UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

MARCELLY DA CONCEIÇÃO THOMES

AVALIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO COM ELETRODO TELADO DE ALUMÍNIO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO

SÃO MATEUS
2023

MARCELLY DA CONCEIÇÃO THOMES

AVALIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO COM ELETRODO TELADO DE ALUMÍNIO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Energia, na área de concentração Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Profº. Drº. Eduardo Perini Muniz
Co-orientador: Profº. Drº. Paulo Sérgio da Silva Porto

SÃO MATEUS

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

T452
a

Thomes, Marcelly da Conceição, 1989-
Avaliação da eletrocoagulação com eletrodo telado de alumínio para o tratamento de efluente oleoso sintético / Marcelly da Conceição Thomes. - 2023.
107 f. : il.

Orientador: Eduardo Perini Muniz.
Coorientador: Paulo Sérgio da Silva Porto.
Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Eletrocoagulação. 2. Tratamento de águas residuais. 3. Eficiência energética. 4. Eletrodo de Alumínio. I. Muniz, Eduardo Perini. II. Porto, Paulo Sérgio da Silva. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

MARCELLY DA CONCEIÇÃO THOMES

AVALIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO COM ELETRODO TELADO DE ALUMÍNIO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 18 de dezembro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
EDUARDO PERINI MUNIZ
Data: 19/12/2023 08:20:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Eduardo Perini Muniz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
PAULO SERGIO DA SILVA PORTO
Data: 19/12/2023 08:59:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Documento assinado digitalmente
GEORGE RICARDO SANTANA ANDRADE
Data: 19/12/2023 17:12:22-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. George Ricardo Santana Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
FLAVIO BENTES FREIRE
Data: 19/12/2023 16:38:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Flávio Bentes Freire
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meus mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao Dr. Eduardo Perini Muniz, pela orientação dedicada ao longo deste período de estudo e pesquisa. Sem seu apoio, suporte e conhecimentos compartilhados não seria possível alcançar os resultados obtidos neste trabalho.

Agradecer ao meu coorientador Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto, cujo apoio e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Suas valiosas contribuições e dedicação foram imprescindíveis para o aprimoramento de minhas habilidades acadêmicas e profissionais.

Ao professor Dr. Flávio Duarte Couto Oliveira que gentilmente auxiliou na montagem do sistema de eletrocoagulação, meu profundo agradecimento por compartilhar seu conhecimento técnico e por ter se disponibilizado a ajudar nesta etapa tão importante do trabalho. Sua paciência, generosidade e prontidão foram essenciais para que as análises fossem realizadas com êxito.

Aos professores que fizeram parte da banca de qualificação: Dr. George Ricardo Santana Andrade e Dr. Flávio Bentes Freire, meu sincero agradecimento pela análise criteriosa e pelos valiosos comentários e observações durante a qualificação desta pesquisa. Suas contribuições enriqueceram a qualidade deste trabalho.

Minha gratidão se estende aos demais professores e toda à equipe do programa que contribuíram para minha formação acadêmica ao longo desta jornada. Seus ensinamentos e incentivos moldaram minha visão de mundo e me motivam a buscar sempre o conhecimento e a excelência em todas as atividades que me proponho realizar.

Não posso deixar de reconhecer a fundamental contribuição dos técnicos de laboratório do Programa de Pós-graduação em Energia por todo apoio, disponibilidade e cooperação. Quero expressar meu profundo agradecimento, particularmente, ao técnico do laboratório de Química Jean Carlos Fiorotti, que pacientemente, esteve sempre disponível para auxiliar nas demandas relacionadas aos experimentos. Sua expertise e suporte técnico foram essenciais para o progresso desta pesquisa.

Aos meus colegas de turma, quero expressar minha gratidão por toda a colaboração, apoio e troca de experiências ao longo desse período. Através de nossas discussões e desafios mútuos crescemos juntos e fortalecemos nossos aprendizados. Agradeço o incentivo e companheirismo que tornaram esta jornada acadêmica ainda mais enriquecedora.

Agradeço a Deus, por me guiar e me iluminar durante todo o percurso desta jornada. Sua divina proteção e orientação foram essenciais para superar os desafios e os momentos de desânimo e chegar ao final dessa etapa com sucesso.

Gostaria de expressar minha eterna gratidão à minha família cujo apoio e compreensão foram fundamentais para minha realização pessoal e profissional. Expresso também minha gratidão ao meu amado filho Henrique, por ter sido tão paciente e compreensivo durante os momentos em que estive longe. Compreendo o quão difícil tenha sido para você lidar com minha ausência e compreender o motivo por trás dela. No entanto, mesmo sem entender completamente, você demonstrou paciência admirável e sempre apoiou minhas decisões.

Por fim, quero expressar minha profunda gratidão pelo apoio financeiro pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo por todo aporte teórico e prático necessários à condução da formação de cada profissional.

Desta forma, e com muita gratidão que concluo meus agradecimentos a todos que ajudaram e contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa. Sem o apoio e estímulo de cada um de vocês, meu crescimento acadêmico não teria sido possível.

EPÍGRAFE

“Como sou pouco e sei pouco, faço o pouco que me cabe me dando por inteiro.”

Ariano Suassuna

RESUMO

A geração de efluentes oleosos representa um desafio iminente, influenciado pelo crescimento populacional, expansão industrial e aumento da produção global. Essa problemática resulta na contaminação do solo, água e atmosfera, com consequências adversas para ecossistemas, biodiversidade e saúde humana. A eletrocoagulação (EC) surge como uma solução promissora, utilizando processos eletroquímicos para precipitar contaminantes metálicos sólidos. Este estudo se baseia em desenvolver um novo tipo de eletrodo telado de alumínio, economicamente viável e fácil de manusear, visando aprimorar a eficácia no tratamento de efluentes oleosos. Experimentos com efluente oleoso sintético em um reator de EC em batelada (volume total: 4,5 litros) exploraram variações de tensão (10, 15 e 20 volts) e tempos de inversão de polaridade (10, 20 e 30 segundos). Parâmetros como teor de óleos e graxas (TOG), turbidez, pH, temperatura, perda de massa dos eletrodos usados, consumo de energia elétrica e teor de alumínio no efluente após o tratamento foram analisados. Remoção percentual no teor de óleos e graxas de até 98±1% foi obtida com os eletrodos telados. A redução percentual na turbidez também foi superior a 98% na maioria dos ensaios sendo que o pH, a temperatura e o teor de alumínio após o tratamento do efluente oleoso, ficaram dentro dos parâmetros para o lançamento de efluentes. Os resultados obtidos neste estudo sugerem que os novos eletrodos de alumínio telado podem ser uma alternativa eficiente e sustentável para empresas e indústrias que necessitam tratar efluentes oleosos.

Palavras-chave: Eletrocoagulação. Eficiência energética. Efluente oleoso. Eletrodo de alumínio. Eletrodo perfurado.

ABSTRACT

The generation of oily effluents represents an imminent challenge, influenced by population growth, industrial expansion, and increased global production. This problem results in the contamination of soil, water, and atmosphere, with adverse consequences for ecosystems, biodiversity, and human health. Electrocoagulation (EC) emerges as a promising solution, using electrochemical processes to precipitate solid metallic contaminants. This study is based on developing a new type of aluminum electrode, which is economically viable and easy to handle, aiming to improve effectiveness in the treatment of oily effluents. Experiments with synthetic oily effluent in a batch EC reactor (total volume: 4.5 liters) explored voltage variations (10, 15 and 20 volts) and polarity inversion times (10, 20, and 30 seconds). Parameters such as oil and grease content (TOG), turbidity, pH, temperature, mass loss of the electrodes used, electrical energy consumption, and aluminum content in the effluent after treatment were analyzed. Percentage removal in oil and grease content of up to 98±1% was obtained with screened electrodes. The percentage reduction in turbidity was also greater than 98% in most tests, as well as the pH, temperature, and aluminum content after treating the oily effluent, were within the parameters for effluent discharge. The results obtained in this study suggest that aluminum mesh screen electrodes can be an efficient and sustainable alternative for companies and industries that need to treat oily effluents.
Keywords: Electrocoagulation. Energy efficiency. Oily effluent. Aluminum electrode. Perforated electrode.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIFERENÇA DAS FORMAS DE DISPERSÃO DO ÓLEO EM ÁGUA 22
FIGURA 2 - ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO DE PETRÓLEO 24
FIGURA 3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS REAÇÕES IN SITU DURANTE PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO 30
FIGURA 4 - DIAGRAMA DE FORMAÇÃO DE ESPÉCIES DO ALUMÍNIO EM ÁGUA PURA 42
FIGURA 5 - ETAPAS DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 45
FIGURA 6 - ESQUEMA DO SISTEMA DE ELETROCOAGULAÇÃO EM ESCALA DE BANCADA 47
FIGURA 7 - DIMENSÕES DA ESTRUTURA DE CANOS PVC PARA MONTAGEM DOS ELETRODOS DE ALUMÍNIO TELADO E FOTO DO CONJUNTO APÓS MONTAGEM FINAL 48
FIGURA 8 - ESQUEMA DA QUANTIFICAÇÃO DOS REAGENTES PARA PREPARO DO EFLUENTE OLEOSO SEGUIDA DE FOTO DO APARELHO MISTURADOR DA SOLUÇÃO 51
FIGURA 09 - FLUXOGRAMA PARA MEDIÇÃO DO TEOR DE ÓLEOS E GRAXAS (TOG) 57
FIGURA 10 - FOTO DAS SEPARAÇÕES DE FASES NOS FUNIS DE SEPARAÇÃO PELO MÉTODO DA ANÁLISE DO TEOR DE ÓLEOS E GRAXAS (TOG): À DIREITA EXTRAÇÃO DA AMOSTRA DO TEMPO FINAL (T=30) E À ESQUERDA EXTRAÇÃO DA AMOSTRA NO TEMPO INICIAL(T=0) 58
FIGURA 11 - UV/VIS - ESPECTROFOTÔMETRO USADO PARA LEITURAS DAS ABSORBÂNCIAS 59
FIGURA 12 - ANÁLISE DO pH EM UMA AMOSTRA DO EFLUENTE SINTÉTICO SEM TRATAMENTO (T=0) 60
FIGURA 13 - TURBIDÍMETRO USADO PARA AS MEDIDAS DE TURBIDEZ DAS AMOSTRAS APÓS TRATAMENTO COM EC 61
FIGURA 14 - BALANÇA ANALÍTICA USADA PARA PESAGEM DOS ELETRODOS 62
FIGURA 15 – FOTO DO REATOR DE ELETROCOAGULAÇÃO COM O EFLUENTE OLEOSO NO INÍCIO E NO FINAL DO TRATAMENTO 64
FIGURA 16 – FOTO DA FORMAÇÃO DO LODO SUPERFICIAL NO REATOR DE EC (A) DEVIDO A LIBERAÇÃO DE BOLHAS DE HIDROGÊNIO PELOS ELETRODOS DE ALUMÍNIO (B) 65
FIGURA 17 - FORMAÇÃO DE FLOCOS E A DECANTAÇÃO DO MATERIAL FLOCULADO APÓS TRATAMENTO POR EC EM AMOSTRAS DE DIFERENTES ENSAIOS 66
FIGURA 18 - GRÁFICO Q-Q PARA RTOG% 70
FIGURA 19 - GRÁFICOS DE INTERAÇÕES ENTRE D.D.P. **X** T_{INV} COM T_{INV} **X** D.D.P. 71
FIGURA 20 - GRÁFICO DE BARRAS COMPARANDO O PERCENTUAL DE R_{TURB} DOS ENSAIOS REALIZADOS 76

FIGURA 21 - GRÁFICO DA TENDÊNCIA DO DESGASTE DOS ELETRODOS INTERNO E EXTERNO AO APLICAR DIFERENTES D.D.P. E T_{INV} AO PROCESSO DE EC.....80
FIGURA 22 - IMAGEM DOS ELETRODOS ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM EC FEITAS COM MICROSCÓPIO USADOS NOS ENSAIOS DE 10, 15 E 20 VOLTS COM 30 SEGUNDOS DE INVERSÃO DE POLARIDADE 81
FIGURA 23 - GRÁFICO COMPARANDO AS PERDAS DE MASSA EM MILIGRAMAS DOS ELETRODOS INTERNO E EXTERNO NOS ENSAIOS DE REUTILIZAÇÃO SOB AS MESMAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO 84
FIGURA 24 - FOTOS DOS ELETRODOS ANTES E DEPOIS DA EC E NAS RESPECTIVAS REUTILIZAÇÕES DO PAR DE ELETRODOS PARA O ENSAIO ELETROQUÍMICO SOB AS MESMAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO 85
FIGURA 25 - VARIAÇÃO DO PH NOS TEMPOS DE 0, 5, 10, 20 E 30 MINUTOS DURANTE O PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO 101
FIGURA 26 - VARIAÇÃO DA TURBIDEZ NOS TEMPOS DE 0, 5, 10, 20 E 30 MINUTOS DURANTE O PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO 103
FIGURA 27 - MONTAGEM DO SISTEMA DE ELETROCOAGULAÇÃO BATELADA EM ESCALA DE BANCADA USADOS PARA OS ENSAIOS COM OS ELETRODOS DE ALUMÍNIO TELADO..... 105

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE CONCENTRAÇÕES PERMITIDAS DE ALUMÍNIO DISSOLVIDO EM ÁGUA PARA DIFERENTES MEIOS AQUOSOS 41
TABELA 2 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO COM AS COMBINAÇÕES DE TENSÃO E TEMPO DE INVERSÃO DE POLARIDADE 53
TABELA 3 - PERCENTUAL DE RTOG EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS E O DESVIO PADRÃO 67
TABELA 4 - TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA RTOG% 68
TABELA 5 - COMPARAÇÕES POST HOC D.D.P. * TINV 68
TABELA 6 - VALORES DO PH ANTES E DEPOIS DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO 73
TABELA 7 - CORRELAÇÃO DE SPEARMAN PARA O PH INICIAL E FINAL DOS EXPERIMENTOS 74
TABELA 8 - RESULTADOS DA REDUÇÃO NA TURBIDEZ ENCONTRADOS A PARTIR DOS ENSAIOS REALIZADOS 75
TABELA 9 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN PARA RTURB 76
TABELA 10 - CONSUMO DE ENERGIA DOS ENSAIOS EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE 78
TABELA 11 - CORRELAÇÃO DE SPEARMAN PARA O CONSUMO DE ENERGIA 79
TABELA 12 - PERCENTUAL DE DISSOLUÇÃO DOS ELETRODOS INTERNOS E EXTERNOS NOS ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO 80
TABELA 13 - RESULTADOS PARA RTOG% E RTURB DO EXPERIMENTO 10 E RESPECTIVOS REUSO DOS ELETRODOS 84
TABELA 14 - VALORES DAS ABSORBÂNCIAS PARA A AMOSTRA DO TEMPO INICIAL E FINAL DA ELETROCOAGULAÇÃO 100
TABELA 15 - LEITURA DO PH DAS AMOSTRAS NOS TEMPOS DE 0, 5, 10, 20 E 30 MINUTOS 101
TABELA 16 - VARIAÇÃO DA TURBIDEZ NOS TEMPOS DE 0, 5, 10, 20 E 30 MINUTOS DE ELETROCOAGULAÇÃO 102
TABELA 17 - MÉDIA DOS REGISTROS DA TENSÃO, CORRENTE E TEMPERATURAS REGISTRADAS VIA ARDUINO E O CONSUMO DE ENERGIA DE CADA ENSAIO 104

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PUBLICAÇÕES SOBRE ELETROCOAGULAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS OLEOSAS 32

QUADRO 2 - CARACTERÍSTICAS DOS ITENS USADOS PARA MONTAGEM DO SISTEMA DE ELETROCOAGULAÇÃO 46

QUADRO 3 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DO HAVOLINE SEMISSINTÉTICO API SL 49

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 3
EPÍGRAFE 5
RESUMO 6
ABSTRACT 7
LISTA DE FIGURAS 8
LISTA DE TABELAS 10
LISTA DE QUADROS 11
SUMÁRIO 12
1 INTRODUÇÃO 15
2 OBJETIVOS 18
2.1 OBJETIVO GERAL 18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18
3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO 19
3.1 ÁGUA: DEMANDA MUNDIAL, CONSUMO, ESCASSEZ E CONTAMINAÇÃO 19
3.2 EFLUENTES OLEOSOS 21
3.2.1 A ORIGEM DOS EFLUENTES OLEOSOS 21
3.2.2 O SETOR PETROLÍFERO 23
3.3 IMPACTOS CAUSADOS PELOS EFLUENTES OLEOSOS 25
3.4 PRINCIPAIS MÉTODOS DE TRATAMENTO PARA OS EFLUENTES DE ORIGEM OLEOSA 26
3.4.1 TRATAMENTOS FÍSICOS 27
3.4.2 TRATAMENTOS QUÍMICOS 28
3.4.3 TRATAMENTOS BIOLÓGICOS 29
3.5 ELETROCOAGULAÇÃO: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES 29
3.6 APLICAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS 31
3.7 FATORES DE INTERFERÊNCIA NOS PROCESSOS DE EC 35
3.7.1 DISTÂNCIA ENTRE OS ELETRODOS 35
3.7.2 INVERSÃO DE POLARIDADE 35
3.7.3 DENSIDADE DE CORRENTE 36
3.7.4 INFLUÊNCIA DO PH INICIAL 37

3.8 CONFIGURAÇÃO DOS REATORES E ELETRODOS USADOS EM PROCESSOS DE EC 38
3.9 SELEÇÃO DO MATERIAL DOS ELETRODOS PARA PROCESSOS ELETROQUÍMICOS 39
3.10 ELETRODO DE ALUMÍNIO 40
3.11 PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS DE EC 42
3.11.1 VANTAGENS 43
3.11.2 DESVANTAGENS 44
4 MATERIAIS E MÉTODOS 45
4.1 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL 45
4.2 PREPARO DO EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO 49
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 51
4.4 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS 52
5 MÉTODOS DE ANÁLISE 56
5.1 TEOR DE ÓLEOS E GRAXAS (TOG) 56
5.2 DETERMINAÇÃO DO PH 59
5.3 DETERMINAÇÃO DA TURBIDEZ 60
5.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA 61
5.5 DETERMINAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ELETRODOS 62
5.6 TEOR DE ALUMÍNIO 63
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 64
6.1 O PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO E REMOÇÃO DE ÓLEO DO EFLUENTE 64
6.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS PARA REDUÇÃO PERCENTUAL DE ÓLEOS E GRAXAS (RTOG%) 66
6.4 EFEITO DO TRATAMENTO POR EC NO PH 72
6.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA TURBIDEZ 74
6.7 ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO 77
6.5 DISSOLUÇÃO DOS ELETRODOS TELADO DE ALUMÍNIO 79
6.8 ANÁLISE DO TEOR DE ALUMÍNIO 82
6.6 TEMPERATURA 82
6.9 POTENCIAL PARA REUSO DOS ELETRODOS DE TELADO DE ALUMÍNIO 83
6.10 ANÁLISE CONJUNTA DAS VARIÁVEIS 85
7CONCLUSÕES 88

PROPOSTAS E SUGESTÕES PARA TABALHOS FUTUROS 89
REFERÊNCIAS 90
APÊNDICE A – LEITURAS DAS ABSORBÂNCIAS 100
APÊNDICE B – VARIAÇÃO DO PH 101
APÊNDICE C – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ 102
APÊNDICE D – TABELA COM AS VARIAÇÕES DA TENSÃO, CORRENTE, TEMPERATURA E CONSUMO ELÉTRICO 104
APÊNDICE E – BANCADA DE ELETROCOAGULAÇÃO 105
ANEXO I 106

1 INTRODUÇÃO

Ao se analisar o cenário atual, é possível observar que o aumento do consumo de água, impulsionado pelo desenvolvimento econômico e o processo de urbanização, tem gerado uma expressiva produção de águas residuais. Dependendo de sua origem, estes efluentes podem apresentar características distintas com substâncias ou compostos altamente poluentes e/ou tóxicos para o meio ambiente e saúde humana.

Dentro deste contexto, os efluentes oleosos se descartados de forma inadequada representam problemas em potencial ao meio ambiente (Druskovic et al., 2021; Shokri & Fard, 2022). Diversos setores industriais, como alimentício, têxtil, metalúrgico, farmacêutico e petrolífero representam um desafio significativo quanto ao tratamento adequado dos seus efluentes em atendimento aos padrões das legislações vigentes (Aljaberi et al., 2020; Zhao et al., 2021). O setor petrolífero, em particular, enfrenta desafios críticos devido à carga poluidora associada aos constituintes naturais do petróleo (Hochberg, Tansel, Laha, 2022; Liu Y. et al., 2021).

Outra preocupação constante é em relação aos efluentes oleosos provenientes dos postos de combustíveis. Segundo dados do Anuário Estatístico Brasileiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 43.266 postos de combustível automotivos autorizados estão em operação no Brasil. De acordo ainda com relatório, no estado do Espírito Santo (ES) estão em funcionamento cerca de 738 postos revendedores (ANP, 2023).

Embora medidas de coleta e tratamento sejam adotadas, os métodos de separação das águas oleosas por gravidade nem sempre removem satisfatoriamente o óleo, resultando na geração significativa de lodo oleoso (Alves et al., 2017; Assis, 2020).

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), estabelece condições e padrões para lançamentos de águas residuais oleosas tratadas em corpos receptores hídricos, conforme a Resolução nº 430 de 2011. Na seção II desta Resolução é estabelecido um valor máximo permitido de até 20 mg/L (miligramas por litro) para óleos e graxas ou óleos minerais (Brasil, 2011).

Com o intuito de minimizar os efeitos e impactos negativos causados pelos efluentes oleosos, diversos estudos têm sido desenvolvidos na busca de alternativas e tecnologias mais eficazes e capazes de reduzir o volume e toxidade destes efluentes (Aljaberi, Ahmed, Makki, 2020; Zhao et al., 2021; Zini et al., 2020).

Os processos de eletrocoagulação (EC) se destacam na remoção de diversos poluentes e misturas mais complexas, devido a sua eficiência energética, redução no uso de produtos químicos, redução em quantidade de lodo produzido, versatilidade, podendo também ser usado em uma unidade de tratamento com outros processos de separação, potencializando o atendimento às diretrizes ambientais e com baixos investimentos (Al-Raad et al.,2021). Entretanto, há desafios quanto à sua implementação, um deles sendo o custo e necessidade de reposição dos eletrodos e outro quanto a necessidade de adequar a geometria do reator e dos eletrodos à sua aplicação.

Existem poucos trabalhos encontrados na literatura, que se arriscam em testar novos tipos de materiais e geometrias diferenciadas para eletrodos em processos eletroquímicos. Druskovic et al. (2021), por exemplo, reforça que existe uma necessidade de investigar a eficiência de novos tipos de eletrodos no tratamento de efluentes oleosos, assim como Moussa et al. (2017) também sugere o desenvolvimento de mais modelos para facilitar a ampliação dos reatores, além de uma avaliação da viabilidade econômica deles.

Desta forma, neste trabalho pretende-se avaliar uma nova geometria para o eletrodo e testar em um reator de EC, em batelada para tratamento de um efluente oleoso sintético. Trata-se de um material de fácil de aquisição, já usado comercialmente em ralos e calhas pluviais para proteção contra insetos e roedores, ao mesmo tempo é super-resistente sendo fabricada em alumínio expandido que não desfia. O eletrodo de alumínio telado reduz relativamente o custo pois estes materiais são de fácil aquisição, manuseio e montagem.

Outra vantagem que pode ser levada em consideração, é em relação ao número de furos que o telado apresenta. Vários autores concordam que o aumento de perfurações no eletrodo proporciona maior eficiência ao processo (Akkaya G., 2022; Avancini et al., 2019; Hussain, et al. 2022; Hussin et al., 2017) e isso pode ser associado a um aumento da distribuição de corrente ao longo da superfície do eletrodo, maior circulação de bolhas e íons durante o tratamento eletroquímico segundo os autores.

Nas seções a seguir, serão abordadas questões pertinentes ao tratamento dos efluentes oleosos utilizando a EC, destacando as vantagens ao utilizar-se do método de tratamento com eletrodos de alumínio empregando uma corrente elétrica e um inversor de polaridades para separação e tratamento deste tipo de efluente.

Assim, a pesquisa não apenas se limita à academia e à indústria, mas estende sua importância para a gestão eficiente de resíduos industriais, para a preservação do meio ambiente e a promoção da saúde e do bem-estar humano.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de remoção de óleo de um efluente sintético por um sistema de eletrocoagulação (EC) com eletrodos telados de alumínio, arranjados no formato de cilindros concêntricos, em batelada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da variação de tensões elétricas e tempo de inversão de polaridade diferentes, na eficiência de remoção de óleo emulsionado em água;
- Determinar o índice de alcalinidade após tratamento com eletrocoagulação analisando o pH das amostras;
- Analisar a concentração de alumínio dissolvido no efluente após processo de eletrocoagulação;
- Analisar quais as variáveis que desempenham maior influência no processo de tratamento do efluente oleoso sintético.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Nesta seção serão abordados os principais tópicos relacionados ao referencial bibliográfico sobre o tema abordado neste trabalho. Assim, aspectos mais relevantes quanto ao uso da água e produção de efluentes oleosos, os impactos causados por eles, principais formas de tratamento com ênfase nos fundamentos e aplicações da eletrocoagulação, reações envolvidas e relacionadas ao processo o uso de eletrodos de alumínio bem como as vantagens e desvantagens, serão discutidas nos tópicos seguintes.

3.1 ÁGUA: DEMANDA MUNDIAL, CONSUMO, ESCASSEZ E CONTAMINAÇÃO

Uma das questões mais preocupantes da atualidade a nível mundial é a quantidade de água potável disponível para consumo bem como para manutenção das atividades essenciais do dia a dia. Estima-se que 97% da água existente no planeta é água salgada, encontrando-se nos mares e oceanos, não sendo própria para consumo sem o processo de dessalinização.

A dessalinização é um avanço tecnológico que permite remover o excesso de sal e minerais da água salgada, entretanto, vale ressaltar que trata-se de um processo caro e energeticamente intensivo o que limita sua aplicação em larga escala. Dos 3% restantes na forma de água doce, menos de 1% dela é própria para o uso e consumo, podendo ser encontrada em rios, lagos e pântanos. A outra parcela, no entanto, encontra-se nas grandes geleiras e em aquíferos subterrâneos de difícil acesso e disponibilidade (ANA, 2011; WWAP, 2016).

De acordo com o relatório mundial da Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos de 2021, a demanda no consumo de água aumentou seis vezes nos últimos cem anos e continua a crescer cerca de 1% ao ano desde a década de 1980 (WWAP,2021). Grande parte desse aumento pode ser associado a uma combinação de usos, devido ao crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças nos padrões de consumo.

O acelerado e desordenado crescimento populacional, a concentração de muitas pessoas nos grandes centros urbanos, a expansão das atividades industriais, a exploração de mais recursos, a geração de um grande volume de resíduos, são alguns dos fatores que levam à

poluição e contaminação dos recursos hídricos, e por consequência, volume de efluentes cada vez maiores (Chen *et al*., 2018; Shahedi *et al*., 2020; Zhao *et al*., 2021)

Cada tipo de efluente possui características inerentes à sua composição e origem. Os efluentes industriais, por exemplo, podem conter desde material orgânico biodegradável até substâncias ou, a combinação delas, altamente tóxicas para o meio ambiente e saúde humana. Os efluentes de origem industrial como usinas termoelétricas, de produtos farmacêuticos, fábricas de papel/celulose, refinarias de petróleo, perfuração de poços e mineração, de semicondutores e de produtos químicos também são grandes responsáveis pela contaminação das águas em todo o mundo devido a carga poluidora que carregam (ANA, 2011; Saravanan *et al*., 2021). No Brasil algumas legislações estabelecem padrões e limites para lançamentos em corpos receptores, a fim de minimizar os impactos causados pelo descarte.

A Lei 9433 de 8 de janeiro de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil e tem como base, dentre outros fundamentos, que a água é um bem de domínio público e é um recurso natural limitado e dotado de valor econômico (Brasil, 1997). Já a Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011 dispõe acerca das condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos hídricos. Esta resolução altera e complementa a Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005 que trata da classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, além de estabelecer condições e padrões para lançamento de efluentes, permitindo assim que os órgãos de fiscalização de cada jurisprudência, tenham embasamento teórico e legal, para a manutenção da qualidade dos corpos hídricos no país (Brasil, 2005).

A gestão e monitoramento de efluentes de origem oleosa tem se tornado cada vez mais importante e representam um desafio para o meio ambiente e para a saúde pública.

3.2 EFLUENTES OLEOSOS

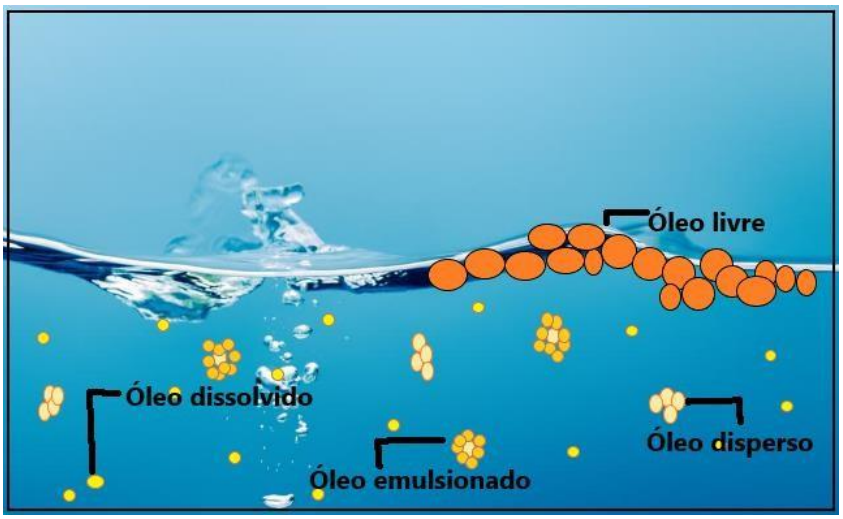
3.2.1 A origem dos efluentes oleosos

Efluentes oleosos são substâncias líquidas e viscosas que resultam do processo de produção no cotidiano de várias empresas e indústrias. O óleo pode estar no efluente gerado na forma livre ou emulsionado (Roman *et al*., 2021). O óleo livre tende a apresentar uma separação mais fácil da fase aquosa devido a diferença de densidade que apresenta em relação à água. Uma emulsão é formada quando dois líquidos imiscíveis são misturados de forma que uma das partes se encontra totalmente dispersa na outra sob a forma de gotas de tamanhos muito reduzidos (Kadier *et al*., 2022).

As emulsões oleosas, geralmente são resultado da mistura de óleo, água e um emulsificante. Elas podem ser do tipo óleo em água (O/A) quando o óleo está misturado e disperso na água sob a forma de pequenas gotículas ou ainda do tipo água em óleo (A/O), quando o meio disperso é a água (Schons, 2008; Souza J.,2022). Estas características das emulsões torna a separação da fase oleosa deste tipo de efluente mais complexa (Franzol e Rezende, 2015; Kadier *et al*., 2022).

A Figura 1 apresenta a diferença da estrutura de tamanhos de poluentes de óleo na água contaminada por este agente. É possível observar a diferença de densidade do óleo livre na água, enquanto na forma emulsionada, óleo e água encontram-se intrinsicamente misturados, o que torna o processo de separação e tratamento mais complexo.

Figura 1 - Diferença das formas de dispersão do óleo em água



Fonte: Adaptado de Kadier *et al*., (2022)

Para Shokri, Fard (2022), as características das águas residuais oleosas dependem da essência do processo de produção, dos métodos e produtos químicos empregados na operação. Como exemplo, pode-se citar os efluentes de origem oleosa provenientes de processos industriais petrolíferos, têxteis, alimentícios, farmacêuticos, automobilísticos, metalúrgicos e que podem conter substâncias perigosas, metais pesados e, portanto, não devem ser devolvidos ao corpo hídrico sem tratamento adequado (Saravanan *et al*., 2021; Shokri, Fard, *2022;* Song *et al*., 2017). Ainda segundo Shokri, Fard (2022), estes efluentes oleosos podem conter os seguintes componentes: óleo difundido, componentes orgânicos solúveis, incluindo voláteis, ácidos orgânicos e fenóis, sólidos, microrganismos, minerais produzidos dissolvidos, incluindo materiais radioativos e metais pesados, salinidade, entre outros.

Considerando que os efluentes de origem oleosa podem ter composições diferentes dependendo da sua procedência, como aditivos de processos industriais, detergentes, entre outros materiais, devem ser caracterizados e avaliados quanto a sua classificação e a presença de substâncias toxicológicas na sua composição química (Hochberg, Tansel, Laha, 2022; Liu Y. *et al*.; 2021; Lu, Zhang, Li, 2021). É importante frisar que tais poluentes são extremamente nocivos tanto para o meio ambiente como para a saúde humana, se descartados de forma inadequada nos meios aquáticos, solo ou em aterros sanitários (An *et al*., 2017).

As empresas de acabamento e processamento de metais, como as metalúrgicas, por exemplo, são responsáveis pela geração de efluentes oleosos, gerados nas fases de corte e lavagem devido ao uso e consumo de fluidos (An *et al*., 2017). Esses fluidos são amplamente

usados para resfriamento, lubrificação, limpeza e prevenção de corrosão dos equipamentos usados, resultando assim em um efluente contaminado (Demirbas, Kobya, 2017). O efluente gerado em processos de usinagem em metalúrgicas pode apresentar altas taxas de óleo livre e emulsionado necessitando um tratamento adequado antes do seu descarte.

O setor de produção e processamento de alimentos também é responsável por demasiada quantidade de águas residuais oleosas geradas diariamente. Restaurantes, abatedouros, frigoríficos, indústrias de laticínios podem gerar efluentes com características e composições diversificadas, a depender das atividades e produtos usados em cada empreendimento (Elia, Stylianou, Agapiou, 2023; Nassar *et al*., 2023). Além disso, trata-se de um dos setores de maior crescimento da atualidade e, consequentemente, maiores volumes de efluentes contaminados com óleo e graxa tendem a ser produzidas (Cai *et al*., 2017).

Além destes, postos de combustível, oficinas mecânicas e empresas automotivas também são responsáveis por grandes volumes de efluentes contaminados por substâncias tóxicas, como hidrocarbonetos, metais pesados e compostos químicos variados. A água pode se misturar ao óleo durante as diversas atividades cotidianas como limpeza, lavagem dos veículos, troca de óleo, entre outras coisas gerando um efluente do tipo oleoso (Zini *et al*., 2020). Estes efluentes, estão contaminados por derivados do petróleo, poeira, areia lubrificantes (mais comumente na forma emulsionada) e por isso precisam passar por tratamentos adequados antes de serem devolvidos à rede coletora de águas residuais de forma segura e dentro dos padrões das legislações vigentes (Druskovic *et al*., 2021; Alves *et al*., 2017).

Existem várias razões pelas quais o setor petrolífero merece destaque quando se trata da produção de águas residuais oleosas como volume, composição e complexidade que envolve toda a logística de produção do setor. Portanto, dada a magnitude da produção de águas residuais oleosas pelo setor petrolífero, este será tratado na próxima seção.

3.2.2 O Setor petrolífero

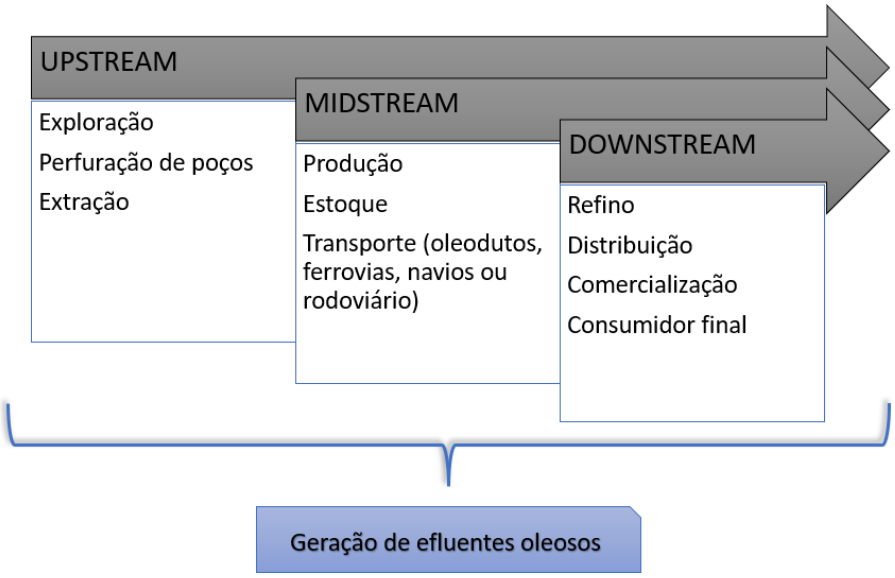
Dentre as atividades industriais supracitadas, o setor petrolífero é um dos mais preocupantes, devido ao alto grau de toxidade dos efluentes gerados, associado aos constituintes presentes naturalmente na composição do petróleo (Hamidi, Ataei, Sarrafi, 2021; Li J. *et al.*,

2021). Nesse contexto, é notório observar que o crescimento das explorações petrolíferas também pode resultar em potenciais impactos ao meio físico, biótico e socioambiental. Todavia, o setor de petróleo e gás ainda é a principal fonte de energia da atualidade e apresenta um grande impacto na economia mundial, sendo uma das matérias primas mais importantes da atualidade (ANP, 2020).

Em 1941 teve início no Brasil a produção comercial de petróleo e gás *onshore*, atingindo seu ápice de produção na década de 70. A partir de 1980 grandes reservas de petróleo começaram a ser exploradas no mar, alavancando ainda mais a produção nacional em 2007 com a descoberta do pré-sal (IBP, 2020).

Durante todo o processo de exploração, armazenamento, transporte e refino do petróleo, inevitavelmente é gerado um efluente oleoso (Li J. *et al*., 2021). Todo este efluente oleoso tende a possuir um teor médio de cerca de 10% a 30% de petróleo, o que não causa apenas desperdício de recursos petrolíferos, mas também pode causar danos ambientais imensuráveis se descartado de forma inapropriada (Hu *et al*., 2020; Zhao *et al*., 2021). Na Figura 2 pode-se observar as diversas etapas desde a exploração do petróleo até sua distribuição ao consumidor final.

Figura 2 - Etapas do processo produtivo de petróleo



Fonte: O autor

As características das águas produzidas são determinadas principalmente pela composição química de formação do petróleo, constituído em grande parte por hidrocarbonetos cuja composição pode ser de 83 a 87% de átomos de carbono e 11 a 15% de hidrogênio, além

de heteroátomos como Nitrogênio (5%), Enxofre (6%) e Oxigênio (de 3 a 5%) e pequenas quantidades organometálicas (D'Almeida, 2015; Godoi, 2022).

Trata-se de um efluente com alto grau poluidor. Nas várias etapas do processo produtivo de petróleo, a emulsificação do efluente acontece devido ao cisalhamento gerado pelas bombas, centrífugas, válvulas e outros equipamentos utilizados (Chaprão, 2020, Roman *et al*., 2021). O óleo presente neste efluente encontra-se, em sua maior parte, na forma emulsionada, de difícil separação e tratamento (Aljuboury *et al*., 2017; Islam, 2019).

Desta forma, o interesse em realizar o correto tratamento e descarte destes efluentes potencialmente poluidores, está diretamente atrelado a escassez de água potável no planeta. A indústria de petróleo e gás é uma das maiores consumidoras de água do mundo em suas diversas etapas de operação. Essa enorme quantidade de água utilizada resulta em quantidades significativas de águas residuais oleosas geradas diariamente. As águas residuais oleosas do setor petrolífero contêm uma mistura complexa de hidrocarbonetos, graxas, produtos químicos e metais pesados. Essa composição torna o tratamento dessas águas residuais um desafio significativo.

3.3 IMPACTOS CAUSADOS PELOS EFLUENTES OLEOSOS

Óleos e graxas se enquadram na classificação dos resíduos perigosos – Classe I de acordo com a NBR 10004/2004 que classifica os tipos de resíduos quanto à sua potencialidade de risco (ABNT, 2004). São substâncias orgânicas de origem mineral, vegetal ou animal que podem alterar as características tanto da água quanto do solo onde são descartadas, geralmente por consequência dos despejos dos efluentes industriais, domésticos, oriundos de postos de combustível, oficinas mecânicas, de produtos alimentícios, têxteis, fármacos, entre outros e que podem causar a contaminação do meio (Orssatto, Hermes, Vilas Boas, 2010).

Os principais componentes químicos presentes em óleos e graxas mais prejudiciais ao ecossistema são os compostos orgânicos persistentes (COPs) e os hidrocarbonetos poliaromáticos (HPAs), especificamente aqueles classificados como tóxicos e bioacumulativos (Sakan, Ostojic e Dordevic, 2017; Singare & Shirodkar, 2023)).

Os COPs são compostos químicos que são muito estáveis e podem persistir no meio ambiente por longos períodos. Eles incluem substâncias como os bifenilos policlorados (PCBs), os dibenzo-p-dioxinas (PCDDs) e os dibenzofuranos (PCDFs). Tais compostos são altamente tóxicos e podem causar danos aos organismos vivos incluindo os seres humanos, devido a capacidade de acumular na cadeia alimentar, concentrando-se cada vez mais à medida que são ingeridos por diferentes organismos (Kanzari *et al*., 2014; Sakan, Ostojic e Dordevic, 2017).

Os HPAs são compostos encontrados em óleos e graxas que contêm carbono e hidrogênio na forma de anéis aromáticos. Alguns HPAs são classificados como tóxicos e bioacumulativos. Esses compostos são formados durante a combustão incompleta de materiais orgânicos como o petróleo (Singare p., 2015; Singare & Shirodkar, 2023).

A degradação natural do óleo no meio ambiente é muito baixa. Os componentes presentes nos efluentes oleosos podem prejudicar às atividades biológicas na natureza por um longo período sendo, portanto, extremamente importante eliminar o óleo das águas residuais antes desta voltar ao seu curso natural (Shokri & Fard, 2022).

Diante dos problemas causados pela contaminação do meio a partir dos efluentes oleosos, tornam urgente o desenvolvimento e aprimoramento de métodos e tecnologias já existentes capazes de fazer o tratamento adequado das águas residuárias oleosas, a fim de minimizar os impactos causados por elas.

3.4 PRINCIPAIS MÉTODOS DE TRATAMENTO PARA OS EFLUENTES DE ORIGEM OLEOSA

Atualmente existem uma série de métodos e técnicas para tratamento de efluentes a depender da sua origem. Para implementação de um processo de tratamento é necessário levar em consideração o tipo de efluente que se pretende tratar: as características principais, o espaço disponível para alocação dos itens e equipamentos necessários, consumo de insumos, energia e produtos químicos, operação do sistema, suporte técnico entre outras questões. Além disso é necessário levar em consideração as condições do corpo receptor, normas e regulamentos para os efluentes após o tratamento.

As técnicas utilizadas para tratar o efluente oleoso podem ser de natureza física, química ou biológica podendo ser usadas separadamente ou combinadas, em função dos objetivos a serem alcançados após o tratamento (Islam, 2019; Moussa *et al*., 2017).

3.4.1 Tratamentos Físicos

Tratamentos físicos são caracterizados por métodos de separação de fases para remoção de material mais grosseiro. Incluem processos em que não ocorrem alterações químicas e biológicas consideráveis no efluente tratado sendo, assim, chamado tratamento primário convencional (Aljuboury *et. al*., 2017; Bhatia *et al*., 2017). Alguns dos processos físicos para remediação de águas oleosas podem ser destacados como: separação por gravidade, hidrociclones, flotação, adsorção, filtração por membranas (Chaprão, 2020).

Para óleos e graxas comumente são usadas as caixas ou tanques de separação por gravidade, onde óleo e água na sua forma livre são separados por diferenças de densidade (Alves *et al.*, 2017). Também podem ser utilizadas membranas de filtração para tratamento do efluente oleoso, podendo ser classificados de acordo com o tamanho dos poros das membranas filtrantes: ultrafiltração, microfiltração ou nano filtração e de osmose reversa (Ahmad, Guria, Mandal, 2020; Aljuboury *et al*., 2017).

Outro tratamento físico que vale ser mencionado, é a flotação por ar dissolvido: inicialmente são adicionados coagulantes ao efluente que são misturados para formar flocos. Este efluente floculado passa por uma câmera de flotação, onde é misturado com um fluxo de água saturada com ar dissolvido sob pressão. Esse fluxo supersaturado é misturado ao efluente que em contato com as microbolhas flutuam juntamente com os contaminantes até a superfície. Desta forma é possível remover boa parte do óleo emulsionado do efluente, enquanto no método de separação gravimétrica apenas o óleo na sua forma livre é separado do efluente. Entretanto, o método apresenta desvantagem quanto ao alto custo e necessidade de manter fluxo constante de nano bolhas para um tratamento eficaz (Edzwald, 1995; Druskovic *et al*., 2021).

Já no processo de adsorção, o método de tratamento é baseado na atração entre a superfície externa do adsorvente e do adsorbato (Sathya *et al*., 2022; Solayman *et al*., 2023). É um processo eficiente e muito usado como etapa final para tratamento de águas residuais

(Gilpavas, Dobrosz, Gómez-García, 2019) contudo, a separação resulta em um segregado sólido ao adsorvente que exige um manejo e descarte final.

3.4.2 Tratamentos químicos

Tratamentos químicos são aqueles em que são empregados diversos agentes químicos na mistura (Liu Y *et al*., 2021). Métodos químicos dependem exclusivamente de certos componentes e suas concentrações para a remediação da mistura oleosa. Assim, faz-se necessário um tempo de residência para a mistura estabilizar e completar a separação dos poluentes através da formação de flocos que tendem a separar por flotação ou decantação (Medeiros *et al*., 2022).

Os coagulantes podem ser separados em duas categorias: floculantes poliméricos orgânicos que podem ser subdivididos em catiônicos, aniônicos, iônicos e anfotéricos (Abuhasel *et al*., 2021) e os floculantes inorgânicos como sulfato de alumínio, sulfatos ferrosos e cloreto de polialumínio (Manilal, Soloman, Ahmed, 2020; Medeiros *et al*., 2022).

Geralmente nos processos de tratamentos químicos convencionais são aplicados emulsificantes ao efluente, o que pode facilitar no tratamento e alcance de bons resultados de remoção de contaminantes. As desvantagens do processo estão relacionadas às contaminações secundárias que podem ser ocasionadas devido a adição dos produtos químicos na mistura, necessidade de grandes quantidades do agente coagulante, problemas causados por corrosão, além da geração de lodo, por exemplo (Druskovic *et al*., 2021; Manilal, SOloman, Ahmed, 2020).

De modo geral, os processos físicos e químicos são métodos de separação de fases, resultando em uma parte mais limpa e outra mais concentrada com alto teor oleoso, sendo necessário ainda o manejo e descarte adequado para o lodo gerado nas etapas dos tratamentos.

3.4.3 Tratamentos biológicos

O tratamento biológico pode ocorrer de forma anaeróbia e aeróbia. Nos métodos biológicos são necessários a aplicação de microrganismos para tratabilidade do efluente adotando procedimentos para remover matéria orgânica dissolvida ou em suspensão ao transformá-la em sólidos sedimentáveis (lagoas aeradas, lodo ativado, filtros de gotejamento, contadores biológicos rotativos) (Azizi *et al*., 2022; Medeiros *et al*., 2022).

Para tratamento de efluente oleoso, o tratamento biológico apresenta baixa toxidade e biodegradabilidade dependendo dos microrganismos usados. São usados microrganismos, bactérias, algas ou enzimas que podem encontrar-se naturalmente no efluente ou serem produzidas para fins específicos para determinado tratamento (Singh, Berawala, Patil, 2022).

Medeiros *et al*. (2022) salientam que o conhecimento sobre as técnicas e aplicações para remediação de efluentes oleosos é importante para a escolha e aplicação do melhor tratamento possível, a fim de se alcançar tratamento eficaz, viável e econômico. Também em Azizi *et al* (2022) destacam que a eficiência no processo de tratamento é dependente das propriedades físico-químicas do efluente a ser tratado, sendo necessário estudos e avaliações para definir o melhor método para cada caso.

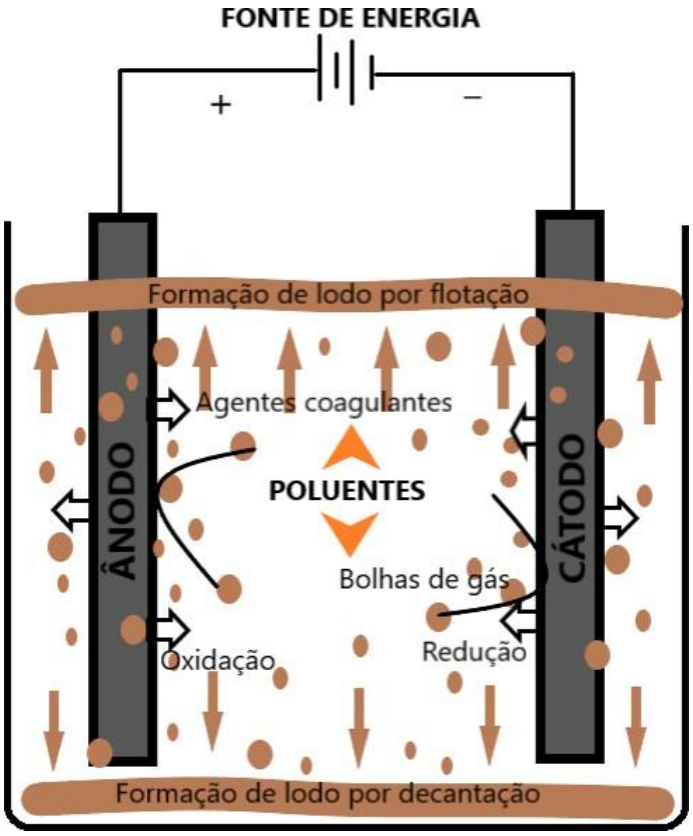
3.5 ELETROCOAGULAÇÃO: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

A EC é uma tecnologia emergente no tratamento de águas e efluentes, pois combina os benefícios da coagulação e flotação (Lu, Zhang, Li, 2021; Moussa *et al*.; 2017). A EC é atualmente uma das tecnologias para tratamento de águas e eliminação de contaminantes que mais se destaca dentre os processos eletroquímicos (Al-Raad *et al*., 2021).

O processo de eletrocoagulação consiste em um sistema onde ocorre a geração de agentes coagulantes/floculantes através de eletrodos colocados em um reator de EC *in situ.* O elétron é o reagente primário, não sendo, portanto, necessário adicionar aditivos químicos para separação da água e lodo (Moussa *et al*., 2017).

O processo de EC, geralmente é realizado a partir de uma célula eletrolítica com um ânodo de sacrifício de Alumínio ou Ferro e um cátodo do mesmo material. Os eletrodos se dissolvem como íons coagulantes (Al^{+3} ou Fe^{+2}), que posteriormente formam hidróxidos metálicos de alta capacidade de adsorção em água. Devido a carga elétrica dos íons metálicos, formam-se flocos na emulsão que são removidos por sedimentação ou flotação (Changmai, Pasawan, Purkait, 2019; Kilany *et al*., 2020; Ulucan, Kurt, 2015). Na Figura 3 é apresentado um diagrama esquemático das reações *in situ* que acontecem no reator de EC durante o processo de tratamento.

Figura 3 - Diagrama esquemático das reações *in situ* durante processo de eletrocoagulação



Fonte: O autor

A técnica de EC vem sendo muito utilizada nos últimos anos e tem se destacado de outros sistemas de tratamento pela sua efetividade, além de ser mais econômica se comparada a outros métodos de tratamento (Elia, Stylianou, Agapiou, 2023).

As equações 1, 2 e 3 descrevem processos possíveis, em caso de o ânodo ser constituído de Alumínio.

Ânodo: $Al_{(s)} \rightarrow Al^{3+}{}_{(aq)} + ne^{-}$ (1)

Em condições alcalinas:

$Al^{3+}{}_{(aq)} + nOH^{-}{}_{(aq)} \rightarrow Al\ (OH)_{n(s)}$ (2)

Em condições ácidas:

$Al^{3+}{}_{(aq)} + nH_2O_{(l)} \rightarrow Al\ (OH)_{n(s)} + nH^{+}{}_{(aq)}$ (3)

Desta forma, formam-se hidróxidos de alumínio na mistura (3), que são excelentes adsorventes para compostos solúveis (Garcia-Segura *et al*., 2017; Ouslimane *et al.*, 2017; Sherr *et al*., 2021; Shokri, Fard, 2022; Song *et al*., 2017).

Segundo Mollah *et al*., (2010) a tecnologia de EC introduz hidróxidos metálicos poliméricos altamente carregados na solução aquosa. A água é hidrolisada em uma reação paralela produzindo pequenas bolhas de oxigênio no ânodo (equação 4) e hidrogênio no cátodo (equação 5).

$nH_2O_{(l)} - ne^{-} \rightarrow O_{2(g)} + nH^{+}{}_{(aq)}$ (4)

$nH_2O_{(l)} + ne^{-} \rightarrow H_{2(g)} + nOH^{-}{}_{(aq)}$ (5)

Estes podem neutralizar as cargas eletrostáticas em sólidos suspensos e gotículas de óleo, promovendo a aglomeração ou coagulação e posterior separação da fase aquosa.

3.6 APLICAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas para aprimoramento e desenvolvimento de novas tecnologias a partir do princípio eletroquímico. Para o tratamento de águas residuais oleosas

foram diversos os trabalhos encontrados. Nesta seção foram abordados algumas das inúmeras descobertas realizadas nos últimos anos, quanto ao tratamento de procedência oleosa e tratadas com eletrocoagulação. No Quadro 1, são mencionadas algumas publicações mais recentes, sendo possível verificar a diversidade das técnicas, métodos e materiais empregados para remoção de óleo do efluente analisado.

Quadro 1 - Publicações sobre Eletrocoagulação para tratamento de águas oleosas

Tipo de reator	**Tipo de água residual oleosa**	**Concentração X volume tratado**	**Remoção de óleo**	**Referência**
Retangular de acrílico com eletrodos de Al colocados de forma cruzada	Simulação de esgoto oleoso	770 mg/L X 5,4 L	97,6%	Jiang, Chen, Liu F., 2019
Retangular de acrílico com placas de alumínio e ferro	Simulação de um esgoto oleoso	Não especifica X 1 L	98,9 % (com eletrodo alumínio)	Liu F. *et al*., 2019
Caixa retangular e eletrodos de alumínio combinado com membranas de microfiltração	Água residual de perfuração de poço/petróleo	35 mg/l (óleo inicial) X 600 ml	Em torno de 70 % (neste caso a EC foi usada como etapa de pré-tratamento do efluente)	Changmai, Pasawan, Purkait, 2019
Reator cilíndrico com ânodo de alumínio e cátodo de aço combinados com membranas de filtração	Duas emulsões: I (emulsão oleosa emulsionada) e II (mistura de emulsão com óleo livre)	I preparado numa proporção de 1:200) e II (proporção de 1:1) X 5L	94 – 96% na rejeição de óleo	Mazumder *et al*., 2020
Reator cilíndrico com eletrodos de Al (tubo helicoidal colocado entre duas telas verticais)	Emulsão oleosa sintética	Não especifica X 3 L	85%	Kilany *et al*., 2020
Reator cilíndrico com eletrodo de malha de aço inoxidável (externo) e lata de bebidas de Al (interno)	Emulsão oleosa sintética	Não especifica X 1 L	93%	Dongsheng *et al*., 2022
Reator cilíndrico (Béquer de 1 L) com eletrodos de alumínio no formato circular	Efluente oleoso de refinaria de petróleo	1000 ppm X 800 ml	98%	Al-Rubaiey, Albrazanjy, Kadhim, 2022

Fonte: O autor

No trabalho realizado por Jiang, Chen, Liu F. *et al.* (2019) os autores avaliaram o desempenho de um reator de EC com eletrodos dispostos transversalmente. As interações entre os parâmetros de densidade de corrente aplicada, ângulo de inclinação das placas de alumínio, taxa de fluxo e distância entre eletrodos para remoção de óleo de um efluente oleoso sintético foram investigadas e otimizadas. Desta forma, foi observado que a inclinação dos eletrodos (ângulos de 60º a 90º), gerou uma diferença nos resultados. De forma geral, os autores concluíram que a combinação de fatores: maior densidade de corrente, menor distância entre eletrodos, menores taxas de fluxo, tempo de eletrólise e melhor ângulo de inclinação foram as variáveis que contribuíram para os melhores resultados obtidos na pesquisa. A remoção de óleo do efluente chegou a 97,6% com as placas transversais a 76º, 140 minutos de tempo de EC e densidade de corrente de 140 A/m².

Em Liu F. *et al*. (2019) os autores utilizaram um reator com capacidade de 1litro e dois tipos de eletrodos (Ferro e alumínio). O efluente utilizado foi um efluente oleoso sintético, preparado de acordo com as características da água produzida na recuperação de petróleo. Desta forma, foram estudados os efeitos de densidade de corrente, pH, concentração de um polímero (acima de 200 mg/L) além de avaliar tipo de material para cátodos e ânodos. Dois parâmetros foram usados para avaliar a eficácia do processo de EC: turbidez e remoção de óleo (método espectrofotométrico em 220 nm). Nesse sentido, os autores obtiveram remoção de óleo e turbidez de 98,9% e 99,4%, respectivamente, para densidade de corrente de 4-6 mA/m² e tempo de eletrólise por volta dos 16 minutos. As condições mais propícias relatadas para obtenção dos melhores resultados foram: condições de pH neutro, tempo de 16 minutos, combinação de cátodo e ânodo de alumínio, bem como a concentração do polímero (HPAM=3000) utilizado pelos autores da pesquisa.

Na pesquisa realizada por Changmai, Pasawan, Purkait (2019), os autores investigaram a combinação entre eletrocoagulação e microfiltração com membranas usando efluente oleoso. A EC, neste caso, foi usada como uma etapa de pré-tratamento antes do efluente passar pelas membranas de cerâmica e os resultados obtidos pelos autores apontaram uma diminuição da concentração de óleo de 35 mg/L (inicial) para 10,2 mg/L (final) no tempo de 20 minutos.

No ano seguinte, Mazumder *et al*. (2020) também investigaram o uso integrado de EC com membranas de filtração em um único conjunto de operação. Do mesmo modo trabalharam com um efluente oleoso, porém sob diferentes tensões e tempo de 50 minutos. Em Ambos os trabalhos relatados, os autores defendem o tratamento com EC e membranas de forma híbrida

como promissor para remediação de óleos e graxa na mistura, reduzindo a tendência de incrustações das membranas. Outros autores que também propuseram o uso integrado de EC com uso de membranas de filtração para remediação de águas residuais oleosas também relataram seus resultados em pesquisas recentes (Dehghani *et al*., 2021; Jebur *et al*., 2021).

No trabalho desenvolvido por Kilany *et al*. (2020), os autores desenvolveram um tubo helicoidal de alumínio como ânodo entre duas telas cilíndricas verticais que atuaram como cátodo. Em condições ótimas de operação (temperatura de 25ºC, pH=5, concentração de NaCl de 2% e densidade de corrente de 1,5 mA/cm²), os pesquisadores conseguiram obter 85% de remoção do teor de óleo, a partir também de um efluente oleoso sintético.

Nas pesquisas desenvolvidas pelos autores Dongsheng *et al*. (2022) foram utilizadas latas (em alumínio) de bebidas como eletrodos em um reator de EC, para tratamento de efluente oleoso sintético. Os pesquisadores montaram um reator em batelada, e usaram uma malha de aço inoxidável como eletrodo externo (cátodo) e para o eletrodo interno (ânodo), utilizaram uma lata de alumínio com pequemos orifícios em toda sua extremidade, preenchida com lã de aço. O reator foi ainda colocado em agitação (de 50 a 250 rpm), e foi testado para diferentes valores de tensão (10 a 20 volts). Os autores da pesquisa relataram que após o tratamento do efluente com EC, a mistura foi deixada em repouso por cerca de 2 horas em temperatura ambiente antes do início das etapas posteriores. Assim, em condições ótimas de operação (taxa de agitação de 250 rpm, tempo de 10 minutos, 15 volts de tensão, concentração de NaCl de 1g/L), foi obtido uma eficiência de remoção de óleo de 93%.

Além dos trabalhos mencionados nesta seção, diversos outros autores seguem ampliando o campo de pesquisa, especialmente em tratamentos de efluentes de origem oleosa de difícil remediação devido a vários fatores que permeiam esse tipo solução. Assim, em trabalhos como de Favero *et al*., (2020); Nassar *et al*., (2023); Zini *et al.*, (2020) entre muitos outros, os pesquisadores seguem testando tipos de eletrodos e concentrações de efluentes, bem como otimização dos reatores e parâmetros investigativos ao longo dos últimos anos.

3.7 FATORES DE INTERFERÊNCIA NOS PROCESSOS DE EC

3.7.1 Distância entre os eletrodos

A distância entre os eletrodos em um reator de EC é uma variável muito importante. O espaçamento entre os eletrodos é responsável pela otimização do processo no tratamento de efluentes. Vários autores concordam que a variação das distâncias pode influenciar diretamente no consumo de energia do processo e seu custo final. Assim, para condutividade alta, é recomendável usar espaçamentos maiores e para condutividade moderada a baixa, distâncias menores (Andreatta *et al*., 2021; Garcia-Segura *et al*., 2017; Gobbi *et al*., 2018).

O espaço entre os eletrodos tem influência direta na formação dos hidróxidos metálicos e remoção do poluente. Uma distância muito baixa pode degradar os hidróxidos formados por colisão entre si, devido à alta atração eletrostática. Ao contrário, o aumento desproporcional dessa distância pode ocasionar a diminuição dos efeitos eletrostáticos, e consequentemente, o tratamento mais lento do efluente devido à diminuição dos flocos e de sua precipitação. Desta forma, o ideal é encontrar uma distância ótima para ser usada entre os eletrodos no processo de EC para tratamento de água oleosa (Changmai *et al*., 2019; Garcia-Segura *et al*., 2017; Zini *et al*., 2020).

3.7.2 Inversão de polaridade

Em processos de EC é comum observar a passivação dos eletrodos, devido a uma série de fatores que envolvem o sistema: como o tipo de efluente a ser tratado, material do eletrodo, pH, densidade de corrente, tempo entre outros. A passivação consiste na formação de uma película (filme passivo) sobre a superfície metálica, geralmente constituída por óxidos metálicos, que impedem o contato da solução com a superfície (Ingelsson, Yasri, Roberts, 2020; Pi *et al*., 2014; Vasudevan, Lakshmi, Sozhan, 2011; Zini *et al*. 2020).

A inversão de polaridades de tempos em tempos ajuda a evitar a formação de camadas de sedimentos espessas nos eletrodos, o que poderia reduzir a eficiência no tratamento da EC. Ao inverter a polaridade ocorre a remoção dessas camadas de sedimentos nos eletrodos, permitindo uma nova geração de íons metálicos coagulantes e uma maior eficiência no processo. Essa inversão também pode ajudar a melhorar a distribuição da corrente elétrica no reator, evitando a formação de zonas de alta concentração de energia que poderiam prejudicar a eficácia do tratamento em algumas áreas e promovendo uma distribuição mais uniforme das cargas elétricas por todo o efluente contido no reator de tratamento (Abdollahi, Alavi Moghaddam, Habibzadeh, 2023; Ingelsson, Yasri, Roberts, 2020; Madhavan, Antony, 2021).

Desta forma, o uso de um dispositivo para diminuir a passivação dos eletrodos como o inversor de polaridade, pode ser útil. O dispositivo fica instalado entre a fonte de energia e os eletrodos e de tempos em tempos, transforma cátodo em ânodo e vice-versa, o que impede a formação do filme passivo e aumenta a vida útil dos eletrodos (Crespilho, Santana, Rezende, 2004; Zini *et al*. 2020).

3.7.3 Densidade de corrente

A densidade de corrente é um fator muito importante a ser considerado em processos de eletrocoagulação (Chen Y., Chen G., Yue, 2002; Merma *et al*., 2020). A determinação da densidade de corrente a ser usada no processo para tratamento de um efluente oleoso está associada à liberação de íons coagulantes na mistura por área dos eletrodos (Druskovic *et al.* 2021; Moussa *et al*., 2014) bem como na formação de bolhas de gás (Chen G., 2004).

Alguns autores como Sahu *et al*. (2014), sugerem que a densidade de corrente ideal para se tratar qualquer tipo de efluente se mantenha na faixa de 2,0 a 2,5 mA/cm^2. Entretanto, Liu *et al.* (2019), fizeram uma série de experimentos usando densidade de corrente entre 2 e 6 mA/m^2 e constataram que a eficácia do tratamento do efluente aumenta a partir do aumento da densidade de corrente, até um certo ponto, acima do qual mantêm-se estável. Assim, os autores defendem uma taxa de densidade de corrente ideal de 4 mA/m^2, alcançando em seus estudos uma remoção de óleo de 98,99% e 99,74% de turbidez.

A escolha de um valor ideal a ser usado para densidade de corrente no processo de tratamento que se pretende usar também é afetada por outros fatores do sistema: temperatura, pH, vazão (Moussa *et al*., 2014). Outro fator que é preciso analisar quanto à escolha da taxa de densidade de corrente a ser empregado é que a aplicação de densidades de corrente mais altas levam à conversão de energia em calor, provocando o aquecimento da água e, por consequência, a diminuição na liberação de íons coagulantes e a lentidão no tratamento (Druskovic *et al*., 2021; Jiang, Chen Y., 2019).

3.7.4 Influência do pH inicial

Um outro fator que apresenta uma grande influência no processo de tratamento de um efluente por meio da EC é o pH. Este fator afeta a condutividade da solução, o potencial zeta (Moussa *et al*., 2017), bem como a geração de íons metálicos coagulantes da reação dependem do pH inicial refletindo no desempenho da EC (Bener *et al*., 2019).

Existe uma dificuldade em estabelecer uma relação clara entre pH e a eficiência no tratamento por EC devido às variações do pH com o decorrer do tempo do processo eletroquímico sendo, portanto, adotado o pH inicial (Chen G., 2004).

Ao serem utilizados eletrodos de alumínio no tratamento com EC, ocorrerá a eletrólise para formar íons de alumínio trivalente como observado na equação 1, seguido por hidrólise espontânea (equação 5) formando várias espécies coagulantes dependendo do pH da solução. As reações que ocorrem no ânodo tornam suas proximidades ligeiramente ácidas e, ao contrário, das proximidades do cátodo estarem ligeiramente alcalinas por causa da liberação de hidrogênio e formação de OH^-. Quando o pH do efluente é altamente ácido (<3) ou altamente alcalino (>11) não há mudanças consideráveis no pH inicial. Desta forma, é esperado que o pH aumente no decorrer do processo de EC se o meio estiver ácido ou que ele diminua, ao longo do tratamento, quando o pH inicial é alcalino (Chen G., 2004; Moussa *et al.*, 2017).

3.8 CONFIGURAÇÃO DOS REATORES E ELETRODOS USADOS EM PROCESSOS DE EC

Em processos eletroquímicos os modelos e geometrias dos reatores devem levar em consideração aspectos relacionados ao tipo (batelada ou contínuo), dimensões (escala laboratorial ou industrial), tipo de placas/eletrodos a serem usados no processo, tipo do efluente a ser tratado dentre outras variáveis a serem consideradas antes da implementação do sistema que se deseja trabalhar (Souza, 2012). O tipo de material usado, distanciamento e a configuração dos eletrodos constitui também uma das decisões mais importantes ao se trabalhar com o tratamento de efluentes por processo eletroquímico (Dongsheng *et al*., 2022; Jiang, Chen Y., Liu Y., 2019; Liu F. *et al*., 2019; Wang *et al.*, 2022).

An *et al*., (2017) por exemplo, consideram a montagem dos eletrodos um dos principais quesitos em um reator para tratamento de efluentes por EC. Abordagem semelhante é destacada por Hussin *et al*., (2017), que também defendem a escolha do tipo de eletrodo a ser usado como um parâmetro crucial para o tratamento.

O uso de um reator em formato cilíndrico tem a vantagem de não fixação de resíduos nas extremidades (zonas mortas) durante os ensaios eletroquímicos e maior simetria no fluxo de efluente durante o processo de EC. Os eletrodos cilíndricos possuem algumas vantagens: campo elétrico uniforme no interior do reator e possibilidade de utilizar eletrodos com maior área (Andreatta *et al*., 2021).

O uso de eletrodos telados é uma consequência dos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa nos últimos anos: em Dias, Muniz, Porto (2019) foi constatado que os melhores resultados eram obtidos com eletrodos furados com o maior número de furos por área. Portanto, era razoável evoluir do eletrodo furado para um telado (maior número possível de furos por unidade de área) e a isto adiciona-se o fato das telas apresentarem menor custo e de existirem resultados interessantes na literatura obtidos com telas, fios metálicos ou mesmo lã de aço e alguns desses trabalhos são mencionados nos parágrafos seguintes.

Recentemente, Akkaya (2022) realizou um estudo para tratar efluente oleoso, a partir de um reator cilíndrico em batelada, usando eletrodos de sucata de Alumínio e Ferro, em que o ânodo apresentava poros circulares, com área de 1,13 cm em cada perfuração. Trabalho similar foi desenvolvido em 2017 por Hussin *et al*. para remoção de chumbo de um efluente. Os autores

usaram um eletrodo de zinco perfurado e compararam com eletrodos de Alumínio, Ferro e Cobre, constatando que o zinco perfurado com diâmetros maiores foi mais ativo para remoção de íons de chumbo durante a EC. Definitivamente, tal eficiência pode ser relacionada à um aumento da distribuição de corrente ao longo da superfície dos eletrodos.

Em uma outra investigação realizada por Ibrahim *et al*. (2020), os pesquisadores testaram placas de alumínio e ferro com tubos cilíndricos com furos e sem furos em diferentes montagens e configurações no reator de EC. Foi observado que não só o tratamento do efluente se mostrou satisfatório (94% para remoção de óleo e graxa), assim como também demonstraram haver uma diminuição na passivação dos eletrodos ao usarem cátodo e ânodo perfurados (menos incrustações em comparação com os demais eletrodos).

Considerando os trabalhos desenvolvidos, a remoção de poluentes pode ser simplificada se houver perfurações e/ou orifícios nos eletrodos em processos eletroquímicos, pois permitem uma movimentação melhor dos íons coagulantes, além de contribuir para formação das bolhas de gás, abrangendo uma área de superfície maior, favorecendo assim, a desestabilização da emulsão em um período de tempo também menor (Dias, Muniz, Porto, 2019; Hashim *et al.*, 2017).

3.9 SELEÇÃO DO MATERIAL DOS ELETRODOS PARA PROCESSOS ELETROQUÍMICOS

Em processos de EC podem ser usados eletrodos de diferentes materiais e composições como os de ferro (Fe) e alumínio (Al) (amplamente usados), zinco (Zn), magnésio (Mg), cobre (Cu), chumbo (Pb), titânio (Ti) entre outros, dependendo do efluente que se pretende tratar (Akarsu *et al.* 2021; Devlin *et al.* 2019; Genawi *et al*. 2020; Hussin *et al*. 2017; Ulucan, Kurt 2015)

Para a seleção de eletrodos para processos eletroquímicos é importante considerar sempre a relação custo e eficácia dos materiais a serem usados no processo. Assim, para Chen X. *et al*. (2018) o eletrodo de alumínio se destacou em seus experimentos, pois demonstrou em seus resultados que a quantidade de íons Alumínio (Al) na solução filtrada, após o tratamento,

foi menor se comparada a outros materiais e, portanto, foi selecionado como melhor material para EC.

Os autores Ulucan e Kurt, (2015) estudaram e compararam eletrodos de ferro (Fe) e Alumínio (Al) para tratamento de águas oleosas de porão, que podem ser definidas como águas residuárias salinas e oleosas oriundas de navios e embarcações e que podem conter residuais de petróleo, óleos e graxas das máquinas/motores além de outros poluentes. Os autores explicaram que o alumínio apresentou melhor eficiência no tratamento do efluente e com menor tempo (10 minutos) e valores de demanda química de oxigênio e remoção de óleo obtidos como 64,8% e 57% de Al e 36,2% e 12,5% de Fe, respectivamente.

Algumas pesquisas de revisão recentes também comprovam que em matéria de processos eletroquímicos para tratamento de águas ou efluentes, os eletrodos de alumínio têm sobressaído e garantem resultados satisfatórios em sua maior parte (Das, Sharma, Purkait, 2022; Kadier *et al*., 2022).

3.10 ELETRODO DE ALUMÍNIO

O telado de alumínio expandido usado neste trabalho como material para eletrodo em reator de EC, provem de experiências e pesquisas anteriores que apresentaram bons resultados ao utilizar os eletrodos de alumínio perfurados para tratamento de águas residuais oleosas.

O alumínio é um dos elementos metálicos mais abundantes que existem na crosta terrestre. Proveniente da bauxita, o alumínio é um metal macio, leve, resistente à corrosão e que apresenta uma boa condutividade elétrica e baixo custo, sendo um dos melhores materiais para ser usado em processos de eletrocoagulação (Bener *et al.*, 2019). O alumínio é encontrado na forma de óxido de alumínio e não apresenta, portanto, riscos graves à saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, a exposição a altas concentrações de alumínio, poderá sim causar transtornos à saúde, principalmente na forma de íons de alumínio, quando solúveis em água (Corral-Bobadilla *et al*., 2020).

O alumínio ocorre de maneira natural no meio ambiente, entretanto pode estar presente na água em diferentes formas e suas concentrações dependem de fatores físicos, químicos e

geológicos. Na tabela 1 é possível observar diferentes concentrações estabelecidas em legislações para o alumínio dissolvido em água:

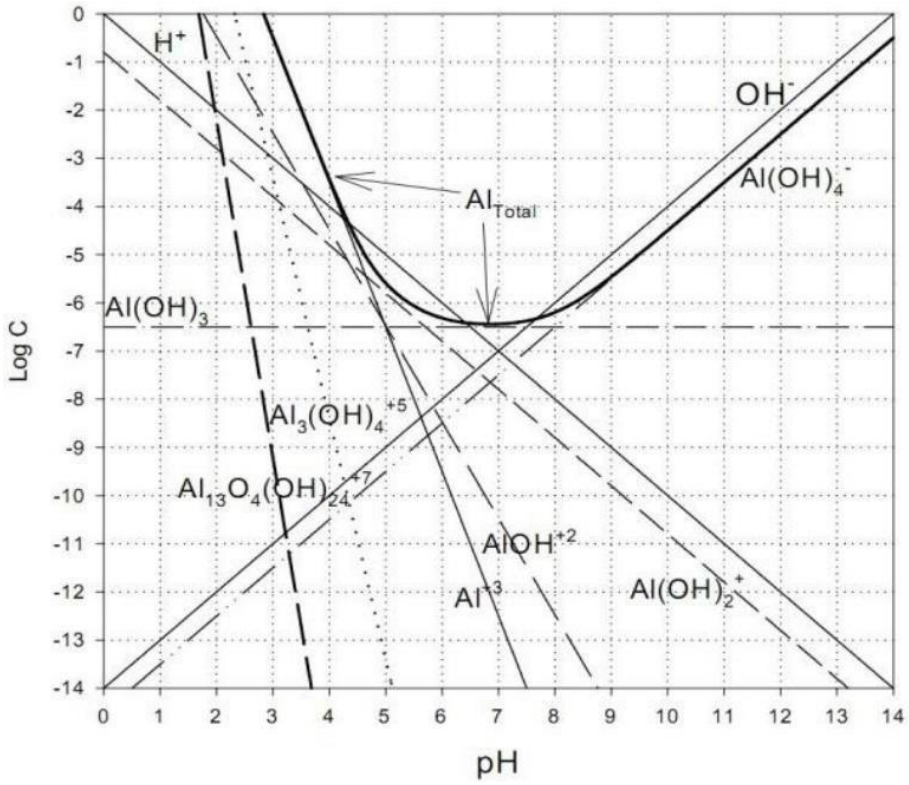
Tabela 1 - Valores de concentrações permitidas de alumínio dissolvido em água para diferentes meios aquosos

Meio	Concentração	Referência
Água potável	0,2 mg/L	Portaria 2914/2011
Água doce ✓ Classe 1 e 2 ✓ Classe 3	 0,1 mg/L 0,2 mg/L	CONAMA 357/2005
Água salina ✓ Classe 1 e 2	1,5 mg/L	CONAMA 357/2005
Águas salobras ✓ Classe 1 e 2	0,1 mg/L	CONAMA 357/2005

Fonte: Portaria 2914/2011 e CONAMA 357/2005

Por via de regra, em águas de pH neutro as concentrações de alumínio dissolvido encontram-se entre 0,001 a 0,05 mg/L, no entanto, com a acidificação das águas ou pelo aumento de matéria orgânica presente, essa concentração tende a aumentar para 0,5 a 1 mg/L ou para valores até maiores (acima de 90 mg/L) em águas extremamente acidificadas (CETESB São Paulo, 2020). Ao analisar a Figura 4 nota-se que as espécies de alumínio em meio aquoso dependem do pH.

Figura 4 - Diagrama de formação de espécies do alumínio em água pura



Fonte: (Stumm e Morgan, 2002)

Levando em conta a lei de Faraday, o desgaste do eletrodo é diretamente proporcional ao tempo do processo de EC e densidade da corrente elétrica aplicada. Para Zini *et al*. (2020), a diminuição da passivação do eletrodo pode ser atribuída à utilização de um inversor de polaridade. Contudo, a geração do agente coagulante no processo de EC, causa um desgaste do eletrodo de alumínio, e por este motivo é importante monitorar as concentrações dos íons dissolvidos no efluente tratado após o processo eletroquímico.

3.11 PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS DE EC

Considerando os aspectos apresentados até o momento, pode-se perceber que o uso do método de tratamento para efluentes através da EC vem crescendo e sendo adaptado e melhorado com o tempo. Nos últimos cem anos, diversos pesquisadores investigaram o processo eletroquímico como forma de remediação, não só para óleos e graxas, como também

muitos outros tipos de contaminantes em meio aquoso. Assim, várias descobertas são feitas ao longo dos trabalhos com a otimização dos reatores, eletrodos e outros parâmetros investigativos, que levam a buscar cada vez mais o aperfeiçoamento da técnica. Contudo, ao sintetizar tantas informações encontradas na literatura sobre EC, inúmeros autores destacam os pontos positivos e negativos quanto ao uso do sistema de tratamento listado.

Nesta última seção deste capítulo são relatadas algumas das principais vantagens e desvantagens evidenciadas no tratamento usando EC, observadas e confirmadas por muitos autores em diferentes linhas de trabalho (Changmai, Pasawan, Purkait, 2019; Devlin *et al.*, 2019; Druskovic *et al*., 2021; Eryuruk, Tecam, Bakir, 2017 e 2018; Garcia-Segura *et al*., 2017; Khalifa *et al*., 2021).

3.11.1 Vantagens

- O processo não necessita da adição de produtos químicos, reduzindo assim contaminações secundárias;
- Os equipamentos são simples e, em sua maioria, de fácil operação, com uma planta relativamente compacta;
- Não é necessário haver um controle do pH (exceto para valores extremos);
- A quantidade de lodo gerada é muito pequena, se comparado aos métodos convencionais;
- Custos são relativamente baixos, com materiais de fácil aquisição, se comparado a tecnologias convencionais;
- As bolhas de gás hidrogênio geradas, facilitam a flotação dos poluentes e o lodo pode ser coletado facilmente;
- Tratamento confiável e eficaz, possibilitando o atendimento às legislações ambientais (redução do teor de óleos e graxas).

3.11.2 Desvantagens

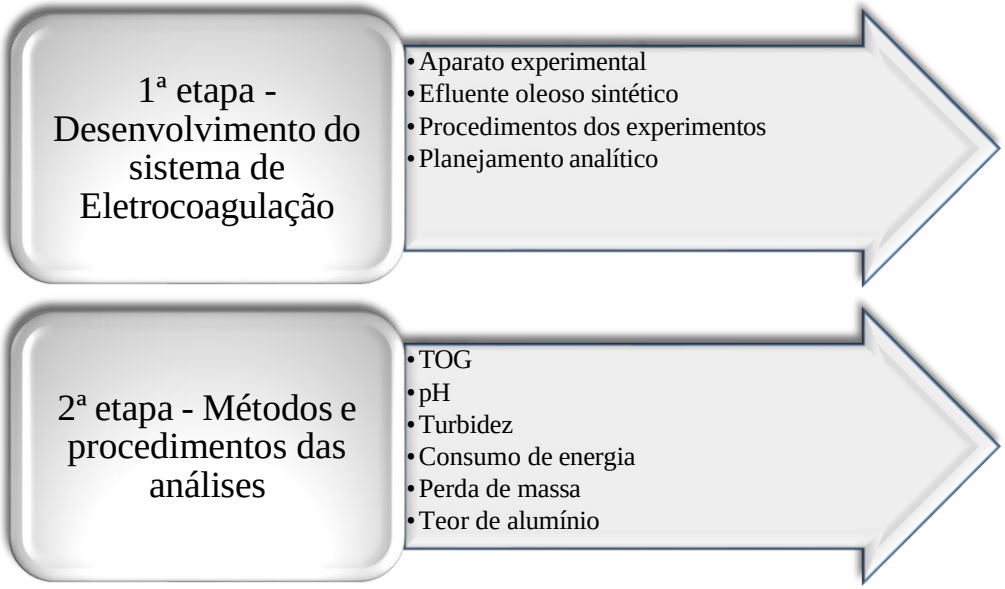
- Depende de uma fonte elétrica para operação do sistema, o que pode gerar um custo adicional se a energia não for proveniente de uma fonte própria de geração;
- Desgaste do ânodo de sacrifício necessitando assim de uma troca. Esse desgaste depende do tipo do material empregado e no caso do Ferro e Alumínio que possuem um custo menor, não é considerado uma desvantagem;
- Devido ao desgaste do ânodo de sacrifício pode gerar um lodo contaminado com íons alumínio, por exemplo, necessitando assim de análises para verificação.

Em síntese, ao usar EC para tratar e remediar poluentes altamente tóxicos como os efluentes oleosos aqui discutidos, nota-se que a técnica é bastante promissora e capaz de apresentar resultados satisfatórios e passíveis de atendimento aos padrões impostos pela legislação. Apesar das desvantagens pesarem um pouco na escolha final do projeto de tratamento, estes podem ser contornados com o uso de fontes de energias limpa, materiais de baixo custo e reutilizáveis, por exemplo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, apresentam-se os materiais e métodos experimentais empregados, divididos em duas etapas principais (Figura 5), com o objetivo de facilitar a compreensão das fases seguidas na condução desta pesquisa. Na primeira etapa abordam-se aspectos relacionados à montagem do aparato experimental, à produção do efluente, aos procedimentos e ao planejamento analítico dos experimentos. Na etapa seguinte subsequente, são detalhados os métodos analíticos empregados na execução deste trabalho.

Figura 5 - Etapas dos procedimentos metodológicos



Fonte: O autor

4.1 MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

As etapas iniciais concentraram-se na configuração do sistema de EC em escala de bancada, operando em regime de batelada. Testes preliminares foram conduzidos utilizando um reator de menor volume (com dimensões 12 cm de altura, 11 cm de diâmetro e capacidade de 1 litro), conectado a uma fonte de alimentação de corrente contínua da marca Minipa DC

POWWER SUPPLY, modelo MPL 1303. Contudo, para dar continuidade à pesquisa, o protótipo foi substituído por um modelo de maior capacidade (4,5 litros).

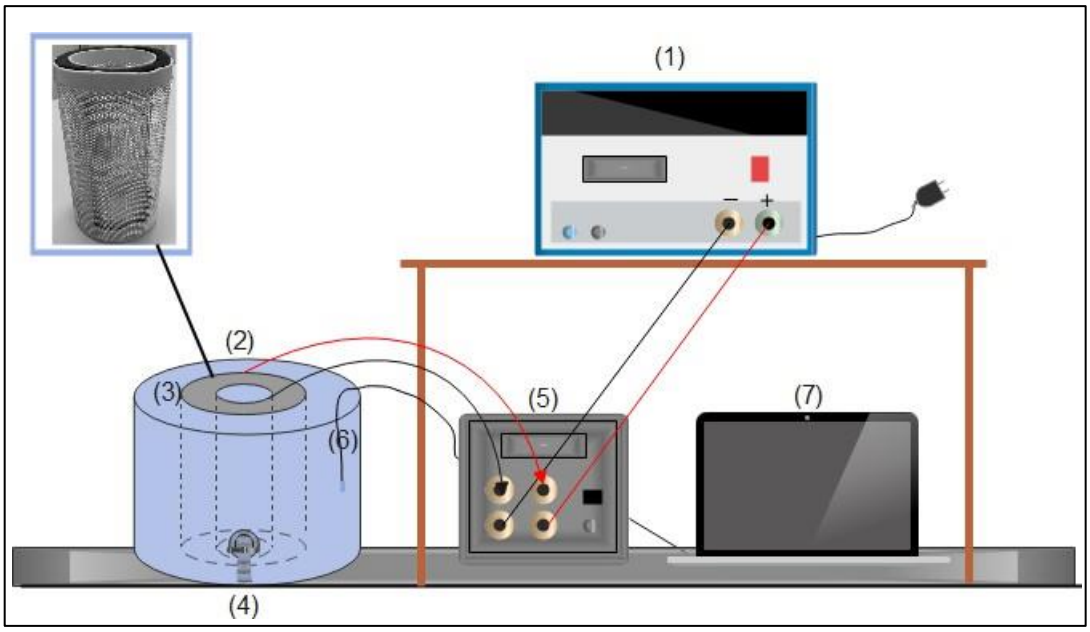
A montagem do sistema de EC em batelada envolveu o uso de um reator cilíndrico, de acrílico, eletrodos de alumínio telado, uma fonte de energia para alimentação de corrente contínua da marca Minipa DC POWER SUPLY, modelo MPC 3003, um inversor de polaridade Arduino IDE 1.8.19 e um computador para registro dos dados. O Quadro 2 destaca as principais características dos equipamentos empregados da unidade experimental, ao passo que a Figura 6 ilustra um desenho esquemático da unidade de EC utilizada neste estudo.

Quadro 2 - Características dos itens usados para montagem do sistema de Eletrocoagulação

Item	**Descrição / dimensões**	**Marca / material**
Reator	Volume total de 5 L (altura18,5 cm; diâmetro de 19,7 cm)	Recipiente cilíndrico de acrílico
Eletrodos	Telado de Alumínio / Eletrodo interno: 23X16 cm e eletrodo externo: 33X16 cm Medida Abertura da malha: 4mm x 7mm	Tela de alumínio expandido
Fonte	Corrente continua ajustável	Marca Minipa DC POWER SUPLY modelo MPC 3003
Inversor de Polaridade	Arduíno	Arduino IDE 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)

Fonte: o autor

Figura 6 - Esquema do sistema de eletrocoagulação em escala de bancada



(1) Fonte de alimentação de corrente contínua; (2) Reator de EC; (3) Eletrodos de alumínio telado; (4) Torneira para retirada das amostras; (5) Arduíno - Inversor de polaridade; (6) Sensor de temperatura; (7) Computador; Fonte: o autor

A fonte de corrente contínua desempenhou o papel de fornecer e regular a tensão utilizada em cada ensaio, mantendo-a constante e controlando também a corrente aplicada.

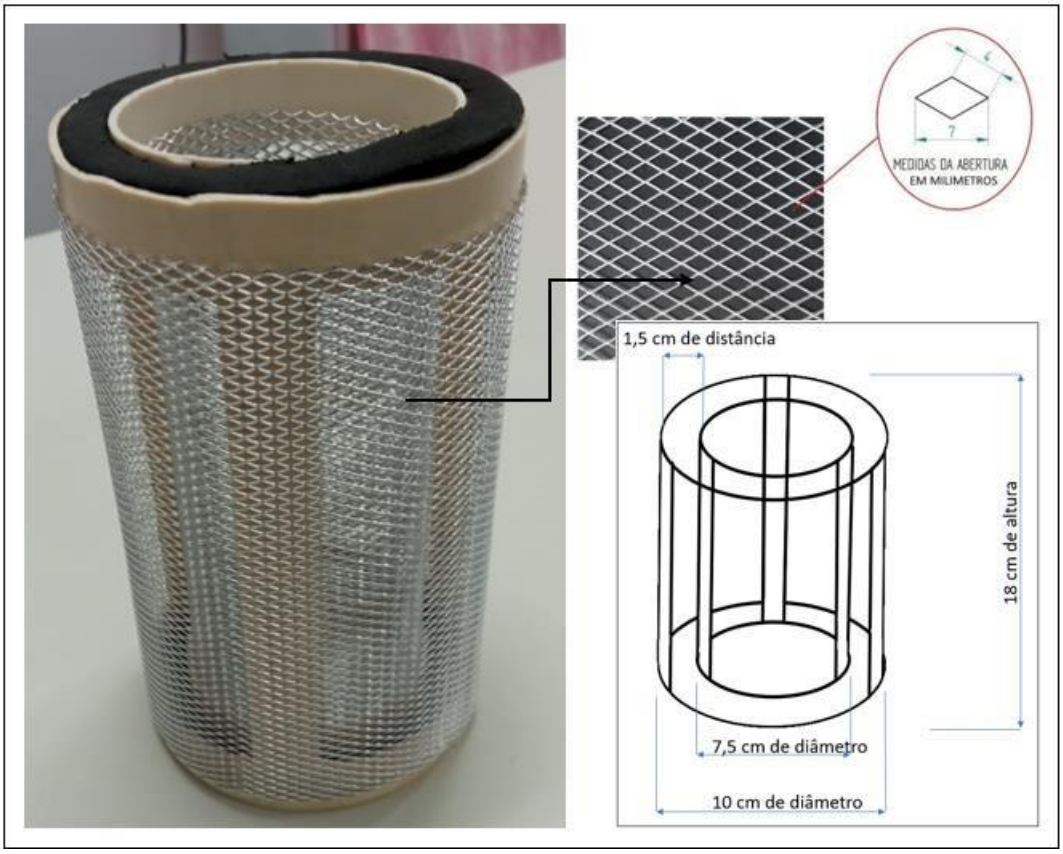
O inversor de polaridade foi conectado à fonte, aos eletrodos fixados no interior do reator de EC e, por intermédio do Arduíno, ao computador para a leitura dos dados. No decorrer do processo de EC, o inversor de polaridade alternou entre cátodo e ânodo em intervalos de tempo predefinidos, evitando assim o desgaste e a formação do filme passivo em um dos eletrodos durante o tratamento.

A temperatura foi medida "*in situ*" por meio de sensor digital DS18B20 colocado dentro do reator (junto ao efluente), e registrada no software Arduino IDE 1. 8. 19, no computador. Ao final do procedimento de EC os registros de tempo de eletrólise, tensão, corrente, temperatura e tempo de inversão são registrados e salvos em arquivos txt para análises posteriores.

A corrente elétrica foi fixada em 2 A (ampère) para todos os ensaios. As tensões (d.d.p) utilizadas foram de 10, 15 e 20 Volts, intercaladas com tempos de inversão (T_{inv}) de polaridade de 10, 20 e 30 segundos. A determinação destes valores é proveniente de trabalhos realizados pelo grupo (Dias, Muniz, Porto, 2019; Gobbi *et al* 2018; Nascimento *et al*., 2023).

A montagem do eletrodo foi realizada utilizando canos de PVC como base para fixação do telado de alumínio. Dois anéis de PVC de diâmetros diferentes foram cortados com uma altura de 18 cm. Conforme mostrado (Figura 7) foram feitas aberturas (cortes) nas laterais para permitir a interação no meio aquoso entre os eletrodos interno e externo. Dessa forma, o telado de alumínio foi fixado ao redor da estrutura feita de canos PVC, mantendo-se uma distância fixa de 1,5 cm entre cada eletrodos. A montagem final da estrutura dos eletrodos, apresentada na foto (Figura 7), foi colocada no interior do reator para o tratamento do efluente oleoso sintético

Figura 7 - Dimensões da estrutura de canos PVC para montagem dos eletrodos de alumínio telado e foto do conjunto após montagem final



Fonte: O autor; Detalhe da abertura da malha foi retirada da internet, disponível em <https://www.znubigrelhas.com.br/Tela50x100Tuning>

4.2 PREPARO DO EFLUENTE OLEOSO SINTÉTICO

Um efluente oleoso sintético foi antecipadamente preparado para cada experimento, com um intervalo mínimo de 16 horas e máximo de 48 horas, a fim de prevenir o envelhecimento da emulsão, manter a homogeneidade e possíveis micro precipitações na amostra. Estudos anteriores demostraram que após 12 horas de repouso a emulsão atingiu sua estabilidade e manteve-se estável até 48 horas, com variação no decaimento de óleo de aproximadamente 1% (Nascimento *et al.*, 2023). O processo de preparo da emulsão seguiu os métodos previamente utilizados em pesquisas anteriores (Dias, Muniz, Porto, 2019; Gobbi *et al.*, 2018).

Para preparar a emulsão oleosa, utilizou-se óleo de motor semissintético 15W-40 da marca Havoline. Este óleo multiviscoso é formulado com óleos básicos minerais e sintéticos. As especificações detalhadas do produto estão descritas no Quadro 3 fornecidas pelo fabricante.

Quadro 3 - Características típicas do HAVOLINE SEMISSINTÉTICO API SL

Grau	**Método ASTM**	**15W-40**
Densidade a 20 ºC, g/cm^3	D4052	0,879
Viscosidade cinemática cSt a 40 ºC cSt a 100 ºC	 D445 D445	 106,6 14,10
Viscosidade a baixa temperatura (CCS), -20ºC, cP	D5293	6300
Índice de Viscosidade	D2270	135
Ponto de Fulgor, PM, ºC	D92	232
Ponto de Fluidez, ºC	D97	-27

Fonte: site TEXACO disponível em < Hav-Semissint-15W40-SL_1ago2018_PT.pdf (texaco.com.br)> (2018)

O preparo do efluente oleoso para atingir uma concentração de 200 mg/L (ppm) em laboratório seguiu os passos a seguir:

Para o preparo de 5 L de emulsão foram mensurados em balança analítica 1,000 g de óleo, 1,000 g de cloreto de sódio (NaCl) e 0,100 g de emulsificante TWEEN 80 (Monooleato de Sorbitan Etoxilado);

Com o auxílio de uma proveta graduada, mediu-se 5 L de água destilada;

A água destilada e os reagentes mencionados foram transferidos para um recipiente maior (vasilhame fabricado em termoplástico) e levados a um agitador Ultra Turrax da marca IKA, modelo T50 (Figura 8), com uma velocidade de 8600 rpm;

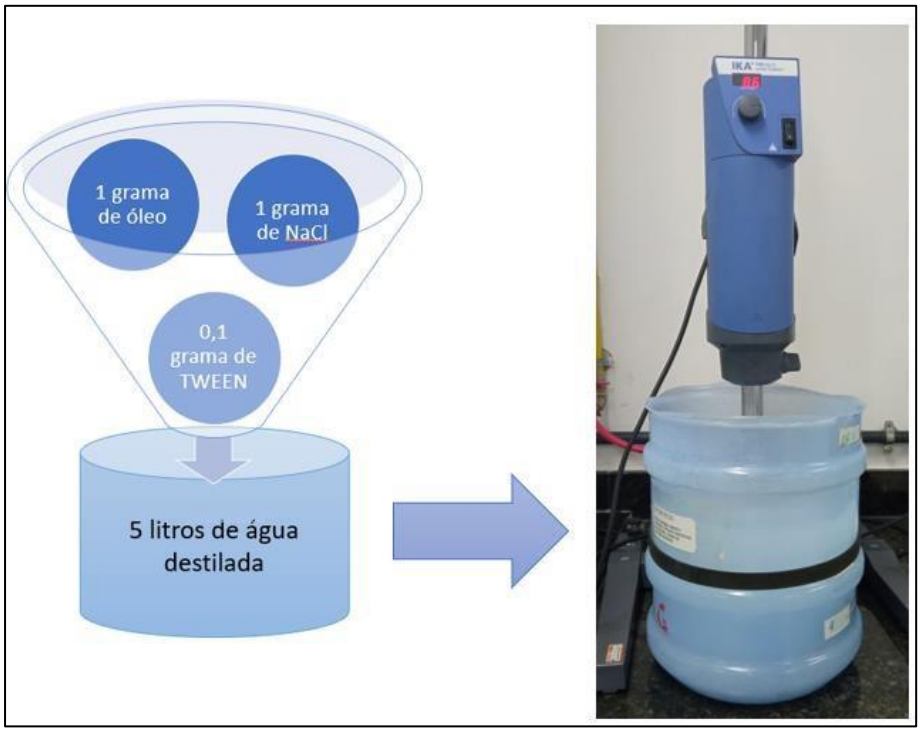
A agitação da emulsão ocorreu em ciclos de sete minutos, alternando entre agitação e descanso, por um intervalo de sete minutos. Esse processo foi repetido três vezes, totalizando 35 minutos de agitação;

Após essa etapa, a emulsão foi deixada em repouso por no mínimo 16 horas e máximo de 48 horas, antes de ser submetida ao processo de EC.

A concentração dos reagentes no preparo do efluente e os procedimentos adotados foram baseados em estudos realizados em anos anteriores (Dias, Muniz, Porto, 2019; Gobbi *et al* 2018; Nascimento *et al*., 2023).

A Figura 8 ilustra um esquema simplificado da quantificação dos componentes do preparo do efluente oleoso, juntamente com uma foto da elaboração da emulsão oleosa sintética, na qual o aparelho de agitação garante a completa homogeneização da mistura, promovendo a efetiva combinação dos líquidos imiscíveis (O/A).

Figura 8 - Esquema da quantificação dos reagentes para preparo do efluente oleoso seguida de foto do aparelho misturador da solução



Fonte: O autor

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a preparação dos 5 L de efluente oleoso e o devido período de repouso da solução, deu-se início ao procedimento de eletrocoagulação. Antes de colocar a mistura oleosa no reator foi removido o sobrenadante de aspecto viscoso e esbranquiçado que não se emulsionou na solução preparada. Em seguida 4,5 L (volume de trabalho) do efluente foram vertidos no reator de EC. O conjunto de eletrodos foi posicionado e fixado com o auxílio de uma fita adesiva de uso geral no centro do reator cilíndrico. Após ajustar a fonte e o Arduino com as variáveis analíticas para casa ensaio, iniciou-se o processo de eletrólise e os dados registrados em software Arduino IDE em um computador conectado para análises posteriores.

Para cada ensaio, foi determinada uma tensão elétrica a ser usada (10, 15 ou 20 Volts) e um tempo de inversão de polaridades (10, 20 ou 30 segundos). Em todas as execuções, a corrente foi fixada em 2 A (ampère), e o tempo de tratamento também foi mantido em 30

minutos. Ao longo dos experimentos, foram coletadas alíquotas nos tempos de 5, 10, 20 e 30 minutos. Assim, foram retirados 80 mL de amostra para cada tempo em 5, 10 e 20 minutos, e uma amostra adicional de 200 mL ao final dos 30 minutos de tratamento, de modo a não reduzir mais de 10% do volume total do reator durante o processo de eletrólise. Outra amostra ainda de 200 mL do efluente inicial (sem tratamento) foi previamente separada para análises subsequentes.

Os eletrodos de alumínio telado, preparados para cada experimento, foram cortados e fixados na estrutura de canos PVC com grampos para evitar solturas durante o procedimento de EC. As massas dos eletrodos interno e externo foram determinadas em balança analítica separadamente, antes e depois do processo eletroquímico, para verificar a perda de massa. O par de eletrodos usado para cada ensaio, foi lavado em água corrente após o término do tratamento por EC, e fotografados com um microscópio digital USB de resolução de 50X a 1600X, da marca VEDO VC 3035. Importante salientar que um conjunto novo de eletrodos foi utilizado para cada experimento. No entanto, nesta pesquisa, também foi avaliada a capacidade de reuso (utilização reutilização dos mesmos eletrodos do ensaio anterior) para tratamentos subsequentes, empregando o mesmo par de eletrodos por mais de uma vez. Nesse sentido, usando uma tensão de 20 V e tempo de inversão de 20 segundos, o reuso de um conjunto de eletrodo telado foi realizado por três vezes para verificar a eficácia no tratamento do efluente ao longo de usos consecutivos.

4.4 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

O planejamento fatorial é indicado quando a intenção é examinar a influência de dois ou mais fatores, abrangendo as diversas combinações de níveis de cada fator, assim como a interação entre eles em relação a uma ou mais variáveis resposta. Essa abordagem estatística é empregada para examinar o efeito de diferentes variáveis independentes em uma ou mais variáveis dependentes. Permite uma avaliação sistemática e eficiente da influência de cada fator em relação aos outros fatores, facilitando a identificação de interações e sinergias entre eles (Almeida, 2009).

As variáveis analisadas neste estudo foram a d.d.p. (Diferença de potencial), também chamada de tensão de 10, 15 e 20 volts e o T_{inv} (tempo de inversão de polaridade) variando entre 10, 20 e 30 segundos. A Tabela 2 descreve os ensaios que compõem a matriz do tipo 3^k, ou seja, três níveis a dois fatores para as variáveis estudadas, além de três repetições no ponto central.

Tabela 2 - Matriz de planejamento fatorial completo com as combinações de tensão e tempo de inversão de polaridade

Ensaio	d.d.p. (V)	T_{inv} (segs)	Repetições
1	10	10	-
2	10	20	1
3	10	30	-
4	15	10	1
5	15	20	-
6	15	20	3
7	15	20	-
8	15	30	-
9	20	10	-
10	20	20	1
11	20	30	1

Fonte: O autor

No planejamento experimental a repetição nos pontos centrais contribui para estimar o erro experimental e avaliar a repetibilidade do procedimento experimental. A significância das análises estatísticas foi estabelecida em 5% (ou 0,05). A matriz completa totalizou 11 experimentos. Destaca-se que os experimentos 5, 6 e 7 representam os pontos centrais, necessários para estimar a repetibilidade bem como o efeito linear no plano.

Para investigar os efeitos entre as variáveis independentes (d.d.p. e T_{inv}) e suas interações acerca da variável resposta (dependente) de remoção percentual do teor de óleos e graxas (RTOG%), com o objetivo de identificar as melhores condições mais eficientes para o processo em análise. A taxa de remoção de óleo do efluente após tratamento com EC foi calculada utilizando a Equação 6, conforme apresentado a seguir:

$$\%TOG = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \quad .100 \qquad (7)$$

Em que $C_{inicial}$ representa a concentração inicial de óleo no tempo T=0 e C_{final} é a concentração observada para a amostra no tempo T=30, ambas medidas por meio de espectrofotometria utilizando um equipamento da marca QUIMIS – modelo 4802 UV/VIS DOUBLE BEAM SPECTROPHOTOMETER, no comprimento de onda 277 nm.

Além do percentual de remoção de óleo do efluente tratado, foram examinadas outras variáveis respostas, incluindo a taxa de redução na turbidez (R_{turb}) e a perda de massa pelos eletrodos. As Equações 7 e 8 delineiam o método utilizado para calcular os resultados relacionados a essas variáveis.

$$\%Turbidez = \frac{Turbidez_{inicial} - Turbidez_{final}}{Turbidez_{inicial}} \cdot 100 \quad (8)$$

Em que $Turbidez_{inicial}$ representa a medição da turbidez em NTU da amostra inicial do efluente e $Turbidez_{final}$ é a medição da amostra após 30 minutos de tratamento. Essas leituras permitem calcular o percentual de R_{turb} *(% Turbidez)* do efluente após passar pelo processo de EC.

$$\%\ Perda\ Massa = \frac{Massa_{inicial} - Massa_{final}}{Massa_{inicial}} \cdot 100 \quad (9)$$

Para determinar o percentual de perda de massa dos eletrodos durante o tratamento eletroquímico, utilizou-se a equação mencionada (Equação 8), em que $Massa_{inicial}$ refere-se a massa do eletrodo antes da eletrólise e $Massa_{final}$ é a massa do eletrodo após o procedimento de EC. Ressalta-se que essa variável foi avaliada separadamente para os dois eletrodos utilizados no tratamento (interno e externo). As metodologias para as análises de percentual de remoção de óleo e graxa, turbidez e perda de massa foram derivadas de resultados e estudos anteriores conduzidos pelo grupo em investigações por Dias, Muniz, Porto, 2019; Gobbi *et al* 2018; Nascimento *et al*., 2023.

Além dos experimentos previamente definidos na matriz de planejamento, foi conduzido um ensaio adicional para avaliar a capacidade de reuso dos eletrodos. As condições operacionais seguiram a metodologia apresentada para os demais ensaios. Selecionou-se um dos melhores pontos de tratamento observados durante a pesquisa (20 Volts de tensão com 20 segundos de inversão) e realizaram-se dois ensaios subsequentes com o mesmo par de eletrodos. Este procedimento visava verificar a capacidade de reuso dos eletrodos telados, abordando uma

lacuna identificada em vários outros estudos de EC, relacionada à necessidade de substituição dos eletrodos devido ao desgaste e à perda de eficiência na remoção de contaminantes, como observado em estudos anteriores (Ingelsson, Yasri, Roberts, 2020; Kilany *et al*., 2020).

As análises estatísticas para interpretação dos dados foram conduzidas com o auxílio dos programas ORIGIN e JAMOVI, softwares especializados em gráficos e análises. Para isso, foram realizadas etapas como limpeza e tratamento dos dados para assegurar sua utilização nas análises estatísticas. Análises de correlação, interação para compreender a relação entre duas ou mais variáveis e de regressão para prever o valor de uma variável com base em outras variáveis foram utilizadas para antecipar como as variáveis afetam uma resposta. Essas análises, realizadas nos softwares estatísticos mencionados, contribuíram para conclusões e decisões fundamentadas nos conjuntos de dados obtidos a partir das investigações conduzidas.

5 MÉTODOS DE ANÁLISE

No decorrer desta pesquisa, foram conduzidas análises prévias e posteriores ao processo de EC para avaliação dos seguintes parâmetros: teor de óleos e graxa (TOG), pH, turbidez, teor de alumínio, microscopia ótica do eletrodo telado e perda de massa dos eletrodos. Nesta seção são descritos os métodos analíticos empregados para a determinação de cada variável investigada.

Para realizar as análises descritas nesta seção, as amostras coletadas durante o tratamento com EC (nos tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 min.), foram mantidas em repouso por um período mínimo 2 horas após o tratamento. Esse procedimento permitiu a decantação do material floculado, sendo que o sobrenadante resultante foi utilizado nas análises subsequentes.

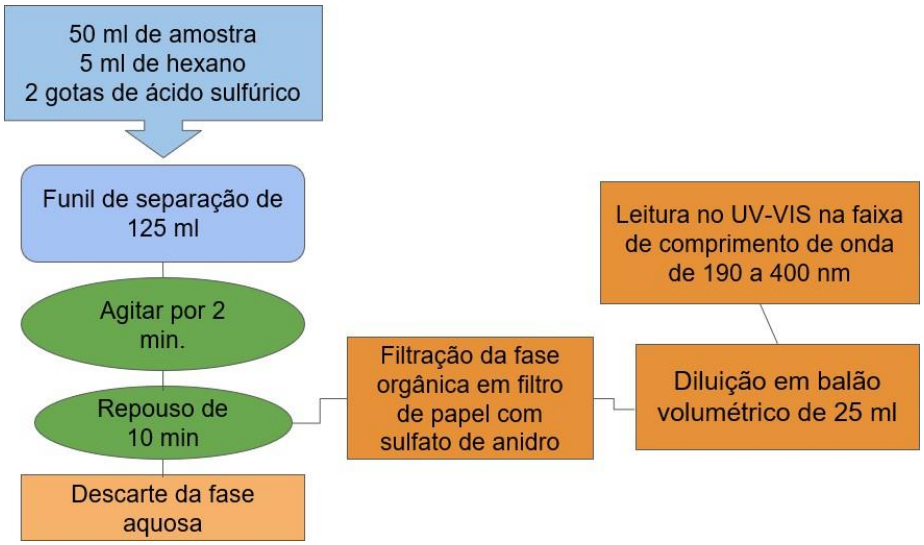
5.1 TEOR DE ÓLEOS E GRAXAS (TOG)

Para a determinação do TOG, adotou-se o método colorimétrico 5520 adaptados das normas *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). Seguindo esta metodologia, a fase orgânica das amostras (tempo = 0 e tempo = 30) foi extraída utilizando hexano como solvente.

O processo de extração do óleo com hexano seguiu as seguintes etapas : i) inicialmente, transferiu-se 50 mL de amostra para o funil de separação, adicionando-se 5 mL de hexano e duas gotas de ácido sulfúrico; ii) O funil foi tampado e agitado por aproximadamente 2 minutos, liberando a pressão interna do funil a cada 20 segundos abrindo-se a torneira , até completa homogeneização; em seguida, o funil foi colocado em um suporte universal para repouso durante 10 minutos; iii) transcorrido o tempo, a fase aquosa foi coletada em um béquer separado, deixando no funil apenas a fase oleosa (parte orgânica). Esta última foi filtrada com aproximadamente 1 g de sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) em papel de filtro, usando um funil e , um balão volumétrico de 25 mL; iv) a fase aquosa separada anteriormente foi reintroduzida no funil de separação, misturada com uma pequena quantidade de hexano, agitada e deixada em repouso para uma segunda separação de fases óleo/água, visando uma obtenção mais eficiente da fase orgânica (óleo + hexano); v) após a filtração completa da fase orgânica, o

balão volumétrico foi preenchido com hexano com hexano até o menisco, tampado e homogeneizado. A Figura 9 esboça um esquema das etapas seguidas para a determinação do Teor de Óleos e Graxas.

Figura 09 - Fluxograma para medição do Teor de óleos e graxas (TOG)



Fonte: O autor

A Figura 10 ilustra a separação de fases durante um dos ensaios conduzidos nesta pesquisa, evidenciado o processo de separação. Todos os procedimentos para a determinação do TOG foram executados no Laboratório de Operações Unitárias, em uma capela de exaustão de gases, seguindo rigorosamente as normas de segurança laboratorial.

Figura 10 - Foto das separações de fases nos funis de separação pelo método da análise do Teor de óleos e graxas (TOG): à direita extração da amostra do tempo final (T=30) e à esquerda extração da amostra no tempo inicial(T=0)

Fonte: O autor

Na etapa subsequente, realizou-se a leitura das absorbâncias utilizando o espectrofotômetro QUIMIS®, modelo 4802 UV/VIS *Double Beam Spectrophotometer*, ajustado com varredura de comprimento de onda entre 190 e 400 nm. Inicialmente, procedeu-se à calibração do equipamento utilizando hexano em ambas as cubetas, seguida pela leitura do branco. Posteriormente, a cubeta inferior permaneceu com hexano enquanto, a cubeta frontal foi preenchida com a amostra para a leitura da espectrofotometria. Duas leituras de absorbância foram realizadas para cada alíquota (tempo inicial e final) e a média foi calculada. A primeira leitura foi efetuada na amostra de menor concentração de óleo (tempo de 30 minutos), seguida pela leitura na amostra com maior concentração de óleo (tempo inicial).

Para calcular os percentuais de óleo nas amostras, utilizou-se a absorbância no comprimento de onda de 277 nm. Essa escolha do comprimento de onda baseou-se em estudos prévios (Dias, Muniz, Porto, 2019; Gobbi *et al* 2018; Nascimento *et al.*, 2023.), nos quais se constatou que, nesse comprimento de onda, o espectro melhor atende à Lei de Lambert-Beer que relaciona a absorção de luz com as propriedades do material atravessado por ela. Na Figura 11 visualiza-se o equipamento UV/VIS utilizado para as leituras das absorbâncias das amostras, localizado no Laboratório de Caracterização Física dos Materiais II.

Figura 11 - UV/VIS - Espectrofotômetro usado para leituras das absorbâncias

Fonte: O autor

5.2 DETERMINAÇÃO DO pH

Para medição do pH das amostras, empregou-se um pHmetro de bancada da marca MS TECNOPON, modelo MPA 210, dotado de compensação automática de temperatura, resolução de 0,01 e precisão ± 0,01%. O método utilizado foi adaptado do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). Após a devida calibração do equipamento, procedeu-se às medidas do pH das amostras em triplicada. A média das leituras obtidas para as alíquotas nos tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 minutos foi registrada para as análises subsequentes. A Figura 12, representada abaixo, ilustra uma medida sendo realizada com o pHmetro de bancada em uma das alíquotas do efluente no tempo inicial.

Figura 12 - Análise do pH em uma amostra do efluente sintético sem tratamento (T=0)

Fonte: O autor

5.3 DETERMINAÇÃO DA TURBIDEZ

A avaliação da turbidez das amostras foi realizada por meio de um turbidímetro portátil da marca HANNA®, com uma precisão de ± 2%. O método utilizado foi adaptado do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). A unidade de medida usada para avaliação da turbidez foi o NTU (Unidade de Turbidez Nefelométrica), ou uT (Unidade de Turbidez). O aparelho foi calibrado para cada ensaio realizado e uma amostra de aproximadamente 10 mL foi inserida no recipiente apropriado do aparelho para realização de leituras em triplicata para cada alíquota dos tempos 0, 5, 10, 20 e 30 minutos. A média das leituras para cada amostra foi registrada para verificações e comparações posteriores. A Figura 13 ilustra o turbidímetro utilizado na pesquisa.

Figura 13 - Turbidímetro usado para as medidas de turbidez das amostras após tratamento com EC

Fonte: O autor

5.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia elétrica do sistema de EC estudado foi calculado segundo Gobbi *et al*., 2018 e Hussaim *et al*. 2022, utilizando a seguinte equação:

$$C_e = \frac{U.i.t'}{V} \tag{10}$$

Em que: C_e representa o consumo de energia elétrica em KW.h/m³, *U* representa a tensão elétrica (volts), *i* representa a corrente elétrica (Ampère), *t* representa o tempo em horas e *V* é o volume do efluente de tratamento (m³). Para calcular o consumo de energia, foi considerada a média da tensão e da corrente registradas via Arduíno para cada ensaio no tempo de 30 minutos de tratamento.

5.5 DETERMINAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ELETRODOS

Os eletrodos de alumínio telado, utilizados neste estudo, foram preparados antes de cada experimento, procurando manter a semelhança em área e massa entre os conjuntos de eletrodos, tanto o interno quanto o externo. O telado foi medido, cortado e moldado em formato cilíndrico antes de cada ensaio. Em seguida, as massas foram determinadas separadamente em uma balança analítica da marca SHIMADZU, modelo ATY224 e a massa inicial foi registrada (Figura 14). Após o procedimento de EC, os eletrodos foram removidos da estrutura de PVC que os mantinha presos no reator, lavados em água corrente apenas para remover o excesso de impurezas acumulada durante o tratamento e deixados secar naturalmente. Depois da secagem completa dos eletrodos (interno e externo), realizou-se uma nova determinação da massa em balança analítica, registrando a massa final.

Para determinar a perda de massa dos eletrodos durante o processo eletroquímico, utilizou-se a Equação 8 apresentada na seção de planejamento dos experimentos. Assim, com a massa inicial e final de cada conjunto de eletrodo telado, foi possível calcular a perda de massa percentual para cada experimento realizado.

Figura 14 - Balança analítica usada para pesagem dos eletrodos

Fonte: O autor

Além da verificação da perda de massa dos eletrodos telados, eles foram fotografados em microscópio antes e depois do processo de EC. Foi empregado um microscópio digital portátil da Marca SNAP, modelo MM-480M, tipo- c USB eletrônico, com câmera LED HD com taxa de ampliação de 50 a 1600X. Os registros foram efetuados para cada eletrodo usado nos ensaios, tanto o externo quanto o interno, com o objetivo de comparar futuramente aos desgastes no alumínio decorrentes dos parâmetros de análise de cada experimento realizado.

A metodologia para verificação de perda de massa e microscopia dos eletrodos foi baseada em trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa, conforme estudos de Dias, Muniz, Porto, 2019; Gobbi *et al* 2018; Nascimento *et al*., 2023.

5.6 TEOR DE ALUMÍNIO

A determinação do teor de alumínio foi conduzida pelo laboratório AGROLAB (Análises e Controle de Qualidade Ltda EPP; CNPJ: 39.267.166/0001-04).

Para avaliar o teor de alumínio no efluente após o tratamento eletroquímico, foi empregado o Método 3500-Al B, 23ª Edição - SMWW (*Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*).

Uma amostra de 300 mL do efluente tratado (após 30 minutos) foi coletada em frasco de polietileno adequadamente limpo e acondicionada em uma caixa de isopor com gelo para o transporte da amostra (refrigeração entre 0 e 6ºC), seguindo as diretrizes fornecidas pelo próprio laboratório responsável por essa análise.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados e analisados os principais desdobramentos obtidos, assim como suas implicações e contribuições referentes aos parâmetros examinados. Os resultados foram discutidos e comparados com estudos semelhantes da literatura.

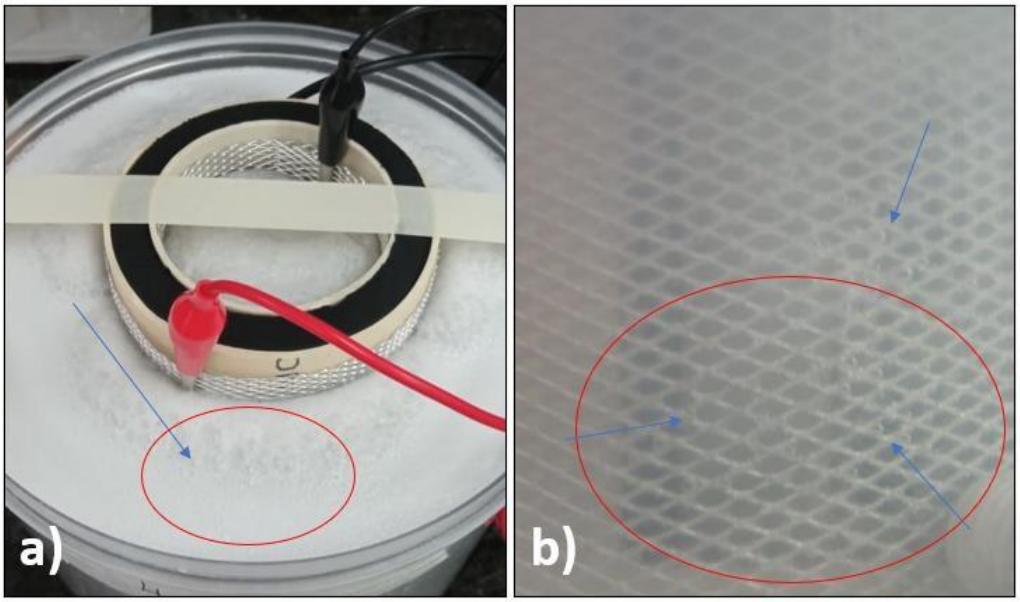
6.1 O PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO E REMOÇÃO DE ÓLEO DO EFLUENTE

O processo de eletrocoagulação e a remoção de óleo do efluente seguiram o protocolo experimental descrito na seção 4.3, com a adequação dos parâmetros analíticos em cada ensaio. A Figura 15 contém duas imagens que permitem a comparação entre o início e o término do tratamento. Nas imagens, é possível notar a alteração na coloração do efluente no reator de EC após 30 minutos de eletrólise. Adicionalmente, uma camada de lodo se formou na superfície do reator devido à liberação de bolhas de hidrogênio pelos eletrodos, arrastando com o gás parte das partículas de impurezas para a parte superior (Figura 16).

Figura 15 – Foto do reator de eletrocoagulação com o efluente oleoso no início e no final do tratamento

Fonte: O autor

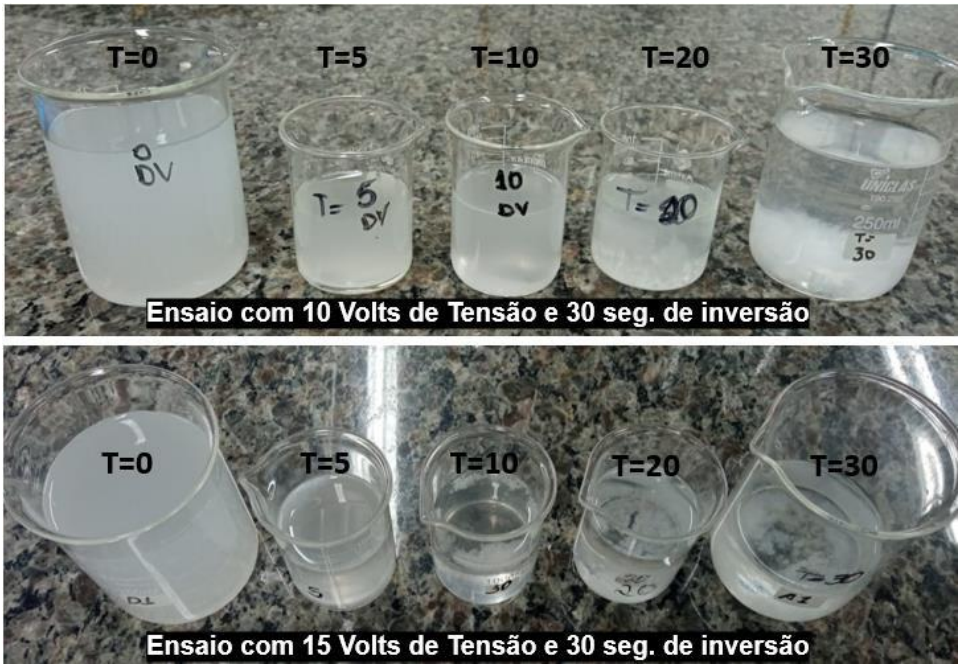
Figura 16 – Foto da formação do lodo superficial no reator de EC (a) devido a liberação de bolhas de hidrogênio pelos eletrodos de alumínio (b)



Nota: As setas azuis apontam para o lodo superficial formado (a) e para as bolhas de hidrogênio que são formadas pelos eletrodos de alumínio dentro do reator durante o processo de EC (b).
Fonte: O autor

Os íons coagulantes liberados durante o tratamento induzem a formação de flocos, que podem ser arrastados para a superfície ou sedimentar após um período subsequente à conclusão da eletrocoagulação. Na Figura 17 percebe-se uma camada de flocos sedimentados provenientes das amostras retiradas do reator ao longo do processo de tratamento. As amostras permaneceram em repouso por no mínimo 2 horas antes da análise de extração de óleos e graxas. Esse intervalo de tempo foi essencial para permitir que os flocos formados no efluente, após o tratamento eletroquímico, pudessem decantar e o sobrenadante das alíquotas foi, então, submetido as análises posteriores.

Figura 17 - Formação de flocos e a decantação do material floculado após tratamento por EC em amostras de diferentes ensaios



Fonte: O autor

6.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS PARA REDUÇÃO PERCENTUAL DE ÓLEOS E GRAXAS (RTOG%)

As amostras do efluente, obtidas do reator de EC após tratamento eletroquímico nos tempos designados, passaram pelo processo de extração de óleo com hexano para avaliar a remoção do poluente ao término do tratamento. Os dados e os resultados percentuais de remoção de óleo nos experimentos realizados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Percentual de RTOG em função das condições operacionais e o desvio padrão

Ensaio	d.d.p. (volts)	T_{inv} (seg.)	RTOG (%)	Valor médio	Desvio padrão
1	10	10	48,8	-	-
2	10	20	87,4	90,4	2,5
Rep.	10	20	94,4		
3	10	30	78,8	-	-
4	15	10	83,2	86,5	2,4
Rep.	15	10	89,9		
5	15	20	82,8	83,3*	4,6
6	15	20	78,9		
7	15	20	88,1		
8	15	30	94,9	-	-
9	20	10	92,1	-	-
10	20	20	98,3	96,7	1,1
Rep.	20	20	95,2		
11	20	30	96,7	91,0	4,1
Rep.	20	30	85,2		

Rep.: Repetição; *Média dos pontos centrais. Fonte: O autor

Há que se notar que possíveis perdas de óleo devido à sua viscosidade podem ter ocorrido antes de ser transferido para o agitador Turrax ou no processo de extração de óleo em água. Tal fato, pode ter alterado a quantidade de óleo nas amostras iniciais, antes do processo de EC. As absorbâncias obtidas para cada amostra do tempo inicial de alguns ensaios são apresentadas no APÊNDICE A.

No entanto, ainda assim, as réplicas dos experimentos resultaram em resultados próximos entre si com desvio padrão menor que 10% do valor médio, com indicação de um desvio aleatório.

A partir dos dados apresentados na tabela acima foram realizadas análises estatísticas para verificar se há uma relação entre as variáveis independentes que pode influenciar significativamente na variável dependente (desfecho). Primeiro foi empregada uma análise de variância (ANOVA) fatorial 3x3 (*Two-way*), possibilitando a análise do efeito das duas

variáveis independentes (d.d.p. e T_{inv}) na variável resposta (percentual de remoção de óleo). A Tabela 4 demostra os dados resultantes da ANOVA.

Tabela 4 - Tabela de Análise de Variância (ANOVA) para RTOG%

	Soma de quadrados	**Gl**	**Quadrado médio**	**Valor F**	***P***
d.d.p.	968,4326	2	484,2163	19,6627	0,0023*
T_{inv}	394,8245	2	197,4123	8,0164	0,0202*
d.d.p.* T_{inv}	1015,4351	4	253,8588	10,3085	0,0074*
Resíduos	147,7567	6	24,6261		

**p-valor* significativo <0,05. Fonte: O autor

A análise dos dados na ANOVA revela que a interação entre os fatores foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$). Diante disso, para investigar os níveis de d.d.p. e T_{inv} individualmente e identificar aqueles que exercem maior influência nos resultados do tratamento do efluente oleoso, foram realizadas comparações Pos hoc, incluindo o teste de Tukey (conforme mostrado na Tabela 5).

Tabela 5 - Comparações Post hoc d.d.p. * Tinv

(continua)

Comparações							
d.d.p.	**T_{inv}**	**d.d.p.**	**T_{inv}**	**Diferença Média**	**Erro padrão**	***T***	p_{tukey}
10	10	10	20	-42,1000	6,0778	-6,9269	0,0060
		10	30	-32,2000	6,0778	-5,2980	0,0230
		15	10	-41,1000	7,0180	-5,8564	0,0141
		15	20	-34,4667	5,7302	-6,0149	0,0123
		15	30	-46,1000	7,0180	-6,5688	0,0079
		20	10	-43,3000	7,0180	-6,1699	0,0109
		20	20	-47,9500	6,0778	-7,8894	0,0030

Tabela 5 – Comparações Post hoc d.d.p. * T_{inv}

(conclusão)

Comparações							
d.d.p.	**T_{inv}**	**d.d.p.**	**T_{inv}**	**Dif. Média**	**Erro padrão**	***T***	p_{tukey}
		20	30	-42,1500	6,0778	-6,9351	0,0060
	20	10	30	9,9000	4,9625	1,9950	0,5905
		15	10	1,0000	6,0778	0,1645	1,0000
		15	20	7,6333	4,5301	1,6850	0,7408
		15	30	-4,0000	6,0778	-0,6581	0,9977
		20	10	-1,2000	6,0778	-0,1974	1,0000
		20	20	-5,8500	4,9625	-1,1788	0,9355
		20	30	-0,0500	4,9625	-0,0101	1,0000
	30	15	10	-8,9000	6,0778	-1,4644	0,8393
		15	20	-2,2667	4,5301	-0,5004	0,9997
		15	30	-13,9000	6,0778	-2,2870	0,4578
		20	10	-11,1000	6,0778	-1,8263	0,6725
		20	20	-15,7500	4,9625	-3,1738	0,1877
		20	30	-9,9500	4,9625	-2,0050	0,5857
15	10	15	20	6,6333	5,7302	1,1576	0,9408
		15	30	-5,0000	7,0180	-0,7125	0,9962
		20	10	-2,2000	7,0180	-0,3135	1,0000
		20	20	-13,4833	4,5301	-2,9764	0,2306
		20	30	-7,6833	4,5301	-1,6961	0,7355
	30	20	10	2,8000	7,0180	0,3990	0,9999
		20	20	-1,8500	6,0778	-0,3044	1,0000
		20	30	3,9500	6,0778	0,6499	0,9979
20	10	20	20	-4,6500	6,0778	-0,7651	0,9940
		20	30	1,1500	6,0778	0,1892	1,0000
	20	20	30	5,8000	4,9625	1,1688	0,9381

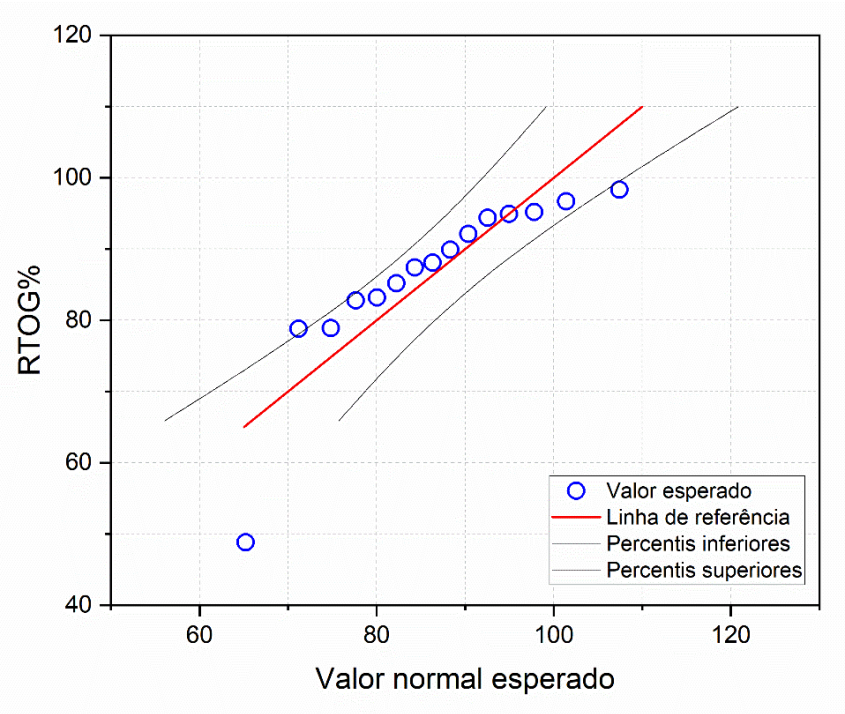
Fonte: O autor

O teste de Tukey evidenciou que a combinação de 10V e 10 segundos se diferenciou das demais combinações de d.d.p. e T_{inv} (p-valor <0,05), o que é corroborado pelo valor do "t-statistic" (ou estatística *t*), calculado com base nas médias e variâncias dos grupos comparados. Quando a média de um grupo é inferior à média de outro grupo o resultado do "t" é negativo, indicando uma diferença significativa entre as médias para esse fator.

Na Figura 18, o gráfico de Q-Q (*quantil-quantil*) oferece uma visão geral da dispersão dos dados e pode auxiliar na identificação de pontos extremos ou de anomalias. Um *outlier* é observado no ponto (RTOG% de 48,8%) do gráfico de Quantis.

Entretanto, um ensaio anterior com eletrodos telados de alumínio, com um diâmetro de abertura da malha menor em relação ao telado de estudo, apresentou uma taxa de remoção de óleo (RTOG%) de 51,6% para as mesmas condições experimentais (10 volts e 10 seg. de T_{inv}). Mesmo com alguma variação no diâmetro das malhas testadas para tratamento de EC, os resultados do RTOG% obtidos não apresentaram diferenças expressivas, confirmando que, para d.d.p. mais baixas e com menor T_{inv}, a taxa de remoção de óleos e graxa não tende a variar significativamente com a geometria.

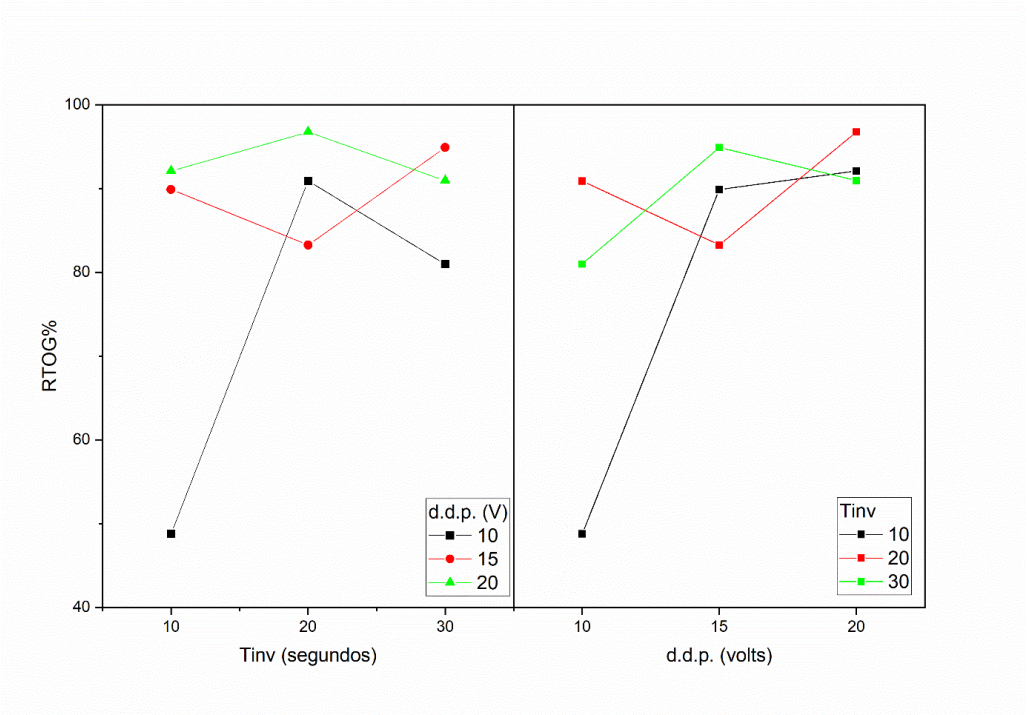
Figura 18 - Gráfico Q-Q para RTOG%



Fonte: O autor

Os outros pontos estão distribuídos mais uniformemente ao longo do gráfico, indicando uma distribuição aproximadamente uniforme dos dados. Para complementar os resultados da análise estatística para o RTOG%, a próxima figura (Figura 19) exibe um gráfico de interações entre as variáveis de investigação.

Figura 19 - Gráficos de interações entre d.d.p. **X** T_{inv} com T_{inv} **X** d.d.p.



Fonte: o autor

Com base nos resultados estatísticos observados, verificou-se que a variação da d.d.p. em combinação com diferentes valores de T_{inv} pode afetar a variável resposta (RTOG%). Notavelmente, a d.d.p. de 20 V, em conjunto com diferentes T_{inv}, demonstrou ser mais acentuada no percentual de remoção de óleo. Isso sugere que aumentos na d.d.p. e no T_{inv} resultam em uma influência mais acentuada no percentual de remoção de óleo. Conforme observado na Tabela 3 e no gráfico correspondente (Figura 19), os tratamentos mais eficazes para RTOG% foram obtidos ao aplicar a d.d.p. de 20 V e 20 segundos, corroborando com o melhor percentual de remoção de óleo obtido no ensaio 10 de 98 ± 1 %.

Portanto, d.d.p. mais elevadas revelaram-se mais eficazes, especialmente no que diz respeito à desmulsificação das gotículas de óleo no efluente. Isso implica em uma maior

desestabilização dos poluentes na mistura, resultando em um tratamento mais satisfatório. Essas conclusões estão alinhadas com estudos anteriores como os realizados por Chen *et al*. (2020) e Dongsheng *et al*. (2022).

6.4 EFEITO DO TRATAMENTO POR EC NO pH

Durante o processo de EC o efluente foi submetido a uma série de condições operacionais que podem afetar o pH da amostra como a composição química do efluente a ser tratado, concentração de contaminantes presentes na mistura, a corrente elétrica aplicada e a condutividade elétrica ou tipo de eletrodos usados no tratamento. A formação de hidróxidos de alumínio a partir da dissolução do telado de alumínio é um fator que afeta diretamente o pH da amostra. Os hidróxidos são bases, e têm a capacidade de aumentar o pH da água, sendo comum, observar um aumento após o tratamento com EC.

A média geral do pH para as amostras do efluente oleoso sintético no tempo inicial, antes de ser submetido ao processo de EC, foi de 6,39. Após o tratamento de eletrólise a média geral do pH de todos os ensaios foi de 8,14. Contudo existe um aumento gradativo no pH final à medida que a tensão elétrica do sistema é aumentada. A Tabela 6 apresenta os resultados registrados para os valores de pH inicial e final em função das condições operacionais para cada ensaio.

Tabela 6 - Valores do pH antes e depois do processo de eletrocoagulação

Ensaio	d.d.p. (volts)	T_{inv} (seg.)	RTOG (%)	R_{turb} (%)	pH Inicial	pH final
1	10	10	48,8	22,3	6,49	8,14
2	10	20	87,4	95,7	6,15	8,21
Rep.	10	20	94,4	98,0	6,59	8,37
3	10	30	78,8	25,4	6,33	7,13
4	15	10	83,2	71,1	6,55	8,42
Rep.	15	10	89,9	95,7	6,51	8,27
5	15	20	82,8	98,3	6,20	8,14
6	15	20	78,9	74,6	6,12	7,69*
7	15	20	88,1	96,7	6,18	8,28
8	15	30	94,9	99,2	6,77	8,02
9	20	10	92,1	98,2	6,47	8,96
10	20	20	98,3	99,7	6,13	8,35
Rep.	20	20	95,2	98,6	6,35	8,22
11	20	30	96,7	98,7	6,63	8,28
Rep.	20	30	85,2	94,2	6,45	7,63*
Média geral					**6,39**	**8,14**

*Valores desconsiderados para a análise estatística referentes ao pH; Fonte: O autor

Uma correlação de Spearman foi usada para observar se existem correlações entre o pH e o percentual de remoção de óleo do efluente após o tratamento (Tabela 7).

Tabela 7 - Correlação de Spearman para o pH inicial e final dos experimentos

		d.d.p.	**T_{inv}**	**RTOG%**	**R_{turb}**
RTOG%	Rho de Spearman	0,5850*	0,1902		
	Gl	13	13		
	p-valor	0,0110	0,2486		
R_{turb}	Rho de Spearman	0,5749*	0,2933	0,8515*	
	gl	12	12	12	
	p-valor	0,0158	0,1544	<0,0001	
pH inicial	Rho de Spearman	- 0,0163	0,0234	0,1604	0,0242
	gl	12	12	12	12
	p-valor	0,5221	0,4683	0,2919	0,4673
pH final	Rho de Spearman	0,4468	- 0,4753	0,4022	0,1628
	gl	11	11	11	11
	p-valor	0,0630	0,9497	0,0865	0,2976

Nota: correlação positiva; **p-valor* significativo <0,05. Fonte: O autor

De maneira geral, o que se pode observar ao analisar a Tabela 7, que não existe uma correlação entre o pH e as variáveis investigadas.

O pH final em todos os experimentos realizados está em conformidade com os padrões para descarte de efluentes líquidos, segundo a legislação CONAMA 430/2011, que permite o lançamento de efluentes com pH entre 5 e 9.

6.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA TURBIDEZ

Os valores percentuais da redução na turbidez (R_{turb}) provenientes dos experimentos com as amostras após o tratamento eletroquímico, estão detalhados na Tabela 8, juntamente com o percentual de remoção do teor de óleos e graxa (RTOG%)) para cada ensaio.

Tabela 8 - Resultados da redução na turbidez encontrados a partir dos ensaios realizados

Ensaio	d.d.p.	T_{inv}	RTOG%)	(R_{turb}) (%)	Valor médio	Desvio padrão
1	10	10	48,8	22,3	-	-
2	10	20	87,4	95,7	96,2	0,8
Rep.	10	20	94,4	98,0		
3	10	30	78,8	25,4	-	-
4	15	10	83,2	71,1	83,4	8,7
Rep.	15	10	89,9	95,7		
5	15	20	82,8	98,3	97,5	0,6
6	15	20	78,9	74,6*		
7	15	20	88,1	96,7		
8	15	30	94,9	99,2	-	-
9	20	10	92,1	98,2	-	-
10	20	20	98,3	99,7	99,1	0,4
Rep.	20	20	95,2	98,6		
11	20	30	96,7	98,7	96,4	1,6
Rep.	20	30	85,2	94,2		

*Valor desconsiderado para fins de análise da turbidez. Fonte: O autor

A turbidez é uma medida importante para avaliar um efluente tratado por eletrocoagulação, uma vez que altos níveis de turbidez indicam a presença de partículas sólidas e/ou em suspensão. A formação de flocos após o tratamento eletroquímico é predominante para remover as impurezas do efluente, tornando a turbidez um indicador eficaz desse processo de remoção.

Para analisar as interações entre variáveis dependente e independentes na R_{turb} foi conduzido um teste não paramétrico. Nesse sentido, a correlação de Spearman foi empregada para avaliar a associação entre as variáveis preditoras e a variável resposta. Na Tabela 9 dispõem os resultados obtidos por meio deste teste.

Tabela 9 - Matriz de correlação de Spearman para Rturb

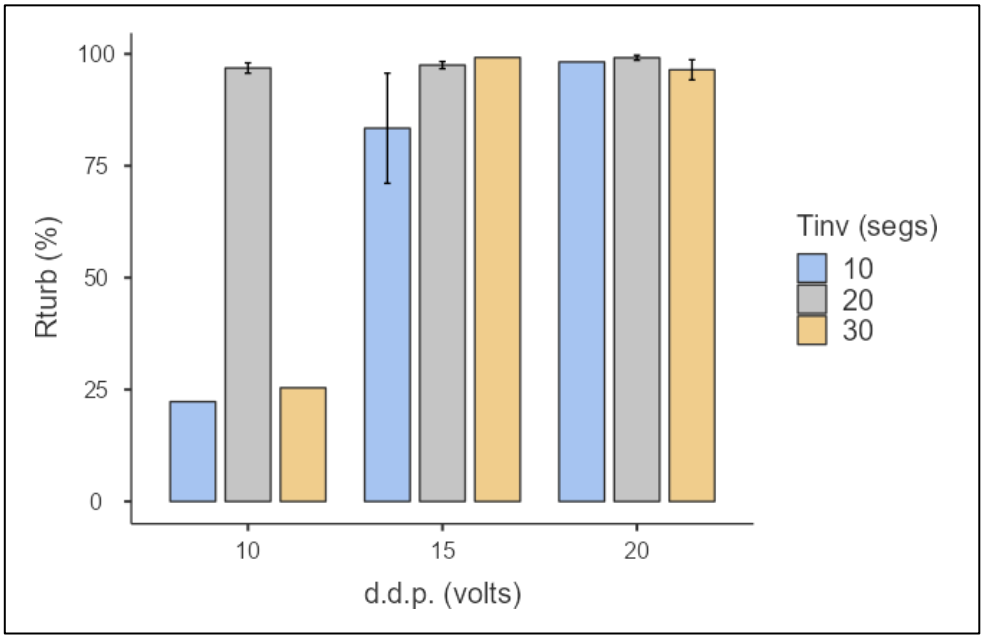
		d.d.p.	**T_{inv}**	**R_{turb}**
RTOG%	Rho de Spearman	0,5850*	0,1902	0,8515*
	Gl	13	13	12
	p-valor	0,0110	0,2486	<.0001
R_{turb}	Rho de Spearman	0,5749*	0,2933	-
	Gl	12	12	-
	p-valor	0,0158	0,1544	-

*Nota: Correlação positiva; *p-valor* significativo <0,05. Fonte: O autor

Examinando a tabela (Tabela 7), pode-se perceber que na R_{turb} a d.d.p. se mostra mais significativa (p-valor < 0,05) ou seja, com o *p*-valor de 0,0158 pela análise de correlação de Spearman, da mesma forma a d.d.p é a variável que influencia de forma significativa em RTOG% como já era possível inferir dos resultados da seção anterior.

O gráfico de barras (Figura 20) ilustra à influência predominante do fator d.d.p. nos resultados de R_{turb} após o tratamento por EC.

Figura 20 - Gráfico de barras comparando o percentual de R_{turb} dos ensaios realizados



Fonte: O autor

Observa-se que os melhores resultados, quanto ao percentual de R_{turb}, foram alcançados nos ensaios com d.d.p. de 20 volts. Vale ressaltar que, para avaliar a R_{turb} do efluente após o

tratamento, o tempo de decantação da amostra após o processo de eletrólise foi essencial para os resultados. A formação dos flocos e decantação do material floculado, para todos os ensaios, ocorreu de forma mais acelerada nos ensaios com d.d.p. elétrico mais elevados. Isso sugere que, nos tratamentos com EC, tensões elétricas maiores são mais eficientes para remover partículas suspensas. Nos ensaios que apresentaram percentuais de R_{turb} menores, foi possível observar uma baixa formação de flocos coagulantes, flocos muito pequenos e que demoraram muito mais tempo para sedimentar, em comparação aos ensaios cujos parâmetros de d.d.p. mais elevados. Como relatado por Wang *et al.*, (2022), o aumento na turbidez em alguns ensaios (ensaios 1, 3 e 4), pode ser causado pela formação de flocos que não foram completamente precipitados, além da presença residual de flocos na amostra. Essas características do efluente após o tratamento refletiram nos resultados obtidos pelo turbidímetro.

Os valores mais altos na R_{turb} são explicados pela desestabilização das partículas coloidais que ocorrem devido a liberação do agente coagulante durante tratamento eletrolítico. A formação dos flocos coagulantes pode ocorrer de forma mais rápida ou mais lenta conforme os parâmetros aplicados ao sistema de EC.

6.7 ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO

O consumo de energia elétrica foi registrado e calculado para cada ensaio a partir da equação 10 e os resultados estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Consumo de energia dos ensaios em função dos parâmetros de análise

Ensaio	d.d.p. (volts)	T_{inv} (seg.)	RTOG (%)	R_{turb} (%)	pH Inicial	pH final	C_e KW.h/m³
1	10	10	48,8	22,3	6,49	8,14	0,43
2	10	20	87,4	95,7	6,15	8,21	0,25
Rep.	10	20	94,4	98,0	6,59	8,37	0,22
3	10	30	78,8	25,4	6,33	7,13	0,39
4	15	10	83,2	71,1	6,55	8,42	0,69
Rep.	15	10	89,9	95,7	6,51	8,27	0,90
5	15	20	82,8	98,3	6,20	8,14	1,26
6	15	20	78,9	74,6	6,12	7,69	1,34
7	15	20	88,1	96,7	6,18	8,28	1,17
8	15	30	94,9	99,2	6,77	8,02	1,14
9	20	10	92,1	98,2	6,47	8,96	1,92
10	20	20	98,3	99,7	6,13	8,35	1,66
Rep.	20	20	95,2	98,6	6,35	8,22	2,23
11	20	30	96,7	98,7	6,63	8,28	2,29
Rep.	20	30	85,2	94,2	6,45	7,63	1,79

*Desconsiderado da análise estatística. C_e: Consumo de energia. Fonte: O autor

O consumo elétrico está diretamente ligado ao fator d.d.p., bem como a densidade de corrente aplicada ao sistema de tratamento (ver APÊNDICE D). Wang *et al*., (2022) explica que existe uma relação linear entre d.d.p. e a densidade de corrente. Os resultados de consumo de energia apresentados na tabela acima mostram que com o aumento da d.d.p. há um acréscimo no consumo de energia nos ensaios de EC.

Isso ocorre porque o consumo de energia, teoricamente, é proporcional ao quadrado da corrente aplicada, com o aumento da densidade de corrente e com o aumento da tensão segundo relatado por Jiang, Chen, Liu F. (2019).

Foi aplicado um teste de correlação de Spearman (Tabela 11) para verificar o grau de associação das variáveis d.d.p. e T_{inv} com o C_e. Assim. d.d.p e C_e apresentam uma correlação muito forte (Rho de Spearman de 0,9402) e quanto ao C_e e o RTOG% (Rho de Spearman de 0,4536) existe uma correlação positiva moderada, bem como entre R_{turb} e C_e (Rho de Spearman de 0,5699) entre as duas variáveis.

Tabela 11 - Correlação de Spearman para o consumo de energia

		d.d.p.	**T_{inv}**	**TOG (%)**	**R_{turb}**	**pH inicial**	**pH final**
C_e	Rho de Spearman	0,9402*	0,1902	0,4536*	0,5699*	- 0,0198	0,2314
	Gl	13	13	13	12	12	11
	p-valor	<0,0001	0,2486	0,0458	0,0167	0,5302	0,2234

Nota: correlação positiva; **p-valor* significativo <0,05. Fonte: O autor

O maior consumo em KW.h/m³ foi registrado para o tratamento do ensaio 11, foi ao conduzir o experimento com a voltagem de 20 volts (2,29 KW.h/m³), enquanto para o melhor ponto de remoção de óleo o consumo elétrico médio foi de 1,95 KW.h/m³. A correlação significativa entre C_e e RTOG% indica que é necessário consumir mais energia elétrica para remover mais óleo. Isto verifica-se ainda na Tabela 10 onde os valores de RTOG% acima de 90% estão todos associados aos maiores consumos de energia.

6.5 DISSOLUÇÃO DOS ELETRODOS DE ALUMÍNIO TELADOS

A formação de coagulantes no meio aquoso é resultado da dissolução dos eletrodos de alumínio usados durante o tratamento. Os eletrodos telados usados nos ensaios de EC nesta pesquisa tiveram as massas registradas e analisadas antes e depois do processo de tratamento.

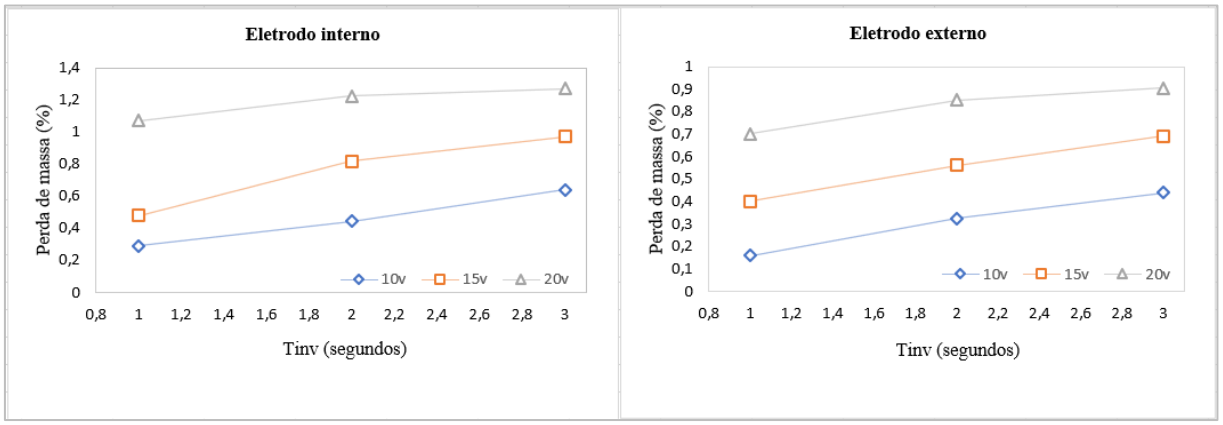
Os resultados percentuais da dissolução dos eletrodos telados estão dispostos na Tabela 12 e em seguida é apresentado um gráfico (Figura 21) que compara as dissoluções dos eletrodos nas diferentes d.d.p. e T_{inv} aplicadas em cada experimento.

Tabela 12 - Percentual de dissolução dos eletrodos internos e externos nos ensaios de Eletrocoagulação

Ensaio	d.d.p. (volts)	T_{inv} (seg.)	TOG (%)	R_{turb} (%)	P_m elet. Interno (%)	P_m elet. Externo (%)
1	10	10	48,8	22,3	0,29	0,16
2	10	20	87,4	98,0	0,37	0,28
Rep.	10	20	94,4	98,0	0,52	0,37
3	10	30	78,8	25,4	0,64	0,44
4	15	10	83,2	95,7	0,48	0,36
Rep.	15	10	89,9	95,7	0,48	0,44
5	15	20	82,8	98,3	0,79	0,51
6	15	20	78,9	74,6	0,98	0,66
7	15	20	88,1	96,7	0,68	0,51
8	15	30	94,9	99,2	0,97	0,69
9	20	10	92,1	98,2	1,07	0,70
10	20	20	98,3	99,7	1,23	0,85
Rep.	20	20	95,2	98,6	1,22	0,85
11	20	30	96,7	98,7	1,32	0,94
Rep.	20	30	85,2	94,2	1,22	0,87

P_m: Perda de massa. Fonte: O autor

Figura 21 - Gráfico da tendência do desgaste dos eletrodos interno e externo ao aplicar diferentes d.d.p. e T_{inv} ao processo de EC



Fonte: O autor

Durante o processo de eletrocoagulação, os eletrodos sofrem um desgaste gradual devido à transferência de massa para o meio reacional. Ao analisar os resultados apresentados

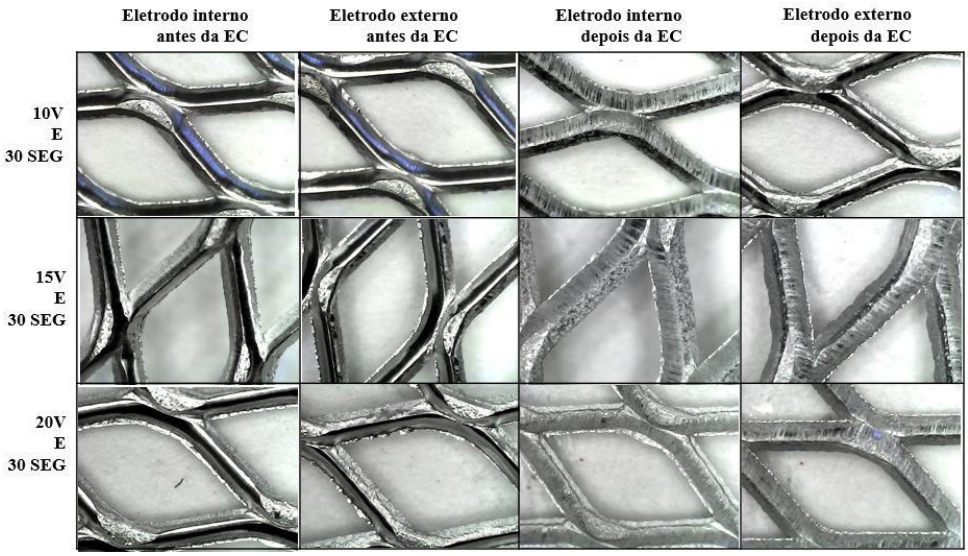
acima (Tabela 12 e Figura 21), é possível verificar um aumento gradativo na dissolução dos eletrodos à medida que é aumentada a d.d.p. do experimento, tendência esta seguida também pelo T_{inv} aplicados nos ensaios.

A porcentagem de desgaste dos eletrodos foi ligeiramente maior nos eletrodos internos, em praticamente todos os ensaios. Esta diferença se deve ao fato de o eletrodo interno ter uma área de contato menor (16cmX23cm) em relação ao eletrodo mais externo (16cmX33cm), influenciando na densidade de corrente aplicada ao sistema.

Nos estudos realizados por Kumari S., Kumar R. N. (2021) os autores aplicaram diferentes tensões elétricas para tratar água de um rio e afirmam que a voltagem aplicada ao sistema influência a densidade de corrente, o que resulta em maior consumo dos eletrodos. Assim como foi verificado nos eletrodos telado há um aumento na quantidade de íons coagulantes na mistura a partir do aumento na voltagem e, por isso, há o aumento na redução do teor de óleos e graxas.

Na Figura 22 são apresentadas as imagens da microscopia realizada nos eletrodos externo e interno que foram utilizados nos ensaios de EC para tratar o efluente oleoso sintético.

Figura 22 - Imagem dos eletrodos antes e depois do tratamento com EC feitas com microscópio usados nos ensaios de 10, 15 e 20 volts com 30 segundos de inversão de polaridade



Fonte: O autor

Há um desgaste crescente do eletrodo telado com o aumento da tensão usada. O mesmo pode ser observado para os eletrodos internos, que seguem uma tendência de desgaste maior

em relação aos eletrodos externos. Os eletrodos internos apresentaram uma maior perda de massa em comparação aos eletrodos externos usados no reator de EC, o que é resultado da diferença de área entre eles. A diferença na área dos eletrodos pode afetar o processo de eletrocoagulação em termos de eficiência e velocidade de coagulação. Eletrodos com área maior geralmente apresentam uma maior capacidade de transferência de carga elétrica, o que pode resultar em uma coagulação mais rápida e eficiente, resultando em melhores resultados na remoção dos poluentes.

6.8 ANÁLISE DO TEOR DE ALUMÍNIO

Para verificar a concentração do alumínio dissolvido no efluente após passar pelo tratamento de EC com os eletrodos telados, foi retirada uma amostra do efluente no tempo de 30 minutos de um dos melhores pontos observados na matriz inicial. Esta amostra usando a voltagem de 20 volts e 30 segundos de tempo de inversão de polaridade, foi enviada para laboratório de analítica AGROLAB – Análises e Controle de Qualidade Ltda EPP para verificação da concentração do alumínio após o tratamento. O relatório de ensaio foi emitido e assinado pela responsável técnica Lúcia Helena de Freitas (Anexo I).

Os resultados apresentaram alumínio dissolvido < 0,020 mg/L. De acordo com a Legislação para lançamento de efluente, a concentração desta análise ao utilizar maior voltagem e tempo de inversão (valores máximos), encontra-se dentro dos limites previstos na Resolução CONAMA nº 357, artigo 18 - Água salina, Classe I, que prevê limite máximo de 1,5 mg/L para alumínio dissolvido.

6.6 TEMPERATURA

A temperatura tende a aumentar devido à geração de calor resultante da passagem de corrente elétrica no meio. Isso ocorre porque a energia elétrica é convertida em energia térmica. Na eletrocoagulação, essa elevação pode ser favorável ao processo de tratamento para um

efluente oleoso, auxiliando na coagulação de substâncias contaminantes do meio (Al-Raad *et al.*,2021; Shokri, Fard, 202). Por outro lado, o aumento excessivo na temperatura pode tornar os flocos coagulantes instáveis e prejudicar o tratamento segundo observado por Zhao et al., (2021).

Nos experimentos de EC realizados com os eletrodos telado de alumínio a temperatura apresentou uma pequena variação relacionada à voltagem aplicada no sistema. Assim, tensões de 10 volts apresentaram uma variação média na diferença de temperatura de 0,23 ºC do início ao final do tratamento no tempo de 30 minutos, tensões de 15 volts uma variação de 0,41 ºC e para 20 volts uma variação média de 1,08 ºC. A temperatura máxima registrada após o efluente passar pelo processo de eletrólise foi em torno de 27 ºC.

Desta forma, as temperaturas finais após tratamento com os eletrodos testados, ficaram dentro dos padrões normais previstos em legislação, não ultrapassando os limites para lançamento de efluentes inferior a 40 ºC.

6.9 POTENCIAL PARA REUSO DOS ELETRODOS DE TELADO DE ALUMÍNIO

No intuito de avaliar o potencial para reuso dos eletrodos telados de alumínio, foi realizado dois ensaios adicionais, reutilizando um par de eletrodos por três vezes seguidas e avaliando a eficiência de remoção do teor de óleos e graxas, bem como as demais análises descritas nas etapas dos experimentos anteriores. Foi escolhido o par de eletrodos do ensaio 10 (20 V e 20 segundos de inversão), para prosseguir com experimentos e avaliar a eficiência na reutilização destes eletrodos para tratamentos seguidos e nas mesmas condições de operação. Este ponto foi escolhido por se tratar de um dos melhores resultados observados para RTOG%.

Na Tabela 13 estão descritos os parâmetros dos ensaios para os reusos, e as taxas percentuais para RTOG% e R_{turb} obtidas para estas amostras finais.

Tabela 13 - Resultados para RTOG% e Rturb do experimento 10 e respectivos reuso dos eletrodos

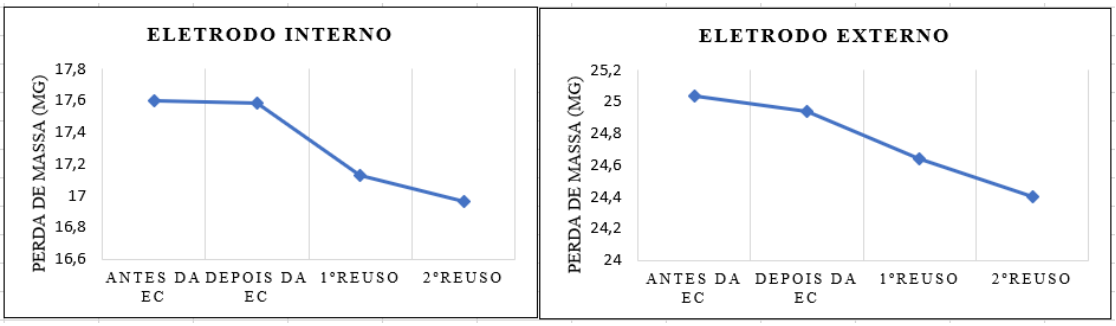
Ensaio	d.d.p. (volts)	T_{inv} (seg.)	RTOG (%)	R_{turb} (%)	pH Inicial	pH final	C_e (KW.h/m³)
Exp. 10	20	20	98,3	99,7	6,13	8,35	1,66
1º reúso	20	20	90,2	99,8	6,31	7,95	1,78
2º reúso	20	20	84,5	99,6	6,80	8,34	1,80

Fonte: O autor

Fazendo uma breve análise diagnóstica dos dados observados, pode-se afirmar que existe uma diminuição gradativa na eficiência do tratamento, à medida em que os eletrodos vão sendo usados em tratamentos de eletrólise sucessivamente. A massa dos eletrodos também foi registrada antes e depois dos procedimentos de EC.

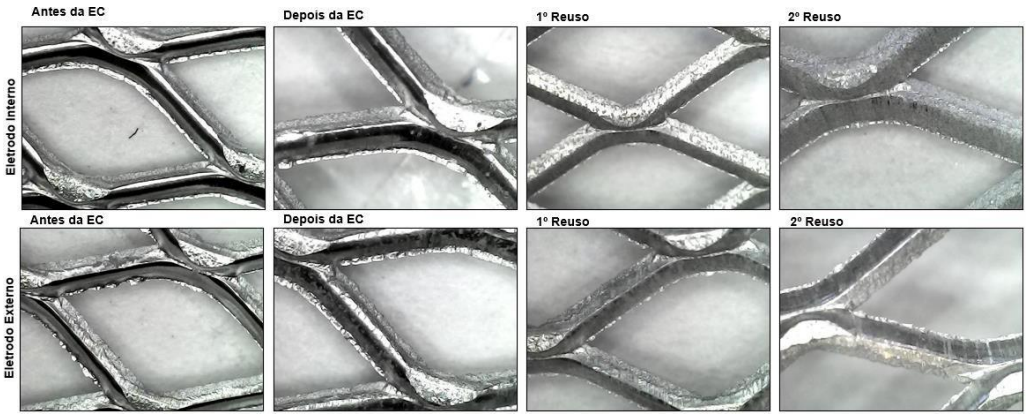
O desgaste dos eletrodos seguiu a mesma tendência e perdas de massa sucessivas foram verificadas (Figura 23). Pelas fotos de microscopia dos eletrodos (Figura 24) é possível observar um aumento de ranhuras e desgaste à medida que é exposto ao tratamento eletroquímico.

Figura 23 - Gráfico comparando as perdas de massa em miligramas dos eletrodos Interno e Externo nos ensaios de reutilização sob as mesmas condições de operação



Fonte: O autor

Figura 24 - Fotos dos eletrodos antes e depois da EC e nas respectivas reutilizações do par de eletrodos para o ensaio eletroquímico sob as mesmas condições de operação



Fonte: O autor

À medida que os eletrodos telados são reutilizados para tratar o efluente oleoso, é provável que a quantidade de material acumulado sobre eles aumente, formando um filme passivo no decorrer do tempo. Mesmo com o uso de inversor de polaridades, essa acumulação pode levar a uma diminuição na formação de agentes coagulantes no meio reacional (Abdollahi et al., 2023), influenciando negativamente nas características físico-químicas da superfície dos eletrodos e afetando as reações eletroquímicas envolvidas no processo de tratamento. Por isso, a remoção percentual de óleo tende a diminuir conforme os eletrodos são reutilizados várias vezes.

Apesar disso, os primeiros dois ensaios apresentaram resultados satisfatórios em relação à porcentagem de remoção de óleo (98% e 90% respectivamente), o pH se manteve constante em relação aos outros ensaios e o consumo de energia elétrica não teve um aumento significativo em comparação com o primeiro tratamento dos eletrodos. Entretanto, é necessário fazer uma investigação mais aprofundada para determinar com certeza até que ponto esta reutilização é possível sem prejudicar o tratamento final do efluente.

6.10 ANÁLISE CONJUNTA DAS VARIÁVEIS

Com base nos resultados verificados, é possível concluir que a depender da d.d.p. aplicada ao sistema de EC para tratamento do efluente oleoso, a remoção de óleos e graxas pode

ser mais eficiente ou não. Aumentar a d.d.p resultou em melhores resultados para RTOG% (ver Tabela 4), provavelmente devido ao aumento da corrente elétrica e consequente maior perda de massa (ver Tabela 11), maior liberação de alumínio por parte dos eletrodos. Outros autores obtiveram resultados semelhantes em seus estudos: Hussaim *et al*. (2022) investigaram variações de tensões elétricas para tratamento de efluente contaminado por surfactantes com eletrodos perfurados, e observaram que com o aumento da tensão a remoção do poluente foi melhor, o tempo de tratamento diminuiu e se tornou estável em 20 volts. Preethi *et al*., (2020) investigaram o uso das tensões elétricas de 10, 15 e 20 V para o tratamento de águas residuais de refinarias de óleo vegetal bruto e remoção da DQO do efluente por meio da EC e relatam que o aumento na voltagem elétrica melhora a eficiência na remoção dos poluentes.

Considerando os valores de RTOG%, R_{turb}, C_e e pH final os valores de entrada de 20 V e 20 S foram tomados como aqueles que levam ao resultado com maior aplicação industrial. Há de se considerar que com estas variáveis de entrada, RTOG% e R_{turb} foram superiores a 90%, o pH final está dentro dos limites da legislação (< 9), o teor de alumínio dissolvido no efluente após a EC ficou dentro dos padrões estabelecidos pelo CONAMA 357/2005 e a energia elétrica consumida não foi a maior obtida neste trabalho.

Basicamente, as análises estatísticas e de correlação de dados demonstraram que a d.d.p. exerce uma influência significativa no RTOG%, Rt_{urb}, no desgaste dos eletrodos e C_e. A temperatura final do efluente tratado também se encaixa dentro dos padrões de descarte de efluentes e foi maior nos ensaios em que foram aplicadas as tensões de 20 volts, consequência da energia térmica liberada na solução, mas ainda permanece dentro do permitido pela legislação.

É importante considerar que a energia fornecida aos eletrodos ainda foi significativa o suficiente para promover uma boa remoção de óleos e graxas nos ensaios com 10 volts e 20 segundos (87,4%) e com 15 volts e 30 segundos (94,9%) bem como a R_{turb} final alcançada de 95,7% e 99,2%, respectivamente. Na réplica para o ensaio 2 (10 volts e 20 segundos) o percentual de remoção de óleo se manteve ainda alto (94,4 %) assim como R_{turb} (98,0%), apresentando um desvio padrão de 2,5 para os dois experimentos. O que acontece é que ao aplicar T_{inv} de 20 segundos foi observado visualmente para todos os ensaios uma melhor floculação e decantação dessas amostras o que resulta na remoção de contaminantes do meio de forma mais satisfatória.

O aumento da voltagem em processos de eletrocoagulação desempenha um importante papel na eficiência da remoção de contaminantes do efluente. Uma voltagem mais alta geralmente resulta em uma taxa de reação eletroquímica mais elevada, o que leva ao acelereramento do processo de EC.

7 CONCLUSÕES

Os resultados discutidos na seção anterior, revelam que eletrodos telados apresentaram resultados satisfatórios para o tratamento de efluente oleoso sintético. O maior número de furos nos eletrodos promove uma maior interação entre o alumínio e o fluído além de melhor fluxo de efluente pelo sistema. O estudo que envolveu a análise de diferentes níveis de tensão elétrica e tempos de inversão de polaridade, indicaram uma remoção máxima de óleos e graxas do efluente sintético de 98 ± 1%, com percentual de remoção na turbidez (Rturb) de 99 ± 0,4% e pH médio final de 8,35, quando aplicados 20 volts e 20 segundos de tempo de inversão ao sistema de tratamento. As medições de pH das amostras em todos os ensaios seguiram padrões semelhantes, com uma média geral do pH = 6,39 para a amostra inicial e pH = 8,14 da amostra após a EC. Tal observação condiz com outros resultados encontrados na literatura, em que é observado um aumento gradativo no pH das amostras após ser submetida ao tratamento eletroquímico.

Observou-se que o aumento da tensão elétrica acelerou a dissolução dos eletrodos, resultando em uma maior liberação de íons metálicos, embora o teor de alumínio dissolvido no efluente permanecesse dentro dos limites regulamentares para descarte. Além disso, confirmou-se a viabilidade da reutilização dos eletrodos telados no tratamento de efluentes oleosos sintéticos.

Assim, os resultados obtidos com os eletrodos telados de alumínio, demonstram ser uma solução eficaz para o tratamento de efluentes oleosos, devido à maior interação entre o alumínio e a fluido promovida pelos furos na estrutura dos eletrodos, favorecendo o fluxo do efluente no sistema de EC. Cabe ressaltar que as conclusões desta pesquisa se baseiam na análise dos dados experimentais e representam tendências observadas durante o estudo. Dado o caráter dinâmico e evolutivo do conhecimento científico, essas conclusões devem servir como ponto de partida para pesquisas futuras.

PROPOSTAS E SUGESTÕES PARA TABALHOS FUTUROS

Para avançar na pesquisa usando os eletrodos telado de alumínio em processos de tratamento eletroquímico, gostaria de compartilhar algumas propostas e/ou sugestões para trabalhos futuros. Acredito que as ideias e o aperfeiçoamento destas podem vir a contribuir de maneira significativa para o avanço deste estudo e suas aplicações. A seguir, deixo algumas sugestões que considero relevantes e promissoras:

- Variar concentração de NaCl no efluente a ser tratado;
- Testar os eletrodos telados em diferentes distâncias;
- Testar o tratamento com os eletrodos telados para diferentes tipos de efluentes;
- Estudar mais a fundo o potencial de reuso dos eletrodos no tratamento de efluentes oleosos;

REFERÊNCIAS

ABDOLLAHI J., ALAVI MOGHADDAM M. R., HABIBZADEH S. The role of the current waveform in mitigating passivation and enhancing electrocoagulation performance: A critical review. **Chemosphere.** v.312, 2023.

ABUHASEL K., KCHAOU M., ALQURAISH M., MUNUSAMY Y., JENG Y. T. Oilywastewater treatment: Overview of conventional and modern methods, challenges, and future opportunities**. Water (Switzerland).** v. 13, nº 7, 2021.

AHMAD T., GURIA C., MANDAL A. A review of oily wastewater treatment using ultrafiltration membrane: A parametric study to enhance the membrane performance. **Journal of Water Process Engineering**. v. 36, n. 101289, 2020.

AKARSU, C., DEVECI, E.U., GÖNEN, Ç., MADENLI, Ö. Treatment of slaughterhouse wastewater by electrocoagulation and electroflotation as a combined process: process optimization through response surface methodology. **Environmental Science and Pollution Research.** v. 28, n. 26, p. 34473-34488, 2021.

AKKAYA G. K. Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: Optimization of operating parameters by RSM. **Chemical Engineering Research and Design.** v. 187, p. 261-275,2022.

ALJABERI F. Y., AHMED S. A., MAKKI H. F. Electrocoagulation treatment of high saline oily wastewater: evaluation and optimization**. Heliyon**. v. 6, n.6, 2020.

ALJUBOURY D., PALANIANDY P., ABDUL A. H., FEROZ S. Treatment of petroleum wastewater by conventional and new technologies-A review. **Global NEST Journal.** v. 19, Nº 3, p 439-452, 2017.

ALMEIDA A. J. Introdução ao delineamento de experimentos. Editora Edgar Blücher Ltda, 2ª edição, 2009.

AL-RAAD, A. A., HANAFIAH, M. M. Removal of inorganic pollutants using electrocoagulation technology: A review of emerging applications and mechanisms. **Journal of Environmental Management**. v. 300, 2021.

AL-RUBAIEY N. A., ALBRAZANJY M. G., KADHIM W. A. Combined electrocoagulation and photocatalytic for oily wastewater treatment using TiO2 nano-catalysts. **Egyptian Journal of Chemistry**. v.65, nº 7, p. 55-64, 2022.

ALVES, R. N., MARIZ, C. F., DE PAULO, D. V., CARVALHO, P. S.M. Toxicity of effluents from gasoline stations oil-water separators to early life stages of zebrafish Danio rerio. **Chemosphere.** V. 178, p. 224-230, 2017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard

methods for examination of water and wastewater. 23ª ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017
AN C., HUANG G., YAO Y., ZHAO S. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. **Science of the Total Environment.** v. 579, p. 537-556, 2017.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Cuidando das águas; soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos. **Agência Nacional de águas; Programa da Nações Unidas para o Meio Ambiente**. Brasília, 2011.

ANDREATTA D., SHONZA N.S., MUNIZ E.P., BACELOS M.S., DALMASCHIO C.J., PORTO P. S. S. Tangential effluent inlet in a cylindrical electrocoagulation reactor containing curved electrodes, and its use in crude oil in water treatment.
Environmental Technology. 2021. DOI: 10.1080/09593330.2021.1924866

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2023**, RJ: ANP, 2008- v.: gráf., tab. Anual. Disponível em <https://www.gov.br/anp e https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico> Acesso em 25/11/2023.

ASSIS A. H.C. Análise Ambiental e gestão de resíduos [livro eletrônico] 1ª ed. Curitiba. **Inter Saberes** – **Série química, meio ambiente e sociedade**, 2020. ISBN:978-65-5517-656-8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 10004** Resíduos sólidos – Classificação. Segunda ed., mai 2004.

AVANCINI D. O., PERINI M. E., PORTO, P. S. S. Electrocoagulation using perforated electrodes: An increase in metalworking fluid removal from wastewater. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**. v. 139, p. 113-120, 2019.

AZIZI D., ARIF A., BLAIR D., DIONNE J., FILION Y., OUARDA Y., PAZMINO A. G., PULICHARLA R., RILSTONE V., TIWARI B., VIGNALE L., BRAR S. K., CHAMPAGNE P., DROGUI P., LANGLOIS V. S., BLAIS J. F. A comprehensive review on current technologies for removal of endocrine disrupting chemicals from wastewaters. **Environmental Research**. v. 207, 2022.

BENER S., BULCA O., PALAS B., TEKIN G., ATALAY S., ERSOZ G. Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. **Process Safety and Environmental Protection610.** v. 129, p. 47–54, 2019.

BHATIA D., SHARMA N. R., SINGH J., KANWAR R. S. Biological methods for textile dye removal from wastewater: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology.** v. 47, nº 19, p. 1836-1876, 2017.

CAI Y., CHEN D., LI N., XU Q., LI H., HE J., LU J. Nanofibrous metal–organic framework composite membrane for selective efficient oil/water emulsion separation. **Journal of Membrane Science.** v.543, p. 10-17, 2017.

CETESB - SÃO PAULO. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo. 1° ed. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). São Paulo/SP. 2021. Disponível em < Relatorio-da-Qualidade-das-Aguas-Interiores-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf (cetesb.sp.gov.br) >acesso em 30/05/2023.

CHANGMAI, M., PASAWAN, M., PURKAIT, M. K. Treatment of oily wastewater from drilling site using electrocoagulation followed by microfiltration. **Separation and Purification Technology**. V. 210 p. 463-472, 2019.

CHAPRÃO M. J. Aplicação do biossurfactante de bacillus methylotrophicus ucp 1616 como coletor no tratamento de águas oleosas em processos de flotação. **Programa de Doutorado da Rede Nordeste de Biotecnologia.** Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Doutorado em Biotecnologia – Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO). Recife, 2020.

CHEN G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**. v.38, n. 1, p. 11-41, 2004.

CHEN X., CHEN G., YUE P. L. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. **Chemical Engineering Science**. v. 57, n. 13, p. 2449-2455, 2002.

CHEN X., REN P., LI T., TREMBLY J. P., LIU X. Zinc removal from model wastewater by electrocoagulation: Processing, kinetics and mechanism. **Chemical Engineering Journal** v. 349, p. 358–367, 2018.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução no 357**, 17 de março de 2005. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2005.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução no 430**, 13 de maio de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2011.

CORRAL-BOBADILLA M., GONZÁLEZ M. A., ALBA E. F., DIEZ S. D. E. Valorization of bio-waste for the removal of aluminum from industrial wastewater. **Journal of Cleaner Production.** v. 264, 2020.

CRESPILHO F. N., SANTANA C. G., REZENDE M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, p. 387-392, 2004.

D'ALMEIDA, A. L. Indústria do petróleo no Brasil e no mundo: formação, desenvolvimento e ambiência atual. São Paulo: ed. Blücher, 2015.

DAS P. P., SHARMA M., PURKAIT M. K. Electrochemical treatment of orange II dye solution-Use of aluminum sacrificial electrodes and floc characterization. **Journal of Hazardous Materials.** v. 174, p. 851-858, 2022.

DEHGHANI Y., HONARVAR B., AZDARPOUR A., NABIPOUR M. Pilot-scale experiments on a hybrid membrane-electrocoagulation system to produced water treatment in a domestic oil. **Water Practice and Technology.** V. 16, p. 210-225, 2021.

DEMIRBAS E., KOBYA M. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety and Environmental Protection**. v.105, p. 79-90, 2017.

DEVLIN T. R., KOWALSKI M. S., PAGADUAN E., ZHANG X., WEI V., OLESZKIEWICZ J. A. Electrocoagulation of wastewater using aluminum, iron, and magnesium electrodes. **Journal of Hazardous Materials**. v. 368, p. 862-868, 2019.

DIAS, O. A.; MUNIZ, E. P.; PORTO, P. S. da S. Electrocoagulation using perforated electrodes: An increase in metalworking fluid removal from wastewater. **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, v. 139, p. 113–120, 2019.

DRUSKOVIC M., VOUK D., POSAVCIC H., HALKIJEVIC I., NAD K. The application of electrochemical processes in oily wastewater treatment: a review. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering.** 2021.

EDZWALD, J.K. - Principles and Applications of Dissolved Air Flotation. In: **Water Science and Technology**. v. 31, p. 1-23, 1995.

ELIA S., STYLIANOU M., AGAPIOU A. Combined EC/EO processes for treating goat cheese whey wastewater. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**. v. 32, 2023.

ERYURUK K., TEZCAN U., BAKIR O. U. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. **Journal of Environmental Management.** v. 186, p. 24-41, 2017.

ERYURUK K., TEZCAN U., BAKIR O. U. A. Electrochemical treatment of wastewaters from poultry slaughtering and processing by using iron electrodes. **Journal of Cleaner Production.** v. 179 p. 1089-1095, 2018.

FAVERO A. C., FAVERO B. M., SOUZA F. S., TAFFAREL S. R. Treatment of re-refining effluent from lubricating oils by combining electrocoagulation and coagulation-flocculation processes. **Journal of Environmental Science and Health - Part A.** v. 55, nº 4, p. 402-410, 2020.

FRANZOL A. e REZENDE C. M. Emulsion stability: a case study involving anionic, cationic and nonionic emulsifiers. Instituto de Ciência e Tecnologia – ICT, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP. São José dos Campos - SP, Brasil. **Polímeros**. V. 25, p. 1-9, 2015.

GARCIA-SEGURA S., EIBAND M. M. S. G., DE MELO J. V., MARTÍNEZ-HUITLE C. A. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. **Journal of Electroanalytical Chemistry**. v. 801, p. 267–299, 2017.

GENAWI, N. M., IBRAHIM, M. H., EL-NAAS, M. H., ALSHAIK, A. E. Chromium removal from tannery wastewater by electrocoagulation: Optimization and sludge. **Water (Switzerland).** v. 12, n.5, 2020.

GILPAVAS, E., DOBROSZ G. I., GÓMEZ-GARCÍA M. Á. Optimization and toxicity assessment of a combined electrocoagulation, H2O2/Fe2+/UV and activated carbon adsorption for textile wastewater treatment. **Science of the Total Environment**. V. 651, p. 551-560, 2019.

GOBBI, L. C. A., NASCIMENTO, I. L., MUNIZ, E. P., ROCHA, S. M.S., PORTO, P. S.S. Electrocoagulation with polarity switch for fast oil removal from oil in water emulsions. **Journal of Environmental Management**, v. 213, p. 119–125, 2018.

GODOI, L. D. Química do petróleo e seus derivados [livro eletrônico]. 1ª edição. Curitiba: Inter Saberes, 2022.

HAMIDI Y., ATAEI S. A., SARRAFI A. A highly efficient method with low energy and water consumption in biodegradation of total petroleum hydrocarbons of oily sludge. **Journal of Environmental Management.** v. 293, 2021.

HOCHBERG S. Y., TANSEL, B., LAHA, S. Materials and energy recovery from oily sludges removed from crude oil storage tanks (tank bottoms): A review of technologies. **Journal of Environmental Management.** v.305, n. 114428, Jan 2022.

HU, G., FENG, H., HE, P., LI, J., HEWAGE, K., SADIQ, R. Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches. **Journal of Cleaner Production.** v.251, 2020.

HUSSAIN K. B., SURYA L. A., RAMADEVI L., AJAY R. A., KING P., VANGALAPATI M. Sodium Lauryl Sulphate removal using copper electrodes without and with perforations by electro coagulation process. **Materials Today: Proceedings**. v.59, p. 655-660, 2022.

HUSSIN F., ABNISA F., ISSABAYEVA G., AROUA K. M. Removal of lead by solar-photovoltaic electrocoagulation using novel perforated zinc electrode. **Journal of Cleaner Production.** v.147, p. 206-216, Jan 2017.

IBP - INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS Diretrizes para o Licenciamento Ambiental de Atividades de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Áreas Terrestres – REATE 2020 **/ Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás** – Rio de Janeiro: IBP, 2020.

IBRAHIM M. H., MOUSSA D. T., EL-NAAS M. H., NASSER M. S. A perforated electrode design for passivation reduction during the electrochemical treatment of produced water. **Journal of Water Process Engineering**. v. 33, 2020.

INGELSSON M., YASRI N., ROBERTS E. P. L. Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electrocoagulation - a review. **Water Research**. V.187, 2020.

ISLAM S. M. D. U. Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatment and pollutants removal. **Sustainable Water Resources Management**. v. 5, p. 359-380, 2019.

JAMOVI. (Version 2.3) [Computer Software]. The jamovi project (2022). Retrieved from https://www.jamovi.org.

JEBUR M., CHIAO Y.H., THOMAS K., PATRA T., CAO Y., LEE K., GLEASON N., QIAN X., HU Y., MALMALI M. Combined electrocoagulation-microfiltration-membrane distillation for treatment of hydraulic fracturing produced. **Desalination.** V.500, 2021.

JIANG W. M., CHEN Y. M., LIU Y., 2019. Performance investigation of an electrocoagulation reactor with electrodes' polarity crossly oriented in emulsified oil separation. **Energy and Fuels.** V. 33, n.9, p.9014-9022, 2019.

KADIER A., AL-QODAH Z., AKKAYA G. K., SONG D., PERALTA-HERNÁNDEZ J. M., WANG J. Y., PHALAKORNKULE C., BAJPAI M., NIZA N. M., GILHOTRA V., BOTE M. E., MA Q., OBI C. C., IGWEGBE C. A. A state-of-the-art review on electrocoagulation (EC): An efficient, emerging, and green technology for oil elimination from oil and gas industrial wastewater streams. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**. v.6, 2022.

KANZARI F., SYAKTI A. D., ASIA L., MALLERET L., PIRAM A., MILLE G., DOUMENQ P. Distributions and sources of persistent organic pollutants (aliphatic hydrocarbons, PAHs, PCBs and pesticides) in surface sediments of an industrialized urban river (Huveaune), France. **Science of the Total Environment**. v. 478, p. 141-151, 2014.

KHALIFA O., BANAT F., SRINIVASAKANNAN C., ALMARZOOQI F., HASAN S. W. Ozonation-assisted electro-membrane hybrid reactor for oily wastewater treatment: A methodological approach and synergy effects. **Journal of Cleaner Production.** v. 289, 2021.

KILANY, A. Y., NOSIER, S. A., HUSSEIN, M., ABDEL-AZIZ, M. H., SEDAHMED, G. H. Combined oil demulsification and copper removal from copper plating plant effluents by electrocoagulation in a new cell design. **Separation and Purification Technology**. v. 248, 2020.

KUMARI., KUMAR R. N. River water treatment using electrocoagulation for removal of acetaminophen and natural organic matter. **Chemosphere.** v. 273, 2021.

LI J., LIN F., LI K., ZHENG F., YAN B., CHE L., TIAN W., CHEN G., YOSHIKAWA K. A critical review on energy recovery and non-hazardous disposal of oily sludge from petroleum industry by pyrolysis. **Journal of Hazardous Materials**. v. 406, 2021.

LIU F., ZHANG Z., WANG, Z., LI X., DAI X., WANG L., WANG X., YUAN Z., ZHANG J., CHEN M., WANG S. Experimental study on treatment of tertiary oil recovery wastewater by electrocoagulation. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification.** V.144, 2019.

LIU Y., LU H., LI Y., XU H., PAN Z., DAI P., WANG H., YANG Q. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. **Science of the Total Environment.** v. 775, jan 2021.

LU J., ZHANG, P., LI, J. Electrocoagulation technology for water purification: An update review on reactor design and some newly concerned pollutants removal. **Journal of Environmental Management**. v. 296, 2021.

MADHAVAN M. A., ANTONY S. P. Effect of polarity shift on the performance of electrocoagulation process for the treatment of produced water. **Chemosphere**. v. 263, 2021.

MANILAL A. M., SOLOMAN P. A., BASHA C. A. Removal of Oil and Grease from Produced Water Using Electrocoagulation**. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**. v.24, 2020.

MAZUMDER A., CHOWDHURY Z., SEN D., BHATTACHARJEE C. Electric field assisted membrane separation for oily wastewater with a novel and cost-effective electrocoagulation and electroflotation enhanced membrane module (ECEFMM). **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification.** v. 151, 2020.

MEDEIROS A.D.M., SILVA JUNIOR C.J.G., AMORIM J.D.P., DURVAL I.J.B., COSTA A.F. S., SARUBBO L.A. Oily Wastewater Treatment: Methods, Challenges, and Trends. **Processes**. v. 10, 2022.

MERMA A.G., SANTOS B. F., REGO A. S. C., HACHA R. R., TOREM M. L. Treatment of oily wastewater from mining industry using electrocoagulation: Fundamentals and process optimization. **Journal of Materials Research and Technology.** V.9, n.6, p.15164-15176, 2020.

MOLLAH M.Y., SCHENNACH R., PARGA J.R., COCKE D. L. Electrocoagulation (EC) science and applications. **Journal of Hazardous Materials**. v. 84, p. 29-41, 2010.

MOUSSA, D.T., EL-NAAS, M.H., NASSER, M., AL-MARRI, M.J. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. J. **Environmental Management**. v. 186, p.24 – 41, 2017.

NASCIMENTO B. Z., MUNIZ E. P., COTTA A. J. B., OLIVEIRA F. D. O., PORTO P. S. S. Oily wastewater treatment by a continuous flow electrocoagulation reactor with polarity

switch: Assessment of the relation between process variables and the aluminum released to the environment. **Journal of Environmental Management.** v. 347, 2023.

NASSAR S.O.A., YUSOFF M.S., HALIM H., MOKHTAR KAMAL N.H., BASHIR M.J.K., MANAN T.S.B.A., AZIZ H.A. MOJIRI A. Ultrasonic (US)-Assisted Electrocoagulation (EC) Process for Oil and Grease (O&G) Removal from Restaurant Wastewater. **Separations.** v. 10, p. 61, 2023.

ORSSATTO F., HERMES E., VILAS BOAS M. A. Eficiência de remoção de óleos e graxas de uma estação de tratamento de esgoto sanitário, Cascavel-Paraná. **Engenharia Ambiental Espírito Santo do Pinhal**. v. 7, n. 4, p. 249-256, out. /dez. 2010.

OUSLIMANE T., AOUDJ S., AMARA M., DROUICHE N. Removal of Copper and Fluoride from Mixed Cu-CMP and Fluoride-Bearing Wastewaters by Electrocoagulation. **International Journal of Environmental Research.** v. 11. p. 677-684, nov 2017.

PI K. W., XIAO Q., ZHANG H. Q., XIA M., GERSON A. R. Decolorization of synthetic Methyl Orange wastewater by electrocoagulation with periodic reversal of electrodes and optimization by RSM. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 92, n.6, p. 796-806, 2014.

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos. **Lei nº 9433 de 08 de janeiro de 1997**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2010.

PREETHI V., RAMESH S. T., GANDHIMATHI R., NIDHEESH P. V. Optimization of batch electrocoagulation process using Box-Behnken experimental design for the treatment of crude vegetable oil refinery wastewater. **Journal of Dispersion Science and Technology**. v. 41, p. 592-599, 2020.

ROMAN F., DÍAZ T. J. L., SILVA A., FARIA J. L., GOMES H. Águas oleosas contaminadas: ameaças, tratamentos e desafios. **Química: Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**. ISSN 0870-1180. v. 45:162, p. 216-224, 2021.

SAHU O., MAZUMDAR B., CHAUDHARI P. K. Treatment of Wastewater by Electrocoagulation: A Review. **Environmental Science and Pollution Research.** v. 21 n. 4, p. 2397-2413, 2014.

SAKAN S., OSTOJIC B., DORDEVIC D. Persistent organic pollutants (POPs) in sediments from river and artificial lakes in Serbia. **Journal of Geochemical Exploration**. V.180, p. 91-100, 2017.

SARAVANAN A, SENTHIL K., P., JEEVANANTHAM, S, KARISHMA, S., TAJSABREEN, B., YAASHIKAA, P. R., RESHMA, B. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. **Chemosphere**. vol. 280, abr 2021.

SATHYA K., NAGARAJAN K., CARLIN G. M. G., RAJALAKSHMI S., RAJA L. P. A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern

methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. **Applied Water Science.** v.12, nº 4, 2022.

SCHONS E. M. Desestabilização de emulsões visando a redução do teor de óleo em água. **Dissertação (mestrado).** Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Ouro Preto – MG. dez de 2008.

SHAHEDI, A., DARBAN, A. K, TAGHIPOUR, F., JAMSHIDI-ZANJANI, A. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. **Current Opinion in Electrochemistry**. v.22, p. 154-169, 2020.

SHER F., IQBAL S. Z., RASHEED T. HANIF K., SULEJMANOVIĆ J., SULEJMANOVIĆ J., LIMA E. C. Coupling of electrocoagulation and powder activated carbon for the treatment of sustainable wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 28, nº35, p. 48505-48516, 2021.

SHOKRI A., FARD M. S. A critical review in electrocoagulation technology applied for oil removal in industrial wastewater. **Chemosphere**. vol. 288.p 132355. Set 2022.

SHONZA N. S., ANDREATTA D., MUNIZ E. P., DALMASCHIO C. J., FREITAS R. R., PORTO P. S. DA S. Crude oil wastewater treatment by electrocoagulation in a continuous process with polarity switch. **Environmental Technology**, DOI: 10.1080/09593330.2020.1847205, nov. 2020.

SINGARE P. U. Studies on polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Mithi River near Mumbai, India: Assessment of sources, toxicity risk and biological impact. **Marine Pollution Bulletin**. v.101, p. 232-242, 2015.

SINGARE P. U., SHIRODKAR J. P. Distribution and fate of PAHs contaminants deposited in the sediments of North-Western Creeks adjoining the Arabian sea of Mumbai, India: Implications for monitoring. **Environmental Forensics**. v. 24, p. 146-163, 2023.

SINGH P., BERAWALA N., PATIL Y. Automobile service station waste assessment and promising biological treatment alternatives: a review. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 194, 2022.

SOLAYMAN H. M., HOSSEN, M. A., ABD A. A., YAHYA N. Y., LEONG K. H., SIM L. C., MONIR M. U., ZOH K. D. Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. v.11, 2023.

SONG P., YANG Z., ZENG G., YANG X., XU H., WANG L., XU R., XIONG W., AHMAD K. Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review. **Chemical Engineering Journal** vol.307, p 707-725, 2017.

SOUZA J. E. S. Utilização de resíduo industrial de poliamida para obtenção de membranas aplicadas no tratamento de emulsões oleosas. **Dissertação (mestrado).** Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia. Campina Grande -PB. Fev de 2022.

SOUZA K. R. Estudo da remoção de Ba2+, Ni2+, Cd2+, Cu3+, Cr3+, Sr2+, Zn2+ por eletrocoagulação em água associada à produção de petróleo. Natal,2012. **Tese (Doutorado).** Programa de pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Química. Natal, 30 mar., 2012.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 1022, 1996.

TEXACO LUBRIFICANTES. Havoline Semissintético API SL SAE 15W-40 – **Ficha técnica**. Disponível em < Hav-Semissint-15W40-SL_1ago2018_PT.pdf (texaco.com.br)> Acesso em 16/06/2022.

ULUCAN K., KURT, U. Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach. **Journal of Electroanalytical Chemistry.** v. 747 p. 104-111, 2015.

VASUDEVAN S., LAKSHMI J., SOZHAN, G. Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water. **Journal of Hazardous Materials**. V. 192, n. 1, p. 26-34, 2011.

WANG L., ZHANG B., ZHAO B., YANG S., WU K., SUN J., HU C. Demulsification performance and mechanism of oil droplets by electrocoagulation: Role of surfactant. **Journal of Environmental Sciences**. V. 118, p. 171-180, 2022.

ZHAO, C., ZHOU, J., YAN, Y., YANG, L., XING, G., LI, H., WU, P., WANG, M., ZHENG, H. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review. **Science of the Total Environment**. v.765, 2021.

ZINI, L. P., LONGHI M., JONKO E., GIOVANELA, M. Treatment of automotive industry wastewater by electrocoagulation using commercial aluminum electrodes. **Process Safety and Environmental Protection.** v.142 p. 272-284, jun 2020.

ZNUBI GRELHAS & CIA. Tela de alumínio expandido. Disponível em < https://www.znubigrelhas.com.br/Tela50x100Tuning> Acesso em 01 de julho de 2022.

APÊNDICE A – LEITURAS DAS ABSORBÂNCIAS

Os valores de absorbância representam a capacidade que as partículas têm em absorver a luz, indicando a concentração dos contaminantes. Na Tabela 14 estão organizados os valores de absorbância para o tempo inicial e final das alíquotas (0 e 30 minutos), permitindo uma comparação dos resultados.

Tabela 14 - Valores das absorbâncias para a amostra do tempo inicial e final da eletrocoagulação

Ensaio	Variável de investigação	Absorbância C0	Absorbância C30	RTOG %
1	10V e 10 seg.	0,1338	0,0685	48,8
2	10V e 20 seg.	0,1867	0,0236	87,4
3	10V e 30 seg.	0,2695	0,0572	78,8
4	15 V e 10 seg.	0,1444	0,0243	83,2
5	15 V e 20 seg.	0,0904	0,0155	82,8
6	15 V e 20 seg.	0,2510	0,0530	78,9
7	15 V e 20 seg.	0,1284	0,0153	88,1
8	15 V e 30 seg.	0,2339	0,0119	94,9
9	20 V e 10 seg.	0,1421	0,0112	92,1
10	20V e 20 seg.	0,3180	0,0055	98,3
11	20 V e 30 seg.	0,2548	0,084	96,7
Réplicas				
2	10V e 20 seg.	0,2279	0,0128	94,4
4	15V e 10 seg.	0,0635	0,0064	89,9
10	20 V e 20 seg.	0,2243	0,0109	95,2
11	20V e 30 seg.	0,2378	0,0352	85,2
Reusos				
1º reuso	20 V e 20 seg	0,1694	0,0165	90,2
2º reuso	20 V e 20 seg	0,1522	0,0232	84,5

C0: Concentração inicial; C30: Concentração final; PC: Ponto central. Fonte: O autor

APÊNDICE B – VARIAÇÃO DO pH

Durante o processo de eletrocoagulação, ocorrem várias reações químicas que podem influenciar o pH da amostra. Os valores de pH observados nos ensaios realizados, para as amostras dos tempos 0, 5, 10, 20 e 30 minutos estão descritos na Tabela 15.

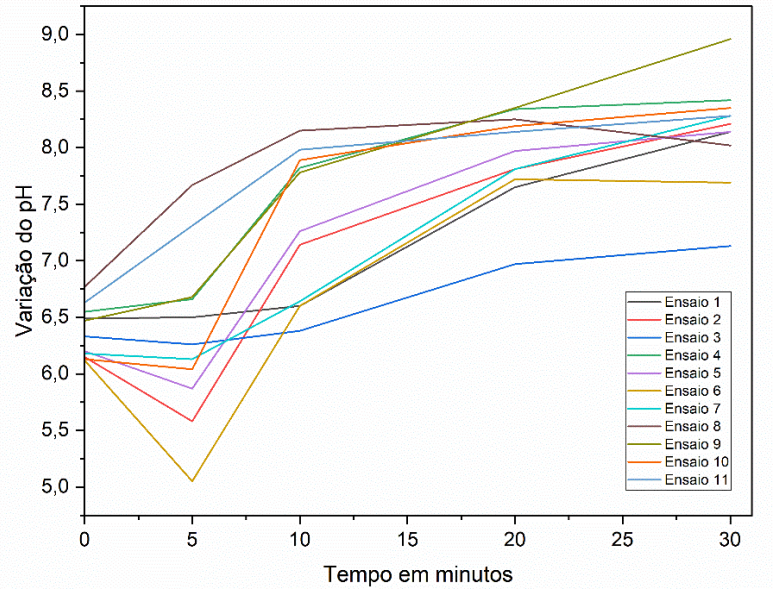
Tabela 15 - Leitura do pH das amostras nos tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 minutos

	pH										
Ensaio / Tempo(s)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
0	6,49	6,15	6,33	6,55	6,20	6,12	6,18	6,77	6,47	6,13	6,63
5	6,50	6,58	6,26	6,66	5,87	5,05	6,13	7,67	6,68	6,04	7,31
10	6,60	7,14	6,38	7,82	7,26	6,60	6,64	8,15	7,78	7,89	7,98
20	7,65	7,81	6,97	8,34	7,97	7,72	7,81	8,25	8,35	8,19	8,14
30	8,14	8,21	7,13	8,42	8,14	7,69	8,28	8,02	8,96	8,35	8,28

Fonte: O autor

No gráfico (Figura 25) é possível observar o aumento gradativo no pH da amostra em relação à amostra inicial e sem tratamento em todos os experimentos realizados para esta pesquisa.

Figura 25 - Variação do pH nos tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 minutos durante o processo de eletrocoagulação



Fonte: O autor

APÊNDICE C – VARIAÇÃO DA TURBIDEZ

Na Tabela 16 são apresentados os valores de turbidez observados nos ensaios realizados. Devido a presença de substâncias ou partículas na mistura a turbidez pode ser afetada, apresentando resultados diferentes a depender da presença de material floculado.

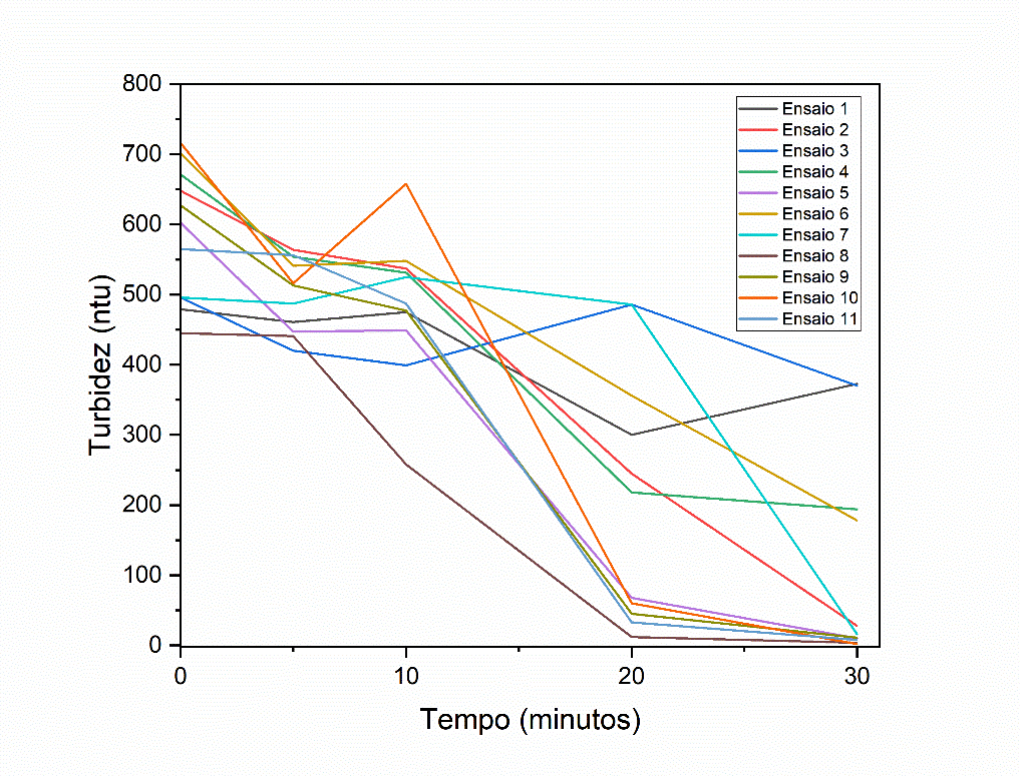
Tabela 16 - Variação da turbidez nos tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 minutos de Eletrocoagulação

	Turbidez (ntu)										
Ensaio / Tempo(s)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
0	479	648	496	671	602	701	496	445	627	716	565
5	461	564	420	554	447	541	487	441	513	516	556
10	475	537	399	531	449	548	525	258	477	658	487
20	300	245	486	218	68	356	486	12	45	60	33
30	373	28	370	194	10	178	16	4	11	2	8

Fonte: O autor

No gráfico da Figura 26 são apresentadas as variações da turbidez (ntu) no decorrer do tempo de tratamento por EC. A turbidez inicial é maior para o efluente oleoso sintético antes de ser submetido ao processo eletroquímico e tende a diminuir conforme o tempo de tratamento avança e a formação de flocos coagulantes é maior.

Figura 26 - Variação da turbidez nos tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 minutos durante o processo de eletrocoagulação



Fonte: O autor

APÊNDICE D – TABELA COM AS VARIAÇÕES DA TENSÃO, CORRENTE, TEMPERATURA E CONSUMO ELÉTRICO

Tabela 17 - Média dos registros da tensão, corrente e temperaturas registradas via Arduino e o consumo de energia de cada ensaio

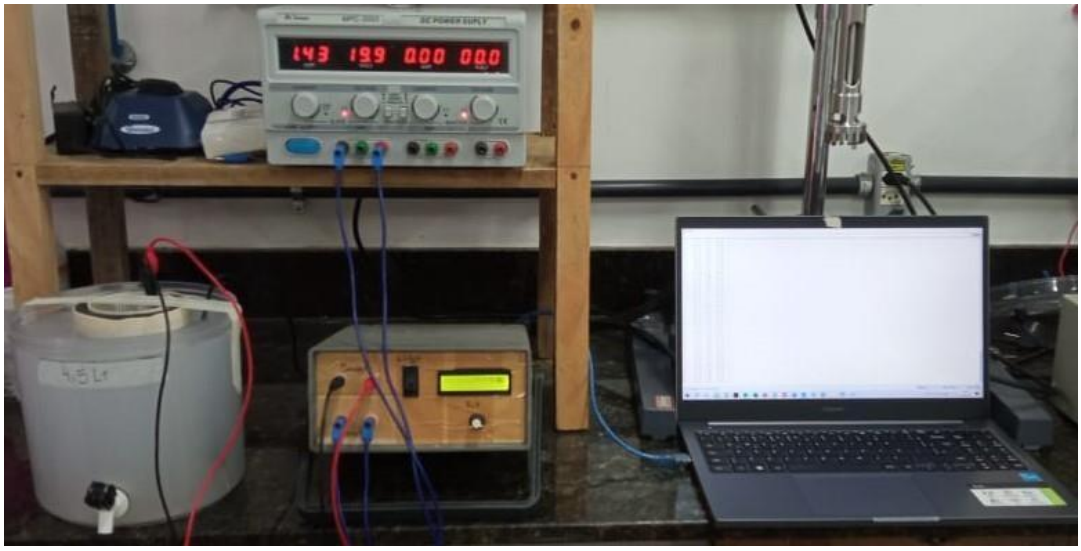
Ensaio	Variável de investigação	Tensão registrada (volts)	Corrente registrada (A)	Temperaturas registradas (ºC)	$C_{energia}$ KW.h/m³
1	10V e 10 segs.	11,29	0,34	26,93	0,43
2	10V e 20 segs.	11,69	0,21	22,85	0,22
3	10V e 30 segs.	11,23	0,32	26,20	0,39
4	15 V e 10 seg.	16,48	0,38	22,72	0,69
5	15 V e 20 segs.	16,37	0,70	22,75	1,26
6	15 V e 20 segs.	16,29	0,74	26,81	1,34
7	15 V e 20 segs.	16,48	0,64	24,79	1,17
8	15 V e 30 segs.	16,20	0,63	26,13	1,14
9	20 V e 10 seg.	20,87	0,83	26,54	1,92
10	20V e 20 segs.	21,42	0,70	21,88	1,66
11	20 V e 30 segs.	21,25	0,97	25,13	2,29
Réplicas					
2	10V e 20 segs.	11,04	0,26	27,17	0,25
4	15V e 10 seg.	16,09	0,50	25,98	0,90
10	20 V e 20 segs.	20,98	0,96	25,28	2,23
11	20V e 30 segs.	21,27	0,77	23,04	1,79
Reusos					
1º reuso	20 V e 20 segs	21,42	0,75	21,83	1,77
2º reuso	20 V e 20 segs	21,62	0,75	22,78	1,92

Fonte: O autor

APÊNDICE E – BANCADA DE ELETROCOAGULAÇÃO

Na imagem (Figura 27) é apresentada uma foto do sistema de EC durante um ensaio eletroquímico.

Figura 27 - Montagem do sistema de Eletrocoagulação batelada em escala de bancada usados para os ensaios com os eletrodos de alumínio telado



Fonte: O autor

ANEXO I

agrolab
ANÁLISES E CONTROLE DE QUALIDADE

Relatório de Ensaio 35889/2023.0

Proposta Comercial: PC2744/2023.1

ID da Amostra: 205932 - 35889-1/2023.0 - Amostra de Efluente após Tratamento por Eletrocoagulação	
Tipo de Amostra: Água Salina	
Data de Coleta: 31/08/2023 07:20	**Data de Recebimento:** 31/08/2023 14:55
Plano de Amostragem: Amostragem de responsabilidade do cliente. Os resultados se aplicam à amostra conforme recebida.	**Temperatura Ambiente:** Não Informado °C
Local de Amostragem: Laboratório - Após Tratamento Eletroquímico	**Responsabilidade da Amostragem:** Cliente
Observação de Coleta: Efluente oleoso sintético com óleo emulsionado.	

Resultados Analíticos

Físico-Química

Análise	Resultado	Espec. 1	LQ	Incerteza	Referência	Data de Análise
Alumínio Dissolvido	< 0,020 mg/L	≤ 1,5 mg/L	0,020	-	SMWW, 23ª ed., Método 3500-Al B	31/08/2023

Especificações

Espec.1: Resolução CONAMA N° 357, de 18/03/2005, Artigo 18 - Água Salina, Classe I.

Interpretação

A presente amostra ATENDE, conforme parâmetros analisados, aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357, de 18/03/2005, Artigo 18.

Informações Fornecidas pelo Cliente

Temperatura: em torno de 23°C
pH: em torno de 7,6
Cloro Residual Livre: Ausente
Cloro Residual Total: Ausente
Materiais Flutuantes: Ausência
Óleos e Graxas Visíveis: Presença
Corantes Artificiais: Ausência
Residuos Sólidos Objetáveis: Ausência

agrolab
ANÁLISES E CONTROLE DE QUALIDADE

Relatório de Ensaio 35889/2023.0

Proposta Comercial: PC2744/2023.1

Legenda e Notas

mg/L: miligrama por litro;
LQ: limite de quantificação;
Espec.: especificação para declaração de conformidade da amostra;
Os resultados apresentados referem-se somente ao item amostrado e/ou analisado.
A incerteza é baseada na incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência (K=2), para um nível de confiança de 95%.

Métodos para amostragem:
Águas (AMT-PP-002); Alimentos (AMT-PP-011); Swab de equipamento, utensílio e manipulador (AMT-PP-009); Solos, Lodos, Sedimentos e Resíduos Sólidos (AMT-PP-002).
Quando a amostragem é de responsabilidade do cliente, a Agrolab se responsabiliza pelos resultados de ensaios a partir do recebimento das amostras no laboratório.

Declaração de conformidade:
Quando solicitado a declaração de conformidade da amostra à uma especificação ou norma e a incerteza de medição para qualquer resultado afetar a sua conformidade, o próprio cliente é responsável pela decisão a ser tomada, considerando o nível de risco de sua decisão. A Agrolab reserva-se apenas no direito de interpretar o resultado da amostra com base na especificação ou norma solicitada pelo cliente sem levar em conta o resultado da incerteza de medição, para não fazer julgamento que resulte em prejuízos de qualquer natureza em função de uma decisão baseada num resultado falso-positivo ou falso-negativo.

Relato de opiniões e interpretações:
As opiniões e interpretações expressas neste Relatório não fazem parte do escopo da acreditação desse laboratório.
Opiniões e interpretações no relatório de ensaio serão baseadas nos resultados obtidos exclusivamente a partir da amostra analisada.
O relatório de ensaio não pode ser reproduzido sem a aprovação da Agrolab, exceto se for reproduzido na íntegra.

Responsável pela aprovação: Bernardete Montovanelli Dalmaso.

Jéssica Tessinari

Jéssica Holz Tessinari
Responsável Emissão

Lúcia Helena de Freitas
Responsável Técnico
CRQ 21300136 - AFT 1302/19

Chave de Validação: ca0cb0a088c34c9c949e2585daf47fea

A validação deste documento pode ser realizada em: portal.mylimsweb.cloud.