suspensão, metais pesados, surfactantes, substâncias orgânicas e outros derivados de petróleo. A presença de óleos em cursos d'água resulta em prejuízos na aeração e iluminação, devido a formação de um filme insolúvel na superfície, produzindo efeitos nocivos ao meio ambiente. Conforme Gobbi (2013), para atender às especificações dos órgãos fiscalizadores e regulamentadores ambientais, é necessário um método adequado, que proporcione cada vez mais eficiência, com menos gastos.

De acordo com os autores Mollah et al. (2001), dentre os novos estudos para avanços tecnológicos nos últimos anos em relação aos tratamentos de efluentes, destaca-se a utilização de processos eletrolíticos como a eletrofloculação. A eletrofloculação é uma técnica que emprega corrente elétrica, envolvendo reatores eletroquímicos, nos quais são gerados coagulantes *in situ*, por oxidação eletrolítica de um material apropriado. Ainda conforme Gobbi (2013), geralmente, utilizam-se eletrodos de ferro e alumínio, devido ao baixo custo, por serem eficazes e de fácil disponibilidade no mercado

Desta forma, como ferro e alumínio são comumente os eletrodos mais empregados para a eletrofloculação, despertou-se o interesse em estudar, analisar e comparar a eficiência individual de cada eletrodo, em escala laboratorial. Tendo como objetivo específico analisar os parâmetros físico-químicos, como pH, turbidez, condutividade, alcalinidade e acidez, antes e após o tratamento de efluente.

O efluente utilizado para o experimento foi coletado de um terminal logístico que opera em Cubatão, no estado de São Paulo. As análises foram efetuadas no efluente bruto e no efluente tratado (eletrofloculado) para fins de avaliação e comparação dos eletrodos.

1. TEORIA DA ELETROFLOCULAÇÃO

A eletrofloculação, sendo encontrada, também, com a denominação eletrocoagulação, é um processo que ocorre em reatores eletroquímicos utilizando corrente elétrica que envolve a geração de coagulantes *in situ*, por oxidação eletrolítica de um material apropriado no ânodo. Geralmente, na região anódica emprega-se ferro ou alumínio, pois são materiais de baixo custo, eficazes e prontamente disponíveis no mercado.

De acordo com Crespilho et al. (2004), esta técnica ocorre em três etapas: eletrocoagulação, eletrofloculação e por fim, eletroflotação. Na primeira etapa ocorre a

formação de um agente coagulante através da oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício ferro ou alumínio. Desta forma, os íons gerados a partir do metal utilizado são hidrolisados quase imediatamente ao hidróxido polimérico do metal. Conforme menciona Cerqueira (2006), estes íons ocasionam a neutralização das cargas das partículas superficiais, a desestabilização das partículas coloidais e a quebra de emulsões. Ainda conforme o autor, na eletrofloculação ocorre a aglutinação das partículas desestabilizadas pelos hidróxidos de ferro ou alumínio, favorecendo a formação e o crescimento dos flocos, que podem ser removidos por decantação, filtração ou flotação. O autor ainda sugere que, na eletroflotação, são geradas microbolhas de oxigênio no ânodo e de hidrogênio no cátodo, que sobem à superfície colidindo e sendo adsorvidas pelos flocos, carregando por arraste as partículas e impurezas em suspensão no meio e promovendo a clarificação do efluente.

Gobbi (2013) cita que a eficiência da flotação depende do tamanho das bolhas e da mistura delas com o efluente. Geralmente bolhas com menores tamanhos promovem maiores áreas superficiais de contato, resultando em melhor eficiência no processo de separação.

1.1 TIPOS DE REAÇÕES ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO

1.1.1 Alumínio

A dissolução eletrolítica do ânodo de alumínio produz as espécies monoméricas catiônicas tais como Al^{3+} e $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ a um pH baixo, e em valores de pH entre 6,5 e 7,0 são transformados inicialmente em $\text{Al}(\text{OH})_3$ (agente coagulante responsável pela coagulação e formação das partículas coloidais) e finalmente polimerizado $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$, de acordo com as Equações I - IV:

Reação anódica



Solvatação do cátion formado



Formação do agente coagulante



Reações secundárias



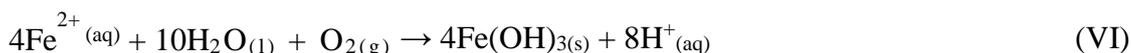
Dependendo do pH do meio aquoso podem conter outras espécies iônicas, tais como Al(OH)^{2+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ e Al(OH)_4^- . Conforme Mollah et al. (2001), a presença desses complexos de alumínio em solução aquosa confere uma característica gelatinosa ao meio. Esses complexos são responsáveis por remover efetivamente contaminantes, pelo fato de adsorverem-se as partículas, produzindo neutralização da carga e originando coágulos maiores.

1.1.2 Ferro

Segundo Mollah et al. (2001), a oxidação em eletrodo de ferro em um sistema eletrolítico produz hidróxido de ferro, Fe(OH)_n , em que n pode ser 2 ou 3. Dois mecanismos foram propostos para a produção de Fe(OH)_n , sendo apresentados nas Equações V a XII.

Mecanismo 1

Ânodo:



Cátodo:



Reação global:



Mecanismo 2

Ânodo:



Cátodo:



Reação global:



Mollah et al. (2004) afirmam que de maneira similar aos eletrodos de alumínio, os íons férricos gerados pela oxidação eletroquímica dos eletrodos de ferro podem formar íons monoméricos e complexos férricos, dependendo do pH do meio aquoso. Estes compostos

metálicos têm característica gelatinosa que podem remover os contaminantes do efluente por complexação ou atração eletrostática, seguido por coagulação.

Crespilho et al. (2004) e Cerqueira (2006) apontam que, além da formação do agente coagulante, na eletrofloculação ocorre a formação de microbolhas de oxigênio (O₂) e de hidrogênio (H₂), que são responsáveis pela flotação de óleos, graxas e outros compostos particulados. A formação desses gases está representada nas Equações XIII, XIV e XV.

Evolução de hidrogênio no cátodo:



Evolução de oxigênio no ânodo:



Ou

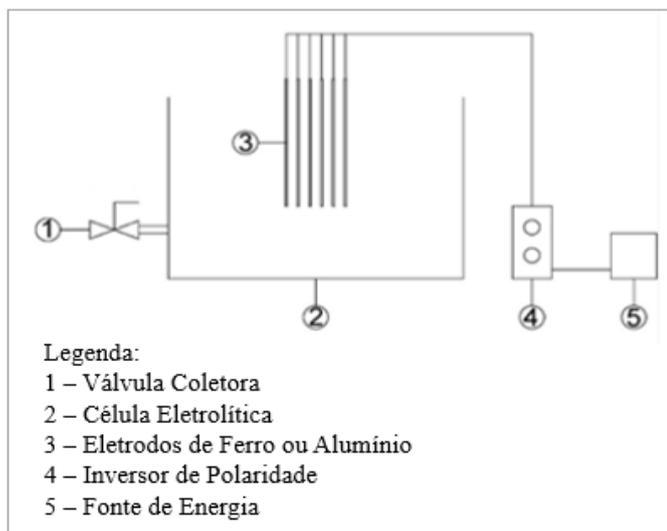


2. METODOLOGIA

2.1 REATOR ELETROLÍTICO DE PEQUENA ESCALA

A unidade experimental de eletrofloculação que foi utilizada no projeto consiste em um reator eletrolítico de pequena escala de acrílico, medindo 30 cm de comprimento, 15 cm de largura e 20 cm de altura com capacidade de 6 litros. O conjunto de eletrodos possui 6 placas de ferro ou alumínio dispostas em paralelo com dimensões de 14 cm de comprimento, 14 cm de largura e com espessura de 2 mm, ligadas à uma fonte externa de energia. As placas foram unidas por dois parafusos, com roscas isoladas com material plástico promovendo distanciamento de 1 cm entre cada placa metálica. Estas placas metálicas foram unidas por solda a cabos conectados à um inversor de polaridade, que inverte o sentido da corrente a cada 10 segundos, que por sua vez está ligado à uma fonte com saída de 12 volts por 5 A. A sequência de inversão de polaridade faz com que o ânodo passe a ser cátodo e vice-versa, beneficiando a minimização do desgaste dos eletrodos causados pela oxidação do ferro e do alumínio e, conseqüentemente, aumentando a vida útil.

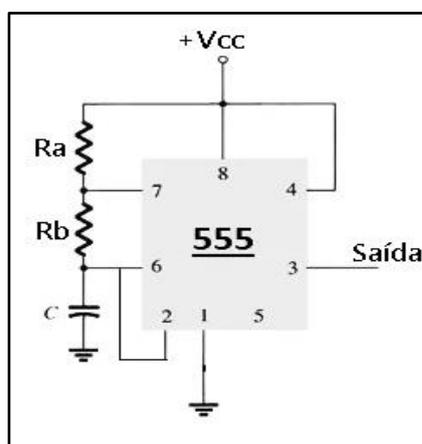
Figura 1 – Esquema da unidade experimental de eletrofloculação



Fonte: Augusto, 2018.

Para alimentar as placas, foi necessário aplicar uma diferença de potencial contínua, porém alternando a polaridade das placas em tempos bem determinados. Se visto em uma linha de tempo contada em segundos, a forma de tensão aplicada nas placas teve o formato de uma onda quadrada, que vai de +12 V para -12 V. Então sendo utilizada uma fonte de alimentação chaveada (a mesma linha de fonte usada em computadores e fontes de notebook), devido a redução da dimensão do circuito, além deter melhor rendimento, pois as perdas por calor são menores. Na alternância da polaridade foi utilizado um circuito oscilador clássico com o circuito integrado 555, um multivibrador estável com frequência variável. O circuito utilizado na pesquisa pode ser apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Circuito oscilador



Fonte: Adaptação de Mollah et al. (2004)

A frequência do oscilador é determinada pela relação dos valores de R1, R2 e C1, conforme o Databook da Texas Instrument:

$$\text{Frequência} = \frac{1,44}{(RA+2RB)C} \quad (\text{XVI})$$

Como interface, foi utilizada uma placa com relés projetado para Arduino, possuindo duas funções: primeiro, ligar parte de potência com excelente isolamento elétrico quando desligado. E em segundo, separar a parte de potência com a de controle, proporcionando maior segurança ao sistema. Também foram utilizados cabeamentos, porta fusíveis, conectores desenvolvidos especialmente para montagem profissional de equipamentos.

O experimento foi realizado da seguinte forma: imergindo os eletrodos em 2,5 litros de efluente da lavagem de máquinas do terminal intermodal devido a eficiência do processo cair quando o volume ultrapassa 60% da superfície de contato dos eletrodos e por ser um volume mais que suficiente para a coleta das amostras. Os eletrodos foram conectados ao inversor de polaridade interligado à fonte de corrente contínua. As amostras de 250 ml foram retiradas a cada 30 minutos de eletrólise durante 1h e 30min.

2.2 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

2.2.1 Determinação do pH

O equipamento utilizado foi da marca Nova Instruments, sendo calibrado com as soluções tampões de 4, 7 e 10 de pH. O eletrodo de vidro foi lavado com água destilada, antes e após cada medição. O pH foi verificado à uma temperatura de cerca de 25 °C em triplicata.

2.2.2 Condutividade

O condutímetro utilizado foi da marca CG 1800 GEHAKA, sendo o eletrodo do aparelho foi lavado com água deionizada, antes e após a cada medição. Após a calibração, inseriu-se o eletrodo em cada amostra para ser feita a análise, sendo aguardado a estabilização do resultado. A condutividade foi verificada à uma temperatura de 25 °C em triplicata.

2.2.3 Alcalinidade

O método utilizado foi o titulométrico com indicador. Os procedimentos foram seguidos conforme Baird et al. (2017):

a) Solução padrão de Carbonato de sódio (Na₂CO₃) 0,05 N

Secou-se 10 g de Na₂CO₃ em estufa a 120 °C por aproximadamente 2h. Após foi aguardado o esfriamento para pesar 2,5 +/- 0,2 g e transferido para um balão volumétrico de 1 L, adicionando água para promover a dissolução, completando o volume do balão.

b) Padronização da solução de Ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,02 N

20 ml de solução estoque de H₂SO₄ 1 N foi pipetada e transferida para um balão volumétrico de 1 L. A padronização da solução de H₂SO₄ 0,02 N ocorreu com 20 ml de solução padrão de Na₂CO₃ 0,05 N, adicionando-se 3 a 4 gotas de indicador fenolftaleína, titulando até o ponto de viragem. Para o cálculo da normalidade real do ácido utilizou-se a Equação XVII:

$$N = \frac{A*B}{106*C} \quad (XVII)$$

Onde:

A: Massa (g) de Carbonato de cálcio presente no balão de 1 L;

B: Volume (mL) de Carbonato de cálcio usado na padronização;

106: Massa molar do Carbonato de sódio (Na₂CO₃);

C: Volume (mL) de H₂SO₄ gastos na titulação;

c) Determinação da alcalinidade da amostra

25 ml de amostra de efluente foi transferido para um Erlenmeyer de 250 ml e então 4 gotas de fenolftaleína foram adicionadas, titulando-se com a solução H₂SO₄ 0,02 N até o desaparecimento da coloração rósea, determinando o ponto viragem. Caso a amostra ao adicionar fenolftaleína não apresente coloração rósea, ou seja, se a amostra apresentar pH fora da faixa do indicador, deve-se adicionar 4 gotas de alaranjado de metila, um indicador que determina se a amostra está com o pH dentro da faixa. Na sequência, a titulação é feita até a amostra apresentar coloração avermelhada. Com o volume gasto do ácido para o indicador fenolftaleína, obteve-se a alcalinidade através da Equação XVIII:

$$\text{mg. L}^{-1}\text{CaCO}_3 = \frac{N*V1*50000}{V2} \quad (XVIII)$$

Onde:

N: Normalidade real de Ácido sulfúrico;

V₁: Volume (mL) gasto na titulação de Ácido sulfúrico;

V_{2amostra}: Volume (mL) coletado da amostra de efluente usado como titulado;

50000: Equivalente-grama do Carbonato de cálcio (CaCO₃).

2.2.4 Acidez

O método utilizado foi o titulométrico com indicador. Os procedimentos foram seguidos conforme o disposto em Baird et al. (2017), sendo realizado em triplicata.

a) Solução padrão de Biftalato de potássio (C₈H₅KO₄) 0,05 N

Secou-se 20 a 30 g de padrão primário de Biftalato de potássio em estufa a 120 °C por 2 h. Após a secagem, foi aguardado esfriar e pesou-se 10,0 +/- 0,5 g, depois foi transferido a quantidade para um balão volumétrico de 1 L. Houve a dissolução e completou-se o volume do balão. Por fim, foi armazenado em um frasco âmbar.

b) Padronização da solução de Hidróxido de sódio (NaOH) 0,02 N

De início, dilui-se 200 ml da solução estoque de NaOH 0,1 N em um balão volumétrico de 1 L. Para a padronização da solução padrão de NaOH 0,02 N, foi utilizado 15 ml da solução padrão de Biftalato de potássio e adicionado 4 gotas de indicador fenolftaleína. O cálculo da normalidade real foi realizado pela Equação XIX:

$$N = \frac{A*B}{204,22*C} \quad (\text{XIX})$$

Onde:

A: Massa (g) de Biftalato de potássio presente no balão de 1 L;

B: Volume (mL) de Biftalato de potássio usado na padronização;

204,22: Massa molar do Biftalato de potássio;

C: Volume (mL) de NaOH gastos na titulação.

c) Determinação de acidez da amostra

25 ml de amostra do efluente foi transferida para um Erlenmeyer de 250 ml, adicionando-se 4 gotas de fenolftaleína; posteriormente foi realizada a titulação com a solução de NaOH 0,02 N até o aparecimento da coloração rósea, determinando assim seu ponto final. Com o volume gasto da base, obteve-se a acidez através da Equação XX

$$\text{mg. L}^{-1}\text{CaCO}_3 = \frac{N \cdot V_1 \cdot 50000}{V_2} \quad (\text{XX})$$

Onde:

N: Normalidade real de Hidróxido de sódio;

V₁: Volume (mL) gasto na titulação de Hidróxido de sódio;

V_{2amostra}: Volume (mL) coletado da amostra de efluente usado como titulado;

50000: Equivalente-grama do Carbonato de cálcio (CaCO₃).

2.2.5 Turbidez

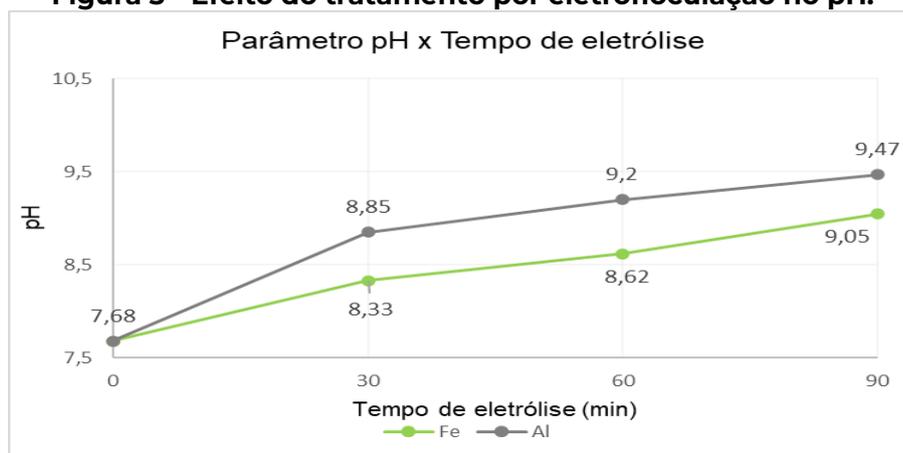
O turbidímetro utilizado foi da marca AP 2000; lavou-se a cubeta do aparelho com água destilada, antes e após cada medição. Calibrou-se o aparelho com as soluções padrão 0,02 NTU e 100 NTU. Em seguida, inseriu a amostra do efluente na cubeta, higienizando sua superfície para retirar eventuais interferências na leitura. Logo após aguardou-se a estabilização do resultado. A determinação da turbidez foi realizada em triplicata para cada amostra analisada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO

Na Figura 3, apresenta-se uma variação do potencial hidrogeniônico (pH) em função do tempo de eletrólise, e pode-se observar que, durante o tratamento do efluente, houve um crescimento entre os valores inicial e final, de 17,84% com o eletrodo de ferro e 23,31% para o de alumínio.

Figura 3 - Efeito do tratamento por eletrofloculação no pH.



Fonte: Autoria própria, 2021

Para Chen (2004) e Mollah et al. (2001), o aumento do pH ocorre pela liberação de OH^- devido a evolução do desprendimento do hidrogênio no cátodo juntamente com os íons de ferro e de alumínio gerados pela oxidação eletroquímica dos eletrodos que podem formar precipitados através dos cátions Fe^{2+} ou Fe^{3+} e Al^{3+} , tendo uma relação direta com a quantidade de corrente aplicada. Karhu et al. (2012) informaram ainda que este aumento de pH é devido à formação de íons OH^- e o aumento mais significativo ocorre em emulsões com pH inicial ácido e neutro. No entanto, Chen (2004) explica que o aumento do OH^- ocorre pela liberação de CO_2 do efluente devido a presença de bolhas de H_2 .

De acordo com Kobya et al. (2003), as mudanças que ocorrem no valor do pH dependem do material do eletrodo e o pH inicial da solução. No caso do alumínio, o pH final possui valores maiores para o pH inicial menores que 8, e acima deste ponto inicial, o pH final é menor. Em relação ao ferro, o pH final é sempre superior ao pH inicial.

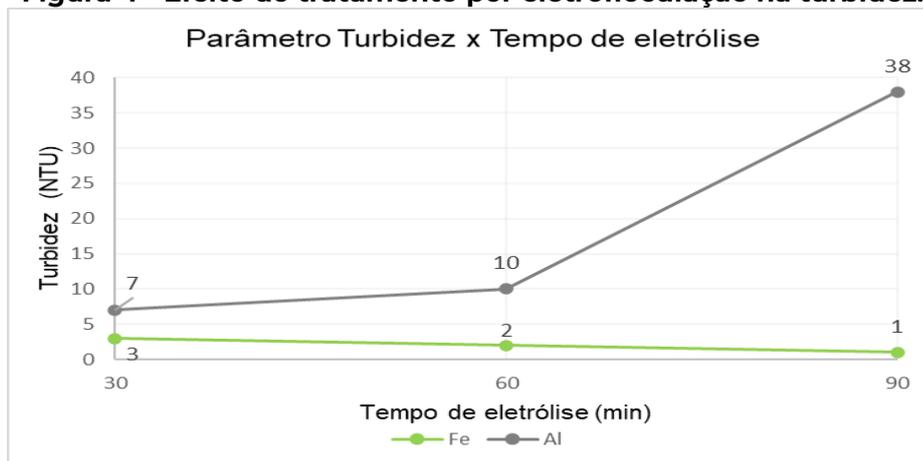
3.2 TURBIDEZ

A análise realizada do efluente bruto, ou seja, anterior ao tratamento, para a determinação da turbidez, mostrou um resultado em média de 825 NTU. A Figura 4 apresenta um gráfico da turbidez em função do tempo de eletrólise, onde pode-se observar que durante 1h e 30min de tratamento, a turbidez apresenta uma variação entre os valores inicial, do efluente bruto, e final, da terceira amostra do efluente tratado e uma redução de 99,88% para o eletrodo de ferro. Em relação ao eletrodo de alumínio, houve uma redução de 95,39%. A diminuição da turbidez atendeu aos resultados esperados, uma vez que o processo principal do tratamento é a

floculação, onde as partículas coloidais entram em contato umas com as outras para aumentar sua distribuição granulométrica.

Contudo, para o alumínio, nota-se que entre os valores da primeira amostra com a terceira amostra coletadas após o tratamento, houve um aumento da turbidez em 81,57%.

Figura 4 - Efeito do tratamento por eletrofloculação na turbidez.



Fonte: Autoria própria, 2021

De acordo com Tir e Mostefa (2008), a turbidez de uma emulsão está relacionada com a concentração de partículas coloidais que tendem a se aglutinarem, fazendo com que a turbidez diminua devido ao seus menores números em quantidade ou um aumento em seus tamanhos. Sendo que os parâmetros importantes que afetam a eficiência da remoção das partículas são: tempo de eletrólise e pH. Ainda conforme os autores Tir e Mostefa (2008), como estabelecido o pH inicial sendo um fator importante para o desempenho do processo de eletrofloculação, pode-se explicar que em valores para pH maior que 9, os flocos de hidróxido de alumínio são menos reativos e a floculação é menos eficaz, pois ocorre a formação de flocos com tamanhos menores, causando a formação de um depósito no ânodo, levando a um aumento da resistência ôhmica das águas residuais, o que resulta em uma menor eficiência na diminuição da turbidez do que em comparação com o eletrodo de ferro.

Em relação a terceira amostra, onde é possível observar um valor mais acentuado no valor da turbidez, o aumento ocorreu possivelmente devido à redução no volume de efluente no interior do reator, após a retirada das amostras anteriores nos intervalos de tempo do tratamento.

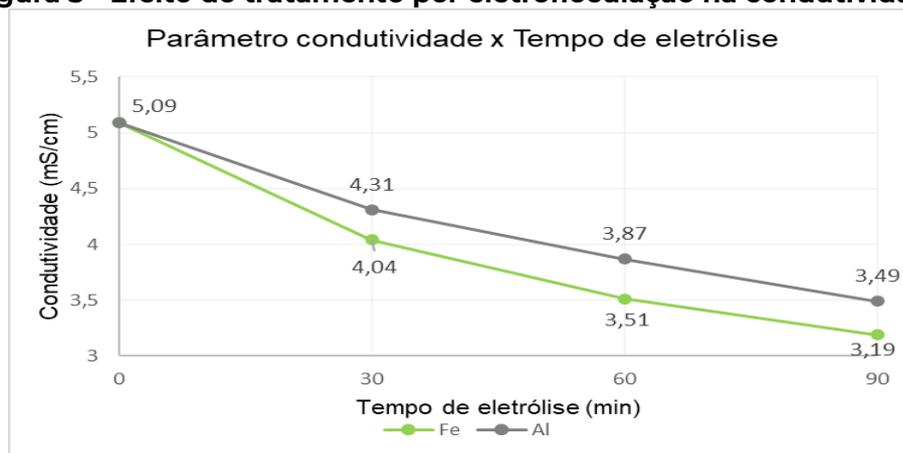
Tal ocorrência fez com que, na última coleta, a amostra apresentasse uma quantidade maior de flocos, que são flotados para a superfície, sendo coletados juntamente com a amostra.

3.3 CONDUTIVIDADE

Na Figura 5, pode-se verificar que o efeito do tempo de tratamento para a condutividade elétrica foi significativo, ocorrendo uma diminuição dos valores medidos. Para este parâmetro, houve uma redução de 37,33% para o eletrodo de ferro e 31,43% para o alumínio.

Cerqueira (2006) cita que a condutividade do efluente líquido bruto estava diretamente proporcional à alta quantidade de íons condutores presentes no meio, durante o tratamento, conforme a formação e o aumento da quantidade dos íons de ferro e alumínio, de acordo com o tempo de eletrólise, havendo uma diminuição dos íons condutores e, por consequência, diminuindo a condutividade. Porém, a diminuição dos íons condutores teve melhor desempenho no eletrodo de ferro do que o alumínio, devido à influência do pH na eficiência do tratamento de eletrofloculação com eletrodo de alumínio.

Figura 5 - Efeito do tratamento por eletrofloculação na condutividade.

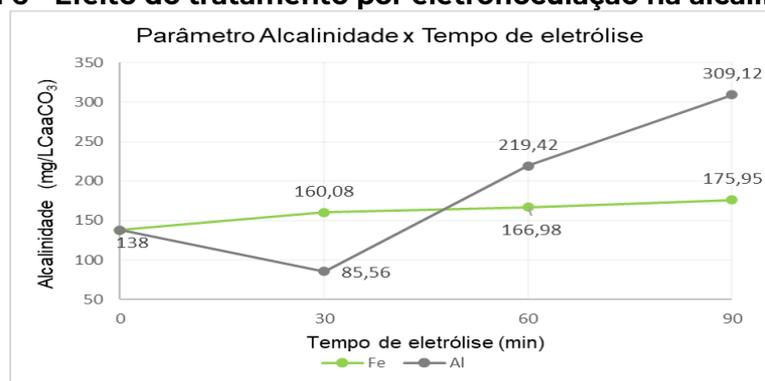


Fonte: Autoria própria, 2021

3.4 Alcalinidade

Na Figura 6, observa-se um aumento gradual da alcalinidade em função do tempo de tratamento, sendo acentuada a 1h e 30 min de tratamento. Em comparação com o valor medido, no efluente bruto, com o valor da última amostra do efluente tratado, houve um aumento de 27,5% para o eletrodo de ferro e 124% para o alumínio.

Figura 6 - Efeito do tratamento por eletrofloculação na alcalinidade.



Fonte: Autoria própria, 2021

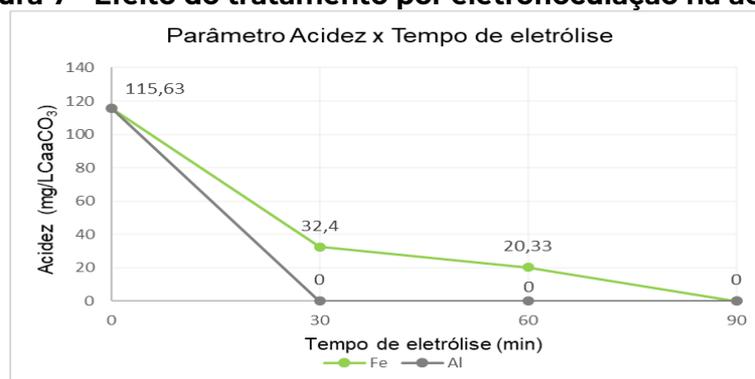
Em concordância com Chen (2004) e Mollah et al. (2001), uma das substâncias mais comuns causadoras de alcalinidade são os hidróxidos (OH^-). Por isso, a tendência para este tipo de tratamento de efluentes é ocorrer maior concentrações de Hidróxidos de ferro e de alumínio, entre outros complexos, no efluente tratado, em virtude da sua liberação ao longo do processo como aglutinante. Em adição, os autores Cerqueira (2006), Crespilho et al. (2004) e Gobbi (2013) confirmam que para o aumento da alcalinidade, houve influência do tempo de eletrólise e a corrente elétrica, sendo que o tempo permitiu cada vez mais a formação dos hidróxidos, aumentando sua concentração, e a corrente elétrica que determina a quantidade de espécies químicas que serão oxidadas.

3.5 ACIDEZ

Na Figura 7 encontram-se os dados oferecidos para a determinação de acidez. É possível observar uma diminuição significativa em comparação com o valor obtido na análise do efluente bruto e no efluente tratado até a segunda amostra retirada do tratamento, após 60 minutos de processo, havendo uma diminuição no entorno de 82,42% para o eletrodo de ferro. Contudo, para o alumínio não foi possível calcular a acidez.

Nas amostras em que a acidez do efluente tratado é igual a zero, significa que não foi possível fazer o cálculo da determinação, pois quando adicionado às amostras o indicador fenolftaleína, imediatamente ocorreu a viragem, surgindo a coloração rósea, indicando que a solução contendo a amostra já estava acima do ponto de viragem do pH.

Figura 7 - Efeito do tratamento por eletrofloculação na acidez.



Fonte: Autoria própria, 2021

Esta queda na análise de acidez atendeu aos resultados esperados, uma vez que está de acordo com os resultados de alcalinidade, portanto, quanto maior a alcalinidade menor será o teor de acidez ao longo das amostras pelo tratamento de efluente por eletrofloculação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com todos os parâmetros estabelecidos para as análises, os resultados deste estudo indicam que a eletrofloculação para tratamento de efluentes de máquinas de terminal intermodal possui melhor desempenho contendo o eletrodo de ferro, apresentando os melhores resultados na redução da turbidez e condutividade à 99,88% e 37,33%, respectivamente.

É sabido que já havia previsão dos resultados obtidos para as determinações de pH, alcalinidade e acidez, em concordância com a literatura. O pH inicial da água residual é um parâmetro chave da eletrofloculação e a partir desta especificação, pode-se constatar que o ideal para o eletrodo de alumínio é manter o pH do efluente tratado abaixo de 7 e 8, pois acima de 9 se torna menos reativo e, conseqüentemente, menos eficaz. Por essa razão é que o eletrodo de ferro apresentou melhores resultados na faixa de pH durante o tratamento, sendo entre 8 e 10.

Em relação a alcalinidade e a acidez, os resultados atenderam às expectativas, visto que o aumento do pH para ambos os eletrodos indicava um aumento de alcalinidade e diminuição da acidez. Ocorrendo de forma proporcional, ou seja, como o eletrodo de ferro teve um aumento menor de pH em comparação com o eletrodo de alumínio, a sua alcalinidade também apresentaria um menor aumento, em consequência da diminuição gradual da acidez.

Contudo, mesmo o eletrodo de ferro obtendo resultados aceitáveis para a maioria dos fatores analisados, o pH ficou fora dos padrões de condições para lançamento de efluente da Resolução Conama nº 430/11, sendo especificado em pH entre 5 e 9. A determinação deste

parâmetro no presente estudo foi acima de 9, ocasionando uma correção de pH para o descarte no meio ambiente.

Conforme citado anteriormente, o tempo de eletrólise e a corrente elétrica são fatores de extrema importância para determinar os resultados de um tratamento de efluente por eletrofloculação. Sabendo-se que a corrente elétrica dita diretamente a quantidade de espécies químicas que serão oxidadas de acordo com o material do eletrodo de sacrifício, e o tempo de eletrólise implica no aumento da concentração dos hidróxidos formados no efluente tratado, estudos relacionados à estes assuntos são de extrema importância, sendo possível determinar de forma aprofundada como qual eletrodo reage e atende melhor ao tratamento de efluente de máquinas por eletrofloculação.

Além disso, também é necessária uma investigação mais detalhada para estabelecer, de fato, a eficiência do eletrodo de ferro nas condições estabelecidas neste trabalho, logo, utilizando outros parâmetros especificados na legislação, como Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, sólidos totais, teor de sulfetos e teor de óleos e graxas.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, W. D. D. **Utilização da eletroflotação no tratamento de efluentes de lavagem de máquinas, visando o reuso**. 2018. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia, Praia Grande. 2018.

BAIRD, R. B.; et al. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*: 23rd. LMC – Pharmabooks, Washington DC. 2017.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-graduação em Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

CHEN, G. *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. Sep. Puri. Technol., 11-41 f. 2004.

CRESPILHO, F. N.; et al. **Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação**. Quim. Nova, Vol. 27, No. 3, 387-392 f. 2003. Instituto de Química de São Carlos. São Carlos. 2004.

GOBBI, L. C. A. **Tratamento de água oleosa por eletroflotação**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

KARHU, M.; et al. *Bench scale electrocoagulation studies of bio oil-in-water and synthetic oil-in-water emulsions. Separation and Purification Technology*, v. 96, 296-305 f. 2012.

KOBYA, M.; et al. *Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. Desalination*, v. 190, 201-211 f. 2006.

MOLLAH, M. Y. A.; et al. *Electrocoagulation (EC)-science and applications*. J. Hazardous Materials, 84(1), 29-41p. 2001.

MOLLAH, M. Y. A.; et al. *Fundamentals, presents and future of electrocoagulation*. J. Hazardous Materials, 114(1), 199-210 f. 2004.

ROSA, J. J. **Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação** – processo FF. 2002. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

TIR, M.; MOSTEFA, N. M. *Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method*. Journal of Hazardous Materials, v. 158, 107-115 f. 2008.