

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

**VICTOR DE BARCELLOS TESOLINI**

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DE UM REATOR DE  
ELETROFLOCULAÇÃO EM BATELADA NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTE À BASE DE TINTA PARA ESTRUTURAS METÁLICAS**

**SÃO MATEUS**

**2022**

**VICTOR DE BARCELLOS TESOLINI**

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DE UM REATOR DE  
ELETROFLOCULAÇÃO EM BATELADA NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTE À BASE DE TINTA PARA ESTRUTURAS METÁLICAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto.

Co-orientador: Prof. Dr. Flávio Duarte Couto de Oliveira.

**SÃO MATEUS**

**2022**

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

---

D278a de Barcellos Tesolini, Victor, 1986-  
ANÁLISE DA PERFORMANCE DE UM REATOR DE ELETROFLOCULAÇÃO EM BATELADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE À BASE DE TINTA PARA ESTRUTURAS METÁLICAS / Victor de Barcellos Tesolini. - 2022.  
96 f. : il.

Orientador: .  
Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. eletrocoagulação. 2. pigmento de blindagem. 3. efluente sintético. 4. eficiência energética. I. , . II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

---

VICTOR DE BARCELLOS TESOLINI

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DE UM REATOR DE  
ELETROFLOCULAÇÃO EM BATELADA NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTE À BASE DE TINTA PARA ESTRUTURAS METÁLICAS**

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 07 de março de 2022.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof(a). Dr(a). Paulo Sérgio da Silva  
Porto  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador(a)**

---

**Prof(a). Dr(a). Flavio Duarte Couto  
Oliveira  
Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof(a). Dr(a). Eduardo Perini Muniz  
Universidade Federal do Espírito Santo**

 Documento assinado digitalmente  
FABIO BENTES FREIRE  
Data: 23/05/2022 17:12:41-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

---

**Prof(a). Dr(a). Fabio Bentes Freire  
Universidade Federal de São Carlos**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
PAULO SERGIO DA SILVA PORTO - SIAPE 1545509  
Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES  
Em 12/05/2022 às 11:01

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/471768?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
EDUARDO PERINI MUNIZ - SIAPE 2421384  
Departamento de Ciências Naturais - DCN/CEUNES  
Em 12/05/2022 às 11:20

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/471803?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
FLÁVIO DUARTE COUTO OLIVEIRA - SIAPE 2478079  
Departamento de Computação e Eletrônica - DCE/CEUNES  
Em 12/05/2022 às 14:27

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/472052?tipoArquivo=O>

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente ao ser superior maior Jesus, pela oportunidade de aqui estar e com saúde ajudando o desenvolvimento científico da humanidade.

Aos meus pais, minha irmã, meus sobrinhos e meu cunhado, pela compreensão, amor, carinho, incentivo. Obrigado por acreditar em mim, e no meu potencial. Amo vocês incondicionalmente.

Agradeço também a minha família e amigos, por sempre me apoiarem nas minhas decisões, alguns se esforçaram demais para a minha conquista até aqui.

Gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto e ao meu co-orientador Prof. Dr. Flávio Duarte Couto de Oliveira por toda cordialidade em sempre querer ajudar e contribuir para o meu aprendizado. Agradecer por todos os ensinamentos, paciência e dedicação. Obrigado pelas palavras de coragem que vocês nos passam para que possamos seguir o caminho da vitória.

Agradeço a todos os envolvidos com as dependências da Universidade. Por estar disposto a nos ajudar até nas horas das dificuldades enfrentadas. Aos técnicos dos laboratórios que sempre estão predispostos em nos ajudar a chegar nas melhores conclusões para nossos trabalhos com a melhor compreensão e receptividade.

À Universidade Federal do Espírito Santo por todo aprendizado teórico e prático disponível a seus alunos, para o desenvolvimento do nosso trabalho.

Ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Nas indústrias metalmeccânica e na construção civil, volumes de efluente a base de tintas, aplicadas em acabamentos metálicos, são gerados expressivamente. O descarte indevido ou sem tratamento adequado deste efluente sugere o estudo de técnicas que possam requerer uma unidade de tratamento compacta e uma relação custo-benefício satisfatória. Existem poucos estudos da aplicação de eletrofloculação (EF) na remoção de tinta dissolvida em água. Como a EF é considerada uma técnica promissora, esta proposta visa desenvolver um sistema compacto composto por: reator eletrolítico cilíndrico, fonte alternada, inversor de polaridade, eletrodos retangulares e sensores. O objetivo deste trabalho é investigar as melhores condições operacionais do sistema de eletrofloculação, em batelada, no tratamento de um efluente sintético produzidos a partir da mistura de tinta, água destilada e sal. Nos experimentos utiliza-se uma concentração de  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ , volume operacional de 3,5 L e um tempo de residência de 30 minutos. Na busca das melhores condições operacionais, estuda-se a influência das variáveis de interesse como tempo de inversão de polaridade e distância entre eletrodos nas variáveis resposta percentuais de remoção de tinta, turbidez e DQO, a variação de pH e temperatura, a condutividade, o consumo de eletrodos e o custo energético. Durante os experimentos, monitora-se a temperatura, a intensidade de corrente e a tensão para informar possíveis variações existentes. Este conjunto de dados fornecem informações para estimar o consumo de energia e possível viabilidade operacional. Construção, montagem do sistema operacional e obtenção dos resultados experimentais fornecem o entendimento das condições satisfatórias quanto ao percentual de remoção de tinta em atendimento aos padrões estabelecidos pelas legislações ambientais vigentes.

**Palavras-chave:** Pigmento de blindagem. Efluente Sintético. Eletrocoagulação. Eficiência Energética.

## ABSTRACT

In the metal-mechanic and civil construction industries, volumes of effluent based on paints, applied in metallic finishes, are significantly generated. The improper disposal or without adequate treatment of this effluent suggests the study of techniques that may require a compact treatment unit and a satisfactory cost-benefit ratio. There are few studies on the application of electroflocculation (EF) in the removal of ink dissolved in water. As EF is considered a promising technique, this proposal aims to develop a compact system composed of a cylindrical electrolytic reactor, alternating source, polarity inverter, rectangular electrodes, and sensors. The objective of this work is to investigate the best-operating conditions of the electroflocculation system, in batch, in the treatment of a synthetic effluent produced from the mixture of paint, distilled water, and salt. In the experiments, a concentration of  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ , an operating volume of 3.5 L, and a residence time of 30 minutes are used. In the search for the best-operating conditions, the influence of variables of interest such as polarity inversion time and distance between electrodes on the percentage response of ink removal, turbidity and COD, pH and temperature variation, conductivity, electrode consumption, and energy cost. During the experiments, temperature, current intensity, and voltage are monitored to inform possible existing variations. This dataset provides information to estimate energy consumption and possible operational viability. Construction, assembly of the operating system, and obtaining of experimental results provide an understanding of satisfactory conditions regarding the percentage of paint removal in compliance with the standards established by current environmental legislation.

**Keywords:** Shielding pigment. Synthetic effluent. Electrocoagulation. Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisão do tratamento de resíduos.....	26
Figura 2 - Desenho esquemático de um reator de eletrofloculação (detalhe circulado será apresentado na figura seguinte).....	28
Figura 3 - Desenho esquemático dos mecanismos reacionais no interior do reator de eletrofloculação. ....	29
Figura 4 - Esquema representativo da bancada de eletrofloculação.....	41
Figura 5 - Desenho esquemático do eletrodo de alumínio. ....	42
Figura 6 - Desenho esquemático do eletrodo de alumínio. ....	42
Figura 7 - Reator montado pronto para procedimento experimental. ....	52
Figura 8 - Processo de eletrofloculação em relação ao tempo.....	53
Figura 9 - Superfície de resposta para %RT. ....	56
Figura 10 - Gráfico dos valores preditos versus observados para o %RT. ....	57
Figura 11 - Gráfico dos resíduos em função dos valores preditos para o %RT. ....	58
Figura 12 - Gráfico da turbidez em relação ao tempo. ....	59
Figura 13 - Gráfico do pH em relação ao tempo ....	64
Figura 14 - Gráfico da relação da DQO com o tempo variando DE e Ti. ....	68
Figura 15 - Gráfico da relação da DQO com o tempo variando DE e Ti. ....	69
Figura 16 - Gráfico da relação da DQO com o tempo variando DE e Ti. ....	69
Figura 17 - Superfície de resposta para Cen ....	73
Figura 18 - Gráfico dos valores preditos versus observados. ....	74
Figura 19 - Valores observados x resíduos.....	75
Figura 20 - Gráfico do pH versus tempo – avaliação do reuso dos eletrodos. ....	76
Figura 21 - Placas dos eletrodos de alumínio. ....	77
Figura 22 - Curva de calibração da % remoção. ....	87
Figura 23 - Regressão linear da absorbância da remoção de tinta ....	88
Figura 24 - Turbidez x tempo de todos os experimentos. ....	91
Figura 25 - Gráficos pH x Tempo de todos os experimentos. ....	95
Figura 26 - Curva de calibração DQO. ....	99
Figura 27 - Curva de calibração DQO em 600 nm. ....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis e níveis a serem investigados no planejamento $3^2 + 2$ PC.....	48
Tabela 2 - Planejamento experimental %RT. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabela 3 - Coeficiente de regressão para o percentual de remoção do soluto.....	54
Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) para determinação do %RT. ....	55
Tabela 5 - Matriz de Planejamento para o %Turb no fim do processo.....	60
Tabela 6 - Matriz de Planejamento dos dados relativos à condutividade elétrica. ....	65
Tabela 7 - Matriz de Planejamento para o consumo de energia elétrica. ....	71
Tabela 8 - Coeficiente de regressão para o consumo de energia elétrica.....	72
Tabela 9 - Valores das análises experimentais do %RT. ....	75
Tabela 10 - Massa das placas.....	77
Tabela 11 - Regressão .....	88
Tabela 12 - Valores de turbidez obtidos para cada experimento. ....	90
Tabela 13 - Valores de pH obtidos para cada experimento. ....	94
Tabela 14 - Valores obtidos da condutividade elétrica.....	97
Tabela 15 - Absorbância 600 nm DQO.....	99
Tabela 16 - Registro da massa de eletrodos antes e depois do processo. ....	101

## LISTA DE APÊNDICE

Apêndice A - Dados referentes ao % remoção do soluto da água.....	87
Apêndice B - Dados referentes a turbidez.....	90
Apêndice C - Dados referentes ao pH. ....	94
Apêndice D - Dados referêntes a condutividade eletrica. ....	97
Apêndice E - Dados referentes ao %DQO. ....	99

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Artigos mais citados no tratamento de tinta como efluente. ....	30
Quadro 2 - Comparação das condições operacionais das pesquisas. ....	32
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da EF. ....	39
Quadro 4 - Matriz de planejamento de experimentos. ....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a – Custo de energia	[R\$.kW.h) <sup>-1</sup>
<sup>1]</sup>	
A - Ampere	
ABRAFATI – Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas	
Abs – Absorbância	
Al – Teor de alumínio	
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica	
b – Custo da placa	[R\$.kg <sup>-1</sup>
<sup>1]</sup>	
C <sub>en</sub> – Consumo de energia	[kW.h. m <sup>-3</sup>
<sup>3]</sup>	
C <sub>Al</sub> – Consumo máximo dos eletrodos de alumínio	[g de Al. m <sup>-3</sup> ]
C <sub>en</sub> – Consumo de energia	[W.h. m <sup>-3</sup>
<sup>3]</sup>	
C <sub>final</sub> – Concentração final	
C <sub>inicial</sub> – Concentração inicial	
Coef – Coeficiente	
C <sub>tinta</sub> – Concentração de tinta	
cm – Centímetro	[cm]
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente	
C <sub>op</sub> – Custo operacional	[R\$.m <sup>-3</sup>
<sup>3]</sup>	
COV – Compostos Orgânicos Voláteis	
d - Distância entre eletrodos	
[cm]	
DEE – Distância entre eletrodos	
DQO - Demanda Química de Oxigênio	[mg.L <sup>-1</sup>
<sup>1]</sup>	
%DQO – Percentual de demanda química de oxigênio	
DQO <sub>inicial</sub> – Demanda química de oxigênio inicial	
DQO <sub>final</sub> – Demanda química de oxigênio final	
EF - Eletrofloculação	

EC – Eletrocoagulação  
 Exp – Experimento  
 e<sup>-</sup> - Elétron  
 F – Constante de Faraday [C.mol<sup>-1</sup>]  
 Fe – Ferro  
 g – Grama [g]  
 i – Corrente elétrica aplicada [A]  
 kg – Kilograma [kg]  
 kW – Kilowatts [kW]  
 L – Litro [L]  
 m – Metro [m]  
 mL – Mililitro [mL]  
 mm – Milímetro [mm]  
 MM – Massa molar do alumínio [g.mol<sup>-1</sup>]  
 Nm – Nanômetro  
 NTU - Unidade de Turbidez Nefelométrica  
 OD – Oxigênio dissolvido  
 OICA – Organização Internacional dos Fabricantes de Veículos  
 PC – Ponto(s) Central(ais)  
 pH – Potencial hidrogeniônico  
 ppm – Partes por milhão  
 Q - Vazão volumétrica [mL.s<sup>-1</sup>]  
 R\$ - Moeda brasileira – reais [R\$]  
 R<sup>2</sup> - Coeficiente de correlação  
 %RT – Percentual de remoção  
 s – Segundos [s]  
 t – Tempo de reação [s]  
 Tinv – Tempo de inversão de polaridade  
 %turb – Percentual de turbidez

Turb<sub>inicial</sub> – Turbidez inicial

Turb<sub>final</sub> – Turbidez final

t' – Tempo de reação

[h]

V – Volume do efluente tratado  
[m<sup>3</sup>]

W – Watts

[W]

z – Número de elétrons transferidos

°C – Graus celsius

[°C]

φ – Diâmetro do furo

[mm]

% - Percentual

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	20
1.1. JUSTIFICATIVA.....	22
1.2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	22
2. OBJETIVOS .....	23
2.1. OBJETIVO GERAL .....	23
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO.....	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	24
3.1. TINTA Á BASE DE ÁGUA.....	24
3.2. PROBLEMÁTICA ASSOCIADA A TINTA DE REVESTIMENTO DE SUPERFICIES METÁLICAS .....	24
3.3. MÉTODOS DE TRATAMENTOS CONVENCIONAIS .....	25
3.4. ELETROFLOCULAÇÃO .....	27
3.4.1. Principais Pesquisas Sobre o Tratamento de Efluentes de Tinta por Eletrofloculação .....	30
3.4.2. Fatores que afetam o processo de EF.....	33
3.4.3. Vantagens e Desvantagens do uso da técnica de EF .....	39
4. METODOLOGIA.....	39
5.1. PREPARO DE AMOSTRA.....	40
5.2. SISTEMA EXPERIMENTAL.....	40
5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	43
5.4. METODOLOGIA ANALITICA.....	43
5.4.1. Determinação do percentual (%) de remoção de tinta (solutos) .....	43
5.4.2. Determinação do percentual de remoção da turbidez .....	44
5.4.3. Determinação do percentual de remoção da Demanda Química de Oxigênio (%DQO).....	45
5.4.4. Determinação do pH.....	47
5.4.5. Análise da determinação da condutividade elétrica .....	47
5.4.6. Determinação do consumo de energia .....	47
5.4.7. Análise estatística.....	48
5.4.8. Determinação do consumo de eletrodo .....	49
5.4.9. Captura de imagens para análise da superfície dos eletrodos .....	50
6. RESULTADO E DISCUSSÃO .....	51
6.1. TESTE PRELIMINARES.....	51
6.1.1. Determinação do percentual (%) de remoção de tinta (solutos) .....	51
6.1.2. Análise da turbidez .....	58

6.1.3. Análise da massa dos eletrodos .....	61
6.1.4. Análise do pH do meio.....	63
6.1.5. Análise da condutividade elétrica .....	65
6.1.6. Análise da demanda química de oxigênio (DQO).....	67
6.1.7. Análise do consumo de energia elétrica (Cen) .....	71
6.1.8. Análise do reuso dos eletrodos.....	75
7. CONCLUSÃO.....	79
8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	81
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82
APÊNDICE .....	87

## 1. INTRODUÇÃO

Nos projetos iniciais das indústrias, são propostos diagnósticos que podem envolver impactos ambientais que são gerados pela fabricação de matérias, como gastos com energia e outros acoplados ao processo total de fabricação. Como consequência tem-se uma geração expressiva de resíduos e poluentes que, em sua maioria, são lançados ao meio ambiente. (ORDOUEI; ELKAMEL, 2017). Na indústria metalmeccânica, na linha de fabricação, os materiais que estão envolvidos no processamento (corte, fresa, solda e revestimento) geram diversos tipos de resíduos que demandam certos cuidados (SALIHOGU; SALIHOGU, 2016).

No setor automobilístico, a produção mundial tem apresentado crescimento ao longo dos anos. Segundo a Organização Internacional dos Fabricantes de Veículos, o número total de veículos fabricados em 2018 é de 95,6 milhões de unidades. No começo do milênio, a produção foi de 58,3 milhões de unidades (ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES (OICA), 2019).

Os efluentes provenientes do processo de pintura têm estimulado certa atenção, em relação às fases de fabricação e o tempo de vida útil (RIVERA; REYES-CARRILLO, 2016). Como a pintura do automóvel é responsável pelo revestimento e proteção do veículo contra desgastes por oxidação, são necessárias diversas etapas de aplicação (RIVERA; REYES-CARRILLO, 2016). Nesta operação, é gerado um volume intenso de águas residuais com elevado concentração de tinta. Isto é resultado (geração) da borrifação excessiva compostos por gotículas de tinta e gotas geradas pela não aderência ao veículo. Também estão presentes produtos químicos utilizados no enxágue e demais compostos que se desprendem durante este processo.

O processo de pintura é responsável por emitir 80 a 90% de poluentes (pela quantidade de produtos químicos que são adicionados aos processos, e o lodo residual gerado não é recuperável, onde geralmente são incinerados (gerando gases para a atmosfera ou despejados nos aterros (contaminando o solo)) para o meio ambiente (MOHTASHAMI; SHANG, 2019); 95% são de compostos orgânicos voláteis (COV), pois quando exposto a luz solar e ao óxido de nitrogênio, os COVs produzem ozônio e através das reações fotoquímicas poluem a atmosfera; o

consumo de energia na etapa de pintura consome de 48 a 60% da necessidade de energia às fases montagem/pintura. Na atualidade, os métodos de tratamentos químicos são os mais utilizados no tratamento de águas provenientes da pintura automotiva. Diversos compostos como desagregadores, intensificadores de pH, agentes floculantes e biocidas para coagular são utilizados na separação do lodo de tinta da água proveniente dos processos de pintura (MOHTASHAMI; SHANG; XU, 2018). Como abundantes quantidades destes produtos químicos são utilizadas, os resíduos de lodo não se tornam recuperáveis. Em parte, estes são incinerados ou terminam em aterros de resíduos perigosos (MOHTASHAMI; SHANG, 2019), representando um risco para o meio ambiente. Tratamentos alternativos mais vantajosos vem sendo estudados com o intuito de utilizar menos uso de produtos químicos, reciclar, diminuir o volume e dar utilidade para o lodo de tinta.

Nos últimos anos, um processo que vem se destacando no tratamento de águas residuais é a eletrofloculação. Essa tecnologia utiliza baixo consumo de energia elétrica e tem alcançado resultados satisfatórios quanto à redução de poluentes até limites padrões de descarga de efluentes mencionados na legislação. O procedimento básico está no princípio dos fenômenos de coagulação, floculação e flotação. É uma técnica que utiliza a passagem de corrente elétrica entre a fonte e o eletrodo submerso em efluente presente em reatores eletroquímicos. Nestes reatores ocorrem a geração de coagulantes naturais *in situ* em consequência da oxidação dos eletrodos de sacrifício (ânodo), ao mesmo tempo que ocorrem as reações catódicas levando a evolução do gás hidrogênio, ocasionando flutuação dos absorventes, processo chamado de eletroflotação (ZAIDI *et al.*, 2015).

Geralmente os eletrodos são compostos por metais como ferro, alumínio ou misto, onde os resíduos gerados pela indústria metalomecânica na linha de produção poderiam ser aproveitados para confecção dos eletrodos deste estudo. Estes são os mais utilizados por serem eficazes, melhor custo-benefício e fácil produzir/obter no mercado. No processo, o coagulante é gerado durante a ação eletroquímica, a partir da liberação dos metais que compõem as placas dos eletrodos, cujas partículas são desestabilizadas dos contaminantes e geram a formação dos flocos. Entende-se que para cada efluente e geometria dos eletrodos, bem como os materiais que os compõem, as condições operacionais e as

características dos resíduos são determinantes para obter-se a melhor eficiência do tratamento (MOHTASHAMI; SHANG, 2019).

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Existem diversos estudos sobre eletrofloculação para diversos efluentes como: tinta de impressão (PAPADOPOULOS *et al.*, 2019), indústria têxtil (KIM *et al.*, 2016), biodiesel (TANATTI; ŞENGİL; ÖZDEMİR, 2018), curtume (AGUILAR-ASCÓN; MARRUFO-SALDAÑA; NEYRA-ASCÓN, 2019), lavadores de carro (MOHAMMADI *et al.*, 2017), efluentes de mina de ouro (FOUDHAILI *et al.*, 2020), refinaria de petróleo (SHAHRIARI; KARBASSI; REYHANI, 2019), tratamento de efluente doméstico (BARIŞÇI; TURKAY, 2016), tinta automotiva (MOHTASHAMI; SHANG, 2019), indústria de tinta (ZAGKLIS; KOUTSOUKOS; PARASKEVA, 2012 e NAMRATA S GAJJAR, 2013), petróleo e derivados (AVANCINI DIAS; PERINI MUNIZ; DA SILVA PORTO, 2019; GOBBI *et al.*, 2018). Como esses efluentes, de elevada carga poluidora, podem ser nocivos ao meio ambiente, o presente estudo de eletrofloculação em batelada no tratamento de efluente à base de tinta visa contribuir, por meio de conhecimentos interdisciplinares, a relação engenharia, tecnologia e gestão. O estudo deste trabalho, vem a favorecer de modo que o tratamento da água residual contendo tinta esteja adequado possível para descarte ou devolvido com teores adequados às normas.

Em Engenharia e Tecnologia busca-se desenvolver um sistema de eletrofloculação no tratamento de um efluente sintético à base de tinta, por meio de um sistema em escala de bancada acompanhado pelo balanço de massa. Enquanto em gestão, busca-se alcançar os limites aceitáveis da Resolução CONAMA e baixo consumo de energia elétrica fornecida ao sistema.

### 1.2. PROBLEMA DE PESQUISA

A redução da concentração de tinta em efluentes vem sendo pouco estudada. Entre as metodologias e tecnologias, a eletrofloculação em reator eletrolítico é uma alternativa positiva por demandar uma planta de pequeno *lay-out* e possibilitar tratar determinados volumes de efluentes em tempos operacionais menores. Assim, acredita-se que é justificável utilizar a eletrofloculação por batelada para tratar águas

residuais provenientes do uso da tinta em pinturas de proteção ou acabamento de superfícies metálicas. Investigar e propor a condição operacional adequada no tratamento deste efluente representa a base deste estudo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar o uso da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluente à base de tinta metálica utilizando-se um sistema composto de um reator cilíndrico, que opera em regime de batelada, além de eletrodos retangulares não-perfurados e inversor de polaridade.

### **2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Utilizar o planejamento experimental para avaliar a influência das variáveis independentes (distância entre eletrodos e tempo de inversão) no percentual de remoção de tinta e consumo de energia, identificando quais condições exercem influência significativa para o processo;
- Determinar o teor de turbidez, pH, condutividade e DQO de amostras do efluente coletadas durante o processo;
- Avaliar o desgaste das placas dos eletrodos por meio de imagens capturadas das suas superfícies e determinação da perda de massa, bem como a possibilidade de reutilização das placas;

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. TINTA Á BASE DE ÁGUA**

A prática de pintar ou colorir tecidos e objetos é datada desde o início da humanidade, começando pelas pinturas em pedras até as pinturas atuais. As inovações tecnológicas ampliaram o desenvolvimento de pigmentos mais duráveis, processo mais eficientes e alterações nas composições das tintas na indústria. Este desenvolvimento é graças ao cientista Willian Perkin, que acidentalmente criou o primeiro corante sintético, na Inglaterra em 1856 (SALEM, 2010).

A tinta é composta por uma mistura de resinas, pigmentos, cargas, aditivos, solventes e aglutinantes (STRASSBURGER, 2021). A proporção destes materiais específicos é utilizada para a formação de cada tipo de tinta. Os componentes empregados para sua fabricação são fatores determinantes para a classificação de prováveis resíduos gerados após seu processamento ou utilização. As tintas podem ser classificadas em: à base de água (inserção de água como solvente até determinado ponto), à base de solvente e sem solventes. Em específico, as tintas à base de água apresentam vantagens em relação as demais por diminuir às emissões de carbono orgânico volátil (COV), reduzir o uso de solventes durante a limpeza, secar mais rápido, apresentar menos cheiro, não amarelar com o tempo (KÖRBAHTI; TANYOLAÇ, 2009)

#### **3.2. PROBLEMÁTICA ASSOCIADA A TINTA DE REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS**

As águas residuais provenientes dos serviços de pintura têm destaque importante. Esses efluentes podem apresentar, em sua composição, produtos residuais adquiridos durante o transporte, a dispersão de tintas no momento da aplicação, na lavagem de superfícies e peças recentemente pintadas. Nesta temática, a fase de pintura de um automóvel acarreta cerca de 80 a 90% das emissões de poluentes do processo por completo durante a produção do veículo.

O setor de tintas destaca que o Brasil ocupa o quinto lugar entre os maiores mercados mundiais para tintas. Segundo a ABRAFATI (2020), os dados registrados para o ano de 2020 quanto ao volume de tintas produzidas

no Brasil foi de 1623 milhões de litros. Isto representou cerca de 3,32% em volume, de crescimento, se comparados aos dados do ano anterior. A ABRAFATI especifica que esse setor se subdivide em segmentos, aos quais especifica que: imobiliária (1354), repintura (67), indústria automotiva (28), indústria geral (174), totalizando os milhões de litros.

Devido à preocupação com o meio ambiente, quanto ao descarte destas águas residuais, foram criados índices ou padrões de lançamentos destes efluentes consoante com as legislações específicas. No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão que estabelece os limites de descarte dos diversos tipos de poluente nos corpos hídricos receptores, após tratamento. A resolução do CONAMA de nº 430/2011 estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, entre elas solventes como benzeno e vários metais, exemplo ferro (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, 2011). A Constituição Brasileira no artigo 23, inciso VI, retrata que é de competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas, na qual ainda prevê no artigo 225 que todos possuem o direito do meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Diante das discussões apresentadas, observam-se as questões envolvendo a proteção ambiental regidas por leis, evidenciando o destaque quanto ao desenvolvimento do tema desta pesquisa.

### 3.3. MÉTODOS DE TRATAMENTOS CONVENCIONAIS

Para realizar o tratamento das águas residuais, as tecnologias para o tratamento estão divididas em três principais grupos, que são eles: físicos, químicos e biológicos.

Figura 1 - Divisão do tratamento de resíduos.



Fonte: o autor.

Uma estação de tratamento de água residual convencional equivale a fusão das três principais operações (MOUSSA *et al.*, 2017). Desta forma, o primeiro estágio (físico) consiste na separação física dos poluentes sem causar qualquer mudança considerável nas características das duas outras operações (químicas e biológicas). O segundo processo (químico) representa a adição de produtos químicos para reagir com os poluentes desejados e fazer a remoção. Este processo é menos atraente se comparado aos demais. Isto é devido a adição destes produtos, quando dissolvidos nas águas residuais, se tornam intratável não podendo ser utilizado em outras aplicações. O terceiro processo é o biológico no qual são necessários o manuseio com microrganismos, para a biodegradação de contaminantes nestas águas. Estes são classificados em aeróbicos e anaeróbicos dependendo da disponibilidade de oxigênio dissolvido nas águas residuais (MOUSSA *et al.*, 2017). Além disto, estes processos não apenas consomem muito tempo para o tratamento quanto precisa de uma grande área operacional. (BAZRAFESHAN *et al.*, 2015).

As técnicas para tratamento de água usando eletricidade surgiram no Reino Unido no final do século XIX. A eletrocoagulação foi patenteada pelos Estados Unidos da América no começo do século XX e usada como tratamento de água potável. No entanto, com os altos investimentos e valores para consumo de eletricidade, foi impraticável o uso da técnica para limpeza. Diversas pesquisas foram realizadas durante o século XX e nas últimas duas décadas, foram criadas legislações ambientais referente ao descarte de águas residuais, com a opção que gera quantidades mínimas de lodo, as técnicas eletroquímicas vêm retomando o espaço (CHEN, 2004).

### 3.4. ELETROFLOCULAÇÃO

A eletrofloculação (EF) é um sistema que consiste na passagem de corrente elétrica demandada por uma fonte de corrente aplicada nos eletrodos (FERREIRA; BARBOSA, [s.d.]) Estes por sua vez devem estar imersos no efluente, dentro do reator eletroquímico. Os eletrodos são geralmente fabricados em ferro ou alumínio por serem mais acessíveis, baratos, eficientes e disponíveis no mercado.

A técnica é um sistema em que a produção do agente coagulante é controlada *in situ* por meio da eletro-oxidação de um ânodo de sacrifício, não havendo necessidade de adição de produtos químicos para a realização do tratamento (KHALED *et al.*, 2014), ou seja, o ânodo é imerso na solução e submetido a carga elétrica, sofrendo oxidação e liberando espécies de hidróxidos de metal altamente carregado, desestabilizando as partículas coloidais na solução, onde está desestabilização acontece devido ao balanceamento de cargas da superfície e leva à agregação e precipitação de partículas (GOBBI *et al.*, 2018).

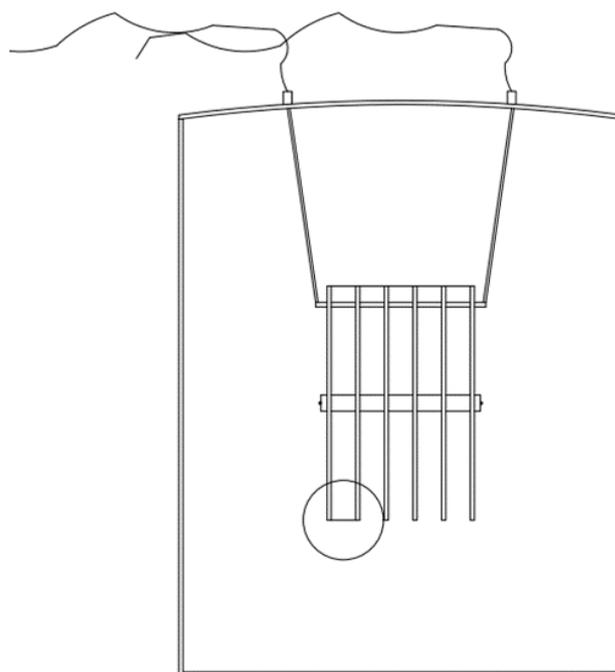
Em resumo, é um método que visa a remoção de partículas das águas residuais através da desestabilização/neutralização das forças repulsivas que mantêm as partículas em suspensão na água, de forma que quando estas forças repulsivas são neutralizadas, estas partículas que estão em suspensão se unem formando partículas maiores que facilitam a separação da água.

Segundo Cerqueira et al (2011), durante o processo, existem três etapas que se subdivide de forma gradual: eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação.

- Eletrocoagulação: nesta etapa ocorrem reações no eletrodo de sacrifício, como a oxidação, na qual promove a formação de agentes coagulantes.
- Eletrofloculação: os agentes coagulantes causam a agregação das partículas o que favorece a formação e o crescimento de flocos.
- Eletroflotação: ocorre a geração das microbolhas de oxigênio (O<sub>2</sub>) no ânodo e de hidrogênio (H<sub>2</sub>) no cátodo, que se deslocam até a

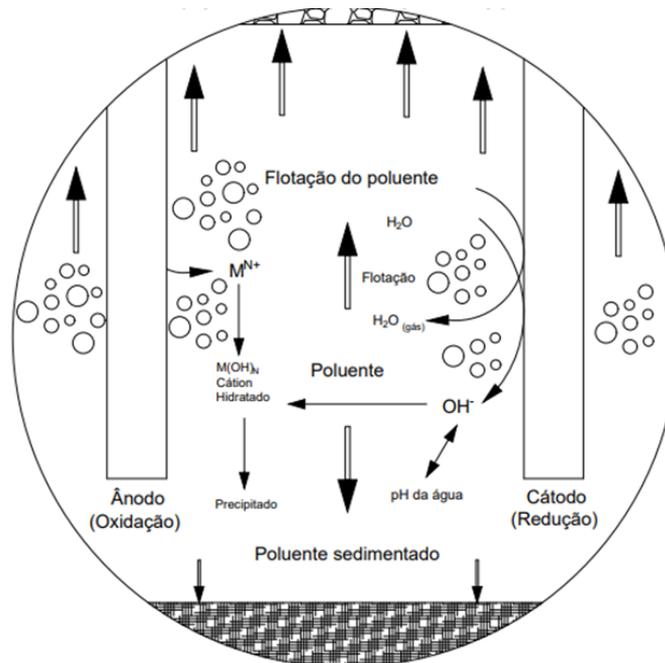
superfície. Durante o percurso ocorrem colisões entre si e são adsorvidos pelos flocos. Os flocos tornam-se mais leves (aerados) e, assim, conduzidos por arraste resultando na clarificação do efluente.

Figura 2 - Desenho esquemático de um reator de eletrofloculação (detalhe circulado será apresentado na figura seguinte).



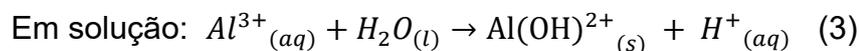
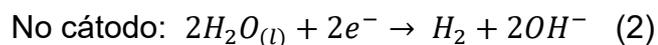
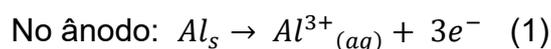
Fonte: o autor.

Figura 3 - Desenho esquemático dos mecanismos reacionais no interior do reator de eletrofloculação.



Fonte: o autor.

Apesar de se utilizarem eletrodos de ferro e outros metais, este estudo utiliza apenas eletrodo de alumínio. Portanto as reações eletroquímicas com o alumínio são abreviadas nas reações a seguir:



Fonte: DANESHVAR; OLADEGARAGOZE; DJAFARZADEH, 2006.

O uso da EF tem motivado diversos setores industriais no tratamento de águas residuais. Este processo agrega certos benefícios envolvendo *in situ* a coagulação, a flotação e sedimentação. Perspectivas positivas tem sido citada pela possível viabilidade do processo quanto ao baixo custo operacional, baixa manutenção e equipamentos compactos. Isso permite integrar esses equipamentos em espaços menores se comparados as unidades individuais de coagulação e flotação. Além do mais é citada como uma das técnicas

promissoras quanto à remoção de cor e de poluentes orgânicos dos resíduos gerados, e geração de lodo em quantidades aceitáveis (DANESHVAR; OLADEGARAGOZE; DJAFARZADEH, 2006).

### 3.4.1. Pesquisas Sobre o Tratamento de Efluentes de Tinta por Eletrofloculação

O Quadro 1 especifica as pesquisas que envolvem o uso da eletrofloculação no tratamento de um efluente sintético (tinta). Os artigos foram pesquisados e selecionados na plataforma Web Of Science® utilizando-se as palavras chaves “electrocoagulation” e “automotivepaint”, “electroflotation” e “automotivepaint”, “coagulation” e “paintindustry” entre os anos de 2010 e 2020.

Quadro 1 - Artigos mais citados no tratamento de tinta como efluente.

<b>Títulos</b>	<b>Autores</b>
Treatment of Automotive Paint Wastewater Using Electroflotation: Kinetic Study, Influencing Factors and Data Analysis	(MOHTASHAMI; SHANG; XU, 2018)
Treatment Of Automotive Paint Wastewater In Continuous-Flow Electroflotation Reactor	(MOHTASHAMI; SHANG, 2019)
Electrochemical Treatment Of Simulated Industrial Paint Wastewater In A Continuous Tubular Reactor	(KÖRBAHTI; TANYOLAÇ, 2009)
Treatment of Paint (Emulsion) Industry Wastewater by Electrocoagulation	(NAMRATA S GAJJAR, 2013)
Treatment of automotive industry wastewater by electrocoagulation using commercial aluminum electrodes	(ZINI <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: o autor.

Mohtshamiet *al.* (2018) realizaram testes de eletrofloculação em batelada, no tratamento de uma solução sintética a base de tinta e água e adição de hidróxido de sódio para regular o pH. Os testes foram realizados em um tempo de 40 minutos e coletadas cinco amostras de águas residuais, com densidade atual de 11 a 44 A.m<sup>-2</sup>. Apenas dois eletrodos foram utilizados em paralelo, um de aço inoxidável e outro de grafite. Foi observado que a taxa de remoção variou de 90 a 97% usando uma densidade de corrente entre 33 e

44 A.m<sup>-2</sup>. Os autores concluíram que a eletrofloculação da água residual tinta/água foi implementada com sucesso. Eles verificaram que o tempo de reação foi um dos principais fatores que influencia na remoção do soluto em suspensão.

Mohtashami e Shang (2019) utilizaram eletrodos de aço inoxidável em um reator de fluxo contínuo. Nos experimentos, treze eletrodos de 3 mm de espessura foram usados como cátodos e ânodos ligados em uma conexão monopolar paralelo. Estes eletrodos foram alocados, internamente, no fundo de um reator retangular com capacidade de 38,4 L. A água residual foi preparada com água da torneira pulverizando a tinta, alcançando uma concentração de 8% de tinta diluída na água. Os autores verificaram que a taxa de remoção diminui com o aumento da concentração de sólidos totais. Isto revela que a taxa de remoção dos sólidos em suspensão está relacionada diretamente à densidade de corrente e tempo de retenção hidráulica. As variáveis estudadas foram tempo de retenção, concentração de sólidos em suspensão influentes e densidade de corrente aplicada. O método foi satisfatório para taxa de remoção média de 95%.

Körbahti et al (2009) estudaram o tratamento eletroquímico de águas residuais de tinta à base de água em um reator tubular. O reator foi fabricado em aço inoxidável e foi operado com fluxo contínuo. Os eletrodos foram compostos por ânodos cilíndricos confeccionado em carbono e os cátodos em aço inoxidável. O efluente sintético foi preparado à base de tinta e água com uma concentração de 4,4% diluída em água. O tanque foi fabricado de aço inoxidável e apresentava 32 cm de altura e 8,89 cm de diâmetro. O ânodo foi posicionado ao centro do cilindro, ocupando a região da tampa até o fundo do tanque. O cátodo foi utilizado nas paredes do próprio tanque. O experimento total teve uma duração de aproximadamente 8 horas. Durante este período, alíquotas de 5 mL foram coletadas para análise da solução em intervalos de tempo apropriados. As variáveis de estudo foram classificadas em dependentes (DQO, demanda química de oxigênio), remoções de cor e turbidez, pH, coeficiente de transferência de massa e consumo de energia) e independentes (o tempo de permanência e o tempo decorrido). O estudo foi satisfatório por apresentar ponto ótimo na sexta hora estimando-se remoções

de DQO, cor e turbidez em 44,3%, 86,2% e 87,1%, respectivamente. Os autores mencionaram ainda que o valor de pH foi de 7,33 com a despesa de 42 kWh.kg<sup>-1</sup> de DQO removida.

Zini et al (2020) operaram um reator de acrílico com uma capacidade de 3,0 L em fluxo contínuo, no qual foram utilizados em conector monopolar paralelo. Um conjunto de 6 placas de 0,2 cm de espessura foram usados como o cátodo e o ânodo. Os eletrodos foram no centro do reator e tinham 1,0 cm de distância entre cátodo e ânodo. Na água residual que foi coletada em uma indústria automotiva na cidade de Caxias do Sul (Brasil) foram adicionados 3,0 g de NaCl. Os autores concluíram que houve aumento no pH durante o processo de EC devido ao aumento da concentração íons hidroxila, que são responsáveis pela formação do agente de coagulação. O consumo de energia aumentou proporcionalmente ao tempo de eletrólise e a densidade atual. Obtiveram-se eficiências de corrente elétrica acima de 150%, principalmente devido à corrosão ocorrido nos eletrodos, causado pela presença de íons de cloreto.

Quadro 2 - Comparação das condições operacionais das pesquisas.

Artigo	Regime	Tipo de Mistura	Reator	Eletrodo
1	Batelada	Tinta automotiva	Material: acrílico Geometria: cilíndrica Dimensão: 19 cm de altura e 4,4 cm de raio Volume: 1,1 L	Material: aço inoxidável e grafite Espaçamento: 13 mm Dimensão: circular não mencionado
2	Contínua	Tinta pulverizada	Material: Plexiglass® Geometria: retangular Dimensão: 80 x 32 x 25 cm Volume: 38,4 L	Material: aço inoxidável Espaçamento: 17 mm Dimensão: 50 x 20 x 3 mm
3	Contínua	Tinta à base de água	Material: aço inoxidável Geometria: cilíndrica Dimensão: 32 cm de altura e 4,445 cm de raio	Material: carbono e aço inoxidável (parede do reator) Espaçamento: não possui Dimensão: cilíndrico 32 cm de altura e 6,6 mm de raio

			Volume: 1,774 L	
4	Contínua	Tinta colhida na indústria	Material: vidro Geometria: cilíndrica Dimensão: não especificado Volume: 500 mL	Material: alumínio Espaçamento: 3 e 4 cm Dimensão: não especificado.
5	Contínua	Tinta coletada na indústria automobilística	Material: acrílico Geometria: retangular Dimensão: 17,5 x 25 x 13 cm Volume: 3,0 L	Material: alumínio Espaçamento: 1,0 cm Dimensão: 14 x 9,9 x 0,2 cm

Fonte: o autor.

Gajjar (2013) realizou o estudo de águas residuais e de amostras coletadas das indústrias de tintas locais. Foram investigados: tipo de material utilizado no eletrodo, área de superfície, distância entre eletrodos e tempo de operação. O autor utilizou um reator de vidro com capacidade de 500 mL. Foram utilizados dois eletrodos de alumínio, sendo um cátodo e outro ânodo distanciados de 3 e 4 cm um do outro. Nos experimentos havia uma fonte de alimentação de corrente contínua para fornecimento da tensão. As amostras foram coletadas em diferentes intervalos de tempo analisando-se: demanda química de oxigênio (DQO), pH e os sólidos em suspensão. O autor concluiu que a eficiência de remoção de DQO foi satisfatória empregando-se eletrocoagulação ao alcançar um índice percentual de 73,31%.

Em resumo, foi possível observar nas pesquisas o uso da eletrofloculação no tratamento de efluente à base de tinta operando tanto em batelada quanto contínua. Notou-se a utilização de volumes variados em cada estudo e os experimentos foram realizados em unidades de bancada. Sensores foram utilizados para medição das variáveis de interesse. Estudos sobre desgaste do eletrodo e reuso do mesmo são pouco observadas. Pesquisas são necessárias na busca de preencher determinadas lacunas da literatura às quais pretende-se discutir, em parte, no contexto deste trabalho.

#### **3.4.2. Fatores que afetam o processo de EF**

A eficiência da técnica de eletrofloculação é influenciada por importantes parâmetros, que são eles: material do eletrodo, distância do eletrodo, pH,

temperatura, intensidade de corrente e densidade de corrente, inversão de polaridade e custo de operação. O conhecimento sobre a influência destes parâmetros bem como o controle influenciam diretamente na remoção dos poluentes, cujos objetivos são aumentar a eficiência e minimizar os custos operacionais. A seguir, breve apresentação de cada parâmetro será abordada buscando-se avaliar a atuação no processo.

a) Material do eletrodo

O tipo de material que compõe o eletrodo é fundamental. O metal é quem determina quais reações poderão ocorrer no sistema de EF (BAZRAFESHAN *et al.*, 2015). Os eletrodos de Al e Fe são os mais utilizados principalmente pela disponibilidade (MOUSSA *et al.*, 2017). O Fe (II) comparado ao Fe (III) é um coagulante ruim devido à maior solubilidade dos hidróxidos e menor carga positiva, explicando assim resultados negativos quando se usa eletrodo de ferro (VEPSÄLÄINEN; SILLANPÄÄ, 2020). De acordo com Moussa et al (2017), os eletrodos de Al, muito empregado em diversos estudos, possuem a maior eficiência de remoção dos poluentes se comparado ao do Fe.

b) Distância entre eletrodos

As distâncias entre eletrodos são relevantes, pois o campo eletrostático depende da distância entre o cátodo e o ânodo. A maior eficiência de remoção dos poluentes é alcançada quando existe uma distância ideal entre os eletrodos. Quando se usa a distância mínima entre os eletrodos, esta eficiência se torna baixa, devendo-se ao fato de que hidróxidos metálicos que são gerados (atuam como flocos e removem os poluentes por sedimentação), são degradados por conta da colisão entre si, devido à alta atração eletrostática. Quando a distância entre eletrodos é aumentada, ultrapassando o afastamento ideal, a eficiência cai. Portanto, o tempo de deslocamento dos íons aumenta, levando a diminuição da atração eletrostática, resultando em menor formação dos flocos necessários para coagular o poluente (KHANDEGAR; SAROHA, 2013).

A área superficial e o espaçamento entre eletrodos são critérios essenciais no projeto e otimização dos custos operacionais de um reator de EF. Para diminuir o consumo de eletricidade (com densidade de corrente constante) no tratamento de efluentes com uma condutividade relativamente alta, é preciso usar distanciamento maior entre as placas que compõem os eletrodos. Para resíduos com baixa condutividade, o consumo elétrico pode ser minimizado com a redução deste espaçamento (VIK *et al.*, 1984).

### c) pH

O pH do efluente a ser tratado é um dos principais parâmetros a serem avaliados, por afetar a condutividade da solução, a dissolução dos eletrodos e o potencial zeta de partículas coloidais (VEPSÄLÄINEN; SILLANPÄÄ, 2020). Os efeitos do pH do efluente ou da água na EF está refletido pela eficiência da corrente. A potência consumida é mais alta no pH neutro do que em condições ácidas ou alcalinas devido a variação da condutividade. Condutividade alta, o efeito do pH não é significativo (CHEN, 2004).

Uma das maiores vantagens de usar a técnica de eletrofloculação é a sua capacidade de neutralizar o pH do efluente, caso o valor esteja acima ou abaixo de 7. Quando o pH inicial da solução é altamente ácido (pH <3) ou altamente alcalino (pH >11), não há mudanças consideráveis no pH inicial. Portanto, quando o pH inicial é ácido, aguarda-se que o mesmo suba ao longo do processo, ao contrário quando o pH é alcalino, no qual espera-se que ao longo do processo ocorra uma redução do valor (MOUSSA *et al.*, 2017).

As variações nos valores de pH dependem do material que é usado para o processo de EF e do pH inicial do meio (KOBYA, Mehmet; CAN; BAYRAMOGLU, 2003). Para o eletrodo de Al, o pH final é mais elevado para valores de pH inicial menores que 8 e acima deste estágio o pH final é mais baixo. Para o eletrodo de Fe, o pH final é sempre maior do que o inicial. A diferença entre pH final e inicial diminui para valores de pH inicial maiores que 8. A Resolução CONAMA 430/2011

estabelece os parâmetros para lançamento de efluentes em que os valores de pH permitidos tem que estar dentro da faixa de 5 a 9.

d) Intensidade e Densidade de Corrente

Corrente elétrica é a quantidade de carga que escoar, a cada segundo, em um circuito. Sabe-se que uma corrente de 1 A equivale a uma corrente de  $1 \text{ C.s}^{-1}$  (HARRIS, 2005). Uma corrente elevada no processo pode significar perda de potência devido ao aquecimento (efeito Joule). De forma que neste efeito parte da potência é dissipada, implicando numa maior frequência de manutenção dos eletrodos (CRESPILHO; SANTANA; REZENDE, 2004).

A densidade de corrente representa a intensidade de corrente dividida pela área do eletrodo. Isso permite estimar a quantidade de íons metálicos liberados dos eletrodos à medida que o mesmo é submetido a uma corrente elétrica. Portanto, a dissociação de íons metálicos é diretamente proporcional à densidade de corrente aplicada (MOUSSA *et al.*, 2017).

Song et al (2008) verificaram que a elevação da densidade de corrente promove uma maior taxa de geração de bolhas com o menor tamanho. Portanto, eles consideraram que quanto maior a taxa de geração de bolhas, há a possibilidade dessas se colidirem devido ao efeito de coalescência. Isto pode causar a redução da separação, uma vez que as bolhas maiores são menos eficazes por apresentarem uma proporção área superficial/volume menor. Assim, entende-se a necessidade em ajustar a densidade de corrente aplicada de modo que as taxas de geração das bolhas sejam adequadas. Isso tende a promover melhor elevação dos flocos (ascensão), evitando-se a ocorrência do efeito excessivo de coalescência das bolhas (KOREN; SYVERSEN, 1995).

e) Inversão de polaridade

A inversão de polaridade significa inverter o sentido da corrente em um sistema, em intervalos regulares de tempo. Isso provoca

alterações constantes em que o cátodo passa a comportar-se como ânodo e vice-versa (CRESPILHO; SANTANA; REZENDE, 2004).

A vida útil do eletrodo pode ser estendida, pois essa inversão diminui o efeito de oxidação. Isso traz como consequência o não decaimento repentino da intensidade da corrente elétrica no reator. O eletrodo passa a liberar mais íons metálicos (alumínio ou ferro) na solução e a formar maior quantidade de grupos hidroxila. Este fato tende a aumentar o pH e a eficiência de remoção dos poluentes (MOLLAH *et al.*, 2001).

f) Consumo de energia

O consumo de energia elétrica é uma variável que representa o maior custo monetário de uma estação de tratamento de efluentes, e sua variável depende da tensão aplicada e do tempo de operação. Com isto é possível avaliar a viabilidade econômica do projeto, sendo assim é um parâmetro muito levado em conta nos processos de eletrofloculação (TEZCAN *et al.*, 2013).

Parâmetros como condutividade elétrica, distância de eletrodo e intensidade da corrente elétrica, são parâmetros que influenciam diretamente no consumo de energia durante o processo. Por este fato, muitos autores fazem o estudo do consumo energético correlacionado com os parâmetros supracitado (TEZCAN *et al.*, 2013).

g) Temperatura

A temperatura tem efeito sobre as reações químicas, acelerando ou desacelerando, resultando em aumento ou diminuição da solubilidade do gás (CERQUEIRA, 2006). Alguns estudos de tratamento de água na Rússia mostraram que a eficiência de remoção de eletrodos de alumínio aumenta inicialmente com a temperatura de até 60°C. Acima deste valor, a eficiência diminui. No entanto, a condutividade elétrica aumenta com o aumento da temperatura, o que reduz o consumo de energia elétrica (TETERICZ, 2011).

Segundo Santos *et al.* (2006), a eficiência de redução de DQO aumenta com o aumento da temperatura. Existem três explicações possíveis para esse aumento de eficiência com alta da temperatura: (i) reações envolvendo liberação de produtos gasosos podem ser favorecidas, aumentando efetivamente a eletroflotação, (ii) a taxa de oxidação de compostos orgânicos nos eletrodos pode ser aumentada, devido à natureza cinética da reação, e (iii) agregados de amostras suspensas podem ser quebrados mais facilmente, aumentando assim a solubilidade do material e sua oxidação direta no eletrodo. O aumento da temperatura pode afetar a cinética das reações envolvidas no processo de eletrólise, resultando em um aumento geral na taxa de degradação.

#### h) Condutividade elétrica

A capacidade de conduzir corrente elétrica, isto é, a condutividade do efluente é diretamente proporcional ao número de íons presentes no líquido, ao qual é responsável pela condução da corrente elétrica. Quanto maior for a concentração de íons no efluente, maior será a capacidade de condução de corrente elétrica e, por conseguinte maior a possibilidade de ocorrências de reações entre as substâncias presentes no efluente, provando que é um fator benéfico no qual possibilita a redução do consumo energético. (CERQUEIRA, 2006).

Segundo (KOREN; SYVERSEN, 1995) alguns tipos de águas residuais, a condutividade é baixa e necessariamente é acrescentada sais para aumentar o número de íons no eletrólito para realização do experimento, onde o mais comum em ser usado é o cloreto de sódio (NaCl).

Com a adição do NaCl, o consumo de energia elétrica é reduzido, por aumentar a condutividade do meio. Isto faz com que a resistência total na solução seja reduzida de modo que a tensão essencial para alcançar a densidade de corrente seja limitada. Assim, o consumo de energia elétrica é menor (TEZCAN UN; KOPARAL; BAKIR OGUTVEREN, 2009).

### 3.4.3. Vantagens e Desvantagens do uso da técnica de EF

O sistema de eletrofloculação apesar de ser uma técnica promissora, apresenta algumas desvantagens; embora, as vantagens são mais relevantes. O Quadro 3 estabelece as vantagens mais citadas na literatura e algumas desvantagens.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da EF (continua)

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
A eletrofloculação necessita de equipamento simples e de fácil operação.	Substituição regular do eletrodo de sacrifício.
A água proveniente do tratamento pela EF, terminam o processo de forma clara, incolor e inodora.	A ocorrência de passivação diminui a eficiência do processo.
Baixa produção de lodo.	Custo operacional elevado em regiões de baixa qualidade energética.
A EF produz efluentes com menor teor de sólidos dissolvidos totais em comparação com tratamentos químicos.	Efluente com determinada condutividade para facilitar a eletrofloculação.
O processo de EF evita a utilização de produtos químicos, não trazendo nenhuma poluição secundária.	O hidróxido gelatinoso pode tender a solubilizar em alguns casos.

Quadro 4 - Vantagens e desvantagens da EF (conclusão)

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem transportar o poluente para a superfície da solução, onde ele pode ser mais facilmente concentrado, coletado e removido.	
Os processos dos quais são submetidas as águas residuais, utilizam a eletricidade, exigindo menos manutenção.	
A técnica pode ser usada em qualquer ambiente ou local, de forma que utilizando por exemplo em uma área rural que não possui eletricidade, um painel solar pode ser adaptado para realização do processo.	

Fonte: Adaptado de (MOLLAH *et al.*, 2001).

#### 4. METODOLOGIA

Neste trabalho, utiliza-se um efluente sintético preparado a partir de água destilada e tinta solúvel em água usada para revestir estruturas metálicas. Para elevar a condutividade do efluente sintético adiciona-se, à mistura, cloreto de sódio (NaCl). Este composto iônico facilita a condução da corrente elétrica, quando dissolvido em água. A concentração adicionada de NaCl encontra-se dentro do limite especificado pela resolução CONAMA (nº 357/2005) (CONAMA, 2005).

##### 4.1. PREPARO DE AMOSTRA

Como base de cálculo para o preparo de 1 L de efluente sintético utiliza-se 0,1 g de tinta (do tipo esmalte premium à base de água da marca Elit) determinada em balança analítica. Esta massa é inicialmente diluída e transferida para um balão volumétrico de 1 L. Em seguida, acrescenta-se 0,2 g de cloreto de sódio (marca Dinâmica) a solução. Na sequência eleva-se o volume adicionando-se água destilada à mistura até completar o volume de 1 L.

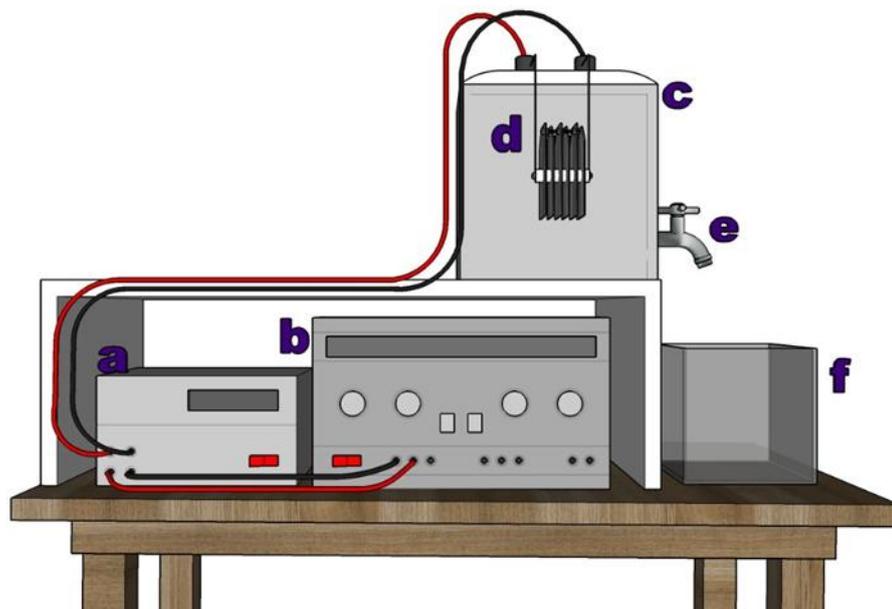
Para produzir o volume de 3,5 L de efluente sintético, necessário para cada experimento, adiciona-se proporcionalmente todos os compostos mencionados acima.

##### 4.2. SISTEMA EXPERIMENTAL

Para investigar o tratamento deste efluente à base de tinta utiliza-se um sistema composto por um reator de eletrofloculação, cilíndrico, que opera em batelada. Este reator, de acrílico, tem por dimensões: 20,5 cm de diâmetro; 20,5 cm de altura e capacidade máxima de 5 L.

Na parte inferior do reator contém uma válvula que permite a coleta das amostras para posterior determinação das propriedades físico-químicas. Na tampa, localizada na parte superior do reator, contém quatro orifícios ( $\phi = 6$  mm), nos quais: dois destina-se a passagem de abraçadeiras de *nylon* para fixação do eletrodo; os demais para passagem da fiação elétrica que conecta o inversor de polaridade ao eletrodo.

Figura 4 - Esquema representativo da bancada de eletrofloculação.

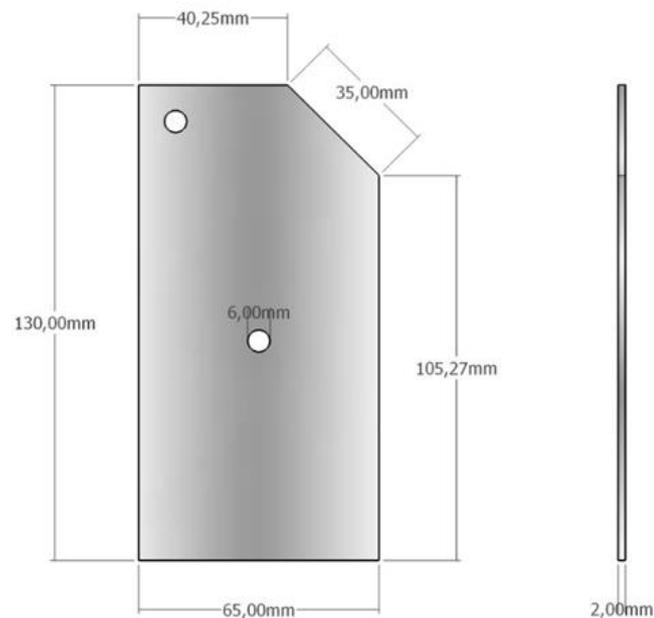


Legenda: (a) – Inversor de polaridade e medidor de temperatura; (b) – Fonte de alimentação de eletricidade; (c) – reator em poliestireno; (d) – eletrodo de alumínio; (e) – válvula de saída do efluente; (f) – coletor de efluente.

Fonte: o autor.

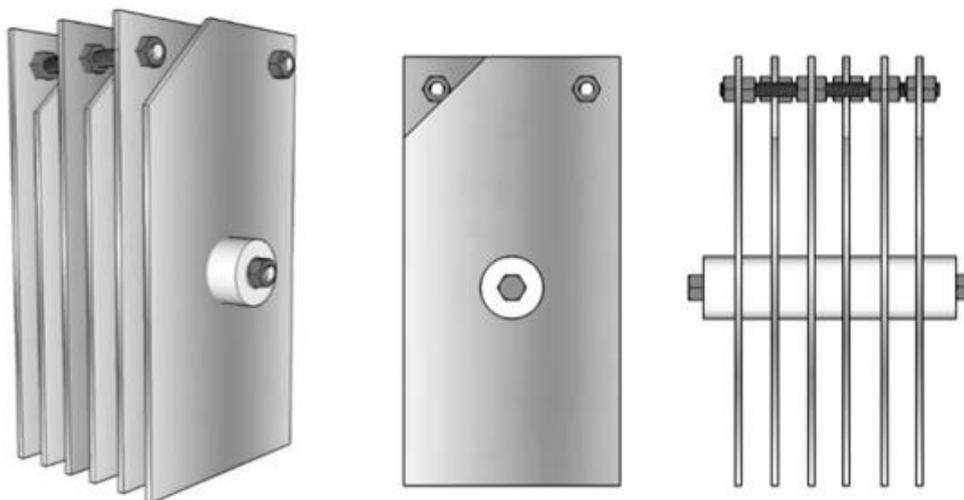
O eletrodo é montado em formato de colmeia, ou seja, composto por três pares de placas intercaladas e em arranjos paralelos. Para garantir que as placas sejam mantidas em distâncias fixas definidas utilizam-se parafusos, arruelas e porcas. Estes acessórios são revestidos de material isolante para evitar que o processo entre em curto-circuito. Em todos os experimentos, a posição do eletrodo de alumínio manteve-se fixa localizado na parte central do interior do tanque e submerso no efluente.

Figura 5 - Desenho esquemático do eletrodo de alumínio.



Fonte: o autor.

Figura 6: Desenho esquemático do eletrodo de alumínio.



Fonte: o autor.

A inversão do sentido da corrente, em tempos pré-estabelecidos, é realizada por um inversor de polaridade confeccionado e equipado com diversos dispositivos sendo o Arduino o principal elemento. O inversor é posicionado, de modo que, sua conexão encontra-se entre o eletrodo e a fonte

de tensão, o que facilita a alternância da polaridade do eletrodo. Para fornecimento de energia emprega-se uma fonte de alimentação marca Minipa e modelo MPC-3003 DC *Power Supply*, que abastece a corrente e tensão na faixa de 20 V e 2 A, respectivamente. O inversor de polaridade age, ao alternar-se ânodo e cátodo e vice-versa, em intervalos fixos e constantes.

Nesse aparato é utilizado um sensor de temperatura do tipo DS18B20A para monitoramento durante o processo, este afere a temperatura segundo a segundo. Sensores de tensão e corrente são usados para captar as informações, cujo dados medidos em tempos reais pelo software Arduino armazenado em arquivo .txt e salvo no computador.

#### 4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Em cada experimento, os estudos são realizados utilizando-se 3,5 L de efluente sintético à base de tinta com concentração inicial estabelecida em 100 mg.L<sup>-1</sup>. Uma vez alimentado o reator, este é tampado e a fiação que sustenta os eletrodos de alumínio é ajustada de modo que estes fiquem inteiramente submersos no efluente, na região central do reator.

Em seguida as conexões do eletrodo ao inversor de polaridade e a fonte de corrente alternada são iniciadas. Na sequência a fonte é ligada e o cronômetro acionado. Durante o tempo de eletrólise, são coletadas 5 alíquotas de 50 mL nos tempos 0, 5, 10, 20 e 30 minutos de exposição do efluente à eletrólise. As alíquotas de 50 mL são extraídas com o auxílio de uma válvula acoplada na parte inferior do reator, armazenadas em frascos e mantidas em geladeira a 4 °C para realização das análises posteriores.

#### 4.4. METODOLOGIA ANALITICA

##### **4.4.1. Determinação do percentual (%) de remoção de tinta (solutos)**

Para estimar o percentual de remoção de tinta fez-se necessário a obtenção de uma curva de calibração. Dessa forma, inicialmente, determinou-se em balança analítica a massa de 0,1 g de tinta. Em seguida, a tinta foi diluída em água e transferida para um balão de 1 L. O volume do balão é, então, completado com água destilada.

Na sequência, diferentes alíquotas desta solução inicial são transferidas com o auxílio de uma pipeta automática para nove balões de 25 mL, completando-se os volumes com água destilada. Dessa forma, as concentrações obtidas são: 0, 16, 20, 40, 60, 80, 120, 160, 200 ppm. Por fim, as amostras desses balões são transferidas para uma cubeta de quartzo, procedendo-se com a aclimatação da mesma e realizando-se as leituras diretamente no espectrofotômetro (UV-VIS) da menos concentrada para a mais concentrada. As leituras são realizadas respeitando-se a varredura de 900 a 190 nm a fim de identificar o comprimento de onda de máxima absorção da substância (absorbância). Os dados comprimento de onda *versus* concentração são graficados e sua tendência ajustada a uma equação linear que obedeça a Lei de Beer.

Uma vez estimada esta equação linear, determinam-se as concentrações de tinta presente no efluente mediante leitura direta das absorbâncias no início do processo e após passar pelo tratamento. Logo, a determinação do percentual de remoção do soluto (tinta) no efluente é estimada utilizando-se a equação 4.

$$\% RT = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que: %RT representa o percentual de remoção de tinta;  $C_{inicial}$  representa a concentração da amostra coletada no tempo 0 minuto [ $\text{mg.L}^{-1}$ ];  $C_{final}$  representa a concentração do efluente tratado coletado no tempo 30 minutos [ $\text{mg.L}^{-1}$ ].

#### 4.4.2. Determinação do percentual de remoção da turbidez

Para a análise da turbidez, é utilizado um turbidímetro portátil, da marca HANNA® com precisão de  $\pm 2\%$ , devidamente calibrado. O método é adaptado segundo o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

O percentual de remoção de turbidez (%Turb) é estimado aplicando-se a equação 5.

$$\% Turb = \frac{Turb_{inicial} - Turb_{final}}{Turb_{inicial}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que: %Turb representa o percentual de remoção de turbidez,  $Turb_{inicial}$  a turbidez da tinta dissolvida em água no tempo zero, ou seja, início do processo e  $Turb_{final}$  a turbidez de efluente de tinta dissolvida em água no final do processo.

#### 4.4.3. Determinação do percentual de remoção da Demanda Química de Oxigênio (%DQO)

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é estabelecida como a quantidade de oxigênio consumida na oxidação química da matéria orgânica compreendida em uma amostra. A unidade é expressa em gramas de oxigênio por litro de água (SABESP, 1997). Essa análise é comumente utilizada como indicador do grau de poluição de um efluente. Neste caso, utiliza-se o método colorimétrico 5220 adaptado do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Preparo dos reagentes:

Solução de digestão: As soluções de digestão são compostas por: ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) e sulfato de mercúrio ( $HgSO_4$ ). Dilui-se 10,12 g de dicromato de potássio (preliminarmente seco por 2 h a 103 °C) em 500 mL de água destilada. Após a diluição, incorpora-se 167 mL de ácido sulfúrico concentrado e 33,3 g de sulfato de mercúrio. Uma vez os reagentes dissolvidos, deixa-se esfriar à temperatura ambiente e dilui-se até 1000 mL, armazenando-a em frasco âmbar para evitar interferência da luz.

Solução catalisador de ácido argênico: A solução catalisadora é composta pela mistura de 10,065 g de sulfato de prata ( $Ag_2SO_4$ ) à 1 L de ácido sulfúrico concentrado e armazenar em frasco âmbar. Deixa-se em repouso por 2 dias antes de utilizar a solução.

Solução de biftalato de potássio: O reagente é seco até massa constante a temperatura de 120 °C. Dissolve-se 0,17 g de biftalato de potássio ( $C_8H_5KO_4$ )

em 200 mL de água destilada, obtendo-se uma solução de 850 mg.L<sup>-1</sup>. Isto é equivalente a DQO de 1 g de O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.

#### Curva de calibração

Para determinação da curva de calibração, realizam-se diluições da solução padrão de 850 mg.L<sup>-1</sup> com propósito de alcançar soluções com concentrações de 170, 340, 510 e 680 mg.L<sup>-1</sup> de biftalato de potássio. Estes dados corresponderão aos valores de DQO de 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8 g de O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Dessa forma, pretende-se obter um conjunto de 5 pontos que possam corresponder diferentes teores de demandas químicas de oxigênio numa faixa que varie de 200 a 1000 mg de O<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.

#### Quantificação da DQO

A quantificação da DQO ocorre com a transferência das soluções para os tubos de digestão da seguinte forma: 2,5 mL das amostras de efluente tratado no reator de eletrocoagulação coletadas em cada tempo; 1,5 mL da solução de digestão e 3,5 mL da solução catalisadora. No ensaio em branco adiciona-se 2,5 mL de água destilada ao invés de uma solução de efluente coletada no reator.

Após, agita-se cuidadosamente os tubos de digestão e inseri-los no digestor da marca MARCONI®, modelo Dry Block MA4004, a 150°C. Antes de inserir os tubos, o digestor deve estar aquecido. O tempo de digestão utilizado é 2 horas. Concluído esse tempo, retira-se os tubos do processo de digestão e resfria-se em banho de água à temperatura ambiente. Após a solução digerida ser resfriada, transfere-se a mesma para uma cubeta de quartzo, com 1 cm de caminho óptico para realização das leituras das absorbâncias em um aparelho espectrofotômetro da marca QUIMIS®, modelo 4802 UV/VIS *Double Beam Spectrophotometer* comprimento de onda na faixa de 600 nm. Os procedimentos são realizados em duplicata.

É possível estimar o percentual de remoção de demanda química de oxigênio (%DQO) empregando-se a equação 6.

$$\% DQO = \frac{DQO_{inicial} - DQO_{final}}{DQO_{inicial}} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que: % *DQO* representa o percentual de remoção de demanda química de oxigênio, *DQO<sub>inicial</sub>* a demanda química de oxigênio de tinta dissolvida em água no tempo zero e *DQO<sub>final</sub>* a demanda química de oxigênio de tinta dissolvida em água no final do processo.

#### 4.4.4. Determinação do pH

O valor de pH de cada amostra é medido utilizando-se um pHmetro de bancada, marca MS TECNOPON®, modelo mPA210, previamente calibrado, com compensação automática de temperatura, resolução de 0,01 e precisão ±0,01%. O método utilizado é uma adaptação do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Durante o tratamento do efluente por eletrofloculação, o interesse é observar como ocorre evolução dos valores de pH. Assim, mede-se no tempo zero (início do processo) e subsequentemente os tempos de 5, 10, 20 e 30 minutos.

#### 4.4.5. Análise da determinação da condutividade elétrica

Afere-se a condutividade elétrica com o auxílio de um condutivímetro de bancada da marca BEL ENGINEERING®, modelo W12D, resolução 0,1 μS.cm<sup>-1</sup> e precisão ± 1%. Na realização de cada experimento é utilizada uma solução padronizada de NaCl de 1000 μS.cm<sup>-1</sup>. Este método se baseia em metodologia adaptada do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Em cada experimento, as medidas de condutividade das amostras coletadas nos tempos 0, 5, 10, 20 e 30 minutos são determinadas para verificar o comportamento (tendência) dos dados.

#### 5.4.6. Determinação do consumo de energia

O consumo de energia que é utilizado no processo de eletrocoagulação é estimado utilizando-se a equação 7 mencionado por Xu e colaboradores (2018):

$$C_{en} = \frac{U \cdot i \cdot t'}{V} \quad (7)$$

Em que:  $C_{en}$  representa o consumo de energia em  $W.h/m^3$ ;  $U$  é a tensão aplicada no processo em  $V$ ;  $i$  é a corrente elétrica aplicada em  $A$ ;  $t'$  é o tempo de reação em  $h$  e  $V$  é o volume do efluente tratado em  $m^3$ .

#### 4.4.7. Análise estatística

Na execução dos experimentos utilizou-se um planejamento experimental fatorial completo do tipo  $3^2$  com 2 pontos centrais (PC). A Tabela 1, especifica as variações das variáveis independentes (distância entre eletrodos e tempo de inversão de polaridade) na forma codificada e as variáveis respostas (ou variáveis dependentes).

Tabela 1 - Variáveis e níveis a serem investigados no planejamento  $3^2 + 2$  PC.

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
$X_1$ : tempo de inversão de polaridade (s)	10,0	20,0	30,0
$X_2$ : distância entre eletrodos (cm)	0,5	1,5	2,5

Fonte: o autor.

Neste planejamento busca-se identificar a influência dos efeitos e suas possíveis interações para as diferentes respostas (variáveis dependentes). A escolha de cada fator foi baseada nos resultados encontrados na literatura (ELEN *et al.*, 2017; PAPADOPOULOS *et al.*, 2019; MANUEL *et al.*, 2019).

No Quadro 4 verifica-se a descrição da matriz de planejamento experimental, cujos valores das variáveis estão representados na forma codificada em que: -1 para o nível “baixo” e +1 para o nível “alto”.

Quadro 5 - Matriz de planejamento de experimentos

<b>Variáveis independentes</b>	<b>Variáveis dependentes (resposta)</b>
--------------------------------	---

$X_1$	$X_2$	% remoção de tinta	% remoção de turbidez	pH	Condutividade	% remoção de DQO	massa de eletrodos	CEnergia
-1	-1	Valores a serem determinados experimentalmente e avaliados individualmente para o mesmo planejamento.						

0	-1	
+1	-1	
-1	0	
0	0	
+1	0	
-1	+1	
0	+1	
+1	+1	
0	0	
0	0	

Fonte: o autor.

Estima-se que este planejamento em três níveis permita evidenciar os fatores significativos em relação às variáveis resposta do processo. A análise estatística é uma ferramenta que auxilia na avaliação e interpretação dos resultados levando-se em consideração o nível de significância na faixa de 5% a 10%.

#### 4.4.8. Determinação do consumo de eletrodo

O acompanhamento da perda de massa do eletrodo é realizado antes e após a realização de cada experimento. Em cada término de experimento, os eletrodos são removidos do aparato experimental, lavados para remover presença de material retido nas placas e secos. Por fim, as massas são determinadas em balança analítica, da marca BIOPRECISA modelo FA-2104N e registradas. É interessante analisar nesta pesquisa a ocorrência da perda de

massa, bem como a possibilidade de usar um eletrodo que já tenha passado pelo processo de eletrofloculação (reuso).

#### **4.4.9. Captura de imagens para análise da superfície dos eletrodos**

Foram feitas imagens dos eletrodos para todos experimento. É utilizado o microscópio de marca Alpha® para a captura das imagens e transferidas diretamente para um computador. O registro é realizado com cada eletrodo devidamente limpo. As capturas foram realizadas antes e após cada experimento. Antes da realização do ensaio os eletrodos foram devidamente limpos para realização de cada captura, e após o término do experimento, houve o desmonte, a lavagem e a secagem do conjunto de placas para novamente fazer o registro fotográfico de cada placa, conforme citado no item anterior.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a execução dos experimentos. Nesse contexto, contempla os testes preliminares, o conjunto de experimentos e suas discussões identifica-se a melhor condição para a menor concentração de soluto no efluente, bem como a influência dos efeitos das variáveis de entrada (tempo de inversão de polaridade e distância entre os eletrodos) em relação às variáveis de saída (percentual de remoção de tinta, turbidez, percentual de perda de massa do alumínio das placas, pH e condutividade). Nas discussões efetua-se uma avaliação das variáveis que estejam contribuindo para a eficiência da remoção destes solutos (tinta e alumínio) do efluente.

### 5.1. TESTE PRELIMINARES

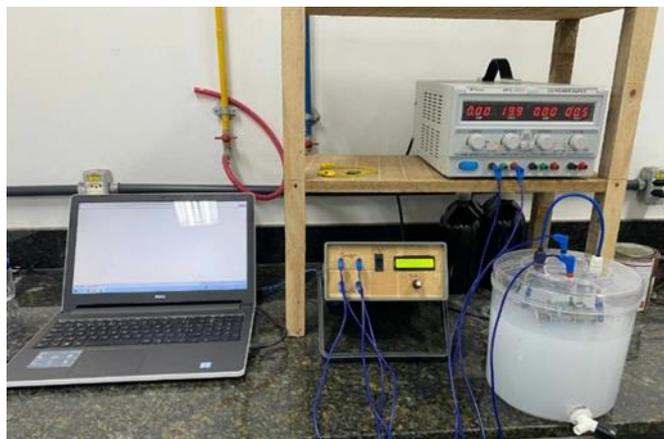
Inicialmente, pretendia-se investigar a remoção do teor de tinta de um efluente com concentração de 200 ppm. Assim, preparou-se a curva de calibração composta de oito diluições composta por: branco, 16, 20, 40, 60, 80, 120, 160 e 200 ppm. As leituras de cada absorbância, medidas em espectrofotômetro, foram graficadas em função de suas respectivas concentrações. Embora alcançando um coeficiente de correlação ajustado acima de 0,99, observou-se que a absorbância ultrapassava a escala de 1 para concentrações acima de 120 ppm. Esta condição não corrobora com a Lei de Beer Lambert. Segundo Skoog *et al.* (2001) a relação deixa de ser linear, devido ao espalhamento tornar-se considerável. Desta forma, definiu-se que neste trabalho a concentração do efluente sintético para todos os experimentos seria fixada em 100 ppm pelo fato da absorbância não ultrapassar a escala de 1, cumprindo-se as exigências da Lei de Beer Lambert.

#### 5.1.1. Determinação do percentual (%) de remoção de tinta (solutos)

Os dados experimentais medidos em duplicata foram realizados em um sistema integrado tendo como objeto de estudo um reator de eletrofloculação, que opera em batelada (Figura 7). O sistema possibilita extrair um conjunto de informações físicas e químicas durante o tratamento de um efluente à base de tinta dissolvida em água. Como os dados sobre tensão e corrente são captados, em tempo real e transmitidos para o *notebook*, são futuramente empregados para estimar o consumo de energia. O sistema possibilita também

avaliar a qualidade do efluente tratado, dos resíduos remanescentes do processo e o nível do consumo do eletrodo à medida que este seja utilizado. Assim, é possível traçar perspectivas futuras quanto ao uso deste aparato em efluentes provenientes de pintura em superfícies metálicas.

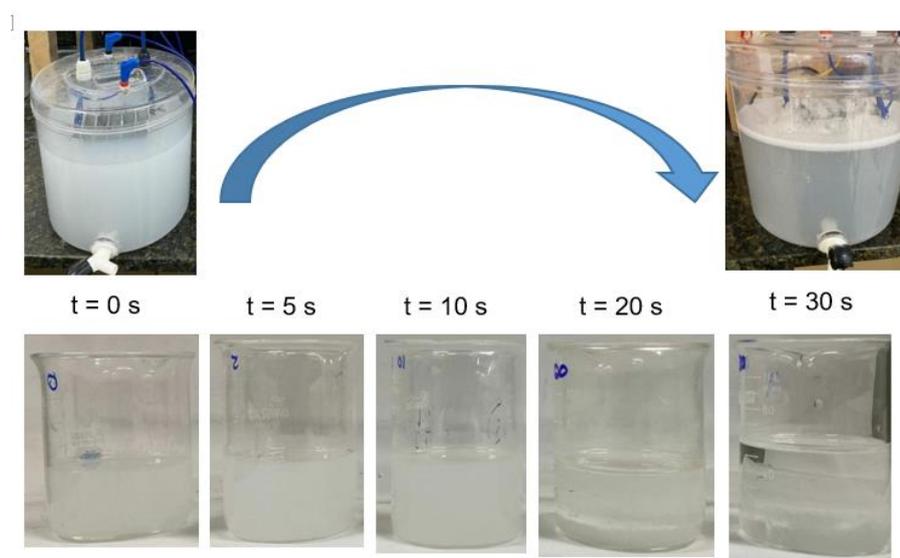
Figura 7 - Reator montado para realizar um procedimento experimental.



Fonte: o autor.

Foi coletada uma alíquota de cada experimento durante os tempos de 0, 5, 10, 20 e 30 min. O percentual de remoção de tinta de cada experimento foi estimado para os tempos inicial e final (Figura 8). É observado que no início o efluente apresenta uma característica turva, esbranquiçada, que impede a visibilidade (não transparente). Enquanto no fim do processo, formam-se duas regiões distintas: uma camada superior, caracterizada por lama e espuma e uma camada mais abaixo, na parte central, referente a um efluente mais clarificado em relação ao inicial, composto por pequenos flocos. Esse comportamento mostrou-se homogêneo (análise qualitativa) entre os experimentos que envolveram remoção de tinta em água por eletrofloculação.

Figura 8 - Processo de eletrofloculação em relação ao tempo.



Fonte: o autor.

A partir dos resultados estimados para o percentual de remoção de tinta (Tabela 2), observa-se que eletrodo com distância entre eletrodos de 0,5 cm e tempo de inversão de polaridade de 10 segundos o percentual médio ( $48,68 \pm 3,14\%$ ), encontra-se abaixo de 50%. Tecnicamente, este resultado, não é satisfatório o que inviabilizaria a prática deste estudo no mercado. Estas características se estendem para os ensaios 3, 4, 5, 6, 7 e 9.

Tabela 2 – Matriz de Planejamento para os dados do %RT.

EXPERIMENTO	X <sub>1</sub> , DEE	X <sub>2</sub> , TINV	%RT 1	%RT 2
1	-1	-1	51,82	45,54
2	0	-1	72,46	74,35
3	+1	-1	26,20	17,18
4	-1	0	63,81	65,22
5	0	0	42,64	38,85
6	+1	0	34,82	44,67
7	-1	+1	54,82	57,45
8	0	+1	85,26	84,75
9	+1	+1	62,14	68,26
10	0	0	70,23	79,77
11	0	0	77,76	78,01

Fonte: o autor.

Os experimentos 3 e 6, com suas particularidades operacionais apresentam valores mais baixos para o percentual de remoção. NAJE *et al.* (2016), retrataram em suas pesquisas que a maior distância entre os eletrodos impulsiona o aumento da resistência elétrica entre o anodo e o cátodo diminuindo o percentual de remoção final obtido.

Considera-se que há um aspecto interessante quanto o percentual alcança valores superiores a 70% de remoção. Nota-se que, o experimento 8 envolve uma condição experimental em que o eletrodo montado contém 1,5 cm de distância entre as placas e um tempo de inversão de polaridade estabelecido em 30 segundos. Os resultados são os que satisfatoriamente se destaca ao alcançar um valor médio de  $85,00 \pm 0,26\%$  de %RT. A condição experimental obtida para o experimento 8 é corroborada com as informações descritas por LOBO *et al.* (2016), que utiliza óleo (petróleo) para os ensaios, relataram que a diminuição do espaçamento entre eletrodos proporciona notadamente a formação de flocos e gás facilitando a sua elevação até a superfície do reator.

Após analisar os dados estatísticos gerados em função dos resultados dos ensaios, evidencia-se que 2 pontos experimentais (5 e sua réplica) necessitam ser retirados da análise, pois o resíduo gerado por estes pontos é elevado o que indica não haver significância. Na análise dos dados (Tabela 3) verifica-se que apesar das exclusões do ensaio 5 e sua réplica (*outliers*), foi preciso desprezar o termo Tinv (Q), pois o p-valor calculado encontra-se superior a 5% (coeficiente de regressão não significativo para o modelo).

Tabela 3 - Coeficiente de regressão para o percentual de remoção do soluto.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	t(11)	p-valor
Média/interação	77,8238	1,461112	53,2634	<0,0001*
(1)Dee (L)	-7,1158	1,192993	-5,9647	<0,0001*
Dee (Q)	-28,4962	1,886288	-15,1071	<0,0001*
(2)Tinv (L)	10,4275	1,192993	8,7406	<0,0001*
Interação (1) x (2)	9,0137	1,461112	6,1691	<0,0001*

Nota: \*p<0,05.

R<sup>2</sup> = 0,92216; R – ajustado = 0,9014, L = linear e Q = quadrático

Fonte: o autor.

O aumento da temperatura é um fator que influencia no aumento da % de remoção. Isto é devido ao fato de que quando se tem um aumento na temperatura do meio, se tem um aumento da movimentação das partículas (maior agitação), conseqüentemente uma maior colisão e interação entre as partículas e o material orgânico, aumenta assim essa troca e o % de remoção. No entanto, quando o valor é superior a 300 K (26,85 °C), a eficiência de remoção diminui devido à formação de flocos indesejados e aumento da solubilidade do precipitado.

A Equação 8 representa o modelo de regressão com termos quadráticos, em que cada efeito apresenta uma componente linear e quadrática. A análise permite também considerar a presença da interação entre os termos lineares. O ajuste realizado aos dados do percentual de remoção do soluto fornece um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 92,21%.

$$\%RT = 77,8238 - 7,1158.Dee + 10,4275.Tinv - 28,4962.Dee^2 + 9,0137.Dee.Tinv$$

(8)

Na Tabela 4 constam os valores estimados para ANOVA. Verifica-se que a comparação entre os testes F, fornece a grandeza do quanto o  $F_{calculado}$  é superior ao  $F_{tabelado}$ . Nota-se que a relação  $F_{calculado}/F_{tabelado}$  foi 14,537 superiores. Isto revela a qualidade do modelo quanto ao ajuste dos dados amostrados.

Tabela 4 - Análise de variância (ANOVA) para determinação do %RT.

Fator	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	$F_{cal}$	$F_{tab}$	$F_{cal/tab}$
Regressão	6460,170	4	1615,042	44,424	3,056	14,537
Resíduo	545,321	15	36,355			
Falta de ajuste	357,454	4	89,363	5,232		
Erro Puro	187,867	11	17,079			
Total	7005,490	19	368,710			

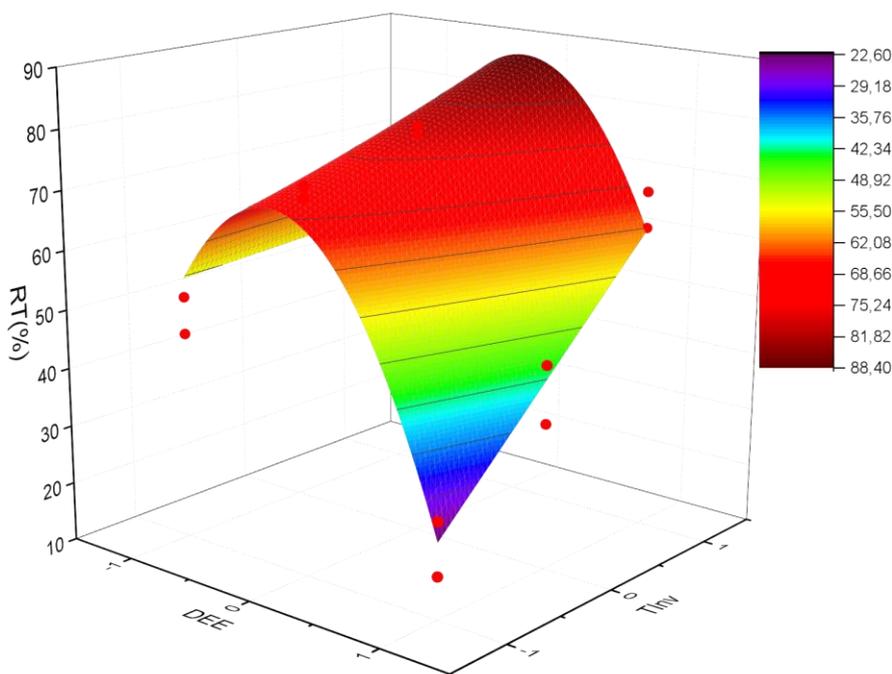
Nota: Resíduo = falta de ajuste + erro puro;  $F_{tab} = F_{0,95; 4; 15} = 3,056$ .

Fonte: adaptado de Barros Neto; Scarminio; Bruns (2002)

O gráfico de superfície de resposta (Figura 9) identifica a região em que ocorre a interação do %RT com a os termos Tinv e DEE. A superfície de

resposta nos possibilita identificar, frente às condições estabelecidas para as variáveis independentes, o ponto de máximo ou mínimo global na região de abrangência ou próximo das extremidades. Neste gráfico nota-se o momento quando se atinge ponto ótimo operacional envolvendo os termos lineares e quadráticos do modelo codificado. Percebe-se que se alcança o maior o percentual de remoção do soluto para o experimento 8, quando a distância entre eletrodos estiver no seu ponto médio (0) (distância entre eletrodos de 1,5 cm) e o tempo de inversão estiver no seu ponto máximo (+1) (tempo de 30 s). Ou seja, esta seria a melhor condição ou melhor ponto frente as condições estudadas.

Figura 9 - Superfície de resposta para %RT.

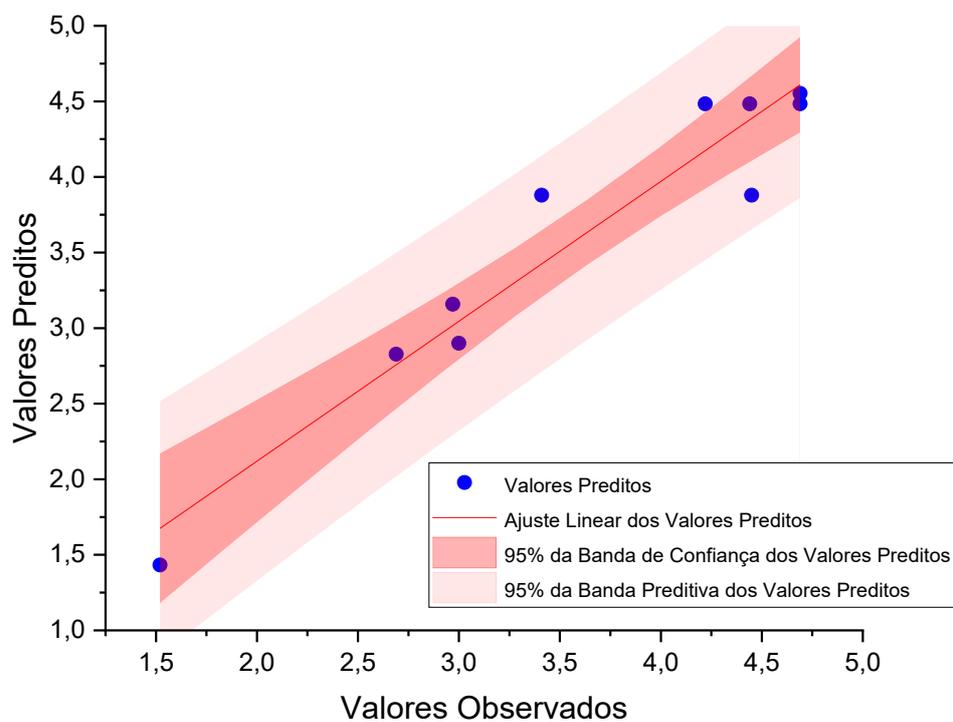


Fonte: o autor.

Também se avalia a qualidade do ajuste se o mesmo realizado apresenta uma condição satisfatória ao verificar se as hipóteses de normalidade e variância constante (homoscedasticidade) dos resíduos estão satisfeitas. O gráfico (Figura 10) indica que os resíduos do modelo ajustado seguem distribuição normal, devido aos pontos se aproximarem da reta identidade. Enquanto o gráfico (Figura 11) descreve o comportamento aleatório

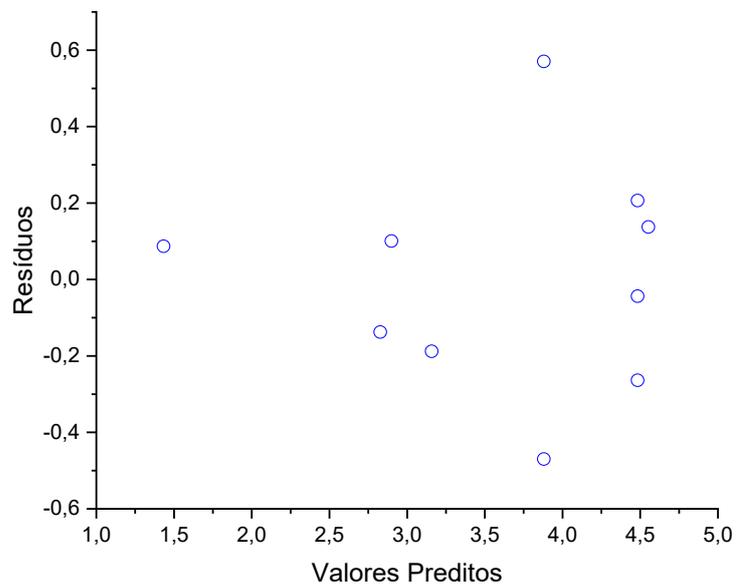
do ruído (erro) em torno do zero na relação entre as variáveis (independentes e dependente), não evidenciando-se tendências entre os valores das variáveis independentes.

Figura 10 – Gráfico dos valores preditos *versus* observados para o %RT.



Fonte: o autor.

Figura 11 - Gráfico dos resíduos em função dos valores preditos para o %RT.

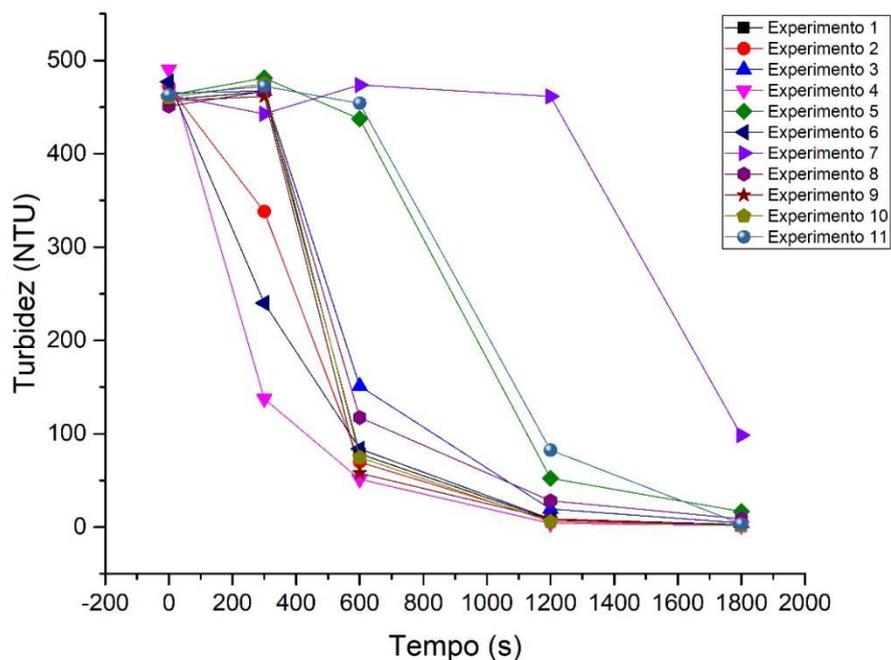


Fonte: o autor.

### 5.1.2. Análise da turbidez

Durante o processo observou-se que a cor do efluente alterava-se com o tempo de eletrólise, ficando com o aspecto mais claro uma vez que o tempo de reação alcançava os 30 minutos (tempo espacial máximo). Observa-se na Figura 12 o comportamento dos dados para a turbidez medidos com o tempo de eletrólise para cada experimento.

Figura 12 - Gráfico da turbidez em relação ao tempo.



Fonte: o autor.

Os dados indicam que existe uma tendência da turbidez se reduzir com o aumento do tempo. É perceptível em todos os experimentos que em 20 min de eletrólise havia alcançado um valor de turbidez inferior a 40 NTU, que é o valor máximo permitido segundo a Resolução CONAMA n° 357/2005. Cerqueira e Marques (2011) apontaram que a eficiência de remoção de cor, turbidez e graxa é diretamente dependente da concentração de íons produzidos pelo eletrodo no processo de eletrofloculação, provenientes de reações que ocorrem nos eletrodos de alumínio (cátodo) e a quebra da água proporcionando, no meio, a elevação da presença gás hidrogênio e hidroxila. À medida que aumenta o tempo de eletrólise, a concentração dos íons gerados aumenta, formam-se flocos devido a geração de floculante *in situ* (favorecendo a coagulação) e a concentração de hidrogênio aumenta. Este fato não foi constatado nos experimentos 5 e 7, possivelmente devido a problemas experimentais.

A Tabela 5 contém os valores referentes ao percentual de redução turbidez estimados entre os tempos inicial e final para cada experimento

realizado. Como se pode observar todos os resultados encontram-se em torno de 99%. Esta constatação é corroborada pelos experimentos realizados por Cerqueira, Souza e Marques (2014). Eles verificaram que a elevação do tempo de eletrólise (tempo espacial) proporcionou os melhores resultados para a eficiência de %Turb, alcançado 99% de remoção. No entanto, os pesquisadores concluíram que a eficiência de remoção permaneceu a mesma e a emulsão ficou visualmente clara com o tempo. Esse comportamento permitiu sugerir que o menor tempo de espaço (24 min) foi suficiente para eliminar a turbidez neste estudo, pois atingiu um %Turb superior a 99%. Portanto, a melhor eficiência de remoção causada pelo maior tempo de espaço não foi compensada pelo consumo de energia adicional.

Tabela 5 – Matriz de Planejamento para o %Turb no fim do processo.

Experimento	X <sub>1</sub> , DEE	X <sub>2</sub> , T <sub>inv</sub>	%Turbidez
1	-1	-1	99,69
2	0	-1	99,67
3	+1	-1	78,71
4	-1	0	99,72
5	0	0	99,40
6	+1	0	99,05
7	-1	+1	99,07
8	0	+1	99,43
9	+1	+1	99,60
10	0	0	99,64
11	0	0	99,25

Fonte: o autor.

Jiang *et al.* (2019) trataram um efluente oleoso com mais de 98% de remoção de turbidez após eletrofloculação a uma vazão de 5 L.h<sup>-1</sup> por 40 min. Aumentar o fluxo para 25 L.h<sup>-1</sup> resultou em uma diminuição para 82%. Os autores concluíram que a menor vazão proporciona maior tempo de residência para o crescimento de flocos e adsorção de poluentes, aumentando assim a eficiência da corrente aplicada e, portanto, a eficiência do tratamento. Esses dados são consistentes com os dados validados no trabalho atual, em que um

%Turb superior a 99% foi alcançado usando uma vazão de 7,85 L.h<sup>-1</sup>, um espaço de tempo de 30 minutos.

Na literatura alguns autores perceberam em trabalhos envolvendo emulsão que o nível mais alto de tempo de inversão de polaridade promove o maior %Turb, bem como o %DQO. Isso se deve à maior capacidade de favorecer a formação de coagulantes, de modo que os íons liberados têm forte possibilidade em interagir com as gotículas de óleo para formar flocos, aumentando assim a eficiência do processo de remoção da turbidez, que é causada pelos poluentes oleosos (GOBBI *et al.*, 2018; PERTILE; BIRRIEL, 2017).

### **5.1.3. Análise da massa dos eletrodos**

Para realização da avaliação do consumo de elétrodo no processo eletrolítico realizado nesta pesquisa foi feita a pesagem do elétrodo antes do processo, e após o processo também este eletrodo foi pesado. Este processo foi feito com as 6 placas de alumínio. Os resultados podem ser consultados na tabela apresenta no Anexo F no final desta dissertação. A taxa de consumo dos eletrodos é um fator importante que deve ser determinada no processo de eletrofloculação para avaliar se os eletrodos podem ser reutilizados. Tal condição seria limitada, se o material estiver desgastado a ponto de liberar compostos indesejados para o efluente tratado.

O valor de perda de massa do elétrodo pode ser usado para determinar a massa de material orgânico que foi apenas eletrofloculado. Esta massa pode ser determinada subtraindo a massa de metal perdida para o meio durante a reação.

Faz parte do processo eletrolítico a corrosão do elétrodo, segundo as Leis de Faraday, por isso a perda da massa de eletrodo. Essa corrosão é explicada devido ao fato que metais apresentam um menor potencial de oxidação que a água, e uma vez que os eletrodos são feitos de metais, eles oxidam perdendo elétrons para o meio reacional. A verificação é determinada e avaliada a partir da diferença entre as determinações de massa (antes e no final) das placas que compõem o elétrodo no processo eletrolítico.

Existem vários parâmetros que influenciam nessa perda de massa, uma delas é a temperatura. Quando se tem um aumento da temperatura do meio, uma maior corrosão do eletrodo acontece, e conseqüentemente se tem mais perda de massa de eletrodo. Isso é justificado porque quando se tem um aumento da temperatura, a taxa de reação aumenta proporcionando o aumento da taxa de remoção de matéria orgânica.

Nota-se uma perda de massa dos eletrodos, portanto, um consumo deste por desgaste ou corrosão. Esta perda não se mostra significativa, em todos os experimentos. Alguns autores como EL-ASHTOUKHY et al, 2015; GOBBI, 2013, afirmam que existe uma grande perda de massa quando se aplica uma grande densidade de corrente. Condição não investigada nesta pesquisa.

A perda de massa é justificada pela oxidação sofrida pelo eletrodo, uma vez que ele recebe os elétrons dos metais presentes no efluente tratado, fazendo com que os metais reduzam e assim possam ser eliminados posteriormente por um processo de filtração. O desgaste do eletrodo é algo eminente ao processo de eletrofloculação, assim buscam-se formas ou metodologias para reduzir esse desgaste e aumentar o tempo de vida do eletrodo.

A distância entre os eletrodos é outro parâmetro que precisa ser considerado quando se deseja otimizar os custos. Como a distância de eletrodo é diretamente proporcional a diferença de potencial, a eficiência do processo de eletrofloculação pode ser melhorado, alterando-se a distância das placas. Em alguns trabalhos, quando se aumenta a distância dos eletrodos, se tem um aumento na eficiência de remoção da DQO. A justificativa se deve ao efeito da eletricidade estática depender da distância entre os eletrodos. Então, à medida que a distância aumenta, o movimento dos íons resultantes diminuirá, facilitando formação de flocos e aglomeração. Segundo Crespilho, Santana e Rezende (2004), quando a condutividade do efluente é relativamente alta, utiliza-se um espaçamento de eletrodos maior. Em condutividade mais baixa, usa-se um espaçamento menor para evitar perda de energia devido à dissipação de calor, o que reduz custos de energia. Além disso, o menor espaçamento dos eletrodos pode proporcionar maior turbulência causada pelas

bolhas de ar geradas, aumentando-se assim a reação entre coagulante e contaminantes (MARTÍNEZ-VILLAFANE *et al.*, 2009).

Segundo Den & Huang (2005), diferentes espaçamentos entre eletrodos não mostraram diferença na eficiência de remoção ao testar o sistema de tratamento na mesma corrente. Portanto, a distância entre eles é considerada apenas como um fator de otimização de custos.

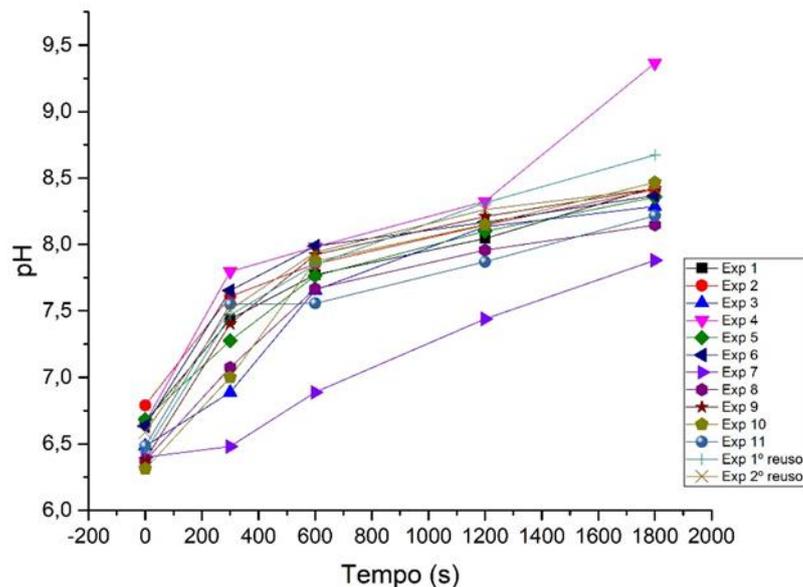
No trabalho de Xu e Zhu (2004), os autores observaram uma diminuição na DQO e na remoção de óleo quando a distância entre os eletrodos foi aumentada, e 10 mm foi considerado um valor adequado. Ao considerar os custos de processamento e a eficiência do processo.

Os autores, Modirshahla *et al.* (2007), ressaltam na pesquisa desenvolvida que com o aumento da distância entre os eletrodos, ocorre interação entre os íons na solução e o coagulante formado pode diminuir. Isto repercutiu na eficiência de remoção da tartrazina, um corante sintético, que diminuiu cerca de 26,64% quando a distância aumentou de 0,5 cm para 3 cm.

#### **5.1.4. Análise do pH do meio**

A partir dos dados tabelados no apêndice B e Figura 13, verifica-se que em todos os ensaios realizados, respeitando-se cada condição operacional, específica ocorre no desenvolvimento do processo o aumento do pH à medida que o tempo espacial avança. Comportamento observado por estudos semelhantes embora em diferentes efluentes (GOBBI *et al.*, 2018). Entretanto, é possível perceber com a determinação do pH com o tempo do início ao fim do processo que o efluente tratado se básico (pH alcalino), devido as equações geradas no cátodo e ânodo, segundo GOBBI *et al.* (2018), surge a liberação de metal para o meio na forma iônica, bem como a hidroxila que formam um floco (floculação) e este, juntamente com as microbolhas (os gases que se desprenderem do eletrodo), resultam em partículas dispersas, mais leves. A medida que o tempo espacial aumenta, ocorre maior quantidade de liberação de microbolhas e por diferença de densidade, a relação floco-microbolha são sustentadas e se movimentam ascendentemente. Isto proporciona o carregamento dos flocos de tintas e compostos de hidróxido de alumínio até a superfície (GOBBI *et al.*, 2018) e (DIAS *et al.*, 2019).

Figura 13- Gráfico do pH em relação ao tempo



Fonte o autor.

Pesquisadores como ABDELWAHAB; et al (2013) e EL-NAAS *et al.* (2009) concluíram que o máximo desenvolvimento da EF utilizando ânodo de alumínio, ocorre quando o pH é neutro, ou seja 7, ou próximo a ele. A faixa inicial de pH deste trabalho ficou entre 6,36 e 6,75, enquanto o pH final encontra-se abaixo de 9. Houve apenas uma condição experimental que foi exceção devido o experimento ter ultrapassando o pH igual a 9. Desta forma, a técnica se mostra adequada pelo comportamento favorável do pH para o tratamento, cujas espécies predominantes como compostos similares a  $Al(OH)_{3(s)}$ , auxilia na remoção dos poluentes pelas reações geradas pela eletrofloculação e pela ação da sedimentação que atua de forma concomitante ao processo (KATAL; PAHLAVANZADEH, 2011). A análise do pH do efluente durante o tempo operacional de de 30 min revela que o pH se mantém dentro das condições aceitáveis impostas pela legislação vigente que designa o descarte de águas residuais devem apresentar o pH na faixa entre 5 e 9. Verifica-se que diante dos resultados desta pesquisa a maioria encontram-se de acordo, exceto o experimento G para as condições de menor distância entre eletrodos e maior tempo de inversão de polaridade.

### 5.1.5. Análise da condutividade elétrica

Na Tabela 6 é estudado a existência de informações dos dados experimentais estimados, medidos em triplicata. Os dados esboçam o comportamento da condutividade sujeita a determinadas características diferentes conforme a variação das condições de distância entre eletrodos e tempo de inversão de polaridade.

Tabela 6 – Matriz de Planejamento dos dados relativos à condutividade elétrica.

DEE	Tinv	Condut. Média	Desvio padrão	Desvio percentual (%)
-1	-1	414,87	24,58	5,92
0	-1	412,80	5,84	1,43
1	-1	390,27	1,72	0,44
-1	0	393,67	7,21	1,83
0	0	407,00	10,95	2,70
1	0	398,00	22,85	5,74
-1	1	400,67	6,71	1,67
0	1	393,93	16,16	4,10
1	1	399,93	7,47	1,87
0	0	405,00	11,78	2,91
0	0	404,27	8,13	2,01

Fonte: o autor

A condutividade do efluente, capacidade de conduzir a corrente, é proporcional à quantidade de íons condutores presentes no meio líquido responsável pela condução da corrente. Quanto maior a concentração desses íons no efluente, maior sua capacidade de conduzir corrente elétrica e, portanto, maior a probabilidade de reações entre as espécies presentes no efluente. Esta sequência de conceitos representa um fator positivo que pode favorecer na redução do consumo de energia. Nota-se que a condutividade determinada neste estudo pouco varia com o tempo, ou seja, os dados são praticamente constantes. Provavelmente esteja relacionado com a quantidade fixa de eletrólito (NaCl) adicionado no preparo da amostra (efluente sintético). Tal constatação foi mencionada no estudo realizado por Flores *et al.* (2018) para tratamento de águas residuais oleosas de engenho de oliva utilizando-se

processos sequenciais que envolvem eletrocoagulação (EC) seguido por eletro-Fenton (EF) ou fotoeletro-Fenton (PEF) sob irradiação de ultravioleta.

Embora a média da variação dos valores da condutividade ao longo do tempo são praticamente constante, esta variação dos valores médios encontra-se abaixo de 6%. Alguns experimentos demonstram uma pequena redução, mas praticamente dentro do erro experimental. A variação apresenta-se aleatória em torno de 0,44 a 5,92%, que pode estar relacionada com o período do tempo de inversão. Quando ocorre a inversão de polaridade pode ocorrer uma pequena variação na condutividade, supostamente justificável pela distância entre os eletrodos (DEE). A DEE delinea o caminho que a corrente deve percorrer para entrar e sair da solução. Quando ocorre um aumento desta distância, ocorre um aumento da diferença de potencial diminuindo, assim, a condutividade entre eles. No entanto, se a DEE for curta dificulta a difusão de íons e a homogeneização do efluente. É interessante observar a formação de depósitos orgânicos ou microbolhas, pois estes reduzem os sítios ativos e as taxas de reação.

Dependendo das características do efluente, a distância entre os eletrodos pode ser variada para melhorar a eficiência do processo. Por exemplo, quando a condutividade do efluente é relativamente alta, uma distância maior pode ser aplicada; caso contrário, a distância deve ser a mais curta possível para não aumentar excessivamente potencial (CRESPILHO; REZENDE, 2004).

A condutividade está diretamente relacionada à concentração de cloreto de sódio (NaCl) no meio. No estudo de Abdel-Aziz *et al.* (2016), os pesquisadores determinaram que a porcentagem de remoção de óleo é proporcional à quantidade de NaCl. Aumentando a concentração de NaCl de 0,5 para 3,5 g.L<sup>-1</sup> aumentou %TOG por um fator de 1,31 para 1,51. O cloreto de sódio é um bom condutor de energia em solução aquosa. Portanto, um aumento na concentração de NaCl resulta em um aumento na condutividade do meio.

Segundo Fornari (2007), a adição de NaCl tem duas funções importantes: aumenta a condutividade eletrolítica; a produção de cloretos ativos

é essencial durante a eletrólise, o que auxilia na desinfecção da água e, também, evita a formação de uma camada de passivação no ânodo, melhorando assim o tratamento eficiente. Quando a condutividade eletrolítica é baixa, é necessário aplicar alto potencial, o que pode levar à passivação do eletrodo e reduzir a eficiência da corrente, aumentando os custos de processamento devido ao maior consumo de energia.

A adição de  $\text{Cl}^-$  age na redução dos efeitos negativos dos ânions  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , pois podem levar à deposição de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , propiciando a formação de camadas de óxidos e reduzir a eficiência da corrente. Assim, recomenda-se ter 20% de  $\text{Cl}^-$  no ânion presente. O uso de grandes quantidades de  $\text{NaCl}$  tem a vantagem de diminuir a tensão da bateria e diminuir o consumo de energia (ABDELMOEZ; BARAKAT; MOAZ, 2013; CHEN, 2004). Contudo deve-se estar atento a quantidade de  $\text{Cl}^-$  máxima permitida na legislação é de  $250 \text{ mg.L}^{-1}$ , isto é, quando excede a esse valor um poluente está a ser adicionado ao efluente (CONAMA, 2005).

#### **5.1.6. Análise da demanda química de oxigênio (DQO)**

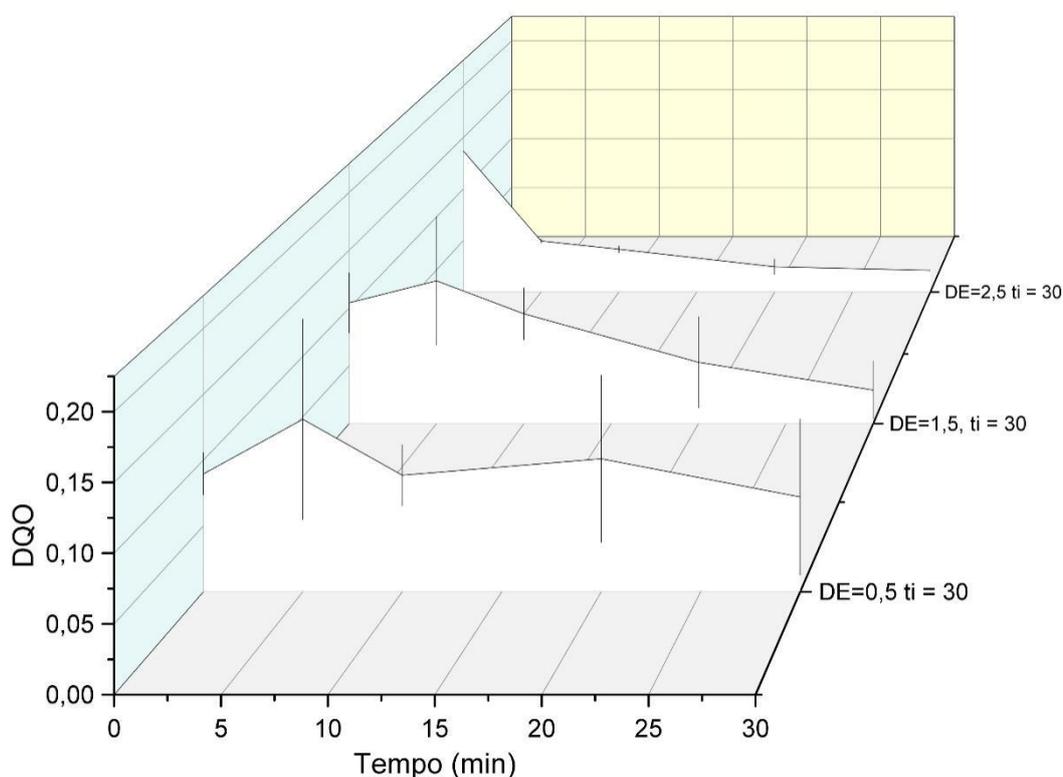
A demanda química de oxigênio (DQO) é um parâmetro utilizado na análise de tratamento de efluentes para avaliar a quantidade de oxigênio dissolvido (OD) consumido em um ambiente ácido, resultando na degradação da matéria orgânica, biodegradável ou não. Neste trabalho avaliam-se os resultados da análise da DQO com o tempo de eletrólise e, também, com a variação da distância entre eletrodo e o tempo de inversão.

Os gráficos (Figura 14,15 e 16) contém informações sobre os dados estimados da DQO conforme o tempo de eletrólise e a influência das variáveis independentes estudadas. Observa-se uma diminuição ou degradação da matéria (ou carga) em relação ao tempo de eletrólise. No início se tem uma quantidade expressiva de matéria orgânica no meio, e com o tempo isso vai diminuindo por consequência do oxigênio vai sendo oxidado diminuindo assim a quantidade de matéria orgânica no meio. Em todos os experimentos observa-se que no tempo de 20 minutos a DQO começa a estabilizar. No entanto, em 5 minutos, encontra-se ligeiramente aumentada. Possivelmente,

este aumento pode ser devido a diminuição no volume do efluente do reator após a coleta da amostra dentro intervalo de eletrólise.

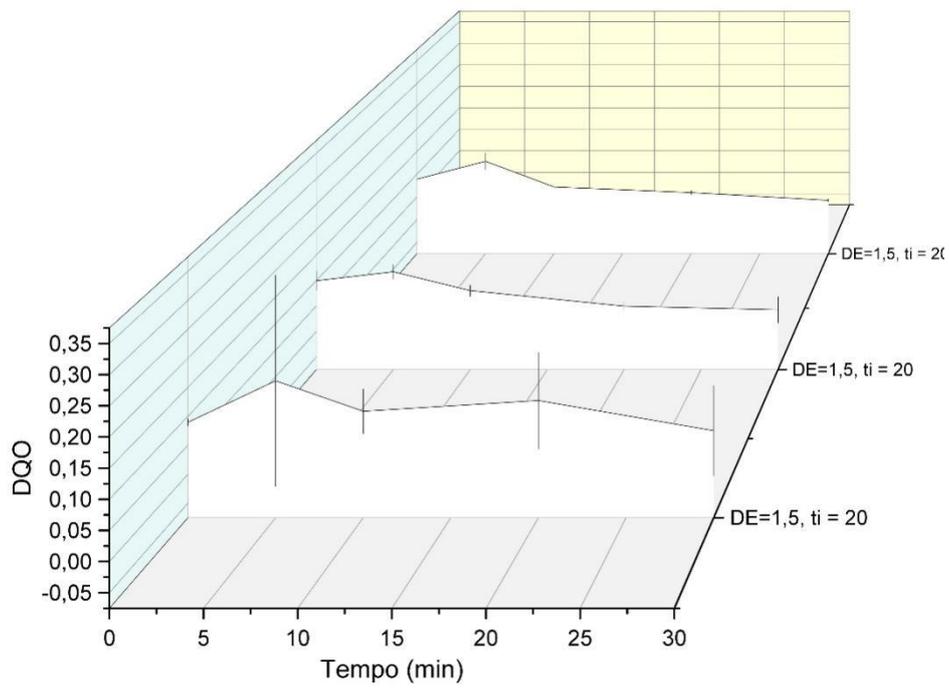
Interessante observar que quanto maior o espaçamento entre os eletrodos maior e mais eficiente a remoção DQO. Isso é justificado pelo fato de ao aumentarmos a distância entre os eletrodos, os íons têm uma maior interação com os coágulos presentes no efluente, proporcionando maior remoção. Tal fato indica que o espaçamento influencia na DQO. Entretanto, percebe-se que o tempo de inversão não afeta a DQO, se analisarmos os gráficos com diferentes tempos de inversão devido a quantidade de remoção permanecer praticamente a mesma.

Figura 14 - Gráfico da relação da DQO com o tempo variando DEE e  $T_i$ .



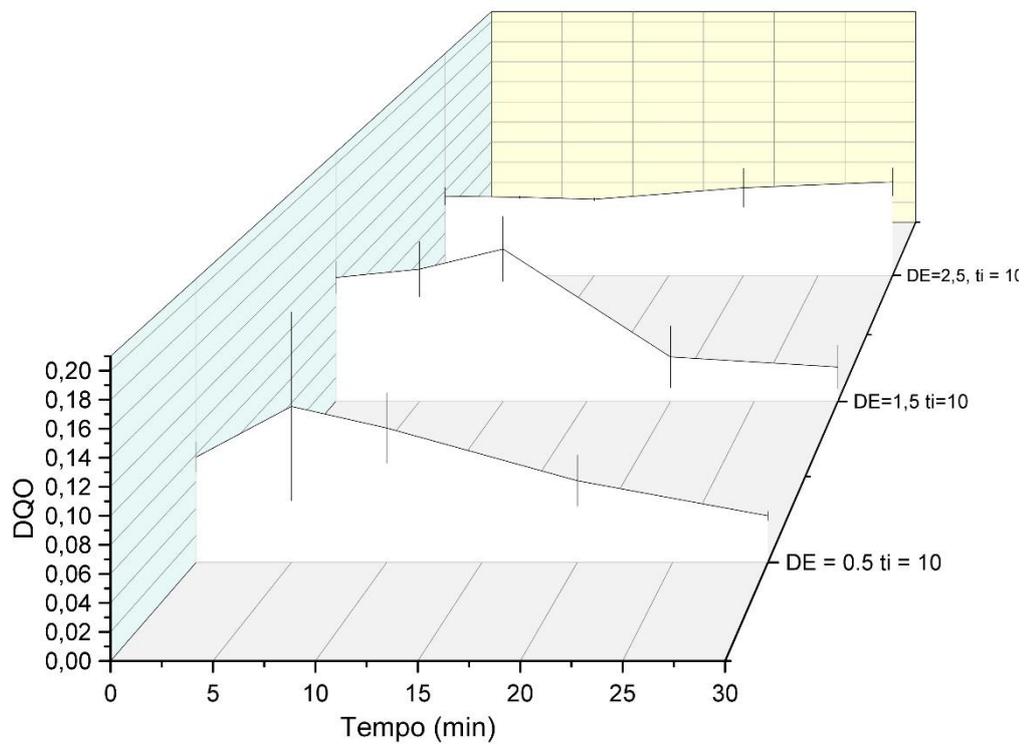
Fonte: o autor.

Figura 15 - Gráfico da relação da DQO com o tempo variando DEE e Ti.



Fonte: o autor.

Figura 16 - Gráfico da relação da DQO com o tempo variando DEE e Ti.



Fonte: o autor.

Os eletrodos de alumínio tendem a apresentar um alto valor de remoção de DQO, pois o agente coagulante formado no processo é  $\text{Al}(\text{OH})_3$  que se apresenta como um sólido com uma densidade menor, quando comparado com outros agentes coagulantes formados quando usado outros metais como material de eletrodo. Este fato foi comprovado e fundamentado no trabalho de Zodiet *al.* (2009) analisaram a eficiência de remoção utilizando-se eletrodos de alumínio e ferro em um efluente de indústrias têxteis. Eles constataram que o hidróxido de alumínio é capaz de transportar mais orgânicos do efluente, pois leva mais tempo para decantar no meio e, portanto, tem maior tempo de contato com o efluente, resultando em maior taxa de remoção de DQO.

Segundo Tir e Moulai-Mostefa (2008), a densidade de corrente está diretamente relacionada à quantidade de coagulante produzida pela dissolução eletroquímica do ânodo de alumínio. A presença de coagulantes na solução ajuda a melhorar a eficiência de remoção da DQO. No estudo realizado pelos autores, uma densidade de corrente de  $25 \text{ mA.cm}^{-2}$  foi suficiente para facilitar a remoção de 89% da DQO. Este resultado é consistente com o presente trabalho, pois a taxa de remoção de DQO em todos os experimentos foi superior a 90% usando uma densidade de corrente fixa de  $28 \text{ mA.cm}^{-2}$ .

Gonderet *al.* (2017) verificaram que a eficiência de remoção de DQO não apresentou resultados significativos com o aumento do tempo de operação, variando de 81 a 88% para eletrodos de alumínio entre 5 e 50 min. Comportamento semelhante é observado no gráfico da Figura 16, pois a %DQO possui a sua maior área nas camadas inferior e superior do espaço-tempo. No entanto, esta diferença não é suficiente para compensar o consumo de energia do sistema.

Chen *et al.*, (2000) avaliaram a eletrofloculação para o tratamento de efluentes de restaurante, utilizando eletrodos de alumínio e a eficiência obtida da taxa de remoção de DQO foi de apenas 72%. Os autores associaram a DQO residual à presença de compostos orgânicos dissolvidos. Em um outro estudo, Tchamangoet *al.*, (2010) confirmaram este fato ao analisar a eletrofloculação aplicada no tratamento de esgoto que continha com resíduos na sua composição.

### 5.1.7. Análise do consumo de energia elétrica (Cen)

A Tabela 7 pontua os valores estimados para o consumo energético utilizando-se a Equação 7 mencionada na metodologia para o tratamento do efluente empregando a eletrocoagulação. Consideram-se 2 A e 20 V os valores médios de corrente e tensão, respectivamente. Verifica-se que em entre os experimentos (1 e 11), o maior consumo de energia elétrica encontram-se próximos de 4,69 kW.h.m<sup>-3</sup>. O custo da energia elétrica é estabelecido pela ANEEL (2021), no qual o kWh para o setor industrial é R\$ 0,56. Portanto, o consumo energético estimado é identificado, individualmente, para os experimentos.

Tabela 7 – Matriz de Planejamento para o consumo de energia elétrica.

DEE	Tinv	C <sub>EN</sub> (kW.h.m <sup>-3</sup> )	Custo Energético (R\$.m <sup>-3</sup> )
-1	-1	4,69	2,63
0	-1	3,41	1,91
+1	-1	1,52	0,85
-1	0	2,46	1,38
0	0	4,44	2,49
+1	0	3,00	1,68
-1	+1	2,69	1,51
0	+1	4,45	2,49
+1	+1	2,97	1,66
0	0	4,22	2,36
0	0	4,69	2,63

Fonte: o autor.

Na Tabela 8 evidencia-se os valores pertinentes aos coeficientes de regressão dos fatores e sua interação linear entre DEE e Tinv sobre a principal variável resposta (C<sub>EN</sub>) estimados a todos os experimentos e analisados estatisticamente.

Tabela 8 – Coeficiente de regressão para o consumo de energia elétrica

Fator	Coef. regressão	Erro padrão	t(2)	p-valor
Média/interação	4,4836	0,1257	35,6694	< 0,0008
(1)DEE (L)	-0,6973	0,1111	-6,2764	0,0245
DEE (Q)	-0,8870	0,1678	-5,2871	0,0340
Tinv (Q)	-0,6039	0,1721	-3,5088	0,0725
Interação (1) x (2)	0,8625	0,1176	7,3355	0,0181

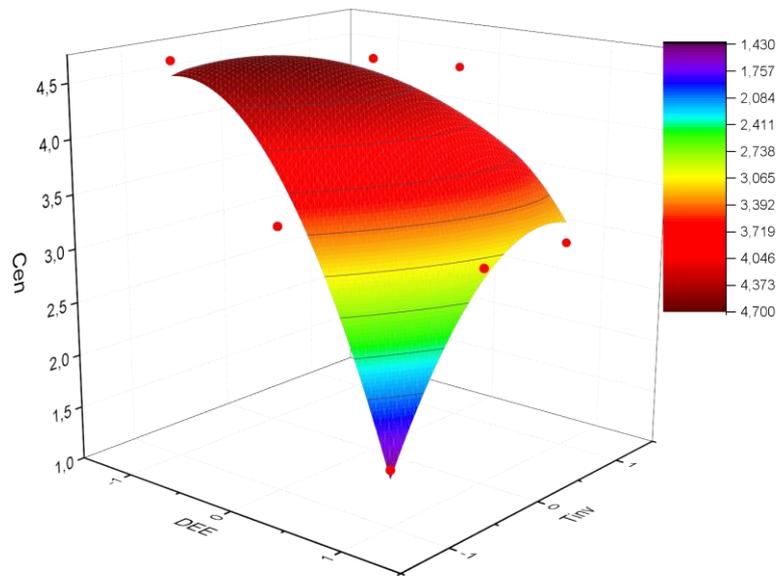
Nota: \*p < 0,10.

R<sup>2</sup> = 0,9259; R – ajustado = 0,8667; L = linear e Q = quadrático

Fonte: o autor.

Na análise dos resíduos dos dados há a necessidade de excluir ensaio 4 por representar *outlier*, ou seja, valor considerado atípico por apresentar um afastamento expressivo da tendência esperada; inconsistente para a estimativa realizada. Além deste, retira-se o coeficiente estimado para a variável Tinv (L) por não apresentar comportamento significativo, cujo p-valor ser superior a 10%. Constata-se que a interação da distância entre eletrodos e o tempo de inversão respectivamente linear, foi o que apresentou o melhor efeito sobre o gasto energético. Os outros fatores foram significativos, porém menos do que a interação.

A Figura 17 estabelece o comportamento da superfície de resposta ajustada aos dados estimados para cada experimento considerando-se um intervalo de confiança de 90%. É evidente que nível baixo de  $x_1$  (distância entre eletrodo) e nível alto de  $x_2$  (tempo de inversão) estimam-se os valores que tendem a apresentar os maiores consumos de energia.

Figura 17- Superfície de resposta para  $C_{en}$ 

Fonte: o autor

A Equação 9 é obtida a partir dos coeficientes de regressão, significativos. A equação é válida para os fatores estudados, cuja eficiência do modelo é verificada com o coeficiente de correlação ( $R^2 = 0,92$ ), devendo ser necessariamente maior ou igual a 0,90.

$$C_{en}(kW \cdot h \cdot m^{-3}) = 4,4836 - 0,6973 \cdot D_{EE} - 0,8870 \cdot D_{EE}^2 - 0,6039 \cdot T_{inv} + 0,8625 \cdot D_{EE} \cdot T_{inv} \quad (9)$$

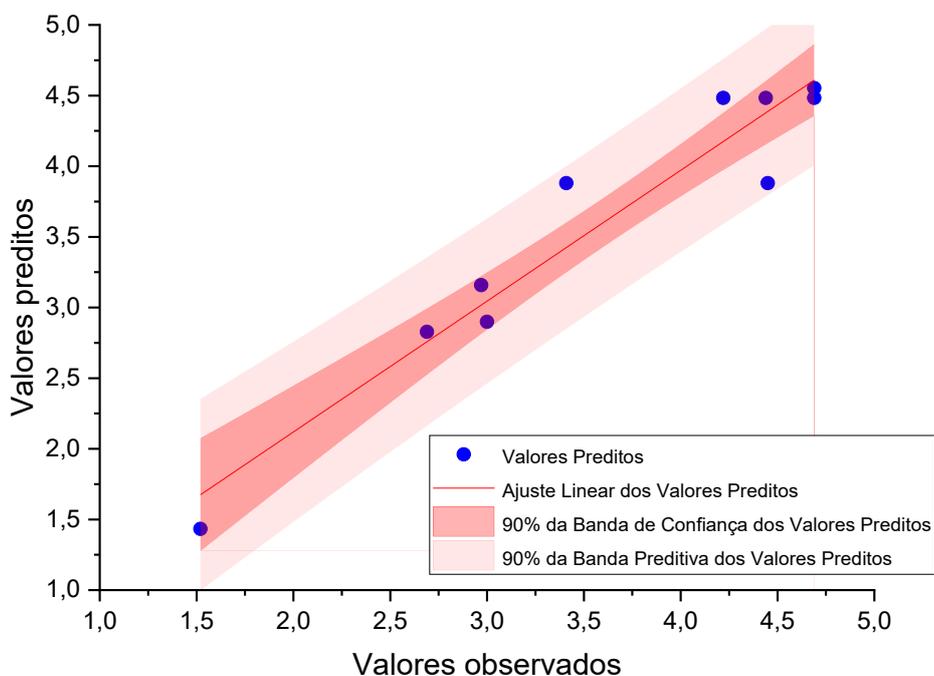
Ressalta-se que nesta relação, não se leva em consideração os valores de investimento para o processo acerca de custos com a confecção de eletrodos e reator, aquisição da fonte e custos de mão de obra e apoio técnico.

Observa-se que no %RT destaca-se o experimento 8 como aquele que apresenta maior remoção (viável). A análise das condições estimadas para o consumo energético deste mesmo experimento, não o torna o mais rentável. Em termos de custo, o mais apreciável se faz representado pelo experimento 3, que consome  $0,85 \text{ R}\$.m^{-3}$ , comparado ao 8 que é  $2,49 \text{ R}\$.m^{-3}$  totalizando uma diferença de  $1,64 \text{ R}\$.m^{-3}$ . Em termos de custo-benefício seleciona-se o conjunto que alcance o maior percentual de remoção de soluto em

consonância com um consumo de energia aceitável, mesmo que seja um pouco elevado. Assim utiliza-se o bom senso para alcançar a otimização do processo. Esta informação é cruzada entre os dois pontos ótimos que envolvem o maior percentual de remoção de tinta (máximo rendimento) com uma faixa de consumo de energia aceitável. O experimento 8 é mais custoso do que o experimento 3 quanto a energia elétrica, portanto podemos adotar estratégia que pode ser usada para redução dos custos com energia, tornando-se mais viável como por exemplo: uso de energia renovável para o consumo durante a realização dos ensaios.

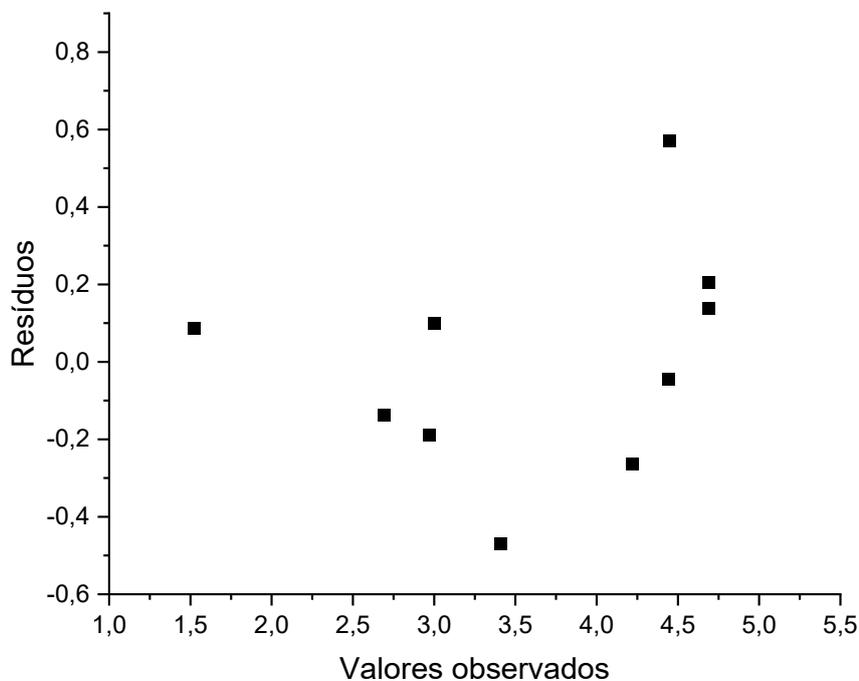
A Figura 18 estabelece a relação entre valores preditos em função dos valores observados. Verifica-se que os resíduos encontram-se próximos da linha contínua, dentro da banda de confiança. A Figura 19 indica a independência e a variância constante dos erros, confirmando que os pontos mostram-se aleatórios em torno do zero, devido a tendência de resíduo comportar-se como quase nulo.

Figura 18- Gráfico dos valores preditos versus observados.



Fonte: o autor

Figura 19- Valores observados x resíduos.



Fonte: o autor

### 5.1.8. Análise do reuso dos eletrodos.

Uma vez determinado que o experimento 8 apresenta o maior %RT, realizam novas utilizações dos pares de placas que compõem o eletrodo do experimento 8 em ensaios subsequentes. A Tabela 9 contém os dados medidos para a condição inicial (experimento 8) e sua subsequente reutilização (1ª e 2ª vez).

Tabela 92 – Valores das análises experimentais do %RT.

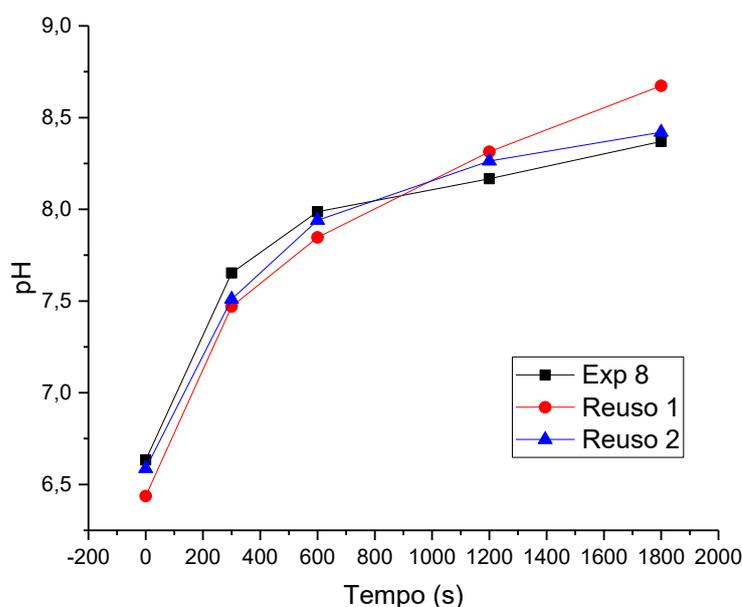
Experimento	%RT 1	%RT 2
Experimento 8 (inicial)	85,26	84,75
Reuso (1ª vez)	73,65	79,61
Reuso (2ª vez)	91,46	91,26

Fonte: o autor.

A análise dos valores médios determinados para os %RT indica que os eletrodos apresentam condições satisfatórias de serem reutilizados.

Verificam-se que os dados medidos de pH, graficados (Figura 20) ao longo do tempo, apresentam comportamentos similares, em atendimento às exigências do Conselho Nacional de Meio Ambiente. Os valores determinados para as variações de pH, inicial e na sequência de reuso, não ultrapassam o limite aceitável, ou seja, dentro da faixa de pH entre 5 e 9. Os experimentos de reuso apresentam um pH que compreende na faixa média de 6,4 para o tempo inicial e 8,70 para o tempo final dos experimentos.

Figura 20 - Gráfico do pH versus tempo – avaliação do reuso dos eletrodos.



Fonte: o autor.

Embora neste trabalho são fotografadas todas as placas antes e após experimento, para fins comparativos seleciona-se o eletrodo do experimento 8 para verificar se além de apresentar o maior %RT, quais consequências ocorrem se reutilizá-lo novamente. As Figuras 21A, 21B, 21C, 21D tratam de imagens capturadas das superfícies das placas do eletrodo 8 antes e após serem utilizadas. Ressalta-se que as placas são inicialmente numeradas para evitar que haja troca de ordem ou posicionamento da placa quando reutilizada.

Figura 21 - Placas dos eletrodos de alumínio.

A) Antes do Exp 8.  
Fonte: o autor.B) Após o Exp 8 e antes do reuso 1.  
Fonte: o autor.C) Após o reuso 1 e antes do reuso 2.  
Fonte: o autor.D) Após do reuso 2.  
Fonte: o autor.

Fonte o autor.

Pequenas formações de pontos de ferrugem (desgaste da placa) são verificadas de acordo com o quantitativo de reuso do eletrodo. Algumas ranhuras inicialmente existentes (superfície inicial da placa) também evoluíram com o uso dos experimentos. É notável duas ranhuras presentes na Figura 21.A, um traço leve na Figura 21.B e Figuras 21C e 21D não são tão visíveis. A Tabela 10 contém a massa das placas antes e após os experimentos.

Tabela 30: Massa das placas.

Experimento	Massa (g) (antes)	Massa (g) (após)
Experimento 8 (inicial)	41,3298	41,6282
Reuso (1ª vez)	41,6282	41,0866
Reuso (2ª vez)	41,0866	41,0883

Fonte: o autor.

Verifica-se que os valores medidos apresentam variações que oscilam positiva e negativamente. Entende-se que são condições atribuídas ao inversor de polaridade que mantém praticamente a massa constante, sem comprometer a reutilização do eletrodo.

Com estes resultados, verifica-se que o desgaste causado pelo processo não é significativo sendo possível reutilizar o mesmo eletrodo ou reaproveitar as placas para esta mesma finalidade. O fato em manter o quantitativo médio do %RT, o pH não ultrapassar as condições exigidas e perda de massa for moderada e não gerar resíduos para o meio ambiente, tais contribuições são positivas para avançar conhecimentos e aplicações interdisciplinares que compõem a relação engenharia, tecnologia e gestão.

## 6. CONCLUSÃO

Os dados obtidos e analisados estatisticamente via planejamento de experimentos permitem concluir que:

- é possível utilizar um sistema de eletrofloculação, compacto, com inversor de polaridade e eletrodos retangulares não perfurados, pois os resultados se mostram satisfatórios para o tratamento de efluente à base de tinta aplicada em revestimentos metálicos;

- a análise do planejamento experimental revela a influência das variáveis independentes ( $DEE = 1,5 \text{ cm}$  e  $T_{inv} = 30 \text{ s}$ ), alcançam um %RT médio de  $85,00 \pm 0,26\%$ , resultado significativo e satisfatório para o processo;

- os valores referentes ao percentual de redução turbidez estimados entre os tempos inicial e final para cada experimento encontram-se em torno de 99%, no maior tempo espacial e não sendo compensado pelo consumo de energia;

- embora o pH inicial do efluente apresenta uma característica ácida, os valores evoluem até 30 minutos de operação mantendo-se dentro da faixa entre 5 e 9, condições aceitáveis quanto ao descarte de águas residuais, estabelecidas pela legislação ambientais;

- a variação dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo apresenta-se aleatória em torno de 0,44 a 5,92% ( $< 6\%$ ), que pode estar relacionada com o período do tempo de inversão;

- os dados estimados da DQO apresentaram uma diminuição ou degradação da matéria (ou carga) em relação ao tempo de eletrólise, demonstrando alcançar estabilidade a partir de 20 minutos de operação;

- o consumo de energia é diretamente proporcional ao tempo de eletrólise, estimado em  $4,45 \text{ kW.h.m}^{-3}$  correspondente a um custo energético de  $2,49 \text{ R\$.m}^{-3}$  no experimento 8;

- o desgaste das placas dos eletrodos por meio de imagens capturadas das suas superfícies e determinação da perda de massa, não se mostra

significativo, sendo passível de reutilização ou reaproveitamento das placas para a mesma finalidade.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o efeito da variação da corrente no meio;
- Utilizar uma fonte de energia para tornar o sistema autossuficiente;
- Determinar se a quantidade dos gases (hidrogênio e oxigênio) formados durante o processo pode causar de riscos para o sistema; resposta necessária para um aumento da escala do protótipo;
- Estudar e caracterizar a lama que se forma no processo de eletrofloculação, propor um destino na busca por resíduo zero;

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELMOEZ, W.; BARAKAT, N. A. M.; MOAZ, A. Treatment of wastewater contaminated with detergents and mineral oils using effective and scalable technology. **Water Science and Technology**, v. 68, n. 5, p. 974–981, 2013.

AGUILAR-ASCÓN, Edwar; MARRUFO-SALDAÑA, Liliana; NEYRA-ASCÓN, Walter. Reduction of Total Chromium Levels from Raw Tannery Wastewater via Electrocoagulation using Response Surface Methodology. **Journal of Ecological Engineering**, v. 20, n. 11, p. 217–224, 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Consumidores, Consumo, Receita, Tarifa Média – por classe de consumo**. 2021

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21<sup>a</sup> ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

BARIŞÇI, Sibel; TURKAY, Ozge. Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations. **Journal of Water Process Engineering**, v. 10, p. 56–66, 2016.

BAZRAFESHAN, Edris *et al.* Heavy Metals Removal from Aqueous Environments by Electrocoagulation Process– a Systematic Review. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 13, n. 1, p. 74, dez. 2015.

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

CERQUEIRA, Alexandre Andrade; MARQUES, Monica Regina da Costa; RUSSO, Carlos. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**, v. 34, n. 1, p. 59–63, 2011.

CERQUEIRA, A. A.; SOUZA, P. S. A.; MARQUES, M. R. da C. Effects of direct and alternating current on the treatment of oily water in an electroflocculation process. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 3, p. 693–701, 2014.

CHEN, Guohua. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11–41, jul. 2004.

CHEN, G.; CHEN, X.; YUE, P. L. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. **Journal of Environmental Engineering**, v. 126, n. 9, p. 858–863, 2000.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente na indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 387–392, 2004.

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.

DANESHVAR, N; OLADEGARAGOZE, A; DJAFARZADEH, N. Decolorization of Basic Dye Solutions by Electrocoagulation: An Investigation of the Effect of Operational Parameters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1–3, p. 116–122, 28 fev. 2006.

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

EL-ASHTOUKHY, E. S. Z.; AMIN, N. K.; FOUAD, Y. O. Treatment of real wastewater produced from Mobil car wash station using electrocoagulation technique. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 10, p. 1–11, 2015.

EL-NAAS, M. H. *et al.* Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 180–185, 2009.

FLORES, N. *et al.* Treatment of olive oil mill wastewater by single electrocoagulation with different electrodes and sequential electrocoagulation/electrochemical Fenton-based processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 347, p. 58–66, 2018.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Toledo.

GOBBI, L.C. A. **Tratamento de água oleosa por eletrofloculação**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

GOBBI, Lorena C.A. *et al.* Electrocoagulation with Polarity Switch for Fast Oil Removal from Oil in Water Emulsions. **Journal of Environmental Management**, v. 213, p. 119–125, maio 2018.

GONDER, Z. B. *et al.* Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization. **Journal of Environmental Management**, v. 200, p. 380–390, 2017.

HARRIS, D. C. **Análise Química Quantitativa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2005.

KATAL, R.; PAHLAVANZADEH, H. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the

treatment of paper mill wastewater. **Desalination**, v. 265, n. 1, p. 199–205, 2011.

KHALED, Brahmī *et al.* Investigation of Electrocoagulation Reactor Design Parameters Effect on the Removal of Cadmium from Synthetic and Phosphate Industrial Wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, n. 8, p. 1848–1859, dez. 2014

KOBYA, M.; CAN, O. T.; BAYRAMOĞLU, M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 100, n. 1, p. 163–178, 2003.

KÖRBAHTI, Bahadır K.; TANYOLAÇ, Abdurrahman. Electrochemical Treatment of Simulated Industrial Paint Wastewater in a Continuous Tubular Reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 148, n. 2–3, p. 444–451, 15 maio 2009.

KOREN, J. P. F.; SYVERSEN, U. State-of-the-art electroflocculation. **Filtration and Separation**, v. 32, n. 2, p. 153–156, 1995.

MANUEL, Juan *et al.* **Journal of Water Process Engineering Printing ink effluent remediation : A comparison between electrochemical and Fenton treatments**. v. 31, n. November 2018, 2019.

ELEN, Jéssica *et al.* Delineamento Box-Behnken para remoção de DQO de efluente têxtil utilizando eletrocoagulação com corrente contínua pulsada. p. 1055–1064, 2017

MARTÍNEZ-VILLAFANE, J. F.; MONTERO-OCAMPO, C; GARCÍA-LARA, A. M. Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, n. 3, p. 1617–1622, 2009.

MOHAMMADI, Mohammad Javad *et al.* Electrocoagulation process to Chemical and Biological Oxygen Demand treatment from carwash grey water in Ahvaz megacity, Iran. **Data in Brief**, v. 11, p. 634–639, 2017.

MOHTASHAMI, Reza; SHANG, Julie Q. Treatment of automotive paint wastewater in continuous- flow electro flotation reactor. v. 218, p. 335–346, 2019.

MOHTASHAMI, Reza; SHANG, Julie Q; , Yanqing. **Treatment of Automotive Paint Wastewater Using Electroflotation : Kinetic Study , Influencing Factors and Data Analysis**. n. 2000, 2018.

MOLLAH, M. Y. *et al.* Electrocoagulation (EC) - Science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 84, n. 1, p. 29–41, 2001.

MOLLAH, M. Y. A. *et al.* Fundamentals, present and future perspectives of 91 electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 114, n. 1, p. 199–210, 2004.

MOUSSA, D. T. *et al.* A comprehensive review of electrocoagulation for water

treatment: Potentials and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 186, p. 24–41, 2017.

NAMRATA S GAJJAR, Namrata S Gajjar. Treatment of Paint (Emulsion) Industry Wastewater by Electrocoagulation. **IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology**, v. 3, n. 5, p. 42–45, 2013.

ORDOUEI, Mohammad Hossein; ELKAMEL, Ali. New composite sustainability indices for Cradle-to-Cradle process design: Case study on thinner recovery from waste paint in auto industries Risk Index Associated with Waste Streams. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 253–262, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.247>>.

ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES (OICA). 2018 Statistics | OICA. Oica. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/2018-statistics/>>. , 2019.

PAPADOPOULOS, Konstantinos P. *et al.* Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. **Journal of Environmental Management**, v. 237, n. February, p. 442–448, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.080>>.

PERTILE, T. S.; BIRRIEL, E. J. Treatment of hydrocyanic galvanic effluent by electrocoagulation: Optimization of operating parameters using statistical techniques and a coupled polarity inverter. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 10, p. 2631–2640, 2017.

RIVERA, J. L.; REYES-CARRILLO, T. A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 75–87, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.027>>.

SALEM, Vidal. **Tingimento têxtil: fibras, conceitos e tecnologias**. São Paulo: Blucher Golden Tecnologia, 2010.

SALIHOGU, Guray; SALIHOGU, Nezi Kamil. A review on paint sludge from automotive industries: Generation, characteristics and management. **Journal of Environmental Management**, v. 169, p. 223–235, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.039>>.

SANTOS, M. R. G.; GOULART, M. O. F.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S. **The application of electrochemical technology to the remediation of oily wastewater**. *Chemosphere*, n. 64, p. 393–399, 2006.

SHAHRIARI, T.; KARBASSI, A. R.; REYHANI, M. Treatment of oil refinery wastewater by electrocoagulation–flocculation (Case Study: Shazand Oil Refinery of Arak). **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 8, p. 4159–4166, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1810-z>>.

SKOOG D. A, *et al.* **Princípios de Análise Instrumental**. 5ª ed. Bookman 2001

SONG, S. *et al.* Effect of operational parameters on the decolorization of C.I. Reactive Blue 19 in aqueous solution by ozone-enhanced electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 1, p. 204–210, 2008.

TANATTI, N. Pınar; ŞENGİL, İ. Ayhan; ÖZDEMİR, Abdil. Optimizing TOC and COD removal for the biodiesel wastewater by electrocoagulation. **Applied Water Science**, v. 8, n. 2, 2018. Disponívelem: <<https://doi.org/10.1007/s13201-018-0701-2>>.

TIR, M.; MOULAI-MOSTEFA, N. Optimization of oil removal from oily wastewater by electrocoagulation using response surface method. **Journal of Hazardous Materials**, v. 158, n. 1, p. 107–115, 2008.

XU, X; ZHU, X. **Treatment of refractory oily wastewater by electrocoagulation process**, *Chemosphere*, v. 56, p. 889 – 894, 2004.

ZAIDI, S *et al.* University of Sciences and Technology HouariBoumediene , Faculty of Mechanical and Process Engineering / Environmental University of South Africa , College of Science Engineering and Technology , UNISA Science Campus , 1709 Roodepoort ,. **ARABIAN JOURNAL OF CHEMISTRY**, 2015. Disponívelem: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.009>>.

ZAGKLIS, Dimitris P.; KOUTSOUKOS, Petros G.; PARASKEVA, Christakis A. A combined coagulation/flocculation and membrane filtration process for the treatment of paint industry wastewaters. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 47, p. 15456–15462, 2012.

ZINI, Lucas Pandolphi *et al.* Treatment of automotive industry wastewater by electrocoagulation using commercial aluminum electrodes. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 142, p. 272–284, out. 2020.

ZODI, S. *et al.* Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: Effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. **Separation and Purification Technology**, v. 69, n. 1, p. 29–36, 2009.

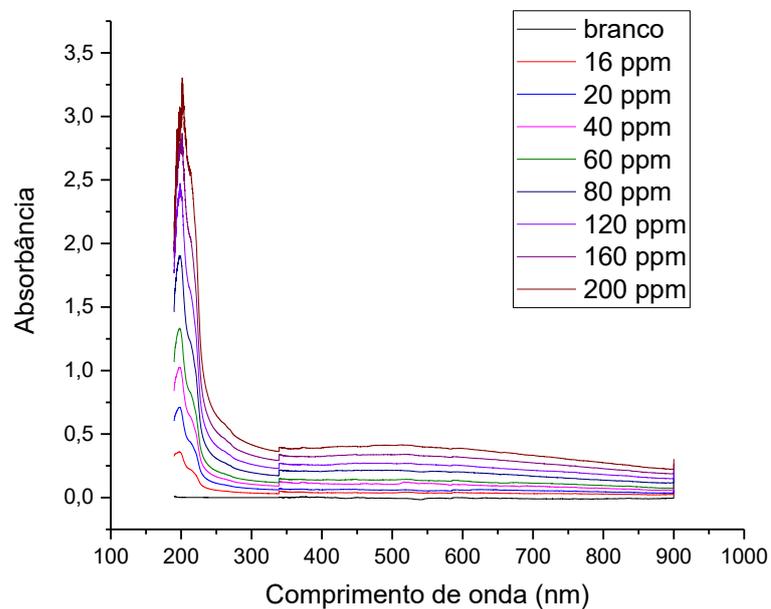
## APÊNDICES

### Apêndice A: Dados referentes ao % remoção do soluto da água.

Curva de calibração:

A Figura 22 explicita o gráfico a partir da varredura das alíquotas referentes as concentrações expostas na metodologia foram lidas no espectrofotômetro e após a análise foram encontrados valores do quais foram tabulados no *software*Origin®.

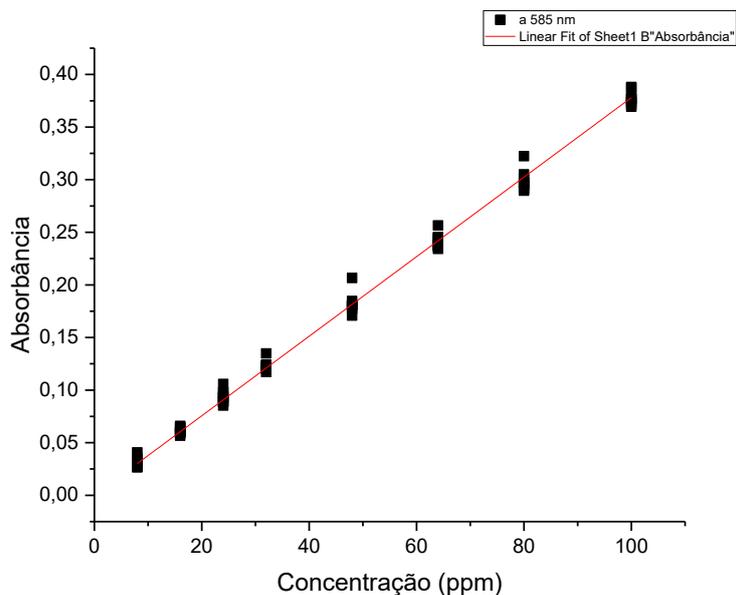
Figura 22– Curva de calibração da % remoção.



Fonte: o autor.

Analisando os gráficos e tabelas gerados pelo *software* para a varredura de 900 a 190 nm, encontrou-se o ponto 585 nm, apontado com o melhor  $R^2$  (o melhor modelo que se ajusta aos dados).

Figura 23 – Regressão linear da absorbância da remoção de tinta



Fonte o autor.

Na Tabela 11 encontram-se os valores estimados conforme ajuste linear da reta para o % remoção do soluto de tinta da água.

$$y = a + bx \quad (10)$$

Em que  $y$  é o valor da absorbância;  $a$  é o valor do intercepto;  $b$  é o valor do coeficiente angular (*slope*) e  $x$  é o valor da concentração. Como o valor do intercepto é 0 e o valor da concentração para se calcular o % remoção de solutos de tinta da água, portanto ficamos com a Equação 10:

$$x = \frac{y}{b} \quad (11)$$

Encontrado os valores para a concentração, utilizou-se a Equação 4 (que está na metodologia analítica) para encontrar os reais valores de do percentual de remoção.

Tabela 41 – Regressão

Equation	$y = a + b \cdot x$
Plot	Absorbância
Weight	No Weighting
Intercept	0 ± --
Slope	0,00378 ± 1,58403E-5
Residual Sum of Squares	0,00313
Pearson's r	0,99945
R-Square(COD)	0,9989
Adj. R-Square	0,99888

Fonte: o autor

O  $R^2$  para o ponto indicado é de 0,9989 e o  $R^2$  ajustado é 0,99888, por isso explica que a variável independente escolhida para determinar a variável dependente esteja correta. O gráfico (Figura 23) mostra que obtivemos apenas 8 pontos, que seriam das concentrações que foram estudadas, portanto analisamos 9 pontos, o ponto que não possuímos no gráfico representa o valor do branco que foi descontado de cada amostra analisada.

**Apêndice B: Dados referentes a turbidez**

Tabela 52 - Valores de turbidez obtidos para cada experimento (continua)

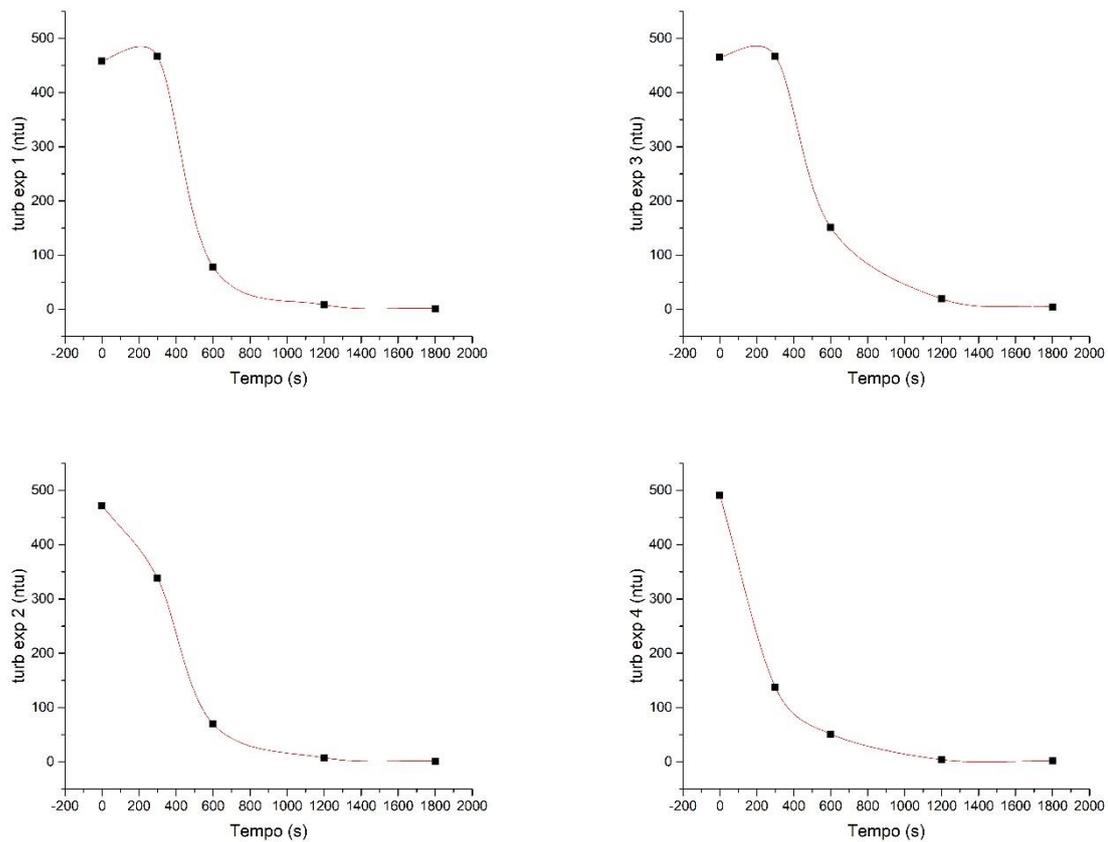
Exp	t (min)	Desvio	%turb	turbidez	Exp	t (min)	Desvio	%turb	turbidez
1	0	0,000	99,69	458	2	0	0,000	99,72	472
	5	0,577		466,67		5	3,464		338
	10	0,351		78,333		10	0,115		69,733
	20	0,055		8,2733		20	0,165		7,58
	30	0,010		1,4		30	0,036		1,32
3	0	0,577	99,07	465,33	4	0	0,577	99,66	490,33
	5	0,577		467,33		5	0,577		137,67
	10	0,000		151		10	0,115		51,133
	20	0,252		19,467		20	0,072		3,98
	30	0,186		4,3067		30	0,050		1,6267
5	0	0,577	96,39	462,67	6	0	0,000	99,43	477
	5	0,000		481		5	1,732		240
	10	0,577		437,33		10	0,208		83,833
	20	0,153		52,367		20	0,125		8,85
	30	0,153		16,667		30	0,040		2,71
7	0	0,577	78,70	462,33	8	0	0,000	98,04	451
	5	1,528		442,67		5	0,000		467
	10	0,577		473,67		10	0,577		117,33
	20	0,577		461,33		20	0,473		28,067
	30	0,611		98,433		30	0,144		8,8067
9	0	2,082	98,60	456,67	10	0	0,000	99,64	460
	5	0,577		461,33		5	0,000		475
	10	0,551		57,833		10	0,153		74,633
	20	0,100		8,7633		20	0,012		5,7167
	30	0,131		1,81		30	0,020		1,64
11	0	0,000	99,25	463	1º reuso	0	0,577	99,71	479,33
	5	0,577		472,33		5	0,000		301,00
	10	0,000		454		10	0,306		42,83
	20	106,983		82,467		20	0,079		2,29
	30	0,072		3,4567		30	0,006		1,35

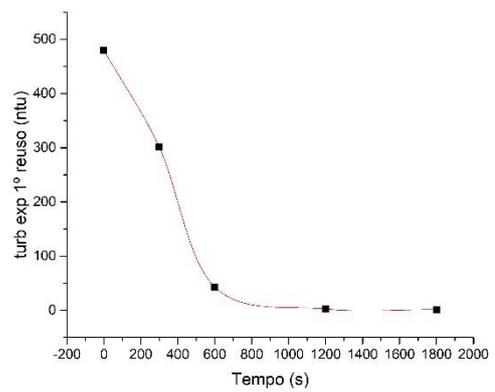
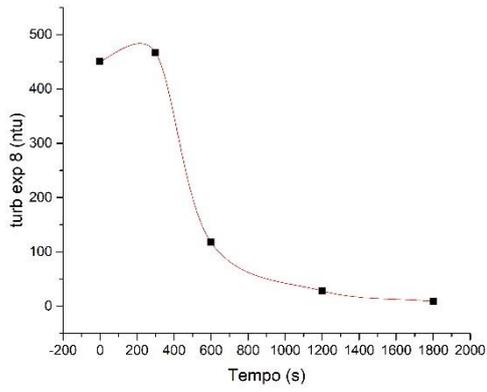
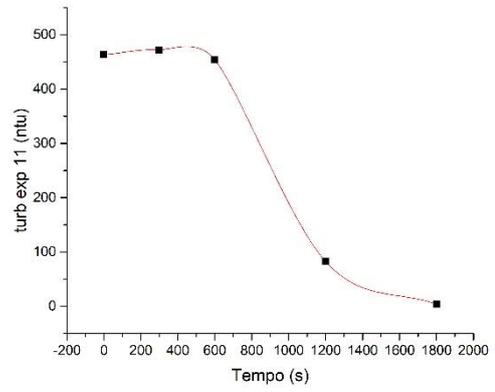
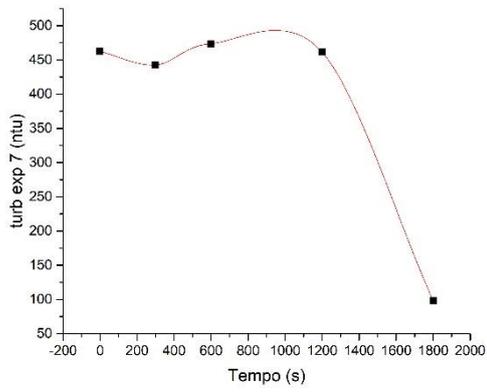
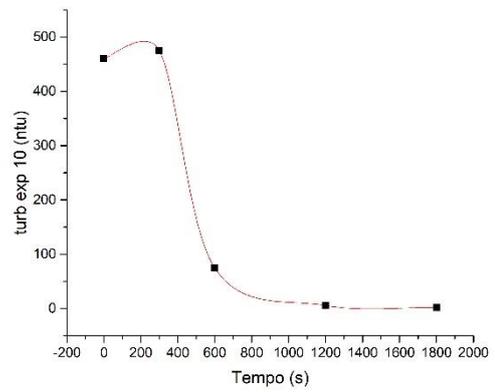
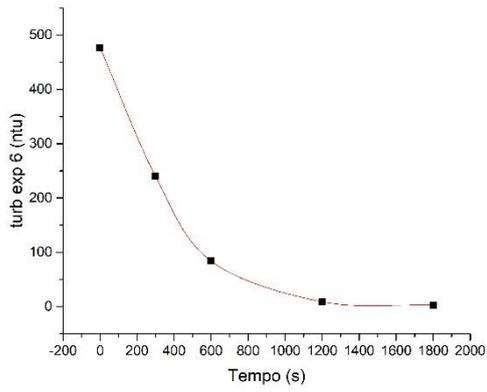
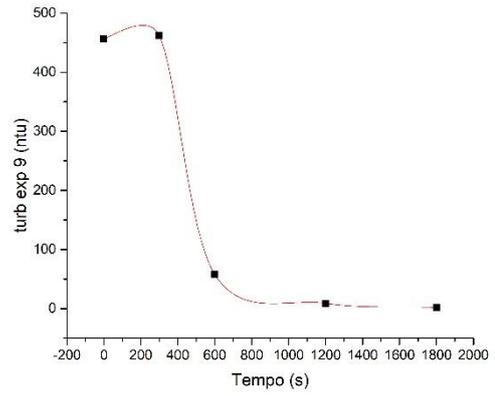
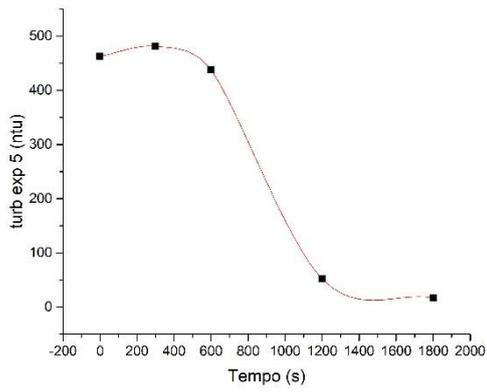
Tabela 62 - Valores de turbidez obtidos para cada experimento (conclusão)

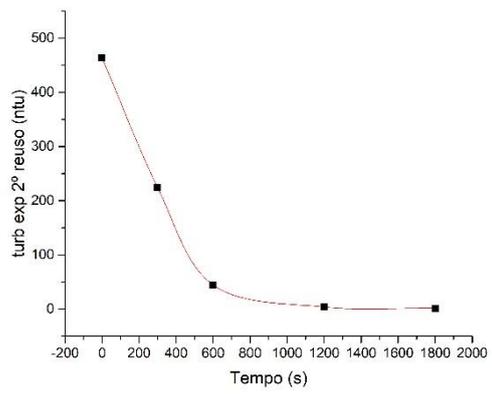
Exp	t (min)	Desvio	%turb	turbidez	Exp	t (min)	Desvio	%turb	turbidez
2º reuso	0	0,577		463,33					
	5	1,528		224,33					
	10	0,551	99,67	44,47					
	20	0,062		3,71					
	30	0,015		1,52					

Fonte : o autor

Figura 24 - Turbidez x tempo de todos os experimentos.







Fonte : o autor

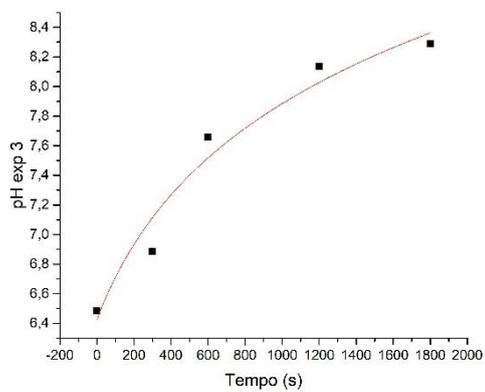
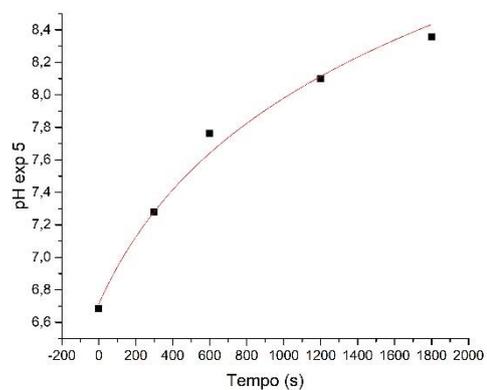
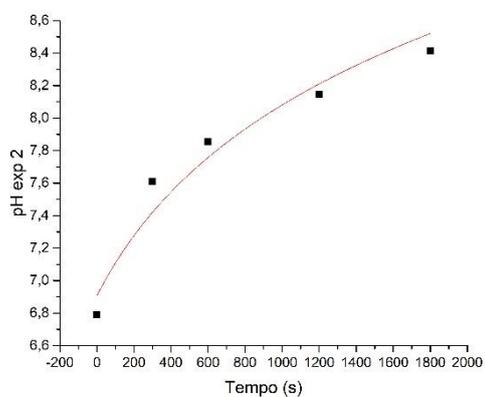
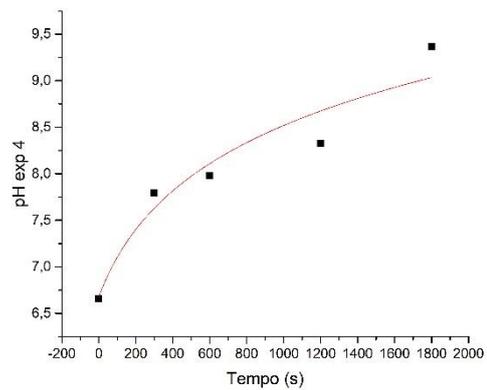
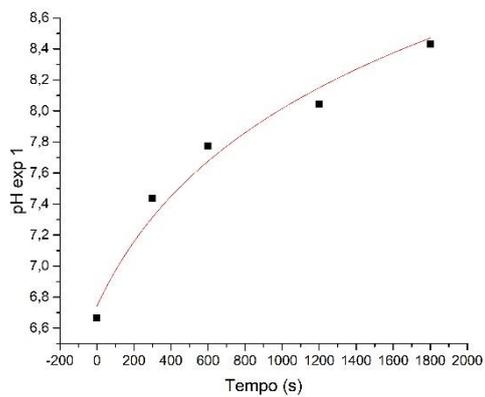
**Apêndice C: Dados referentes ao pH.**

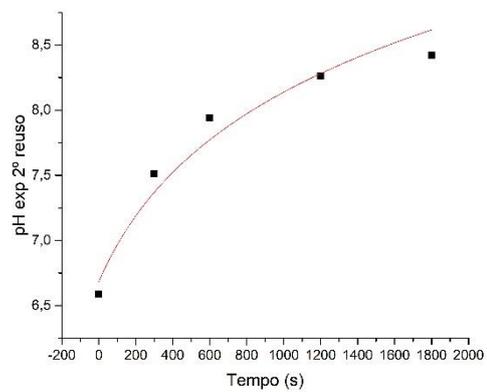
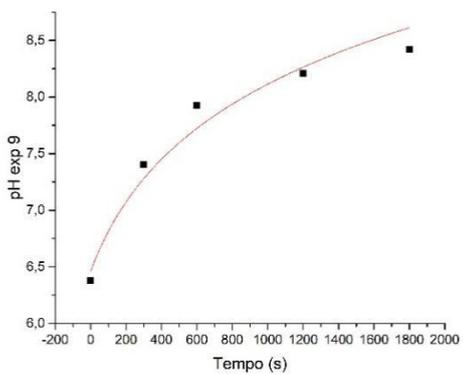
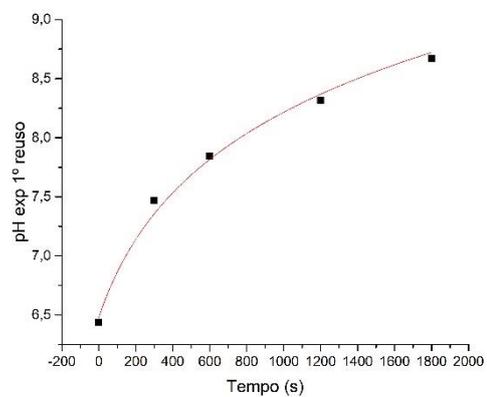
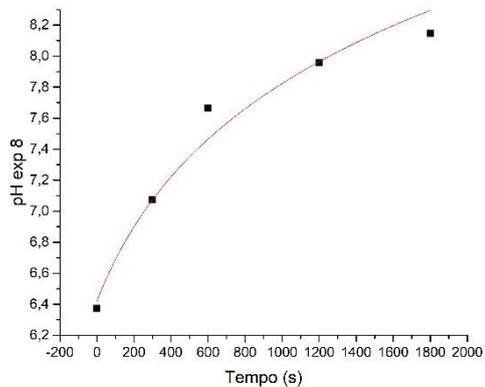
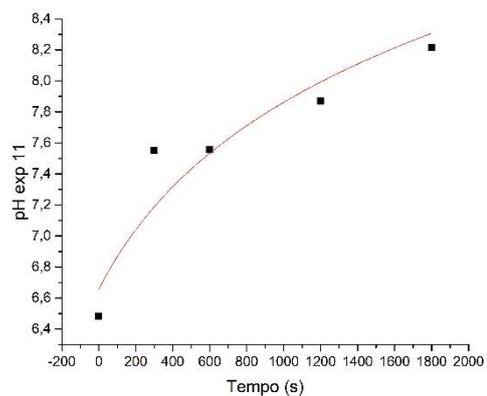
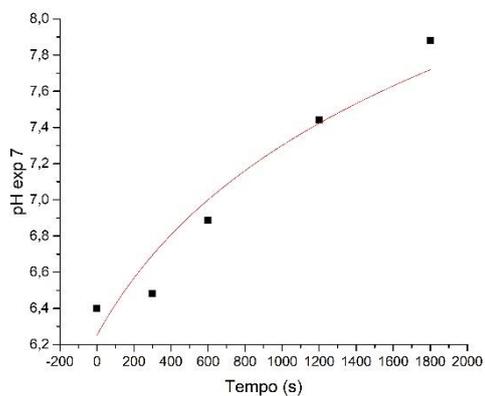
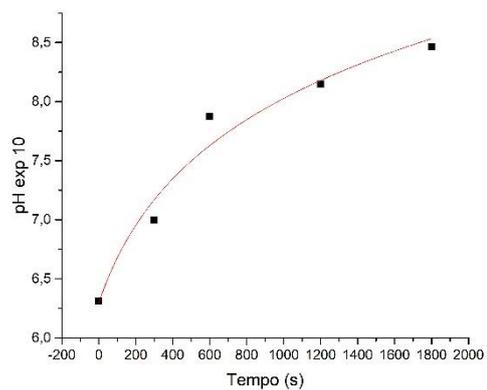
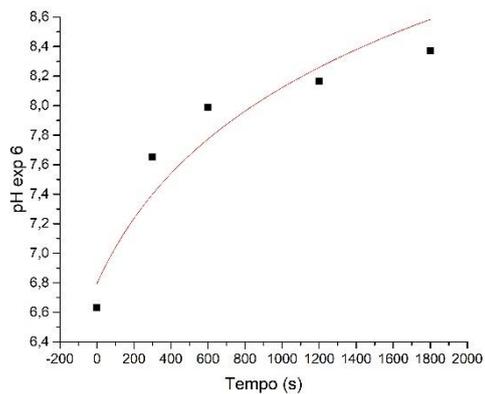
Tabela 73 - Valores de pH obtidos para cada experimento.

Experimento	t (min)	Desvio	pH	Experimento	t (min)	Desvio	pH
1	0	0,0265	6,81	2	0	0,0321	6,71
	5	0,0058	7,74		5	0,1069	7,76
	10	0,0379	8,15		10	0,0173	8,02
	20	0,0058	8,31		20	0,0058	8,10
	30	0,0058	8,46		30	0,0173	8,30
3	0	0,0503	7,05	4	0	0,0611	7,75
	5	0,01	8,10		5	0,0153	8,48
	10	0,0115	8,24		10	0,0153	9,04
	20	0,0058	8,32		20	0,0289	9,20
	30	0,0115	8,44		30	0,05	9,30
5	0	0,0569	6,40	6	0	0,0551	6,62
	5	0,0208	7,01		5	0,0058	7,71
	10	0,0058	7,68		10	0,0153	8,01
	20	0,0058	7,74		20	0,0173	8,33
	30	0,0808	8,27		30	0,0153	8,48
7	0	0,0208	6,60	8	0	0,0404	6,36
	5	0,0404	7,02		5	0,0361	6,69
	10	0,0208	7,45		10	0,0115	7,13
	20	0,0058	7,87		20	0,0208	7,70
	30	0,01	8,06		30	0,0115	8,01
9	0	0,0624	6,64	10	0	0,0404	6,41
	5	0,0058	7,64		5	0,02	7,26
	10	0,0115	7,98		10	0,01	7,93
	20	0,02	8,29		20	0,0058	8,26
	30	0,0436	8,41		30	0,0608	8,42
11	0	0,1387	6,50				
	5	0,155	7,47				
	10	0,0643	7,86				
	20	0,0153	8,12				
	30	0,0755	8,33				

Fonte o autor

Figura 25 - Gráficos pH x Tempo de todos os experimentos.





Fonte: o autor

**Apêndice D: Dados referentes a condutividade elétrica.**

Tabela 84 - Valores obtidos da condutividade elétrica (continua)

Experimento	t (min)	Desvio	Condut.	Experimento	t (min)	Desvio	Condut.
1	0	2,0817	432,33	2	0	0,5774	401,67
	5	1,0000	399,00		5	2,0817	387,33
	10	1,5275	391,67		10	2,6458	401,00
	20	0,5774	402,33		20	1,7321	387,00
	30	1,7321	449,00		30	1,5275	391,33
3	0	1,1547	402,33	4	0	1,0000	418,00
	5	2,6458	402,00		5	2,0817	415,33
	10	0,0000	404,00		10	1,7321	405,00
	20	1,7321	389,00		20	1,7321	408,00
	30	1,0000	406,00		30	2,3094	417,67
5	0	2,0817	421,67	6	0	1,5275	419,67
	5	2,5166	401,67		5	3,4641	394,00
	10	1,7321	395,00		10	1,7321	387,00
	20	2,6458	415,00		20	1,1547	393,33
	30	2,5166	401,67		30	2,3094	375,67
7	0	2,8868	391,33	8	0	2,6458	416,00
	5	1,1547	391,33		5	5,2915	363,00
	10	1,5275	387,67		10	2,6458	393,00
	20	0,5774	391,67		20	2,0817	397,33
	30	2,0817	389,33		30	0,5774	420,67
9	0	2,0817	411,33	10	0	2,6458	423,00
	5	2,8868	400,33		5	1,7321	396,00
	10	2,0817	391,33		10	2,0817	395,33
	20	2,3094	395,67		20	2,3094	410,67
	30	1,7321	401,00		30	1,7321	400,00
11	0	2,0817	409,33	1º reuso	0	2,3094	410,67
	5	2,3094	392,67		5	3,2146	409,67
	10	2,8868	399,33		10	1,7321	408,00
	20	3,2146	412,67		20	3,0000	425,00
	30	3,7859	407,33		30	2,0817	428,33

Tabela 94 - Valores obtidos da condutividade elétrica (conclusão)

Experimento	t (min)	Desvio	Condut.	Experimento	t (min)	Desvio	Condut.
	0	1,5275	416,33				
	5	2,3094	405,67				
2º reuso	10	3,2146	435,67				
	20	1,0000	403,00				
	30	2,0817	394,33				

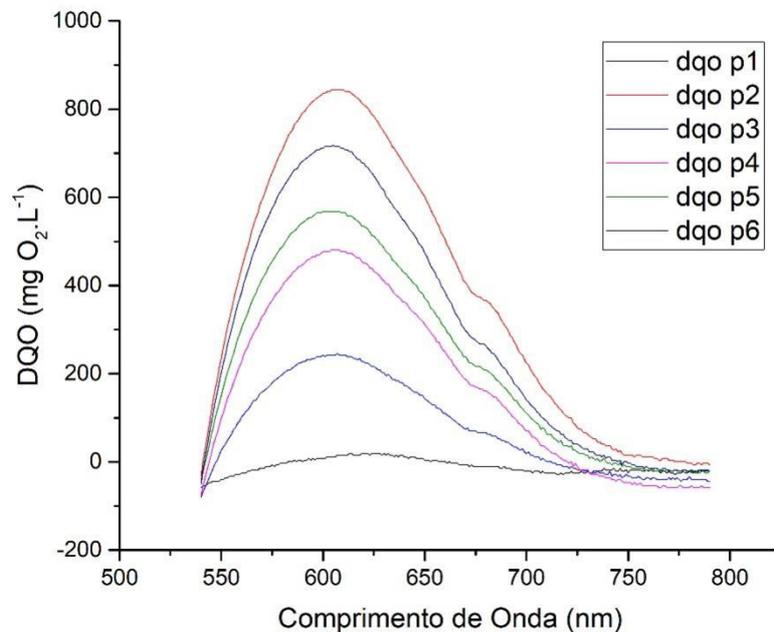
Fonte : o autor.

## Apêndice E: Dados referentes à %DQO.

Curva de calibração:

A Figura 26 explana o gráfico atingido durante a varredura das soluções padrões de biftalato de potássio após a digestão com a variação dos valores de DQO de 200 a 1000 mg de  $O_2.L^{-1}$

Figura 26 - Curva de calibração DQO.



Fonte: o autor.

Constatou-se que o pico de absorção máxima está compreendido no comprimento de onda de 60 nm.

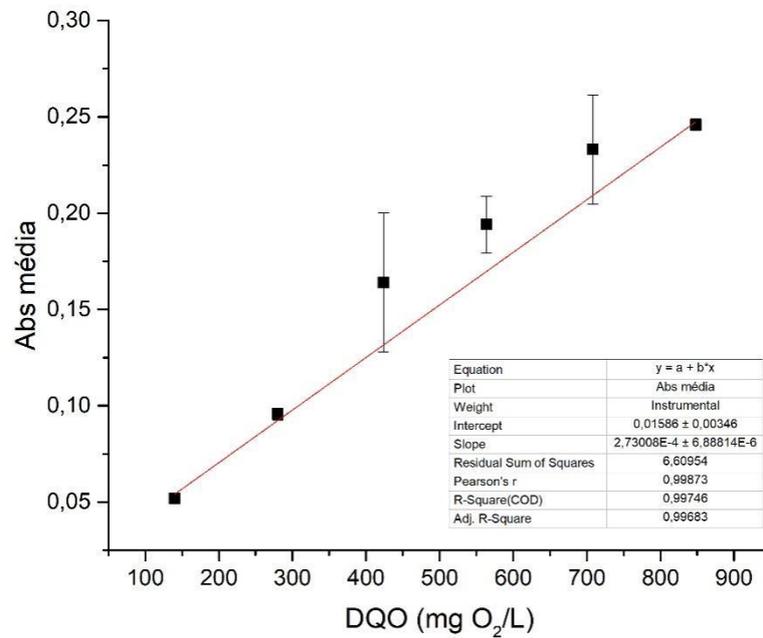
A Tabela 15 expõe valores da absorbância no comprimento de onda indicado para a elaboração da curva de calibração da DQO exposto na Figura 27 :

Tabela 105 - Absorbância 600 nm DQO.

Ensaio	Comp. De onda	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Padrão 4	Padrão 5	Padrão 6
1	6460,170	0,0492	0,09889	0,20014	0,20871	0,26128	0,24889
2	545,321	0,05432	0,09267	0,12787	0,1794	0,20471	0,24295
Média	357,454	0,05176	0,09578	0,164005	0,194055	0,232995	0,24592
Desvio padrão	187,867	0,00256	0,00311	0,036135	0,014655	0,028285	0,00297

Fonte: o autor.

Figura 27 - Curva de calibração DQO em 600 nm.



Fonte: o autor.

O ajuste linear atingido para os experimentos em questão foi satisfatório, no qual é observado valor o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,9975. Calcula-se a demanda química de oxigênio das amostras com a Equação 12, a partir dos valores de absorvância.

$$DQO = \frac{(Abs - 0,01586)}{0,00027308} \quad (12)$$

Em que:  $DQO$  é a demanda química de oxigênio mg de  $O_2/L$  e  $Abs$  representa a absorvância

### Apêndice F: Dados do consumo da massa de eletrodo.

Tabela 116 - Determinação da massa de eletrodos antes e depois do processo.

Exp.	P. E. A. 1ª placa	P. E. D. 1ª placa	P. E. A. 2ª placa	P. E. D. 2ª placa	P. E. A. 3ª placa	P. E. D. 3ª placa	P. E. A. 4ª placa	P. E. D. 4ª placa	P. E. A. 5ª placa	P. E. D. 5ª placa	P. E. A. 6ª placa	P. E. D. 6ª placa
D	42,5686	42,4972	40,9445	40,8084	41,3012	41,1676	40,8542	40,7271	41,3082	41,1704	41,3338	41,2602
G	41,051	40,7366	42,2901	42,0956	40,703	40,612	41,0536	40,9682	40,7832	40,6769	40,7196	40,706
J	41,9944	41,9882	42,2711	42,2698	41,8585	41,8317	42,4902	42,4349	41,7227	41,6736	42,3855	42,3542
E	40,2916	40,2234	40,8225	40,6969	40,6463	40,5177	41,5003	41,3911	40,6997	40,5703	42,2157	42,134
H	42,1799	42,1232	42,3683	41,8868	42,3683	42,2738	42,3577	42,2768	42,2988	42,2005	41,6561	41,6048
K	41,5166	41,3166	41,7688	41,6631	42,6605	42,5604	42,2913	42,1812	42,336	42,2157	41,7523	41,6299
F	40,4754	40,4164	41,4176	41,3198	41,0836	40,9895	40,661	40,5539	40,4812	40,4148	40,9766	40,8637
I	41,6966	41,6282	41,8691	41,7353	41,8528	41,7313	41,3298	41,2175	41,7181	41,5976	40,9637	40,8975
L	41,1285	41,0739	41,7857	41,6954	41,9705	41,8793	41,9666	41,8714	41,3737	41,2728	41,621	41,5618
M	42,4166	42,3417	41,6304	41,5006	42,2371	42,1083	41,8394	41,728	42,3432	41,2195	42,1616	42,0921
N	41,1858	41,1139	40,9707	40,8408	41,2968	41,1714	41,0328	40,8942	41,9828	41,8379	40,4261	40,3483
<b>1º REUSO</b>	<b>41,6282</b>	<b>41,5202</b>	<b>41,7353</b>	<b>41,5415</b>	<b>41,7313</b>	<b>41,5735</b>	<b>41,2175</b>	<b>41,0866</b>	<b>41,5976</b>	<b>41,431</b>	<b>40,8675</b>	<b>40,7809</b>
<b>2º REUSO</b>	<b>41,5202</b>	<b>41,4188</b>	<b>41,5415</b>	<b>41,3542</b>	<b>41,5435</b>	<b>41,4871</b>	<b>41,0866</b>	<b>41,0883</b>	<b>41,431</b>	<b>41,3277</b>	<b>40,7809</b>	<b>40,6682</b>

P.E.A - Peso do eletrodo antes

P.E.D - Peso do eletrodo depois.

Fonte : o autor