



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

PAULO HENRIQUE RAMOS LEVORATO

**ESTUDO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADO EM
EFLUENTE REAL DA INDÚSTRIA DE METALMECÂNICA**

ERECHIM

2023

PAULO HENRIQUE RAMOS LEVORATO

**ESTUDO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADO EM
EFLUENTE REAL DA INDÚSTRIA DE METALMECÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Gean Delise Leal Pasquali

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Clarissa Dalla Rosa

ERECHIM

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Levorato, Paulo Henrique Ramos
ESTUDO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADO EM
EFLUENTE REAL DA INDÚSTRIA DE METALMECÂNICA / Paulo
Henrique Ramos Levorato. -- 2023.
32 f.:il.

Orientadora: Doutora Gean Delise Leal Pasquali
Co-orientadora: Doutora Clarissa Dalla Rosa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,
Erechim,RS, 2023.

1. efluente, lavagem de peças, reuso industrial,
tratamento eletroquímico.. I. Pasquali, Gean Delise
Leal, orient. II. Rosa, Clarissa Dalla, co-orient. III.
Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

PAULO HENRIQUE RAMOS LEVORATO

**ESTUDO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADO EM
EFLUENTE REAL DA INDÚSTRIA DE METALMECÂNICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de grau
de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária
da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

20/11/2023

De acordo.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Gean Delise Leal Pasquali

Orientadora

Prof. Dra. Clarissa Dalla Rosa

Coorientadora

Prof. Dra. Adriana Dervanoski

Universidade Federal da Fronteira Sul

Dedico esse trabalho a minha família pelo apoio incondicional e especialmente ao meu pai que não chegou ao fim dessa jornada conosco, mas esteve sempre presente, amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Nesta pequena parte gostaria de deixar meus agradecimentos a minha família que me apoiou em toda essa jornada e na qual me orgulho muito de dizer que essa etapa concluída também pertence a eles, um agradecimento mais que especial a minha namorada e meus amigos que viraram família nessa longa etapa de vida onde tenho o prazer de dividir e aos amigos e família que ficaram longe, mas de certa forma comigo em todo o caminho agradeço o carinho de sempre, amo vocês.

Agradeço aos meus orientadores e colegas de laboratório em que tive o prazer de dividir experiências e aprender o quanto pude, aos meus professores e a cidade de Erechim pela excelente hospitalidade.

E por que não, agradeço a mim mesmo pelo foco no processo e perseverança pra seguir adiante e completar meus objetivos.

RESUMO

O processo de tratamento de efluentes vem avançando com importância no cenário nacional, tendo em vista uma melhoria significativa do processo e diminuição de custos, investimentos em tecnologia acerca da reutilização de efluentes tratados no meio industrial. Estes processos continuam no foco das empresas para que a sustentabilidade do negócio avance no mesmo patamar em que avançam as tecnologias de equipamentos. A indústria metalmeccânica como todas as demais, produz volumes de efluentes resultantes de suas etapas de processo, no caso em particular, o maior volume produzido encontra-se na etapa de lavagem das peças produzidas. Este efluente apresenta características muito específicas, como baixa biodegradabilidade, condutividade elevada, pH alcalino e cor característica. Assim o uso de um tratamento como a eletrocoagulação pode ser interessante, na busca por melhorias no efluente em questão. O presente estudo teve como objetivo avaliar o tratamento de eletrocoagulação aplicado em efluente gerado no processo de limpeza da superfície de peças metálicas de uma indústria metalmeccânica, tendo como meta a melhoria nos parâmetros cor, condutividade, demanda química de oxigênio (DQO) e toxicidade. O processo de tratamento por eletrocoagulação foi escolhido a partir de testes preliminares, e por este efluente apresentar uma alta condutividade o que facilitaria o processo de transferência de elétrons, sem a necessidade de adição de eletrólito. A eletrocoagulação aplicada no efluente do processo de lavagem de peças foi realizada utilizando eletrodos de Fe (cátodo/ ânodo). Os resultados obtidos mostraram remoção de cor de até 98%, redução na DQO podendo chegar 74% e redução na toxicidade do efluente. Assim o processo apresentou melhorias relevantes nas características iniciais deste efluente. O presente estudo possibilitou visualizar o potencial de aplicação do tratamento de eletrocoagulação neste efluente industrial como um tratamento primário, e a partir destes resultados, sugere-se que na sequência se utilize um tratamento secundário, focado na redução da condutividade elétrica, visto que este parâmetro não foi removido pelo processo.

Palavras-chave: efluente, lavagem de peças, reuso industrial, tratamento eletroquímico.

ABSTRACT

The effluent treatment process has been making significant progress on the national scene, with a view to significantly improving the process and reducing costs, as well as investments in technology for the reuse of treated effluents in the industrial environment. These processes continue to be the focus of companies so that the sustainability of the business advances at the same level as equipment technology. The metalworking industry, like all other industries, produces volumes of effluent as a result of its process stages. In this particular case, the largest volume produced is at the stage of washing the parts produced. This effluent has very specific characteristics, such as low biodegradability, high conductivity, alkaline pH and characteristic color. The use of a treatment such as electrocoagulation may therefore be interesting in the search for improvements in the effluent in question. The aim of this study was to evaluate electrocoagulation treatment applied to effluent generated in the process of cleaning the surface of metal parts in a metalworking industry, with the goal of improving the parameters of color, conductivity, chemical oxygen demand (COD) and toxicity. The electrocoagulation treatment process was chosen on the basis of preliminary tests, and because the effluent had high conductivity, which would facilitate the electron transfer process without the need to add electrolyte. Electrocoagulation applied to the effluent from the parts washing process was carried out using Fe electrodes (cathode/anode). The results obtained showed color removal of up to 98%, a reduction in COD of up to 74% and a reduction in the effluent's toxicity. The process thus showed significant improvements in the initial characteristics of this effluent. This study made it possible to visualize the potential for applying electrocoagulation treatment to this industrial effluent as a primary treatment, and based on these results, it is suggested that a secondary treatment be used next, focused on reducing electrical conductivity, since this parameter was not removed by the process.

Keywords: effluent, parts washing, industrial reuse, electrochemical treatment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	11
2.1 Geral.....	11
2.2 Específicos	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Efluente da Indústria Metalmeccânica	11
3.2 Eletrodos de Fe	11
3.3 Reator de Eletrocoagulação.....	12
3.4 Obtenção do Efluente	12
3.5 Procedimentos.....	14
3.5.1 Metodologias Analíticas	14
3.5.2 Planejamento experimental.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5. CONCLUSÃO.....	27
6. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	27

1. INTRODUÇÃO

O setor industrial tem grande importância no desenvolvimento e na movimentação monetária em todo mundo, os avanços tecnológicos na área estão sendo cada vez mais desenvolvidos para que a automação se torne mais prática e mais rentável (BARBOSA et al, 2020).

As empresas de destaque no setor não têm como grande qualidade apenas atender seus clientes com excelência, mas também descobrir e implementar técnicas cada vez mais eficazes e menos agressivas aos recursos naturais (BARBOSA et al, 2020). O Brasil não fica atrás das maiores potências mundiais nesse quesito, e a pesquisa e investimento no setor ambiental tem foco em gerar cada vez menos resíduos e buscar soluções cada vez mais inteligentes no meio industrial.

Os efluentes líquidos quando despejados de forma incorreta podem influenciar em uma vasta quantidade de interações no meio ambiente, alterações químicas, físicas e biológicas são observadas em variadas escalas ao observar o contexto histórico da evolução das indústrias, geralmente localizadas ao entorno ou próximas a corpos hídricos (GIORDANO, 2004).

O tratamento de efluentes em processos industriais se evidencia cada dia mais a partir dos conceitos e dificuldades ambientais que vem surgindo, uma estação de tratamento que tenha a capacidade de trabalhar totalmente os efluentes da empresa é uma ferramenta de grande valia (SILVEIRA, 2010).

Os tratamentos mais utilizados envolvem processos físicos, químicos e biológicos, que visam remover ou reduzir a concentração de poluentes presentes no efluente, a escolha pelo tipo de tratamento deve levar em consideração as características do efluente a ser tratado.

Desta forma a complexidade e variedade da constituição dos efluentes metais mecânicos acabam criando dificuldades extremas para que o tratamento adequado seja executado, portanto buscar inovação em novos tratamentos e alternativas para os tratamentos já existentes é imprescindível. Geralmente, estes efluentes são tipicamente tratados com processos físico-químicos, visto que os processos de tratamentos convencionais não removem a totalidade de compostos encontrados nos efluentes, a partir disso, vários compostos como bactericidas e outros xenobióticos, podem ser descartados em corpos d'água ou na rede de tratamento de esgoto,

causando sérios problemas à vida aquática desses corpos receptores (QUEISSADA et al, 2011).

O efluente gerado na lavagem de preparação da superfície de peças mecânicas é conhecido pelo seu grande acúmulo de óleo e graxa, cor, condutividade e DQO, fatores estes que dificultam o tratamento deste de forma convencional.

O tratamento adequado de efluentes com estas características é essencial para a preservação do meio ambiente e garantia da saúde pública já que diferentes compostos podem ser encontrados. Os processos secundários de tratamento biológico que são cotidianamente empregados no tratamento de efluentes, contudo, não apresentam uma grande eficiência na remoção de substâncias específicas (PAIVA *et al*, 2008), como as encontradas em efluente da indústria metalmeccânica.

É possível citar alguns modelos de tratamento que envolvem os mais variados fatores e técnicas para tratar de forma correta o efluente oriundo da lavagem de peças, contudo, é necessário conhecer o contaminante de forma específica para que os processos atuem de maneira correta (METCALF e EDDY, 2003; TCHOBANOGLOUS, 1996).

A legislação que implica em quais parâmetros o efluente tratado deve se encontrar para descarte é a 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), essas diretrizes são o modelo obrigatório a ser seguido para que um processo industrial tenha o tratamento correto. Após o tratamento, num grande número de indústrias, a água é descartada em corpos hídricos se as diretrizes do CONAMA forem cumpridas, contudo, um questionamento importante vem sendo desenvolvido ao passar dos anos, sobre a possibilidade de reutilizar esse efluente tratado em outros processos do meio produtivo.

Reutilizar a água tratada em processos posteriores, além de impulsionar a modernização e diminuir o consumo de água na indústria, demonstra um comprometimento da empresa com a preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente.

As tecnologias desenvolvidas com intuito de melhora na qualidade do tratamento de efluentes e reuso da água se dividem em três modelos: biológico, físico e químico. A maneira correta de combinar esses modelos parte do princípio de conhecer o efluente de interesse e de como cada processo pode contribuir na melhora do tratamento (MIERZWA, 2005).

A eletrocoagulação é uma metodologia que tem por base utilizar eletrodos de metal em solução que conduzem uma tensão elétrica, chamados eletrodos de sacrifício, esse tem por objetivo a oxidação e desgaste provocando as interações na solução e causando a coagulação (BENAZZI, 2013).

O processo de eletrocoagulação através da dissolução elétrica gera os coagulantes em solução e podem ser utilizados eletrodos de ferro ou alumínio nesse processo. A geração de íons metálicos acontece no ânodo e em contrapartida o cátodo é responsável por gerar o gás hidrogênio (CHEN, 2004; MAMAN et al., 2022).

A eletrocoagulação utiliza a corrente elétrica de maneira com que aconteça uma interação entre a solução e os eletrodos suspensos nela, o cátodo em solução promove uma hidrólise na água a partir de sua redução gerando hidroxila e gás hidrogênio e em contrapartida o ânodo em solução oxida gerando cátions que serão dispostos no meio. Esses cátions irão formar complexos juntamente com as partículas em solução que favorecem a formação de flocos que tendem a decantar ou flotar na superfície (GOERCK, et al, 2021).

Esse tipo de tecnologia pode remover uma variedade de poluentes, já que, possuem a capacidade de neutralizar as cargas eletrostáticas e facilitar o processo de aglomeração e a separação na fase aquosa do tratamento de efluentes, quando submetidos no processo tendem a lançar na solução Fe^{2+}/Fe^{3+} causando hidrólise e desestabilizando coloides em solução (GRECCO et al., 2022).

A metodologia de eletrocoagulação com pequenos reatores de bancada vem sendo desenvolvida principalmente pela praticidade e pela diversidade em tratamento de diversos tipos de resíduos gerados mundialmente, variando de contaminantes orgânicos, metálicos e têxteis, esse processo acresce muito nas pesquisas e no avanço de estratégias de tratamento (KOBYA; DEMIRBAS, 2015).

Utilizar os parâmetros de forma correta no processo de eletrocoagulação é essencial para a remoção eficiente dos contaminantes. A corrente aplicada ao processo, o material dos eletrodos, a distância entre estes e o tempo de reação, são fatores determinantes para a eficiência deste tratamento (MAMAN et al., 2022), bem como tendem a diminuir os consumos de energia e conseqüentemente os gastos operacionais (BRAHMAI et al, 2018).

Sobre este contexto o objetivo deste estudo foi realizar o processo de eletrocoagulação como tratamento primário no efluente de lavagem de peças da indústria metalmeccânica, a fim de obter melhorias na qualidade deste efluente.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Aplicar o processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de ferro como tratamento primário para o efluente produzido na lavagem de peças da indústria metalmeccânica.

2.2 Específicos

- Caracterizar o efluente de lavagem de peças.
- Realizar o tratamento de eletrocoagulação no efluente resultante da etapa de lavagem das peças.
- Avaliar a corrente aplicada, tempo de reação e pH no tratamento do efluente por eletrocoagulação.
- Verificar a eficiência do processo de eletrocoagulação no tratamento do efluente em estudo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Efluente da Indústria Metalmeccânica

O efluente da lavagem das peças foi obtido em uma indústria do ramo Metal Mecânica localizada no município de Erechim (RS), sendo que este efluente não sofreu qualquer tipo de diluição ou pré-tratamento inicial, e foi utilizado em temperatura ambiente (20 - 25 °C).

3.2 Eletrodos de Fe

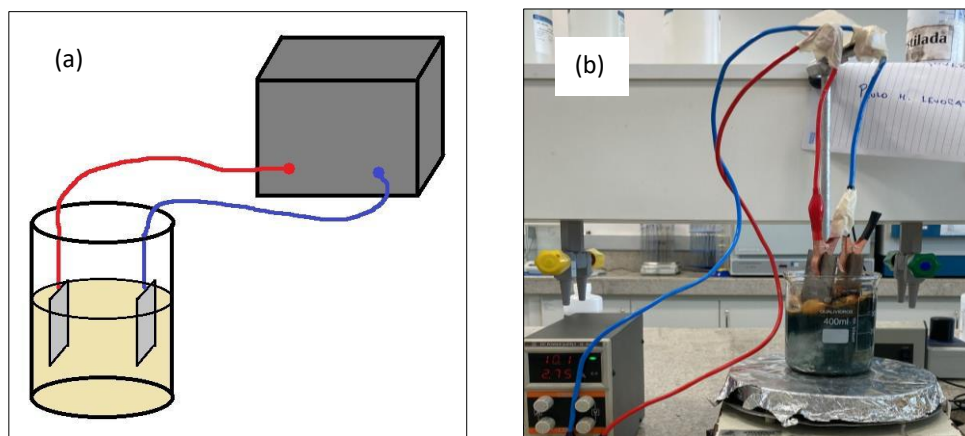
Os eletrodos de sacrifício utilizados nos experimentos foram de ferro. Este material foi obtido a partir das sobras de processos provenientes de indústria Metal Mecânica, sendo as dimensões utilizadas para as placas de 9 cm x 3 cm x 2 mm.

A escolha pelos eletrodos de ferro partiu após os testes iniciais de eletrocoagulação utilizando o efluente, onde foram feitos ensaios comparativos entre dois tipos de eletrodos, de ferro e de alumínio. Após estes testes iniciais optou-se pelo eletrodo de ferro onde obteve-se um melhor desempenho, sendo fixada a distância entre os mesmos em 3 cm.

3.3 Reator de Eletrocoagulação

O reator de eletrocoagulação utilizado nos ensaios tinha capacidade 0,4 L, sendo utilizado o volume de 0,3 L de efluente de lavagem para o tratamento, com agitação magnética (120 rpm), em temperatura ambiente. Os eletrodos de Fe foram fixados através de presilhas de metal soldadas a dois fios ligados a fonte de energia (Figura 1).

Figura 1: Reator de eletrocoagulação utilizado no tratamento do efluente de lavagem: (a) esquema do processo, (b) foto do aparato experimental.



Fonte: autor, 2023.

3.4 Obtenção do Efluente

As indústrias metalúrgicas trabalham com variados setores que acumulam em suas responsabilidades objetivos específicos. O setor da pintura em pó tem uma tecnologia diferenciada que demanda processos preliminares antes da adição a tinta e processos posteriores a adição a tinta, isso acontece devido a especificidade do processo. A atividade essencial para que o desenvolvimento da pintura ocorra com êxito tem relação direta com o processo preliminar adotado para esse tipo de segmento, esse processo é denominado banho químico e tem por objetivo preparar a superfície da peça através da limpeza para adesão da tinta eletrostática.

De acordo com o porte das empresas, os estágios de preparação da superfície podem ser maiores, contudo, em sua maioria são utilizados cinco estágios diferentes de banhos com o intuito de limpar e preparar as peças fundidas e usinadas para a pintura, o primeiro estágio é o banho desengraxante que é majoritariamente constituído de uma solução alcalina que tem por objetivo remover óleos e graxas das peças que acabam de chegar para serem pintados. Os dois próximos estágios são

denominados enxágues I e II, estes enxágues subsequentes tem por objetivo remover a solução alcalina depositada anteriormente nas peças com o objetivo de limpar ainda mais a superfície, o enxágue II é composto exclusivamente de água deionizada.

O estágio posterior aos dois enxágues é denominado de banho nanocerâmico, esse processo tem por objetivo principal oferecer proteção contra o desgaste, corrosão e atrito, além de proporcionar outros benefícios funcionais e estéticos. Isso acontece, pois, a camada adquirida no banho nanocerâmico atua como uma barreira física que reduz o contato excessivo com o ambiente, que acaba impedindo os danos causados por agentes externos, como umidade, substâncias químicas agressivas e partículas abrasivas.

Após essa camada protetiva ser aplicada no quarto estágio, vem na sequência o quinto processo de pré-pintura das indústrias metalúrgicas, que é o enxágue III. Esse processo tem por objetivo a remoção de impurezas e de excessos embutidos nas peças proveniente dos processos anteriores, fazendo com que a peça saia com a superfície preparada para a adesão da tinta eletrostática. É importante ressaltar que as soluções presentes nos banhos são direcionadas para as peças por bicos aspersores que ficam alocados dentro de uma câmara.

Todos esses processos preliminares: desengraxante, enxágue I, enxágue II, nanocerâmico, enxágue III em algum momento entram em processo de manutenção e precisam ser limpos e readequados as características iniciais para que o acúmulo de sujidades não prejudique a limpeza das peças.

Para efetuar as respectivas manutenções nos tanques das soluções citadas acima, 4 dos 5 banhos são descartados e enviados ao tanque de equalização da estação de tratamento de efluente (ETE) através de um sistema de bombas, o tanque de equalização principal de 15m³. O efluente resultante do banho das peças e desengraxante é enviado exclusivamente para o tanque secundário de equalização é responsável por armazená-lo e fracioná-lo ao decantador para o tratamento e tem capacidade para 6m³. Dessa forma o tratamento é executado dosando uma quantia de desengraxante misturada com o efluente adjacente do tanque de 15m³. O efluente gerado foi o utilizado no presente estudo.

3.5 Procedimentos

3.5.1 Metodologias Analíticas

O efluente de lavagem de peças, foi caracterizado através das análises da demanda química de oxigênio (DQO), análise de pH, sólidos dissolvidos e totais, condutividade, sais inorgânicos (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012). Após o tratamento de eletrocoagulação foram realizadas as seguintes análises: Cor, Turbidez, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Condutividade elétrica, Lodo formado e Toxicidade (MEYER et al., 1982 adaptado).

3.5.2 Planejamento experimental

A metodologia definida para avaliação do efluente de interesse foi o processo de eletrocoagulação, isso aconteceu devido aos resultados obtidos em testes preliminares onde foi observada uma grande concentração de sais no efluente que facilita a interação da tensão elétrica na solução causando uma desestabilização nas partículas e facilitando o tratamento. O planejamento experimental definido para o processo foi o DCCR para três variáveis independentes: tempo, corrente elétrica e pH, (Tabela 1). Para o tratamento estatístico foi realizado o teste de ANOVA utilizando o software Minitab 21.

Tabela 1: Variáveis e níveis avaliados no processo de eletrocoagulação

Variáveis	Níveis				
	-1,68	-1	0	1	1,68
Tempo (min)	15	30	60	90	105
pH	3	4,6	7	9,4	11
Corrente elétrica (A)	1	5	10	15	20

Fonte: autor, 2023.

O presente planejamento resultou em 20 ensaios com diferentes combinações, sendo utilizados 6 pontos centrais para a determinação do erro. Foram avaliadas as a influência das variáveis independentes no tratamento de eletrocoagulação do efluente em estudo (Tabela 1). As variáveis de resposta utilizadas para determinar o desempenho do processo de tratamento foram: o pH, cor, condutividade elétrica, demanda química de oxigênio, toxicidade e formação de lodos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 abaixo apresenta os resultados da caracterização físico-química do efluente de lavagem de peças da indústria metalmeccânica. Como é possível observar este efluente apresenta um pH bastante alcalino, o que é compreensível, visto que no processo de limpeza das peças, as mesmas, passam por um banho em solução de NaOH, além do uso de surfactantes. Outros parâmetros que chamam a atenção são a condutividade elétrica, e a DQO, que podem ter seus valores associados. Sendo que a presença de diversos íons como Fe^{3+} , Cl^- , S^{2-} e NH_4^+ podem além de aumentar a condutividade, também afetar o resultado da análise de DQO do efluente (AQUINO et al., 2006).

Tabela 2: Caracterização físico-química do efluente de lavagem de peças

Parâmetro	Medida
pH	11,01
Cor (mg Pt Co L ⁻¹)	1849,83
Condutividade elétrica (mS/cm)	16,16
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	1309,24
Toxicidade (%)	94,0

Fonte: autor, 2023.

Conforme já descrito foi utilizado o planejamento experimental do tipo DCCR, para avaliar a influência das variáveis independentes (tempo, pH e corrente elétrica) na remoção de diferentes parâmetros presentes no efluente, através do tratamento por eletrocoagulação. Estes ensaios são apresentados na Tabela 3.

O valor obtido na caracterização do efluente para o pH foi de 11,01. Entretanto este parâmetro foi um dos escolhidos para avaliar, assim através dos ensaios onde se trabalho com pH ajustado em 4, 7 e 9, segundo a matriz do planejamento. Observou-se que ao final do processo de eletrocoagulação o pH do efluente estava dentro ou próximo do padrão exigido para o lançamento (pH de 5 a 9) segundo a CONAMA (2011), assim em alguns ensaios específicos (1, 2, 3, 4, 9 e 13) foi possível obter uma melhora expressiva deste parâmetro.

Tabela 3: Resultado de ensaios realizados para o planejamento experimental DCCR utilizado no processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro para o tratamento do efluente de lavagem de peças

Ensaio	Remoção Cor (%)	Remoção DQO (%)	Lodo (g)	pH	Condutividade (mS/cm)	Toxicidade (%)
01	41,87	28,74	0,54	7,42	17,69	99,9
02	97,31	48,70	2,79	9,86	18,07	36
03	95,68	43,51	0,48	9,42	15,67	34
04	88,90	60,01	0,29	9,70	16,10	12
05	97,43	57,75	5,08	12,20	20,78	28
06	95,74	74,39	10,31	12,91	24,76	30
07	96,41	46,04	1,45	10,59	20,76	10
08	97,01	56,29	3,48	11,84	25,67	26
09	1,80	20,63	2,38	9,18	16,09	18
10	95,20	42,45	6,01	12,73	20,53	14
11	97,97	45,64	2,25	12,85	21,35	48
12	95,68	38,72	0,74	12,43	17,41	2
13	80,13	36,19	0,18	7,88	15,06	42
14	37,72	64,14	4,41	12,77	21,03	20
15	97,79	42,85	3,31	11,72	20,05	26
16	98,63	59,88	3,49	12,08	20,69	24
17	97,19	52,16	1,89	10,86	18,67	24
18	97,43	54,56	1,72	11,16	18,41	18
19	97,73	51,50	3,41	10,51	18,27	20
20	97,37	37,92	3,19	10,72	18,27	16

Fonte: autor, 2023.

Foi possível observar que o pH dos ensaios apresentou grande variação, contudo, na maioria dos ensaios se manteve alcalino, mesmo que nas condições iniciais em que se encontrava ácido, resultado este esperado dado o tipo de tratamento aplicado ao efluente. A eletrocoagulação tem por princípio a oxidação do eletrodo de sacrifício o anodo liberando os cátions metálicos, que por sua vez irão reagir com o íon OH⁻ produzido na redução da molécula de água, formando assim

hidróxidos metálicos e intermediários alcalinos que por sua vez elevam o pH do efluente (MAMAN et al., 2022)

O pH é um parâmetro fortemente influenciado pela corrente elétrica aplicada aos eletrodos. Isso ocorre, pois, a eficiência do processo tende a ser maior em meios ácidos ou alcalinos, é importante que o pH ajustado para o experimento propicie as melhores condições de reação para que sejam formados hidrogênio e íons hidroxila (RODRIGUES, 2008). Segundo Elazzouzi *et al* (2017) quando o pH se encontra perto da neutralidade ou em caráter inicial muito básico acabam sofrendo um aumento menos significativo no processo, dessa maneira os ensaios que apresentavam característica inicial ácida promoveram uma maior interação com os eletrodos.

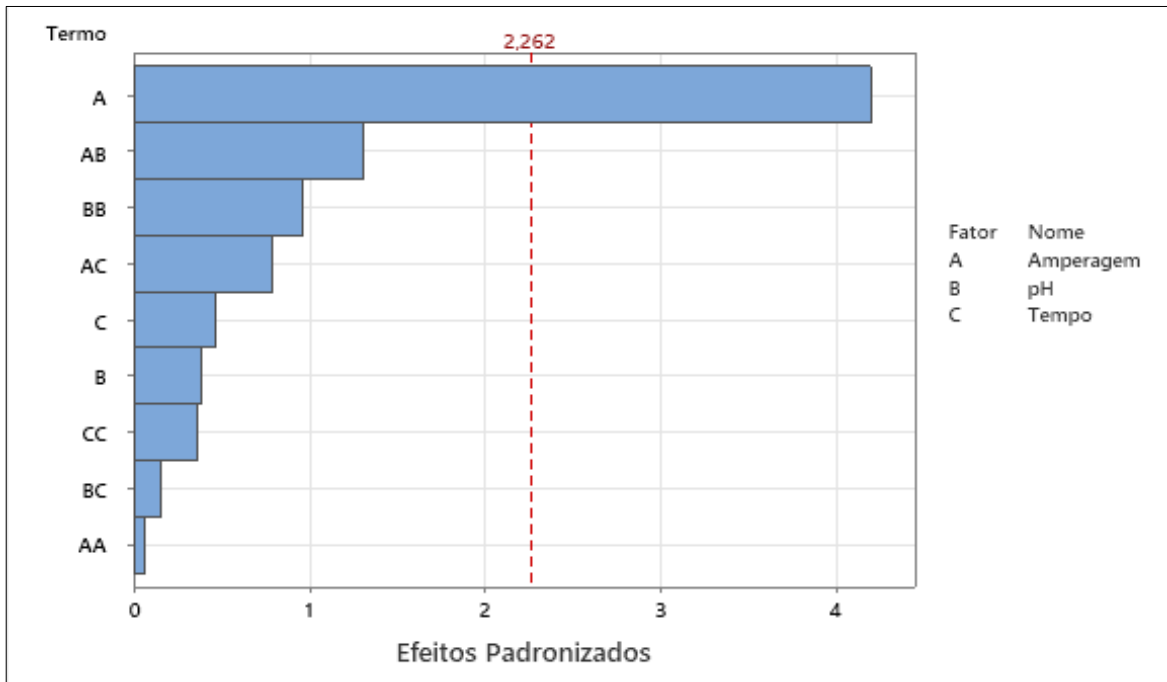
Alguns ensaios apresentaram um bom índice para o tratamento se observados juntamente com os outros parâmetros de análise, além de, comprovar que o efluente da lavagem das peças foi melhor tratado quando aplicada correntes elétricas altas, nesse quesito, os ensaios 17, 18, 19 e 02 se mostraram bem efetivos.

Após os vinte ensaios foi possível notar algumas características importantes do processo. A condutividade elétrica era um parâmetro bem relevante a ser analisado nos ensaios, esse grau de relevância é atribuído aos mais variados tipos de usos no meio industrial que esse efluente pode ser reutilizado gerando um ciclo sustentável e menos agressivo das empresas.

Segundo Rodrigues (2008) o efluente quando apresenta condutividade elétrica baixa tende a precisar da adição de sais para favorecer o aumento da condutividade. Esse fator não interferiu no processo de eletrocoagulação já que o efluente de estudo apresentou uma alta condutividade elétrica devido ao processo em que se encontra promover a interação de muitas partículas, além de, uma alta concentração de sódio.

Na Figura 2 foi possível analisar através do gráfico de Pareto as condições que influenciaram no comportamento de condutividade elétrica no tratamento de eletrocoagulação aplicado ao efluente da lavagem de peças da indústria metalmeccânica.

Figura 2: Gráfico de Pareto para a análise da condutividade no processo de eletrocoagulação do efluente de lavagem de peças



Fonte: Autor, 2023.

Para a condutividade apenas a variável independente corrente elétrica apresentou efeito significativo linear, sugerindo que correntes elétricas mais elevadas propiciam o aumento na condutividade do efluente, devido a presença de íons que acaba por ser potencializada, pela dissolução do anodo. A análise estatística demonstra que para a condutividade do efluente tratado, foi possível observar que apenas a corrente aplicada ao processo influenciou nos resultados medidos.

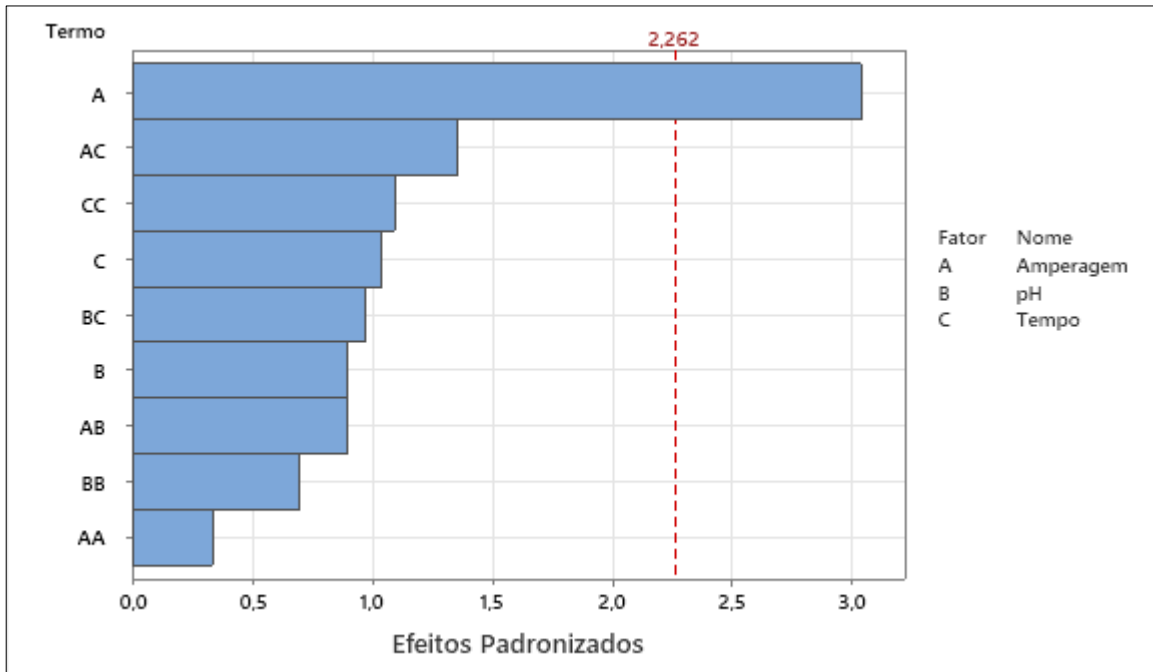
É importante que águas residuárias geralmente apresentem uma condutividade elétrica razoável para que o processo de eletrocoagulação ocorra de forma expressiva, isso permite que a tensão elétrica no meio progrida para desestabilizar os compostos promovendo a formação dos flocos (BENAZZI, 2013).

Os ensaios que apresentaram as menores condutividades elétricas coincidiram com alguns fatores limitantes como um tempo de execução baixo, ou uma corrente muito baixa que afetou diretamente o processo de eletrólise, dessa maneira o processo não evoluiu como deveria e não houve uma formação de flocos adequada.

A quantificação de lodo seguindo a linha das respostas anteriores sofreu influência direta de apenas uma variável independente a corrente aplicada (Figura 3). Este comportamento já era esperado, visto que com o aumento da corrente o eletrodo

de sacrifício acaba por sofrer um desgaste maior propiciando desta a formação de lodo.

Figura 3: Gráfico de Pareto para a análise de lodo formado no processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de ferro no tratamento do efluente de lavagem de peças



Fonte: Autor, 2023.

Através dos ensaios foi possível observar que houve formação de lodo em todos os experimentos de eletrocoagulação. A formação de lodo nos processos de eletrocoagulação acontece devido às interações entre íons metálicos que são liberados na água a partir da passagem da corrente elétrica. Segundo Butler *et al* (2011) a produção de lodo é também um desafio emergente ligado a uma técnica muito positiva para o tratamento de efluentes, em detrimento da corrosão dos eletrodos metálicos.

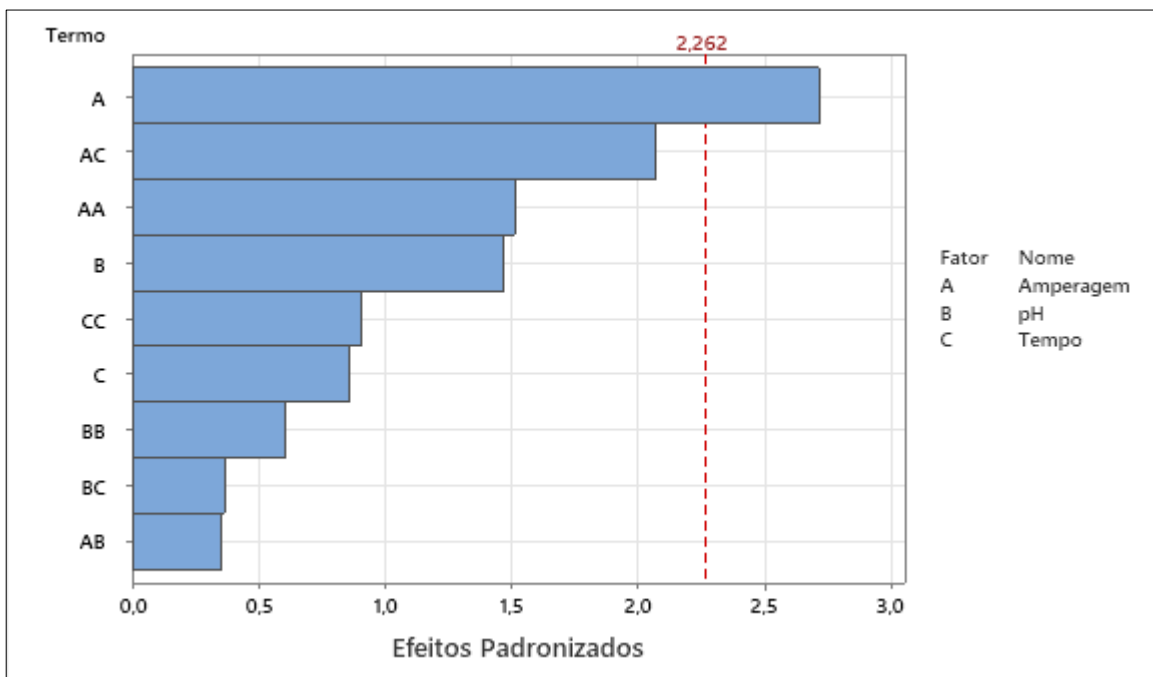
Naje et al (2016) também explica que o processo de formação de lodo é diferente em relação aos tratamentos convencionais, já que a eletrocoagulação reúne tudo em um único reator concentrando as interações referentes ao tratamento.

A partir do gráfico de Pareto (Figura 3) obtido na análise estatística observou-se que apenas a corrente elétrica afetou de forma linear o processo, assim como observado visualmente, quanto maior a amperagem mais os eletrodos eram induzidos ao desgaste aumentando a formação de lodo no processo.

Contudo, a utilização da eletrocoagulação em comparação com outros tipos de tratamentos industriais acaba inferindo em um menor volume de lodo formado, flocos maiores e estáveis além de promover uma vantagem física de operação, ou seja, pode ser instalado em locais isolados com o auxílio de energia fotovoltaica (CRESPILHO e REZENDE, 2004).

Quanto a DQO do efluente, também foi um parâmetro que sofreu interferência direta de apenas uma variável independente como pode-se observar na Figura 4. A DQO é um parâmetro que avalia a quantidade de matéria orgânica e inorgânica presente no efluente, isso acontece de forma em que se avalia a quantidade de oxigênio necessária para oxidar os contaminantes por interações químicas (VALENTE *et al*, 1997).

Figura 4: Gráfico de Pareto para a análise de DQO do efluente no processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de ferro



Fonte: Autor, 2023.

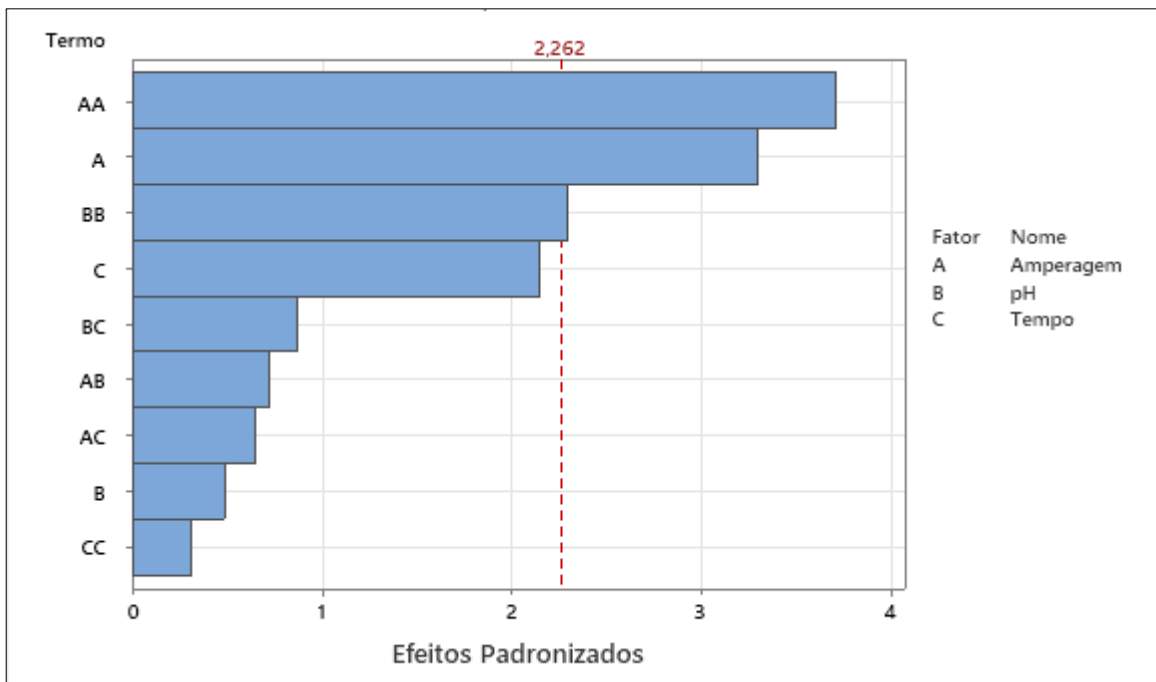
Nos efluentes líquidos, a DQO acaba desempenhando um papel importante que tem por finalidade estimar o potencial poluidor de resíduos domésticos ou industriais, a partir dessa premissa é possível compreender os impactos futuros nos mais variados que podem ocorrer nos ecossistemas aquáticos (SILVA, 2022).

A partir das análises dos resultados, foi possível compreender que houve uma redução na demanda química de oxigênio no efluente tratado, sendo a variável

independente que afetou este processo a corrente elétrica. Observando os dados do gráfico de Pareto da análise estatística, constatou-se apenas influência linear desta variável. Esta foi a que mais impactou no processo de eletrocoagulação, de forma positiva, pois quanto maior a corrente elétrica aplicada no tratamento, menor a demanda química de oxigênio no efluente final.

Os ensaios que apresentaram os resultados visuais mais interessantes foram os experimentos de remoção da cor do efluente, esses experimentos mostraram um desempenho muito positiva acerca da eletrocoagulação com o efluente de lavagem de peças e desengraxe. A Figura 5 apresenta a análise estatística para a remoção da cor através da eletrocoagulação do efluente de lavagem e desengraxe de peças.

Figura 5: Gráfico de Pareto para a análise de cor do efluente no processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de ferro



As tecnologias desenvolvidas têm focado em um processo cada vez mais limpo e efetivo na remoção de cor em efluentes industriais, a busca por avanços efetivos e economicamente rentáveis tem sido cada vez mais acentuada, com isso, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) se tornam opções cada vez mais interessantes na remoção de coloração (ARAÚJO et al 2006). A eletrocoagulação pode ser classificada como um tratamento avançado para efluentes com alta carga de

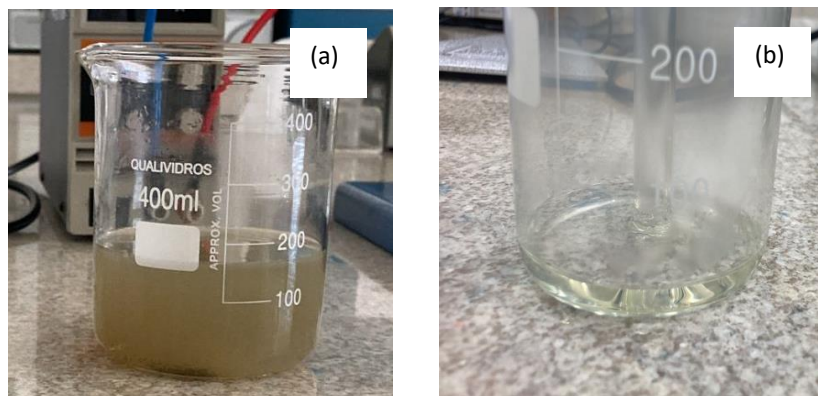
contaminantes, tendo um grande potencial para a remoção de cor (MAMAN, et al., 2022).

O tratamento correto acerca de efluentes que apresentam alta carga de coloração implicam numa série de fatores, é importante que os contaminantes resistentes à degradação biológica e remoção de compostos dissolvidos e coloidais sejam trabalhados e testados a partir de todos os processos existentes de remoção de cor (BENDER et al, 2019), antes de seu lançamento.

A corrente elétrica aplicada define a quantidade de bolhas de gás formadas no processo de eletrocoagulação, bem como a liberação dos íons metálicos, determinando a formação de partículas, nesse quesito, é importante a otimização do processo em busca das condições ideais (JOÃO et al, 2018). Outros fatores que conjuntamente influenciaram no processo neste estudo foram o tempo de reação e o pH inicial aplicado. Estas três variáveis independentes de forma conjunta, potencializaram a remoção da cor no efluente pelo processo de eletrocoagulação

A remoção de cor foi o parâmetro que teve a melhor desempenho no processo de eletrocoagulação, visualmente o tratamento eletroquímico utilizando os eletrodos de ferro foi capaz de remover de forma efetiva a coloração do efluente real (Figura 6 (a) e (b)).

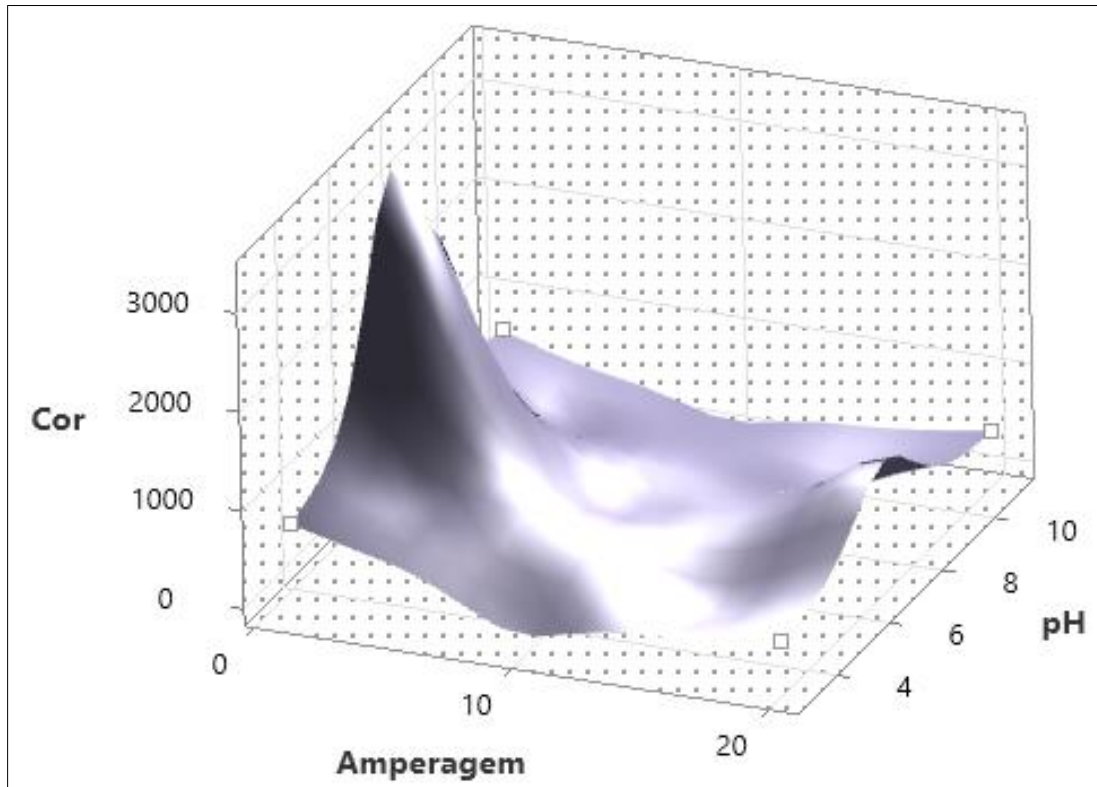
Figura 6: Remoção da cor através do processo de eletrocoagulação, (a) efluente bruto, (b) efluente tratado.



Fonte: autor, 2023.

Como para a remoção da cor a análise estatística mostrou a interação linear e quadrática para a variável corrente aplicada e quadrática para o pH, foi possível obter a curva de contorno para estas variáveis na remoção de cor do efluente real por eletrocoagulação (Figura 7).

Figura 7: Superfície de resposta obtida para a remoção da cor do efluente por processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de Fe



Fonte: autor, 2023.

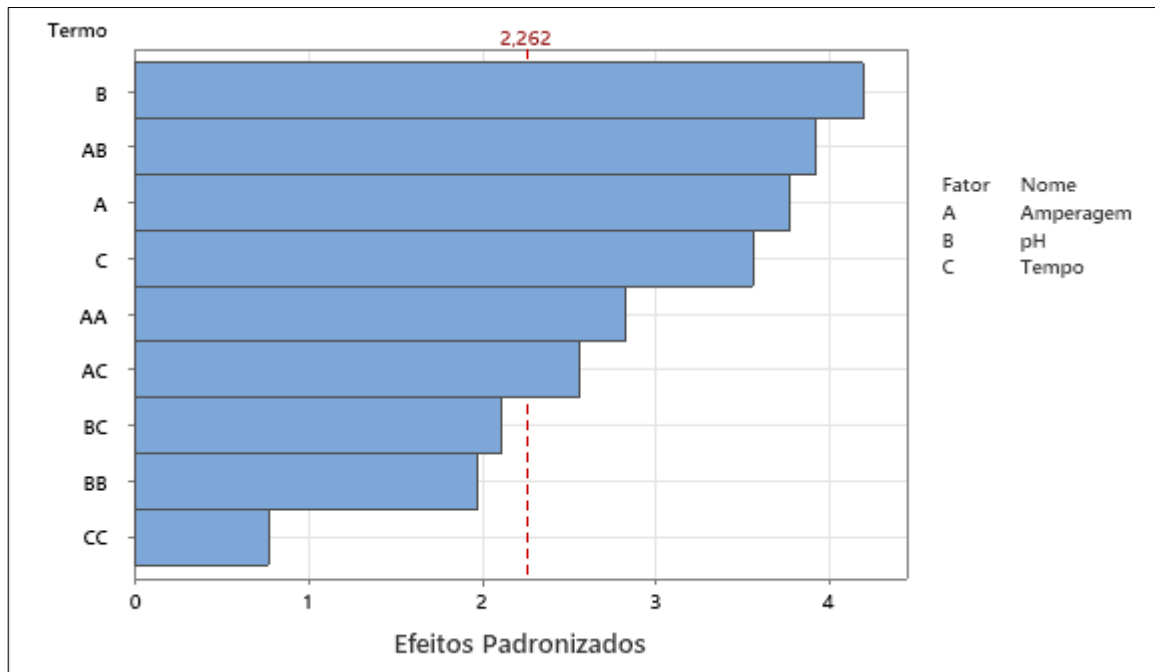
O modelo tridimensional mostra as melhores condições para a aplicação do processo de eletrocoagulação nos níveis avaliados, onde é possível observar que a corrente elétrica entre 10 e 15 A, em conjunto com o pH mais ácido (3,0 e 4,0), resultou em uma remoção de cor efetiva, chegando em torno de 99%. Isso ocorre devido a dissociação de íons no meio que possibilitou uma interação maior na solução desestabilizando seus componentes e formando coágulos.

A análise estatística da toxicidade do efluente tratado, também apresentaram interações multivariáveis, nesse quesito os três parâmetros de teste influenciaram diretamente na toxicidade do efluente. Os testes foram realizados utilizando o crustáceo *Artemia salina*, esse organismo foi escolhido devido a sua fácil manutenção

em laboratório e sua ampla distribuição no meio ambiente, sendo conhecidamente um bom indicador de contaminação ambiental (CANSIAN et al., 2017).

A Figura 8 apresenta a análise estatística para a toxicidade do efluente tratado por eletrocoagulação.

Figura 8: Gráfico de Pareto para a análise de toxicidade do efluente após o processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de ferro



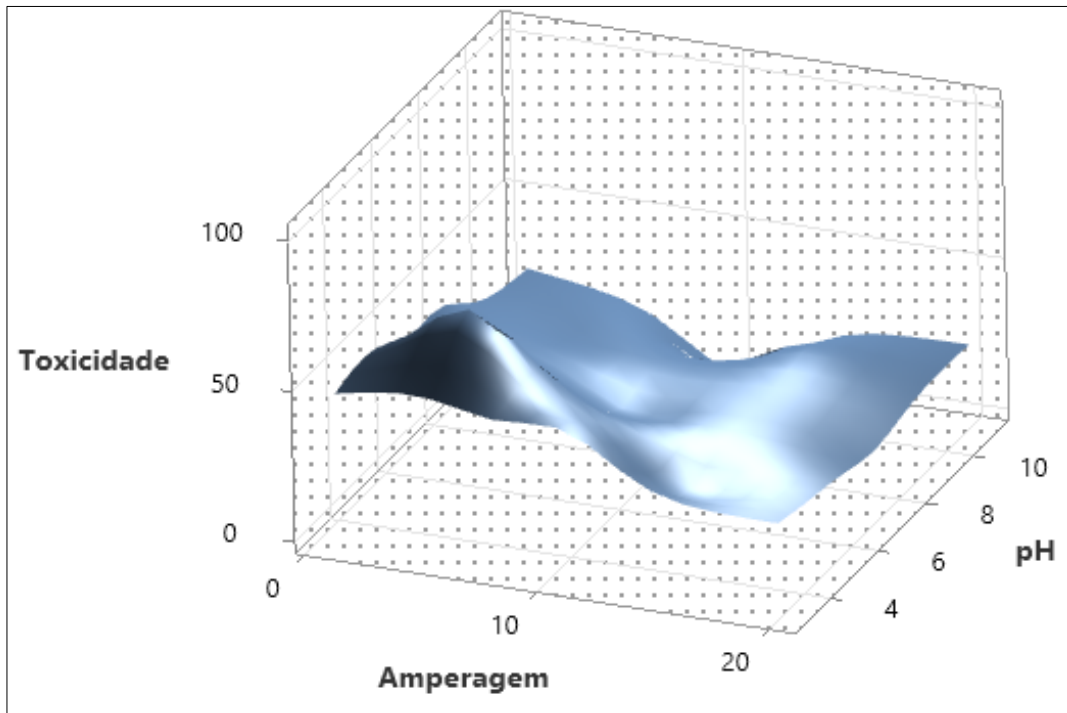
Fonte: autor, 2023.

A *Artemia salina* é um micro crustáceo que tem sido amplamente utilizado nos testes acerca da toxicidade de substâncias. O teste consiste na exposição dos Náuplios durante 24 ou 48 horas. O intuito do experimento é contabilizar o número de indivíduos mortos ao final do procedimento, contabilizando assim a taxa de mortalidade no efluente tratado (PIMENTEL *et al*, 2010).

Testes relativos a avaliar a toxicidade de efluentes podem durar horas ou dias, e tem por objetivo principal compreender e estudar qual a concentração letal média (CL50), a partir da determinação deste valor é possível criar estratégias e desenvolver tratamentos específicos visando a melhora da biota local (MOREIRA, 2013).

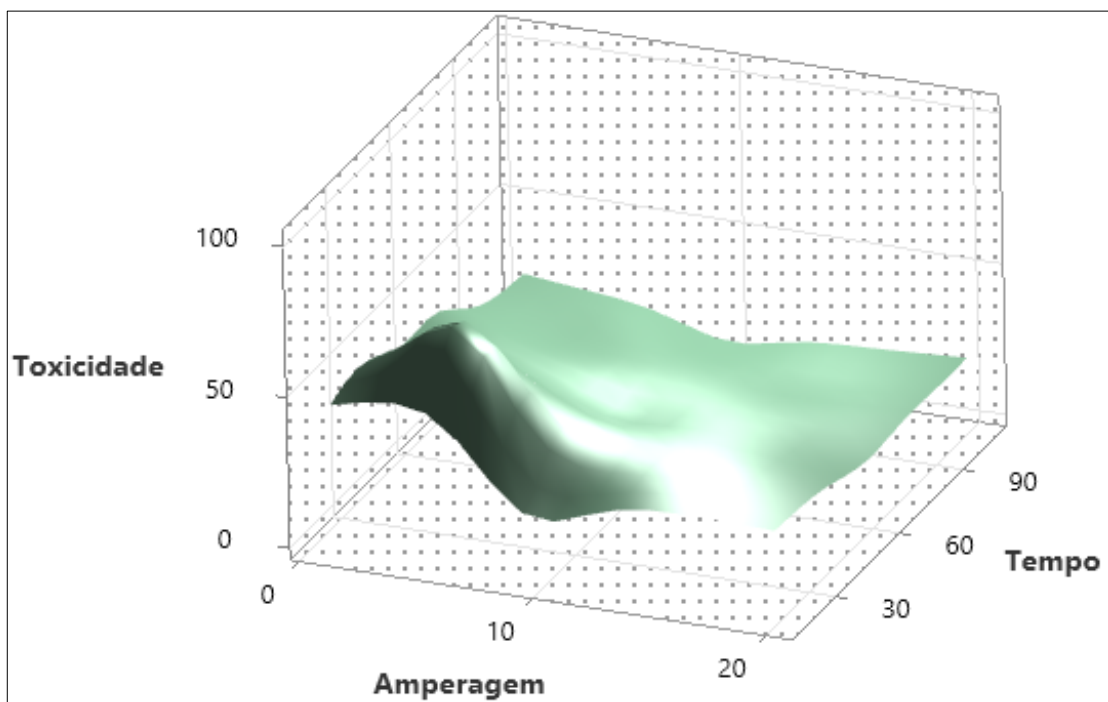
As variáveis que influenciaram na toxicidade do efluente podem ser observadas na Figura 8, nas Figuras 9 e 10 foi possível compreender como as variáveis reduziram a toxicidade do efluente utilizado neste estudo.

Figura 9: Superfície de resposta obtida para a análise de Toxicidade (*Artemia salina*) do efluente tratado por processo de eletrocoagulação para as variáveis corrente elétrica e pH



Fonte: autor, 2023.

Figura 10: Superfície de resposta obtida para a análise de Toxicidade (*Artemia salina*) do efluente tratado por processo de eletrocoagulação para as variáveis tempo e corrente elétrica



Fonte: autor, 2023.

Avaliando as superfícies de resposta (Figura 9), observou-se que o primeiro modelo relaciona a tensão elétrica e o pH, e como isso tem influência direta na toxicidade observada no efluente tratado pela eletrocoagulação, foi possível constatar que a taxa de mortalidade reduz quando o efluente se encontra em pH na faixa de 3,0 a 4,0, a corrente elétrica de 15 a 20 A também sobressai positivamente nos testes observados. Isso possivelmente ocorre devido ao aumento da corrente aplicada que associada ao pH favorece a desestabilização dos contaminantes presentes no efluente favorecendo assim a redução da toxicidade deste.

No segundo modelo (Figura 10) foi possível observar influência do tempo de reação, que de forma conjunta com a corrente elétrica, favoreceu a redução na toxicidade do efluente. Sendo que tempos de reação menores (até 30 minutos), associados a correntes maiores (15 a 20 A) resultam em uma diminuição de mortalidade da *Artemia salina*.

5. CONCLUSÃO

O processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de ferro quando aplicado no efluente de lavagem e desengraxe de peças da indústria metalmeccânica demonstrou potencial de utilização como um tratamento primário para este efluente bruto. Visto que após a aplicação observou-se melhoras significativas nos parâmetros cor em torno de 98% no ponto central do planejamento, DQO com remoção máxima no ensaio 6 com cerca de 74% e redução da toxicidade na maioria dos ensaios realizados.

Quanto a condutividade do efluente não se obteve neste estudo remoção deste parâmetro, por isso sugere-se a utilização do processo de eletrocoagulação como um tratamento primário, sendo que após a saída deste processo, está água estaria em condições de passar por um tratamento de eletrodialise utilizando membranas de troca iônica, com a finalidade de reduzir a condutividade e assim possibilitar um potencial reuso para estes efluentes. O processo de eletrocoagulação apresentou características positivas para o tratamento do efluente em questão, além de indicar um potencial interessante para o reuso deste efluente em processos adjacentes na própria indústria.

6. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

American Public Health Association – APHA, 22th ed., Washington – USA, 2012.

SILVA, E.C. **Remoção de azo-corantes de efluente aquoso modelo por adsorção em carvão ativado.**

ARAÚJO, F. V. DA F. et al. Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H₂O₂/UV. **Química Nova** 29 (1), 2006.

AQUINO, S. F. de; SILVA, S. de Q.; CHERNICHARO, C. A. L. Practical aspects of the chemical oxygen demand (COD) test applied to the analysis of anaerobic effluents. **Eng. Sanit. Ambient.**, 11 (4), p. 295-304, 2006.

BARBOSA, Victor Hugo. Et al. Ferramentas da qualidade na indústria metal mecânica: Estudo de caso da aplicação do Procedimento Operacional Padrão em uma empresa de usinagem. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.** Ano 05, Ed. 10, Vol. 20, pp. 36-58, 2020.

BENAZZI, L. T. Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos da indústria de laticínios. **Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em engenharia de alimentos.** Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, 2013.

BENDER, A. F. et al. Tecnologias avançadas de tratamento visando à remoção de cor e fenol de efluente de indústria de celulose e papel. **Ciência Florestal** 29 (2), 2019.

BRAHMAI, K. et al. Treatment of heavy metal polluted industrial wastewater by a new water treatment process: ballasted electroflocculation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 968–980, 2018.

BRASIL, **Resolução CONAMA** n°357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BUTLER, E.; HUNG, Y. T.; YEH, R. Y.; AL AHMED, M. S. Electrocoagulation in wastewater treatment. **Water**, v.3, p. 495 – 525, 2011.

CANSIAN, R.L.; VANIN, A.B.; ORLANDO, T. PIAZZA, S.P.; PUTON, B.M.S.; CARDOSO, R.I.; GONÇALVES, I.L.; HONAISSER, T.C.; PAROUL, N.; OLIVEIRA, D. Toxicity of clove essential oil and its ester eugenyl acetate against *Artemia salina*. **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 1, p. 155-161, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.12215>.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Sep. Purif. Technol.**, v. 38, p. 11-41, 2004

CRESPILHO, F. N.; REZENDE, M. O. **Eletrofloculação: Princípios e Aplicações.** 1ª ed. São Carlos, 2004.

ELAZZOUI, M.; HABOUBIB, K.; ELYOUBIA, M. S. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 117, p. 614-626, 2017.

GIORDANO, Gandhi. Tratamento e controle de efluentes industriais. Departamento de engenharia sanitária e do meio ambiente. pp. 01-81, 2004.

GRECCO, A. H. L., et al. Eletrocoagulação/eletrofloculação para tratamento de águas residuárias: eletrodos não convencionais e acoplamento de técnicas. **Química Nova** 45 (4), 2022.

GOERCK, J. et al. Eletrocoagulação como pós-tratamento do efluente de um wetland construído de escoamento vertical. **Eng. Sanit. Ambient.** 26 (1), 2021.

JOAO, J. J. et al. Processo de eletrocoagulação-flotação: investigação dos parâmetros operacionais para o tratamento de águas residuais da indústria de pescados. **Química Nova** 41 (2) • Fev 2018.

- KOBYA, M.; DEMIRBAS, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 8, p. 64–74, 2015. Citado na página 16.
- MAMAN, R. DE; DA LUZ, V.; BEHLING, L.; DERVANOSKI, A.; DALLA ROSA, C.; PASQUALI, G. D. L. Electrocoagulation applied for textile wastewater oxidation using iron slag as electrodes. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 29 (21), 31713-31722, 2022.
- MEYER, B.N.; FRERRIGNI, N.R.; PUTNAM, J.E.; JACOBSEN, L.B.; NICHOLS, D.E.; McLAUGHLIN, J.L. Brine Shrimp: A Convenient General Bioassay for Active Plant Constituents. **Journal of Medicinal Plant Research**, v.45, p. 31-34, 1982.
- MIERZWA, José Carlos. O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria - estudo de caso da Kodak Brasileira. **Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária**. São Paulo, 2002.
- New York, USA. MERK, 2003, Manual Fotômetro Spectroquant **NOVA 60**.
- METCALF & EDDY., 1991. "Water Resources and Environmental Engineering".
- MOREIRA, L. P. De O. Avaliação da atividade tóxica em artemia salina leach de extratos de duas espécies da família melastomataceae. Anápolis: **IFG – Campus Anápolis/ Coordenação do curso de Química – Licenciatura em Química**, 2013.
- NAJE, A. S.; CHELLIAPAN, S.; ZAKARIA, Z.; AJEEL, M. A.; ALABA, P. A. A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. **Review in Chemical Engineering**. v. 3, p. 263-292, 2016.
- PAIVA, L. B. de, MORALES, A. R., & DÍAZ, F. R. V. (2008). Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. **Cerâmica**, 54(330), 213-226.
- PIMENTEL, M. F. et al. O Uso de Artemia sp. como Organismo-Teste para Avaliação da Toxicidade das Águas Residuárias do Beneficiamento da Castanha de Caju Antes e Após Tratamento em Reator Biológico Experimental. **J. Braz. Soc. Ecotoxicol**, v. 6, n. 1, 2011, 15-22.
- QUEISSADA, Daniel Delgado; SILVA, Flávio Teixeira da; PAIVA, Teresa Cristina Brazil de. Tratamentos integrados em efluente metal-mecânico: precipitação química e biotratamento em reator do tipo air-lift. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 181-188, jun. 2011. FapUNIFESP (SciELO).
- RODRIGUES, M. B. Utilização de eletrofloculação para água de produção. Dissertação de mestrado. **Programa de Pós-graduação em química**. Universidade do Rio de Janeiro. 2008
- SILVA, L. R. Da. Estudo da importância da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) para o controle da qualidade do tratamento de efluentes. **Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia**. Maceió, 2022.

SILVEIRA, Gustavo. Sistemas de tratamento de efluentes industriais. **Trabalho de conclusão de curso em engenharia química**. pp 01-42, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H. & VIGIL, A.V. Integrated Solid Waste Management, **McGraw Hill/Interamericana de Espana**, 1996.

VALENTE, J. P. S., PADILHA, P. de M., & DA SILVA, A. M. M. (1997). Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP. **Eclética Química**, 22(1), 49–66.