



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica



ENGENHARIA  
METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

# ELETROCOAGULAÇÃO COMO PRÉ- TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA QUÍMICA

Henrique Simkevicius Gabriel

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2017

**Eletrocoagulação como Pré-Tratamento de Efluentes da Indústria Química**

Henrique Simkevicius Gabriel

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Examinado por:

*Achilles Dutra*

---

Prof. Achilles Junqueira Bourdot Dutra, D.Sc

PEMM/COPPE/UFRJ

*Marcelo Borges Mansur*

---

Prof. Marcelo Borges Mansur, D.Sc

PEMM/COPPE/UFRJ

*Iranildes Santos*

---

Prof. Iranildes Daniel dos Santos, D.Sc

ITV/VALE

RIO DE JANEIRO - BRASIL

Dezembro de 2017

Gabriel, Henrique Simkevicius

Eletrocoagulação como pré-tratamento de efluentes da indústria química/ Henrique Simkevicius Gabriel. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

IX, 36 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Projeto Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 37-39.

Apêndice: p. 40-43

1. Efluentes Industriais. 2. Eletrocoagulação. 3. DQO. 4. Diagrama de Pourbaix. I. Junqueira Bourdot Dutra, Achilles. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Eletrocoagulação como pré-tratamento de efluentes da indústria química.

## Agradecimentos

Aos meus pais, Fernando e Regina, e ao meu irmão, Frederico, por todo suporte, apoio, carinho, colaboração, esforço e contribuição durante toda a minha formação, e por me fazerem acreditar que era possível.

Aos meus avôs e avós, Francisco, Otto, Ausra e Hortense, por serem exemplos de inspiração e superação. Por terem me incentivado e tranquilizado durante vários momentos de minha caminhada. E por todo carinho e amor transmitidos ao longo desses anos.

Aos meus amigos que levarei para sempre comigo, pela companhia e apoio durante essa longa jornada. Por todas as risadas e momentos de descontração nos momentos mais difíceis. Pelas incontáveis horas de estudos e madrugadas viradas para sanar dúvidas. E por serem companheiros, tanto dentro como fora da faculdade.

Ao professor Achilles, meu orientador, por toda a disponibilidade, paciência e contribuição para a realização desse trabalho. Por ter me orientado ao longo de todo este trabalho.

Aos demais membros da banca, primeiro por aceitarem participar dela, e por todo apoio e contribuição durante a realização desse trabalho.

À toda a equipe do Laboratório de Eletroquímica Aplicada por toda ajuda e suporte na realização desse trabalho.

Aos professores da Metalmat, e os de outros departamentos que eu tive oportunidade de conhecer, por todo o conhecimento transmitido ao longo desses anos, que sem dúvida nenhuma contribuíram para minha formação, e que continuarão a contribuir por toda minha vida.

Aos funcionários da UFRJ por proporcionarem um ambiente e clima favoráveis ao aprendizado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Engenharia Metalúrgica.

Eletrocoagulação como pré-tratamento de efluentes da indústria química

Henrique Simkevicius Gabriel

Dezembro/2017

Orientador: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Curso: Engenharia Metalúrgica

Devido à crescente preocupação ambiental relativa aos efluentes industriais gerados pela indústria de fertilizantes e pesticidas agrícolas, no presente trabalho foi estudado a eficiência na remoção da DQO (Demanda Química de Oxigênio) destes efluentes pela técnica da eletrocoagulação com a utilização de eletrodos de aço 1020. Para isso, foram analisados os efeitos da variação de certos parâmetros durante os ensaios realizados. De acordo com os estudos apresentados, constatou-se que a técnica pode ser usada no pré-tratamento destes efluentes.

Palavras-chave: Efluentes industriais, eletrocoagulação, DQO, diagrama de Pourbaix.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEMM/POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Metallurgical Engineer.

Eletrocoagulation as pretreatment of effluents from chemical industries

Henrique Simkevicius Gabriel

December/2017

Advisor: Achilles Junqueira Bourdot Dutra

Course: Metallurgical Engineering

Environmental concerns related to the industrial effluents from fertilizers and pesticides industries has motivated this study about the efficiency of eletrocoagulation technique with eletrodes made of 1020 steel on the removal of COD (Chemical Oxygen Demand) from those effluents. A couple of parameters has been varied in order to analyse the effects of each one on the results. According to our studies, it is possible to use this technique as a pre-treatment process of those effluents.

Keywords: Industrial effluents, eletrocoagulation, COD, Pourbaix Diagram.

## ÍNDICE GERAL

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO</b> .....	1
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	2
<b>3.1 Fertilizantes</b> .....	2
<b>3.2 A Indústria de Fertilizantes</b> .....	2
<b>3.3 A Importância dos Fertilizantes na Produção Agrícola</b> .....	2
<b>3.4 Pesticidas e Defensivos Agrícolas</b> .....	3
<b>3.5 A Indústria de Agrotóxicos</b> .....	4
<b>3.6 Problemas Ambientais Relacionados aos Fertilizantes e Pesticidas</b> .....	5
<b>3.7 Eletrocoagulação</b> .....	6
<b>3.7.1 A Teoria da Eletrocoagulação</b> .....	7
<b>3.7.2 Reações Químicas Envolvidas</b> .....	8
<b>3.7.3 Vantagens e Limitações da Eletrocoagulação</b> .....	15
<b>3.7.4 Diagramas de Pourbaix</b> .....	16
<b>3.7.5 Demanda Química de Oxigênio</b> .....	18
<b>3.7.6 Configuração dos Reatores</b> .....	19
<b>3.8 Eletrocoagulação no Tratamento de Efluentes</b> .....	21
<b>3.9 Parâmetros Associados ao Processo de Eletrocoagulação</b> .....	22
<b>3.10 Disposição Final do Lodo</b> .....	22
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	23
<b>4.1 Materiais</b> .....	23
<b>4.1.1 Efluente Industrial</b> .....	23
<b>4.1.2 Eletrodos de Aço</b> .....	23
<b>4.1.3 Vidrarias de Laboratório</b> .....	24
<b>4.1.4 Outros Equipamentos e Parâmetros Estudados</b> .....	24
<b>4.2 Métodos de análises químicas</b> .....	26
<b>4.2.1 Procedimento Experimental</b> .....	26
<b>4.2.2 A Análise da DQO</b> .....	27
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	28
<b>5.1 Análise dos Resultados</b> .....	28
<b>5.2 Consumo dos Eletrodos</b> .....	32
<b>5.3 Observações Visuais</b> .....	33
<b>5.4 Resultados de MEV</b> .....	34

<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>37</b>
<b>8. APÊNDICE .....</b>	<b>40</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da população mundial (Relatório “State of the World Population 2011” do Fundo de População da ONU) .....	3
Figura 2 - Vendas de defensivos agrícolas no Brasil, valores em US\$ milhões, 1990 a 2013 (Martinelli Jr. e Waquil, 2002; SINDIVEG, 2014) .....	5
Figura 3 – Fórmulas moleculares dos princípios ativos Glifosato (A), Fipronil (B) e Tiram (C) (Monografias Anvisa) .....	6
Figura 4 - Interações observadas durante a eletrocoagulação (Henriques, 2004) .....	8
Figura 5 – Decomposição da tensão elétrica da célula eletrolítica (VALENTE, 2012) .....	13
Figura 6 - Diagrama de Pourbaix do sistema Al-H <sub>2</sub> O a 25°C (Valente, 2012) .....	16
Figura 7 - Diagrama de Pourbaix para o ferro (Valente, 2012) .....	17
Figura 8 - Tipos de conexões entre os eletrodos. (A) Paralelo monopolar, (B) Série monopolar, (C) Paralelo Bipolar (VALENTE, 2012).....	20
Figura 9 - Eletrodos de aço usados no presente estudo .....	24
Figura 10 - Fonte de corrente utilizada .....	25
Figura 11 - O agitador magnético utilizado .....	25
Figura 12 – Eletrodos conectados .....	27
Figura 13 – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 7 (referente à tabela 6 do apêndice).....	29
Figura 14 – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 2 (referente à tabela 7 do apêndice).....	29
Figura 15 – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 4 (referente à tabela 8 do apêndice).....	30
Figura 16 – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 10 (referente à tabela 9 do apêndice).....	31
Figura 17 – Diagrama de Pourbaix do ferro ( <a href="https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_(Wikibook)/Chapter_04%3A_Redox_Stability_and_Redox_Reactions/4.5%3A_Pourbaix_diagrams">https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_(Wikibook)/Chapter_04%3A_Redox_Stability_and_Redox_Reactions/4.5%3A_Pourbaix_diagrams</a> ) .....	31
Figura 18 - Efluente original a) e efluente depois de 150 min de eletrocoagulação b). .....	34
Figura 19 - Imagem da espuma obtida pelo MEV com aumento de 1200x.....	34

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos dias de hoje, os temas ambientais estão sendo tratados com cada vez mais importância. O mundo está progressivamente mais industrializado e com isso mais impactos ambientais estão sendo sentidos pela sociedade.

Nesse contexto, face ao aumento da população, torna-se necessária a produção de um maior volume de alimentos e, para isso, os fertilizantes vêm ganhando cada vez mais relevância.

A indústria química, entre elas a indústria de fertilizantes e pesticidas, possui um alto índice de poluição das águas subterrâneas, devido à contaminação da mesma pelos efluentes provenientes dessas indústrias (site Cetesb.sp.gov.br).

No Brasil, a situação é ainda mais complicada devido à proximidade da população em relação as áreas industriais, que não possuem abastecimento central de água devido a problemas socioeconômicos, sendo a água subterrânea a principal fonte de água dessas regiões, sem que haja nenhum tipo de controle da sua qualidade. O consumo dessa água aliado ao seu uso na higiene pessoal pode causar sérios problemas a saúde humana (MIRLEAN, 2004).

Soma-se a isso uma crescente preocupação com a escassez de água no futuro, surgindo então uma maior necessidade de re- aproveitamento da água e sua recuperação a partir de efluentes industriais, e uma das técnicas para isso é a eletrocoagulação, que cada vez mais vem sendo objeto de estudos.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi verificar a viabilidade técnica da utilização da eletrocoagulação no pré-tratamento de efluentes industriais do setor de fertilizantes e pesticidas para posterior tratamento biológico.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Fertilizantes**

A utilização de fertilizantes na agricultura vem de longa data. Há exemplos de sua utilização pelos antigos chineses, 8 mil anos antes de Cristo, assim como no antigo Egito, cerca de 600 anos antes de Cristo. Outro exemplo são os povos da região andina, que eram grandes agricultores e conheciam técnicas sofisticadas de adubação, empregando em seus plantios o guano, material rico em fosfato de cálcio, uréia e sulfato de sódio e potássio (DIAS, 2005).

Porém, a adubação passou a ser vista como negócio durante a Idade Média, na antiga Flandres. Os adubos usados nas lavouras continham esterco animal, lixo humano e lodo de esgoto. A técnica de adubação com esterco animal difundiu-se rapidamente pelo continente, fazendo com que o material se tornasse escasso. Em 1842, Justus von Liebig publicou *A Química Orgânica e suas Aplicações à Morfologia e Patologia*, onde relata que a nutrição vegetal é feita por meio dos elementos minerais do solo, e com isso, surge a fórmula mundialmente conhecida como NPK, fórmulas que contém, em diferentes dosagens, produtos ricos em nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente.

#### **3.2 A Indústria de Fertilizantes**

As indústrias de fertilizantes produzem o insumo mais importante para a agricultura, já que ele é o principal fator para o aumento da produtividade da terra e do homem, contribuindo para a fixação do homem no campo.

As indústrias misturadoras de fertilizantes têm a função de preparar diversas fórmulas de adubos com diferentes doses de nutrientes. Os fertilizantes são vendidos como produtos, tais como: 05-20-20, 07-11-09, 02-20-30, 04-30-10, 22-00-24, 04-14-08, 05-20-30, cujos números referem-se às concentrações de Nitrogênio, Fósforo e Potássio, respectivamente (BAZZOTTI, 2001).

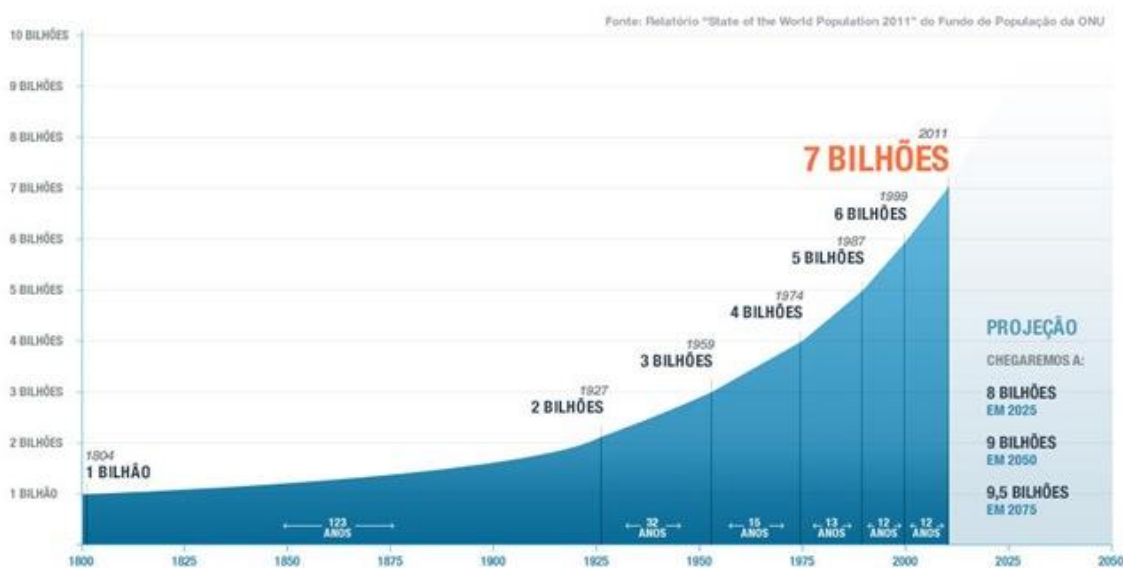
O fertilizante é considerado um insumo agrícola de baixo valor agregado, portanto necessita de produção em grande escala, rigoroso controle de custos, e logística eficiente.

#### **3.3 A Importância dos Fertilizantes na Produção Agrícola**

A importância dos fertilizantes é demonstrada através do aumento da população mundial, que na década de 1970 era de 3,693 bilhões de pessoas e produzia-se 1,225 bilhões de toneladas de grãos em 695 milhões de hectares. Em 2005, a população aumentou para 6,453 bilhões de pessoas, e com uma produção agrícola de 2,219 bilhões de toneladas de grãos em 681,7 milhões de hectares (SCOLARI, 2007). Portanto, houve

um aumento de 74,7% na população, aumento de 81% na produção agrícola e redução de 1,9% na área cultivada. E a tendência é de que esses números continuem a apresentar estes mesmos comportamentos nos próximos anos.

Pode-se dizer então que com o mesmo nível de produtividade de antigamente, não haveria terra suficiente para gerar a produção atual, e conseqüentemente, a quantidade de alimentos disponível seria menor, e a população faminta seria maior. Esse aumento de produtividade agrícola deve-se ao desenvolvimento tecnológico, como o uso intensivo de fertilizantes, irrigação, melhoramento genético de sementes e uso de produtos fitossanitários. A Figura 1 mostra o aumento da população mundial (ONU, 2011).



**Figura 1** - Crescimento da população mundial (Relatório "State of the World Population 2011" do Fundo de População da ONU)

### 3.4 Pesticidas e Defensivos Agrícolas

Os pesticidas, também chamados de agroquímicos, são produtos químicos que protegem as plantações da ação de doenças ou de pestes (insetos, roedores, fungos, nematoides – organismos microscópicos semelhantes a vermes que se alimentam de raízes de plantas -, ervas daninhas, bactérias ou vírus).

Os pesticidas são compostos por um ingrediente ativo, o qual é o componente químico principal, cuja função é controlar a praga, e um ou mais ingredientes inertes, como água, solventes, tensoativos ou agentes propulsores.

Esses agroquímicos muitas vezes são vistos como algo negativo devido ao seu uso intensivo e algumas vezes indevido, assim como aos acidentes a eles relacionados. No entanto, seus benefícios no combate às pragas são reais e deve-se buscar melhorias nos

métodos de controle e utilização. Devido a algum tipo de praga, cerca de 40% das plantações são perdidas antes da colheita e cerca de 10% depois.

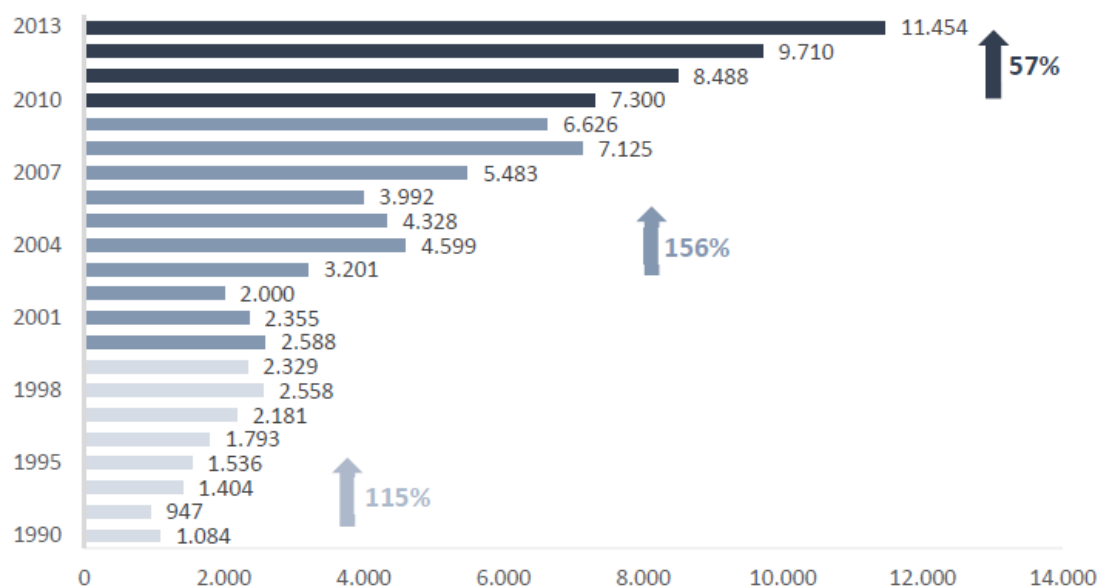
Assim, os agroquímicos possuem um importante papel na indústria agrícola. Além disso, os pesticidas possuem muita importância não só na proteção de plantações, como também na proteção de jardins e áreas de lazer, no controle de pragas industriais, na melhoria da saúde dos animais, entre outros.

### **3.5 A Indústria de Agrotóxicos**

Somente após as duas grandes Guerras Mundiais, há pouco mais de meio século, a indústria química, até então conhecida pela sua fabricação de matéria prima para uso em armas químicas, passa a apostar na agricultura como um novo mercado em potencial para inserção de seus produtos. Apesar de ter surgido após a Primeira Guerra Mundial, foi após a Segunda Guerra Mundial que a indústria de agrotóxicos se expandiu nos Estados Unidos e na Europa, e no Brasil isso aconteceu entre os anos de 1945 e 1985, período conhecido como da modernização da agricultura nacional.

Hoje, os defensivos agrícolas são um insumo indispensável para a agricultura no mundo. Junto com as sementes geneticamente modificadas, mecanização do meio rural e criação de técnicas avançadas de cultivo, os defensivos agrícolas fazem parte do processo de evolução dos paradigmas produtivos globais, que se pautam especialmente pelo aumento da produtividade.

Diante deste cenário, o uso de defensivos agrícolas cresceu de forma consistente ao longo das últimas décadas. O Brasil tem sido um dos maiores protagonistas deste resultado, assumindo, desde 2008, a posição de maior consumidor de defensivos agrícolas do mundo (CARNEIRO, 2008; MCDOUGAL, 2014; SINDIVEG, 2015). Em 2013, o mercado mundial de defensivos agrícolas registrou vendas de 54 bilhões de dólares, com representatividade brasileira de 20% desse valor, ou seja, 11,4 bilhões de dólares (MCDOUGAL, 2014; SINDIVEG, 2015). A Figura 2 mostra a evolução nas vendas de defensivos agrícolas no Brasil entre 1990 e 2013.



**Figura 2** - Vendas de defensivos agrícolas no Brasil, valores em US\$ milhões, 1990 a 2013 (Martinelli Jr. e Waquil, 2002; SINDIVEG, 2014)

### 3.6 Problemas Ambientais Relacionados aos Fertilizantes e Pesticidas

A indústria de fertilizantes e de pesticidas faz parte do conjunto de indústrias pertencentes ao setor químico, um dos que mais impõe riscos ambientais. Isso se deve à natureza de seus processos produtivos, das matérias-primas e insumos utilizados e dos tipos de resíduos gerados.

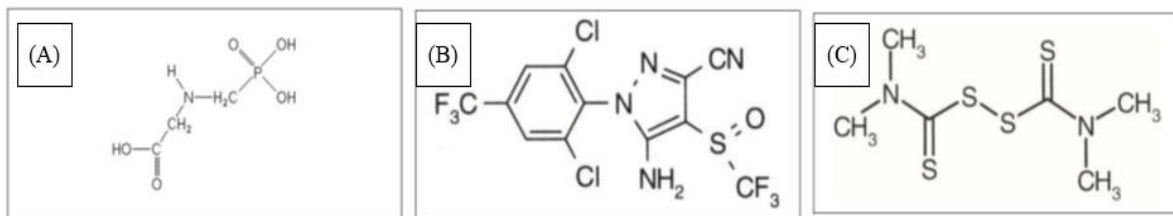
Dentro desse contexto, a produção de fertilizantes e pesticidas pode impactar no meio ambiente em três situações: emissão de gases, gerados através de processos químicos, que podem impactar na qualidade do ar; lançamento de efluentes, que são gerados através de atividades industriais, que podem acabar contaminando os corpos hídricos adjacentes e lençol freático; e geração de resíduos sólidos que podem ocasionar em contaminação do solo e lençol freático.

Olhando mais especificamente para a geração de efluentes, a indústria de fertilizantes e pesticidas gera efluentes contaminados principalmente com íons fosfato e fluoreto, em concentrações bastante elevadas (maiores que  $100 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Estes poluentes podem causar risco à saúde humana e ao meio ambiente.

Para tratar esses efluentes, muitas técnicas podem ser utilizadas. Em anos recentes, estudos têm sido feitos sobre o tratamento de águas residuárias usando a técnica de eletrocoagulação, que é o objeto de estudo deste trabalho, detalhado a seguir.

Para o caso dos pesticidas, os tipos mais utilizados são herbicidas, inseticidas e fungicidas, e o princípio ativo mais frequente de cada um deles é Glifosato, Fipronil e Tiram, respectivamente (RIEDER et al., 2004). A Figura 3 mostra a fórmula molecular desses três princípios ativos. A Anvisa, através da Lei nº 9782 de 26 de janeiro de 1999, é a responsável pela regulamentação, análise, controle e fiscalização de produtos e

serviços que envolvam risco a saúde por agrotóxicos, seus componentes e afins, e demais substâncias de interesse toxicológico. Ela é também a responsável pela reavaliação de moléculas já registradas e elabora monografias dos princípios ativos de defensivos agrícolas (NETTO, 2014).



**Figura 3** – Fórmulas moleculares dos princípios ativos Glifosato (A), Fipronil (B) e Tiram (C) (Monografias Anvisa)

### 3.7 Eletrocoagulação

O processo de eletrocoagulação ocorre quando o anodo sofre oxidação liberando íons metálicos e no catodo ocorre a redução, ocorrendo a formação de íons hidroxilas e hidrogênio, através da hidrólise da água. Os íons metálicos decorrentes da dissolução do anodo se combinam com os íons hidroxila, formando os hidróxidos metálicos, que favorecem a formação de flocos por desestabilização dos contaminantes ou partículas suspensas. Os flocos formados podem ser separados do líquido por sedimentação ou flotação dependendo da densidade dos mesmos (BENSADOK et al., 2007).

O agente coagulante é gradualmente liberado quando uma diferença de potencial é aplicada nos eletrodos metálicos. À medida que o anodo sofre oxidação, o cátion ativo é liberado para a solução (WIMMER, 2007).

Koparal et al. (2002) definem eletrocoagulação como um processo que consiste em criar hidróxidos metálicos nas águas residuárias por eletrodissolução de anodos solúveis, geralmente feitos de ferro ou alumínio.

De forma mais específica, a eletrocoagulação é uma tecnologia emergente para o tratamento de efluentes líquidos industriais coloidais. Nos últimos anos, ela vem recebendo atenção em pesquisa e desenvolvimento, porém muito ainda precisa ser feito para se entender os mecanismos fundamentais relacionados com os parâmetros de projeto que possam otimizar o processo (VALENTE, 2012).

### 3.7.1 A Teoria da Eletrocoagulação

A técnica combina os processos de oxidação e redução, flotação, concentração e obtenção de hidróxidos metálicos e adsorção de poluentes por bolhas de gás hidrogênio formadas no catodo (ZHANG et al., 2009).

No processo de eletrocoagulação, uma diferença de potencial aplicada entre um par de eletrodos gera espécies coagulantes, *in situ*, através da dissolução eletrolítica de um anodo, que pode ser de alumínio ou ferro. Em geral, o alumínio é usado para o tratamento de água e o ferro para o tratamento dos demais efluentes (Chen, 2004).

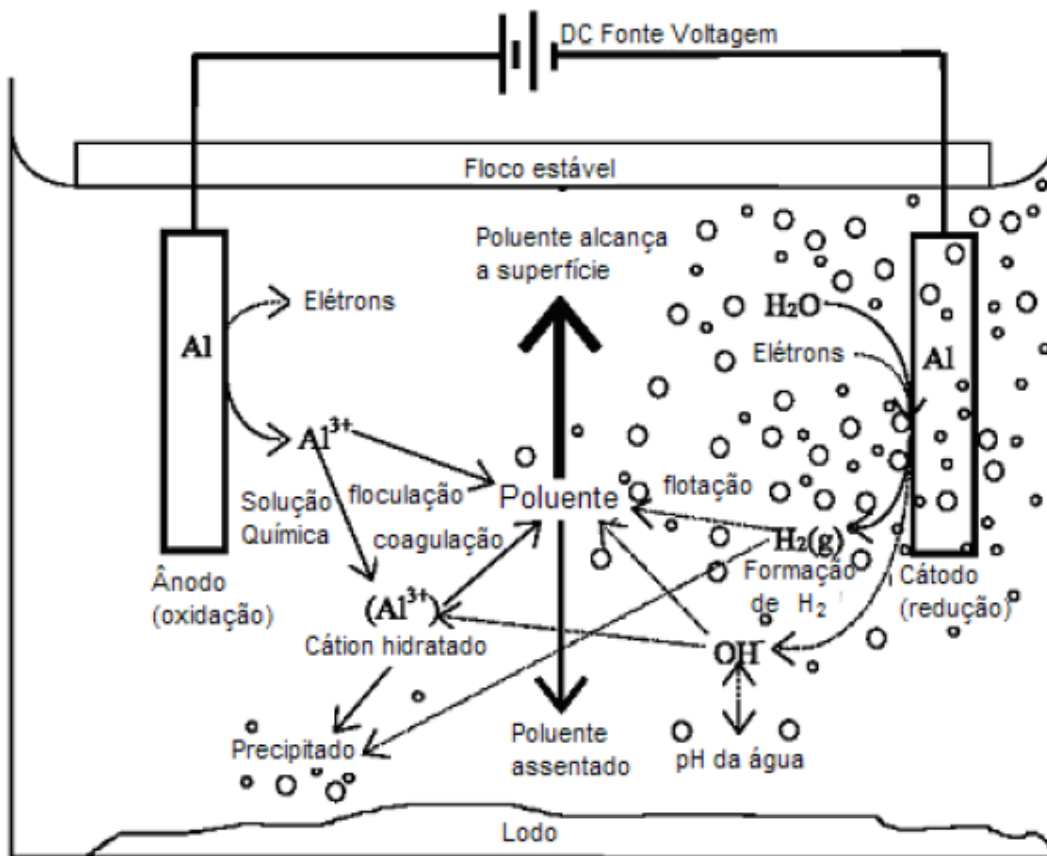
Além da etapa de formação de coagulante pela dissolução do anodo, a produção de íons na eletrocoagulação envolve a desestabilização de contaminantes, suspensão de partículas e quebra de emulsões e formação de flocos pela agregação de fases desestabilizadas (Merzouk et al., 2009).

As microbolhas de hidrogênio que se formam no catodo e as de oxigênio formadas no anodo durante a eletrólise da água podem ajudar a flotar as partículas poluentes. A escolha do material do eletrodo depende de vários aspectos, como baixo custo, baixo potencial de oxidação, ser inerte ao sistema de trabalho (Wang et al., 2008).

Os materiais usados como anodo na eletrocoagulação são ferro e alumínio, devido à disponibilidade, ao baixo custo, efetividade nos processos, além de serem bons coagulantes. Eles podem hidrolisar próximo ao anodo produzindo uma série de intermediários ativos que são capazes de desestabilizar as partículas finamente dispersas do efluente.

A Figura 4 mostra a natureza complexa e interdependente do processo de eletrocoagulação.



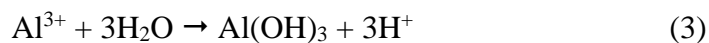


**Figura 4** - Interações observadas durante a eletrocoagulação (Henriques, 2004)

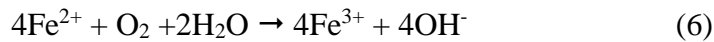
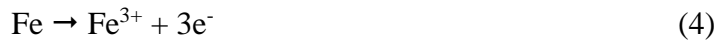
### 3.7.2 Reações Químicas Envolvidas

As reações químicas que ocorrem usando anodos de alumínio e ferro em processo de eletrocoagulação são apresentados a seguir (CHEN, 2004):

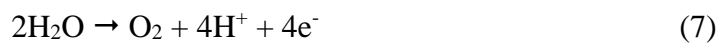
Para o anodo de alumínio:



Para o anodo de ferro:



As reações de formação de oxigênio e hidrogênio são:



Os cátions de alumínio e ferro formados adsorvem poluentes, tornando-os excelentes coagulantes (SHEN et al., 2003).

Atualmente, o mecanismo mais aceito é o de adsorção seguido de precipitação. Os cátions metálicos e os íons hidrogênio formados nos eletrodos reagem formando espécies monoméricas e poliméricas que são transformadas em  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (s) e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (s), que são compostos que apresentam alta capacidade de adsorção (GROCH et al., 2008).

Os principais fatores que influenciam no processo de eletrocoagulação são o pH, a presença de NaCl, a densidade de corrente e tempo de processo.

Experimentos anteriores mostraram que a maior eficiência no tratamento de efluentes com eletrodo de alumínio ocorreu em pH igual a 7, onde há maior consumo de energia devido à variação de condutividade. Para a remoção de DQO e cor de efluentes, utilizando eletrodos de ferro, os melhores resultados foram obtidos em experimentos realizados com pH na faixa alcalina (CHEN, 2004).

Desta forma, o pH é um fator importante, que exerce influência no desempenho do processo eletroquímico, pois determina a especiação do íon metálico, influencia no estado de outras espécies em solução e na solubilidade dos produtos formados.

Quando há uma maior densidade de corrente aplicada, maior será a taxa de reação dos eletrodos (oxidação no anodo e redução no catodo), o que gera uma maior quantidade de agente coagulante e de gases hidrogênio e oxigênio, fazendo com que haja maior transporte de material contaminante. Entretanto, uma maior densidade de corrente pode provocar desperdício e diminuição da eficiência de corrente e, por isso, outros parâmetros devem ser analisados ao se selecioná-la (CHEN, 2004).

O aumento da temperatura provoca uma maior eficiência na remoção de partículas poluentes em um processo de eletrocoagulação, já que os íons produzidos têm uma maior movimentação em altas temperaturas, fazendo com que a colisão deles com o coagulante se torne mais fácil (CHEN, 2004).

Considerando que a oxidação do metal no anodo e a redução de água no catodo são as únicas reações químicas que ocorrem no reator de eletrocoagulação, é possível determinar a massa de metais dissolvidos e hidrogênio formado durante a eletrólise a uma corrente  $I$ , usando a Lei de Faraday (BENNAJAH, 2007; VALENTE, 2012):

$$m = \frac{ItM}{nF} \quad (9)$$

Em que:

$m \rightarrow$  é a massa dos metais dissolvidos ou gás formado (g)

$I \rightarrow$  é a corrente elétrica aplicada (A)

$t \rightarrow$  é o tempo de eletrólise (s)

$M \rightarrow$  é a massa molar do elemento ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

$n \rightarrow$  é o número de elétrons envolvidos na reação

$F \rightarrow$  é a constante de Faraday ( $96485,3 \text{ sA/mol}$ )

Para uma célula contendo  $p$  eletrodos e alimentada por uma vazão ( $Q_e$ ), a razão entre a massa do metal e a vazão é (VALENTE, 2012):

$$C = \frac{m(p - 1)}{Q_e} \quad (10)$$

Em que:

$C \rightarrow$  é a razão entre a massa de metal dissolvido e a vazão de alimentação,  $Q_e$  ( $\text{kg.h.m}^{-3}$ )

$Q_e \rightarrow$  é a vazão de alimentação do reator ( $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ )

$p \rightarrow$  é o número de eletrodos

$m \rightarrow$  é a quantidade teórica de metais dissolvidos (kg)

Caso outras reações eletroquímicas ocorram simultaneamente, a corrente não é totalmente utilizada pela reação de oxidação anódica.

Considerando a reação:



Em que:

A é a espécie a ser oxidada, P a espécie reduzida, n o número de mols de elétrons e  $\gamma_p$  é o número de mols de P produzidos.

Se esta for a única reação a ocorrer, a Lei de Faraday indica que a produção de  $\gamma_p$  mols de P exige a passagem de  $\gamma_p$  mols de elétrons, ou seja, a quantidade de eletricidade ( $Q_0$ ) é (VALENTE, 2012):

$$Q_0 = nNe_0 = nF \quad (12)$$

Onde N é o número de Avogadro ( $6,022 \cdot 10^{+23} \text{ mol}^{-1}$ ), F é a constante de Faraday,  $e_0$  a carga elementar ( $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) e n é o número de elétrons.

Considerando que sempre ocorrem várias reações eletroquímicas ao mesmo tempo, diferentes expressões de desempenho ( $\sigma_c$ ) podem ser usadas (VALENTE, 2012):

$$\sigma_c = \frac{X}{Y} \quad (13)$$

Em que  $X$  é o consumo de energia elétrica para produzir  $\gamma_p$  mols de P e Y o consumo da energia elétrica pela eletrólise, ou (VALENTE, 2012):

$$\sigma_c = \frac{I_t t}{I_c t} \quad (14)$$

Em que  $I_t$  é o consumo de energia elétrica teórico e  $I_c$ , o consumo de energia real.

O rendimento energético (RE) é definido por (VALENTE, 2012):

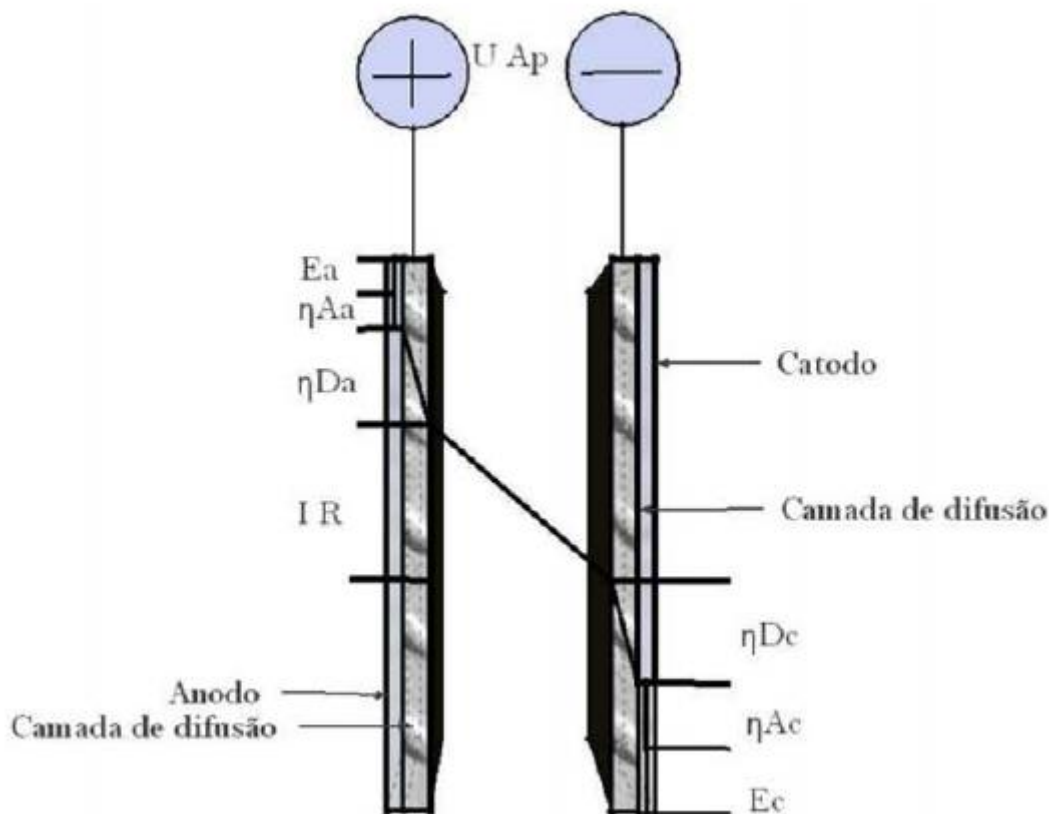
$$RE = \frac{W}{Z} \quad (15)$$

Em que  $W$  é a energia térmica mínima para produzir  $\gamma_p$  mols de P,  $Z$  a energia elétrica consumida pela eletrólise. Ou (VALENTE, 2012):

$$RE = \frac{I_t E_{Eq}}{I_c U_{Ap}} \quad (16)$$

Em que  $E_{Eq}$  é o potencial de equilíbrio,  $U_{Ap}$  é a tensão elétrica medida.

Em uma célula eletrolítica durante a eletrólise, a diferença de potencial ( $U_{Ap}$ ) necessária é formada pela soma de vários termos: o potencial de equilíbrio reversível do anodo ( $E_a$ ); o sobrepotencial de ativação no anodo ( $\eta_{Aa}$ ), que é uma função da densidade de corrente elétrica; a sobretensão de difusão no anodo ( $\eta_{Da}$ ), que é o resultado da diferença na concentração de uma espécie entre o anodo e a solução, em virtude do fenômeno de difusão; a resistência ôhmica da solução que converte parte da energia elétrica em calor por efeito Joule; a sobretensão de difusão no catodo ( $\eta_{Dc}$ ) gerado pelo gradiente de concentração perto do catodo; a sobretensão de ativação ( $\eta_{Ac}$ ), a reação eletroquímica que acontece no catodo; ao potencial de equilíbrio reversível do catodo ( $E_c$ ). A relação entre as diferentes componentes da equação é descrita de várias formas por diferentes autores (CHEN et al., 2004; BENNAJAH, 2007; MOUEDHEN et al., 2008). A Figura 5 mostra a decomposição da tensão elétrica de uma célula eletrolítica.



**Figura 5** – Decomposição da tensão elétrica da célula eletrolítica (VALENTE, 2012)

A diferença de potencial aplicada entre os eletrodos é:

$$U_{Ap} = E_a - E_c + \eta_{Aa} + \eta_{Da} + |\eta_{Dc}| + |\eta_{Ac}| + IR \quad (17)$$

$$U_{Ap} + E_{Eq} + \sum \eta + IR \quad (18)$$

Em que  $U_{Ap}$  é a tensão elétrica medida (diferença de potencial),  $E_{Eq}$  é o potencial de equilíbrio,  $\sum \eta$  é o somatório de sobretensão anódica e catódica e  $(IR)$  é a resistência ôhmica (CHEN et al., 2002; BENNAJAH, 2007).

A diferença de potencial ( $E_{Eq}$ ) correspondente à diferença de potencial entre o anodo e o catodo é necessária para ocorrer as reações de oxirredução. A soma das sobretensões ( $\sum \eta$ ) expressa as limitações cinéticas das reações nos eletrodos. Ela caracteriza as diferentes etapas da reação eletroquímica (CHEN et al., 2002).

A resistência ôhmica, entretanto, é característica da composição da solução e sua condutividade. Para o caso de eletrodos planos, tem-se:

$$IR = \frac{Id}{Ak} \quad (19)$$

Ou,

$$IR = \frac{jd}{k} \quad (20)$$

Em que  $I$  é a corrente elétrica (A),  $d$  a distância entre os eletrodos (cm),  $A$  a superfície ativa do eletrodo ( $\text{cm}^2$ ),  $k$  a condutividade da solução ( $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ),  $j$  a densidade de corrente elétrica ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (BENNAJAH, 2007).

Para soluções com baixa condutividade elétrica, a resistência ôhmica é a principal componente da diferença de potencial aplicada. No entanto, quando o efluente apresenta baixa resistência ôhmica, ambas as contribuições  $E_{Eq}$  e  $\sum \eta$  são importantes para a  $U_{Ap}$  (CHEN, 2004).

A tensão elétrica aplicada ( $U_{Ap}$ ) contribui significativamente para o custo operacional do processo, pois afeta a potência aplicada ( $P$ ) ao reator (CHEN, 2004).

$$P(W) = U_{Ap}I \quad (21)$$

Conhecendo-se a vazão de operação de alimentação do reator, pode-se determinar o custo operacional da energia elétrica por unidade de volume ( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Para uma avaliação precisa do consumo de energia elétrica, é importante avaliar o desempenho do retificador, que é o equipamento que fornece a corrente contínua aos eletrodos (BAYRAMOGLU et al., 2006).

As variáveis que afetam a taxa de reação do eletrodo são constituídas por variáveis relacionadas ao eletrodo (materiais de construção, área superficial, condição da superfície), transferência de massa, concentrações superficiais e adsorção, concentração de espécies eletroativas na solução, variáveis elétricas e variáveis externas como temperatura, pressão e tempo de eletrólise (YILMAZ et al., 2005; BENNAJAH, 2007)

As diversas relações mostradas na literatura são provenientes do trabalho de Faraday. A relação de proporcionalidade entre as correntes farádica e a velocidade da reação de eletrólise é:

$$v = \frac{I}{\eta F A} = \frac{j}{\eta F} \quad (22)$$

Em que  $v$  é a velocidade de oxidação ou redução ( $\text{mol.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ),  $I$  é a corrente elétrica (A),  $A$  a superfície ativa do eletrodo ( $\text{cm}^{-2}$ ),  $j$  a densidade de corrente ( $\text{A.m}^{-2}$ ) e  $F$  a constante de Faraday.

Diferentes modelos podem ser estabelecidos de acordo com as fases determinantes da velocidade de reação global (BENNAJAH, 2007; MOUEDHEN et al., 2008).

### 3.7.3 Vantagens e Limitações da Eletrocoagulação

São vantagens relacionadas ao processo de eletrocoagulação (YOUSUF, 2001; HENRIQUES, 2004):

- Requer equipamento simples e fácil de operar;
- O lodo formado tende a ser rapidamente decantado e de fácil desidratação, já que ele é composto por uma série de hidróxidos e óxidos metálicos, quando comparado com o lodo gerado com os coagulantes tradicionais;
- Gera efluentes com uma menor quantidade de sólidos dissolvidos, comparado com tratamentos químicos;
- Evita a adição de substâncias químicas, diminuindo a possibilidade de poluição secundária;
- As bolhas de gases produzidas durante a eletrólise podem favorecer o processo de eletroflotação, onde as partículas sólidas são carregadas para o topo da solução. Com isso, tem-se uma maior facilidade de concentração, coleta e remoção de poluentes.

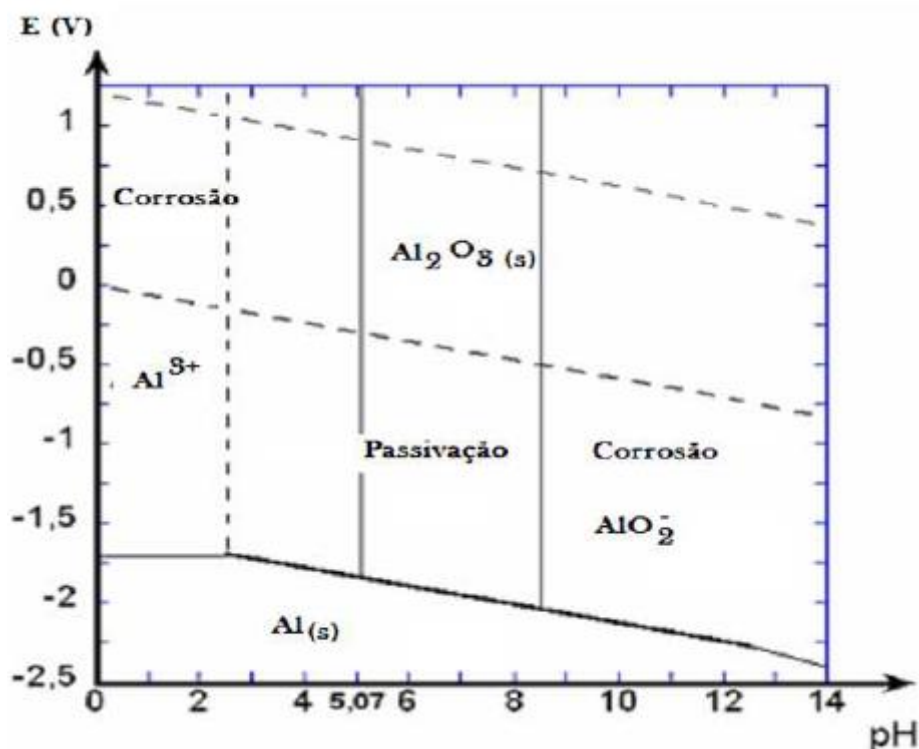
Dentre as limitações do processo:

- Os eletrodos são eletro-dissolvidos pela ação da corrente elétrica e precisam ser constantemente substituídos;
- O alto consumo de energia elétrica eleva o custo operacional do processo;
- Uma camada de óxido pode ser formada na superfície do catodo, levando à perda de eficiência do processo (alumínio, por exemplo);
- Formação de lodo.



### 3.7.4 Diagramas de Pourbaix

Em eletroquímica, os diagramas de Pourbaix são uma ferramenta importante, pois relaciona o pH com o potencial, e com isso é possível supor quais espécies químicas são estáveis em determinadas condições. Os diagramas de Pourbaix para os sistemas Al-H<sub>2</sub>O e ferro (a 25°C) são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

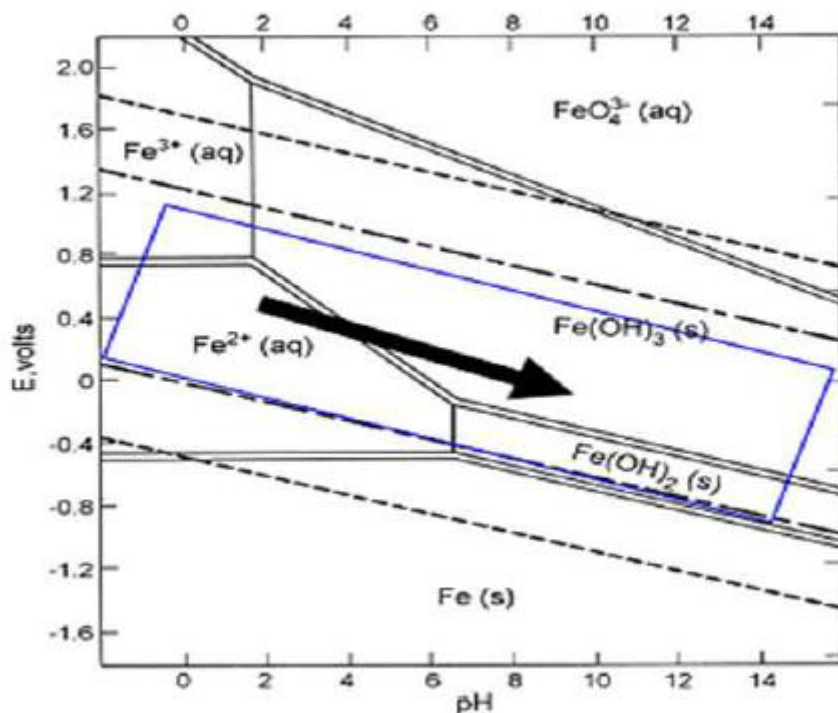


**Figura 6** - Diagrama de Pourbaix do sistema Al-H<sub>2</sub>O a 25°C (Valente, 2012)

No sistema Al-H<sub>2</sub>O, para valores de pH entre 5 e 9 nota-se o fenômeno da passivação, onde a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) forma uma camada protetora, o que evita a oxidação dos eletrodos. As regiões de Al<sup>3+</sup> (pH < 5 e E > 1,75 V) e de AlO<sub>2</sub><sup>-</sup> (pH > 8,3 e E > -2,5 V) correspondem à oxidação de alumínio em espécies solúveis. A região de Al corresponde a imunidade do metal à oxidação (BENNAJAH, 2007).

O alumínio pode formar complexos com matéria orgânica natural, como derivados do ácido húmico, proteínas, micelas e coloides. A matéria orgânica reage de forma mais intensa com o alumínio em meio ácido, pH < 4,5 (BENNAJAH, 2007).

Da mesma forma, pode-se usar o Diagrama de Pourbaix para o eletrodo de ferro, que ele nos mostra as várias espécies químicas, de acordo com o pH e o potencial da solução (CASILLAS et al., 2007).



**Figura 7** - Diagrama de Pourbaix para o ferro (Valente, 2012)

A maior parte das partículas coloidais possui carga elétrica superficial e, por isso facilita à adsorção preferencial de íons presentes no meio. Estas cargas elétricas possuem um papel importante na estabilização química do sistema e captura de poluentes. A aplicação de uma diferença de potencial em pH adequado pode ser usado para gerar íons que promovam a desestabilização, e conseqüentemente, a remoção de substâncias coloidais de efluentes industriais (McCLEMENTS, 2005; COSGROVE, 2010).

A coagulação é definida como uma fase de desestabilização de substâncias coloidais. A neutralização de cargas pode ser obtida através da adsorção das espécies catiónicas do material do eletrodo ou pela precipitação do hidróxido do metal sobre a superfície das partículas coloidais. Para altas concentrações de alumínio e pH próximo da neutralidade, a geração de um precipitado de alumínio predomina no sistema. Este precipitado aprisiona as partículas coloidais no interior em um mecanismo conhecido como aglutinação ou varredura (CAÑIZARES, 2008).

Em geral, a superfície de partículas coloidais é carregada negativamente. Essa superfície promove adsorção de íons positivos dissolvidos na água, que por sua vez atrai íons negativos, juntamente com uma pequena quantidade de íons positivos. Os íons que aderem fortemente às partículas formam a camada compacta, e aqueles que não são, formam a camada difusa. Uma das interações coloidais que pode ocorrer é a força de Van der Waals (McCLEMENTS, 2005; COSGROVE, 2010).

A teoria DLVO de Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek forneceu à ciência dos coloides e de superfície os fundamentos de um modelo quantitativo para as interações entre macropartículas onde dois tipos de forças de natureza eletromagnética, as forças

eletrostáticas da dupla camada e as forças atrativas de Van der Waals, agem entre as partículas em função da distância (VARGAS, 2004; COSGROVE, 2010).

Existem limitações inerentes ao modelo, tanto por hipóteses simplificadoras, por limitações intrínsecas, quanto por negligência de outras forças, normalmente chamadas de não DLVO. Há algumas forças que não são levadas em conta pela teoria que se acredita que possam ser significantes, especialmente quando as forças de longa distância da dupla camada estão blindadas e a natureza química ou molecular da superfície proteica não pode ser ignorada. Algumas moléculas adsorvidas apresentam cadeias que prolongam para a fase contínua do sistema, e isso pode causar repulsão elétrica. Quando duas gotículas de emulsão se aproximam, começam a se sobrepor e interagir. Interações estéricas são um resultado da interpenetração e/ou compressão das camadas (McCLEMENTS, 2005; COSGROVE, 2010).

Uma das formas de se realizar o tratamento de efluentes é promover a desestabilização do sistema, e a eletrocoagulação é um método que pode ser aplicado. Entretanto, o mecanismo de remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio) por eletrocoagulação não é totalmente compreendido havendo poucas pesquisas que avaliam os fatores que influenciam na eficiência de remoção de espécies iônicas e compostos de águas residuárias (CASILLAS et al., 2007).

Casillas et al. (2007) observaram que a eletrocoagulação funciona bem em alguns casos e falha completamente em outros e propuseram a seguinte teoria:

1. A DQO aumenta quando compostos (geralmente ácidos) que reagem com o  $Fe^{2+}$  formam produtos solúveis que permanecem em solução;
2. A DQO permanece praticamente a mesma quando compostos solúveis e miscíveis não reagem com  $Fe^{2+}$ , e, ou  $Fe^{3+}$ , não serão removidos por eletrocoagulação, permanecendo em solução. Uma pequena quantidade pode ser adsorvida ou absorvida na floculação e, conseqüentemente, serem removidas de forma incidental.
3. A DQO é parcialmente reduzida. Oxalato de sódio e sais orgânicos similares são outro caso. O processo de eletrocoagulação gera íons que hidrolisam para formar  $Fe(OH)_2$  e, ou  $Fe(OH)_3$ , em meio ácido formam hidróxidos de ferro que possuem baixa solubilidade. Assim, apenas uma baixa percentagem dos íons acetato e similares serão removidas.
4. A DQO é reduzida eficientemente. Compostos que reagem com  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  formando compostos insolúveis, espera-se que sejam completamente removidos. Sólidos suspensos, coliformes fecais, turbidez, óleos e graxas, leite são facilmente removidos.

### **3.7.5 Demanda Química de Oxigênio**

A demanda química de oxigênio (DQO) é um parâmetro que diz respeito à quantidade de oxigênio consumido por materiais e por substâncias orgânicas e

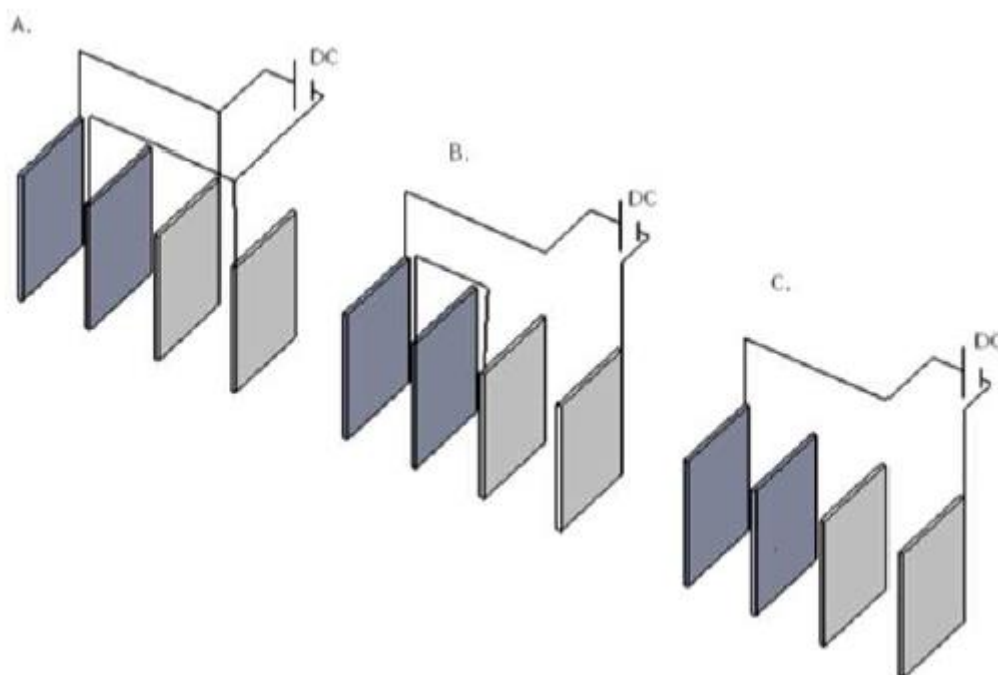
minerais, que se oxidam sob condições definidas. No caso de águas, o parâmetro torna-se particularmente importante por estimar o potencial poluidor (no caso, consumidor de oxigênio) de efluentes domésticos e industriais, assim como por estimar o impacto dos mesmos sobre os ecossistemas aquáticos. Na impossibilidade prática de quantificar a demanda de tal oxigênio, o mesmo é convencionalmente substituído por substâncias químicas oxidantes que, tendo sua quantidade medida antes e depois do contato com o material em estudo, revelam o poder redutor ou demandador de oxigênio do mesmo (HANSON, 1973; ROCHA et al., 1990; ZUCCARI, 2005).

### **3.7.6 Configuração dos Reatores**

Os reatores consistem de placas metálicas usando conexão elétrica em paralelo ou não e ligados a uma fonte de corrente elétrica contínua. As placas dos metais são conhecidas como eletrodo, e os eletrodos podem ser construídos de um mesmo material ou podem ser de materiais diferentes (MOLLAH et al., 2001).

As configurações mais comuns dos reatores de eletrocoagulação são tipicamente reatores de placas (vertical ou horizontal), reatores de placas perfuradas, reatores de tubos concêntricos (MOLLAH et al., 2004), e reatores de leito fluidizado (MOLLAH et al., 2001).

Devido à simplicidade de manuseio e manutenção de placas planas paralelas, faz com que sejam usadas com maior frequência nos experimentos de eletrocoagulação. Vários tipos de conexões são estudados, sendo os três principais: a conexão monopolar em paralelo (Figura 6A), a conexão monopolar em série (Figura 6B), e a conexão paralelo bipolar (Figura 6C) (MOLLAH et al., 2004).



**Figura 8** - Tipos de conexões entre os eletrodos. (A) Paralelo monopolar, (B) Série monopolar, (C) Paralelo Bipolar (VALENTE, 2012)

Na conexão monopolar em série, o par de eletrodos interno estão conectados, mas não estão conectados com os outros eletrodos. Essa configuração de conexão dos eletrodos requer maior potencial para atingir uma determinada corrente elétrica, já que esses reatores apresentam maior resistência elétrica. Na configuração em paralelo, a corrente elétrica é dividida entre os eletrodos. Na configuração em paralelo bipolar, os eletrodos internos não apresentam nenhuma conexão, somente dois eletrodos monopolar estão conectados, o que permite maior facilidade de manutenção (MOLAH et al., 2001).

Eletrodos monopolares apresentam somente carga positiva ou negativa, enquanto os eletrodos bipolares apresentam de um dos lados da placa, carga positiva e de outro negativa (MOLLAH et al., 2001). Esses três modos de conexão se diferenciam entre si por suas expressões de tensão e intensidade da corrente na célula eletrolítica. Enquanto no modo em série, o gerador deve ser capaz de fornecer baixas intensidades de corrente e tensões mais elevadas, no modo paralelo, há exigência de um gerador de alta intensidade de corrente e baixa tensão (BENNAJAH, 2007).

Bayramoglu et al. (2007) realizaram a avaliação técnica e econômica do processo de eletrocoagulação no tratamento de efluente da indústria têxtil usando diferentes tipos de conexões entre os eletrodos, concluindo que a conexão monopolar em paralelo apresenta a melhor relação custo-eficiência para os eletrodos, de ferro e alumínio. Ambos os eletrodos apresentaram eficiência semelhante na remoção de DQO e turbidez, mas o ferro apresenta menor custo.

Em geral, um reator de eletrocoagulação está projetado para permitir que ocorra floculação no mesmo local, nesse caso, as bolhas de gás produzidas durante a eletrólise adsorvem-se aos sólidos e promovem a sua flotação. Vários trabalhos sobre eletrocoagulação têm demonstrado que a separação dos flocos pode ser realizada

principalmente de duas maneiras: decantação ou flotação (HU et al., 2007; ESSAKADI et al., 2008).

### **3.8 Eletrocoagulação no Tratamento de Efluentes**

Como a eletrocoagulação tem se mostrado uma alternativa de tratamento sem a adição de produtos químicos, ela tem demonstrado ser bastante promissora no tratamento de efluentes de diversos setores.

Para o tratamento de efluentes de curtume, Feng et al. (2007) estudaram a eletrocoagulação em baixa corrente (<1A) com eletrodos de aço e alumínio. Para a remoção de sulfetos, os eletrodos de aço apresentaram remoção superior a 90% em comparação com os de alumínio, que tiveram eficiência inferior a 12%. Para a remoção de DQO, amônia, carbono orgânico total (COT), sulfeto e cor foi testado um sistema onde o efluente foi tratado primeiramente com eletrodos de aço, seguido pelo filtro, e por fim com eletrodos de alumínio, resultando em remoções de 68%, 43,1%, 55,1%, 96,7% e 84,3%, respectivamente.

Sirajuddin et al. (2007) atingiram uma recuperação de 99% de cromo proveniente de um banho residual de curtimento de um curtume do Paquistão após duas horas de eletrólise de 1V, em pH 5, e a velocidade de agitação de 500 rpm utilizando Pb como catodo, e Cu como anodo.

Com eletrodos de aço, Sengil et al. (2009) obtiveram para DQO, sulfetos e óleos e graxas eficiências de remoção de 82%, 90% e 96%, respectivamente.

Akbal e Camci (2011) estudaram os efeitos de eletrocoagulação para remoção de cobre, cromo e níquel em efluentes da indústria metalúrgica com eletrodos de ferro e alumínio em configurações monopolar. Os resultados indicaram que a eletrocoagulação com um par de eletrodos de Fe-Al foi muito eficiente, sendo capaz de atingir remoção de 100% para cobre, cromo e níquel, com um tempo de eletrocoagulação de 20 minutos, uma densidade de corrente de 10mA/cm<sup>2</sup> e pH 3,0.

Para efluentes da agroindústria, Drogui et al. (2008) obtiveram uma remoção de 82% de DQO solúvel na configuração bipolar com eletrodos de aço carbono.

Daneshvar et al. (2003) utilizaram a eletrocoagulação para descoloração de corantes. Foram testados o efeito do pH inicial, a velocidade de agitação, a concentração de corante, a distância dos eletrodos, a densidade de corrente e a temperatura da água. Obtiveram resultados experimentais onde a cor laranja foi removida de forma eficaz (>98%) e também a demanda química de oxigênio (DQO) foi reduzida (>84%).

### 3.9 Parâmetros Associados ao Processo de Eletrocoagulação

Para se obter uma melhor eficiência de remoção dos poluentes e um menor custo operacional, alguns parâmetros associados ao processo devem ser controlados.

De acordo com Chen (2004), os efeitos do pH da água ou de águas residuais na eletrocoagulação são refletidos pela eficiência de corrente, assim como a solubilidade em hidróxidos do metal. Em geral as eficiências de corrente em placas de alumínio são mais elevadas na condição ácida ou alcalina quando comparadas à condição neutra. O rendimento do tratamento depende da natureza dos poluentes com a melhor remoção encontrada com pH perto de 7,0. Porém, o consumo de energia é superior a pH neutro devido à variação de condutividade. Quando a condutividade é elevada, o efeito do pH não é significativo.

A condutividade elétrica do efluente influencia significativamente na eficiência de remoção dos poluentes e no consumo de energia elétrica. Pode-se aumentar esse parâmetro adicionando-se ao sistema de tratamento compostos de sais. Usualmente, utiliza-se o cloreto de sódio (NaCl) por ser um produto de baixo custo e não ser tóxico. No entanto, em altas concentrações ocorre a liberação de grandes quantidades dos íons Cl<sup>-</sup>, o que pode ocasionar na formação de compostos organoclorados de toxicidade considerável.

A corrente elétrica aplicada no processo de eletrocoagulação vai determinar a quantidade de metal que será oxidado no anodo.

Em relação aos eletrodos, existem dois tipos que podem participar dos processos eletroquímicos, os inertes e os reativos. Os eletrodos reativos participam do processo sofrendo desgaste, por oxidação ou redução, sendo os mais simples formados por alguns metais tais como ferro, alumínio, ou cobre, que podem contribuir para a formação de íons metálicos na solução. Já os eletrodos inertes, não sofrem desgaste pela passagem de corrente elétrica, sendo formados por materiais como titânio, platina, grafite, óxido de rutênio, entre outros (SINOTI e SOUZA, 2005).

A agitação aumenta a homogeneidade em todo o reator, e é geralmente devido a uma fonte mecânica ou um agitador magnético. Na eletrocoagulação, os reatores eletrolíticos em batelada produzem bolhas de gás *in situ* que são oxigênio e hidrogênio que podem ajudar na agitação.

### 3.10 Disposição Final do Lodo

Há poucos trabalhos relatando a disposição final do lodo gerado no tratamento de efluentes por eletrocoagulação.

De acordo com Drogui et al. (2008), o lodo desidratado de várias agroindústrias (abatedouros, processamento de cereais, processamento de carnes, bebidas) apresentou alta concentração de ferro, com média de 270 g.Kg<sup>-1</sup>; elevada concentração de fósforo

(6920 mg.Kg<sup>-1</sup>); 39% de carbono e baixas concentrações de nitrogênio (3,27%) e enxofre (0,37%). A elevada concentração de ferro é proveniente do material de construção do eletrodo (VALENTE, 2012).

De acordo com os critérios de classificação de resíduos sólidos da NBR 10004/2004 o lodo desidratado é um resíduo não perigoso classe II, mas não foi possível definir se esse material é inerte ou não devido à falta de avaliação de constituintes que podem ser solubilizados em concentrações superiores àquelas estabelecidas pelo anexo G da norma, principalmente no que se refere as concentrações do material de construção do eletrodo, como o ferro e o alumínio. Uma avaliação mais adequada é necessária já que existe a possibilidade de uso do lodo desidratado na agricultura, como estabelece a resolução CONAMA n° 375/2006 (BRASIL, 2006; VALENTE, 2012).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados e descritos a metodologia e os materiais usados para se avaliar a utilização da eletrocoagulação como método de redução da DQO (demanda química de oxigênio) no tratamento de efluente industrial.

### **4.1 Materiais**

#### **4.1.1 Efluente Industrial**

O efluente utilizado foi produzido pela Bayer, proveniente de uma de suas unidades, e é uma mistura de efluentes provenientes do setor de pesticidas e fertilizantes, e a DQO inicial desse efluente é de aproximadamente 20.000 mg/L.

#### **4.1.2 Eletrodos de Aço**

Foram usados como eletrodos na eletrocoagulação, placas de aço 1020, que serviram de catodos e anodos da célula de eletrocoagulação conforme mostra a Figura 9. A área anódica dos anodos foi de 187,44 cm<sup>2</sup>, já que cada anodo (eram 2) tinha 6,6 cm de largura, e 7,1 cm de altura submersa. E para se chegar ao valor da área anódica, considerou-se 4 faces de anodo (6,6x7,1x4).





**Figura 9** - Eletrodos de aço usados no presente estudo

#### **4.1.3 Vidrarias de Laboratório**

Durante o procedimento, foram utilizados alguns tipos de vidraria como bécheres, que serviram para montar a célula de eletrocoagulação. Também foi usada uma pipeta para retirada de amostras em tempos de tratamento pré-definidos, e armazenado em tubo de ensaio para posteriores análises químicas.

#### **4.1.4 Outros Equipamentos e Parâmetros Estudados**

As Figuras 10 e 11 mostram a fonte de alimentação (ICEL PS-600) e o agitador magnético (CORNING Stirrer/Hot Plate), respectivamente utilizados na realização dos ensaios de eletrocoagulação.



**Figura 10** - Fonte de corrente utilizada



**Figura 11** - O agitador magnético utilizado

A Tabela 1 mostra os parâmetros estudados no presente trabalho.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados

Volume de efluente (mL)	500
Alíquota de amostra (mL)	10
pH	2; 4; 7; 10
Corrente (A)	1,0; 2,0
Densidade de corrente (mA/cm <sup>2</sup> )	5,33; 10,67
Rotação do agitador	4
DQO inicial do efluente (mg/L)	19600

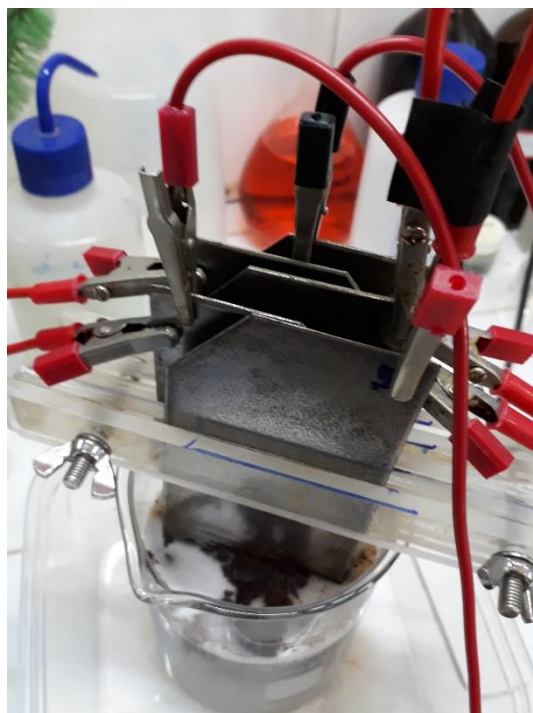
## 4.2 Métodos de análises químicas

### 4.2.1 Procedimento Experimental

Os experimentos foram conduzidos na capela do Laboratório de Eletroquímica Aplicada da UFRJ. Antes do experimento em si, foi feita uma preparação dos eletrodos: lixamento, lavagem, secagem e pesagem. Depois disso, era feita a montagem da célula de eletrocoagulação, onde foram colocados 500 mL do efluente industrial em um bécher de 600 mL. Essa célula era colocada em um recipiente plástico que servia de coletor de espuma caso ocorresse flotação, e esse conjunto era colocado sobre o agitador magnético.

Depois que essa estrutura estava montada, a barra magnética era colocada dentro do bécher e a agitação era ligada. Para os casos em que se desejava modificar o pH inicial, era nesse momento que o ajuste do pH era realizado.

Após essa etapa, colocava-se o conjunto dos eletrodos no efluente e eram feitas as ligações elétricas entre os eletrodos entre si e com a fonte de corrente. Para esses experimentos, a configuração escolhida foi a conexão em paralelo. A Figura 12 mostra os eletrodos já conectados.



**Figura 12** – Eletrodos conectados

Uma amostra inicial para medir a DQO antes do ensaio era retirada e então ligava-se a fonte de corrente no valor da corrente desejada. Uma amostra de 10 ml foi retirada em tempos definidos. A duração total dos ensaios foi de 150 minutos. Ao final do experimento, verificava-se o pH final da amostra final.

#### **4.2.2 A Análise da DQO**

As análises da DQO foram feitas no Laboratório de Controle de Poluição das Águas da UFRJ (LabPol UFRJ), a partir das amostras de 10 mL retiradas durante os experimentos. Para essa análise, existem alguns tipos de metodologia, dentre eles o *Demanda Química de Oxigênio (DQO) – Método Calorimétrico de Refluxo Fechado – Altas Concentrações*, que foi o utilizado neste trabalho.

Esse método foi o escolhido pois é o mais indicado para concentrações mais altas de DQO, entre 100 e 1000 ppm, e mesmo assim, devido a esse limite superior, as amostras tiveram que ser diluídas em 50 vezes com o uso de água destilada, já que a concentração deste efluente fica em torno dos 20.000 ppm.

Essa diluição faz com que a concentração da matéria orgânica fique dentro da faixa de concentração do método, tornando sua análise possível, sendo necessário multiplicar o valor encontrado por 50.

Após fazer essa diluição deve-se adicionar ao efluente um agente catalítico e um agente oxidante,  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  e  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , respectivamente. O método emprega solução

digestora ( $K_2Cr_2O_7$ ,  $HgSO_4$  e  $H_2SO_4$  diluídos em água) e solução catalítica ( $Ag_2SO_4$  em  $H_2SO_4$  concentrado), e após esse preparo, as amostras são levadas para um aparelho digestor a  $150^\circ C$ , onde permanecem por 2 horas.

Após a digestão, as amostras foram levadas para medidas de absorvância em espectrofotômetro de luz visível em 600 nm, e as leituras de cor obtidas são correlacionadas com DQO por meio de uma curva de calibração construída utilizando solução padrão de biftalato de potássio.

Para este trabalho, todas as análises foram feitas em triplicatas para se minimizar a possibilidade de leituras erradas. E quando havia uma discrepância maior do que 8% entre as leituras do valor da DQO das triplicatas, o processo era feito novamente.

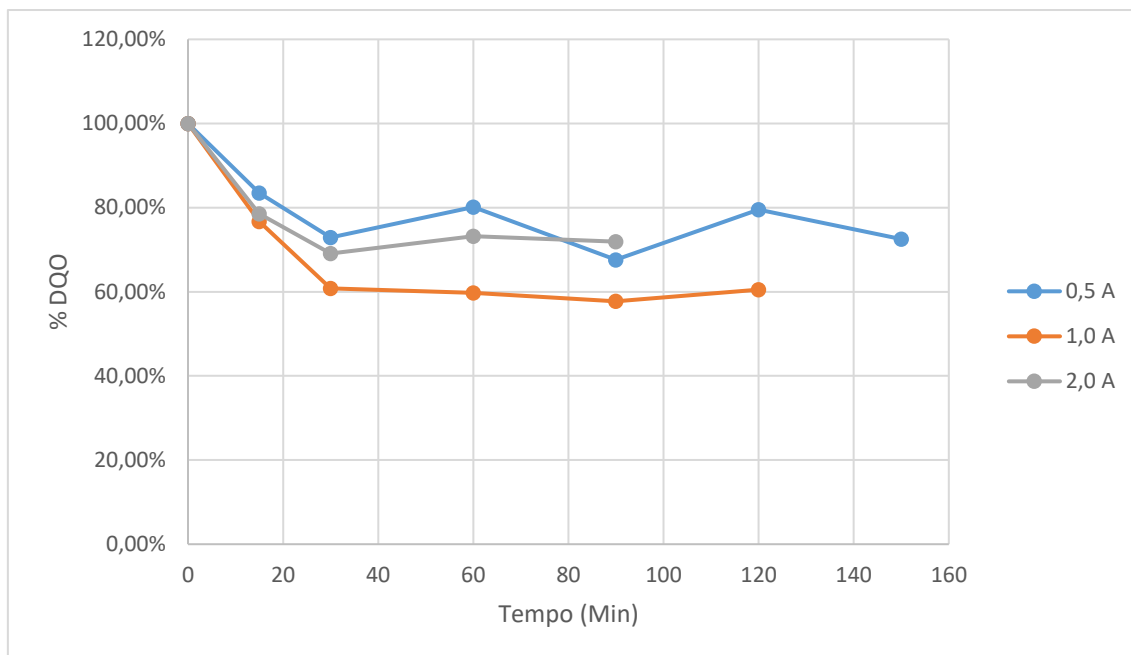
Para se calcular a concentração da DQO, o valor da absorvância precisou ser corrigido subtraindo-se o valor médio do branco da absorvância de cada amostra, e a concentração da DQO é calculada usando-se a equação da reta de calibração, não esquecendo de considerar o fato de diluição, no caso, de 50 vezes.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 Análise dos Resultados**

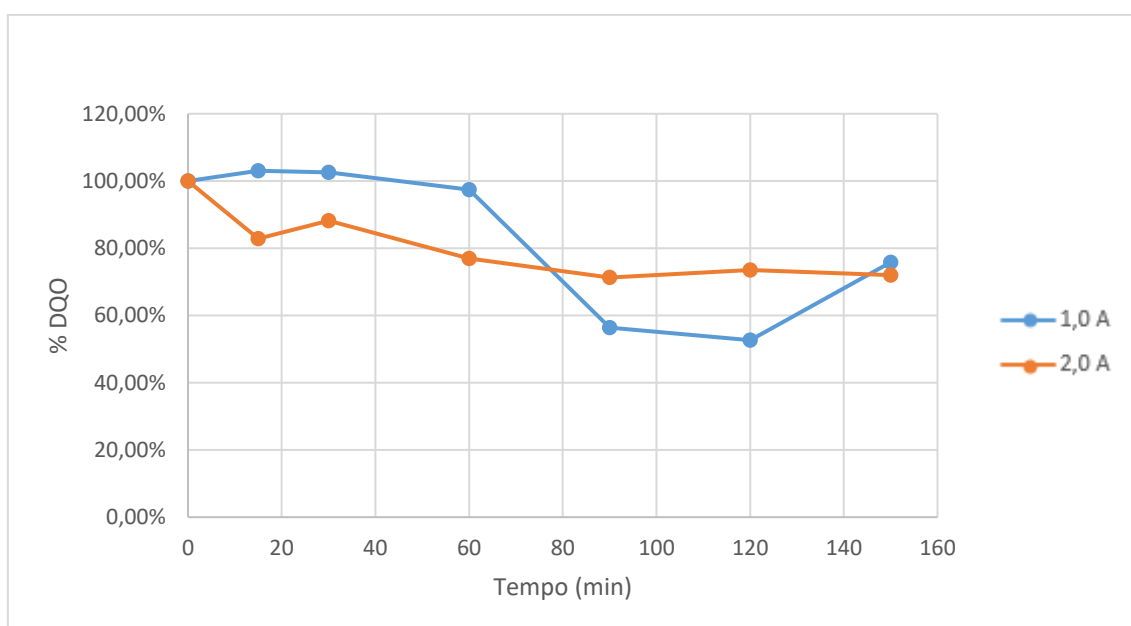
Os primeiros ensaios foram feitos com o pH original do efluente, 7, com correntes de 1,0; 2,0 e 0,5 A. Após esses 3 ensaios, optou-se por utilizar somente as correntes de 1,0 A e 2,0 A com as outras faixas de pH utilizadas, já que o ensaio com 0,5 A não obteve a mesma clarificação do efluente que foi obtida com as outras correntes.

A redução da DQO (%) em função do tempo de eletrocoagulação para diferentes valores de corrente com pH 7 é mostrada na Figura 12. Pode ser observado que a corrente de 1,0 A foi mais eficiente do que com 0,5 A e 2,0 A, que obtiveram resultados próximos. Nessas condições, a DQO sofreu uma redução de 30% após 30 min de eletrocoagulação. Com a corrente de 1,0 A, a redução da DQO foi mais significativa, de 39,2% após 30 min de eletrocoagulação.



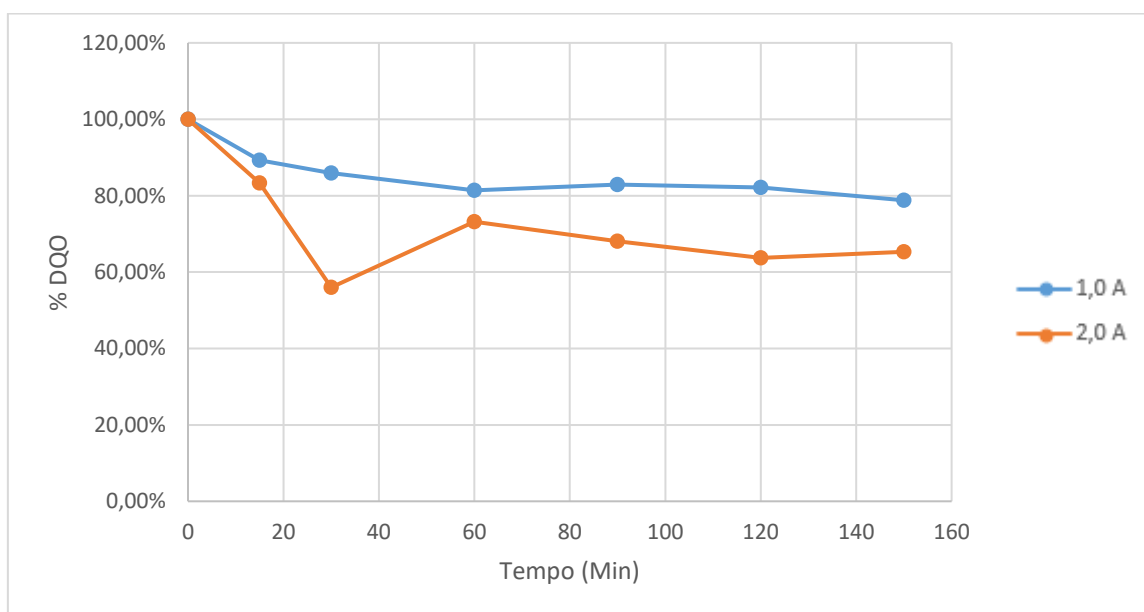
**Figura 13** – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 7 (referente à tabela 6 do apêndice)

A redução da DQO (%) em função do tempo de eletrocoagulação para diferentes valores de corrente com pH inicial 2 é mostrada na Figura 13. Pode ser observado que a remoção com a corrente de 1,0 A foi mais eficiente do que com a corrente de 2,0 A. Aplicando 1,0 A ao sistema, atingiu-se uma remoção de 47,4% após 120 min de eletrocoagulação, enquanto que com 2,0 A, a redução da DQO obtida foi de 28,7%.



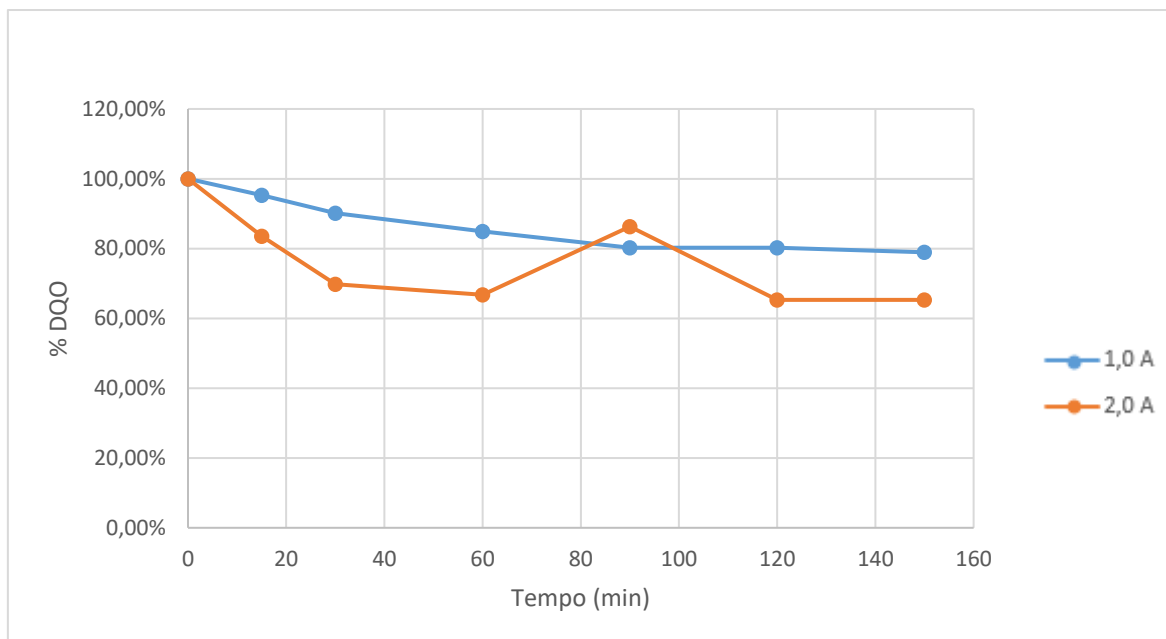
**Figura 14** – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 2 (referente à tabela 7 do apêndice)

A redução da DQO (%) em função do tempo de eletrocoagulação para diferentes valores de corrente com pH inicial 4 é mostrada na Figura 14. No gráfico, pode-se observar que houve maior redução da DQO no ensaio realizado com 2,0 A. Nesse ensaio, a redução obtida foi de 44,0% após 30 min de eletrocoagulação, já no ensaio com 1,0 A, a redução obtida foi de 21,2% após 150 min de eletrocoagulação.



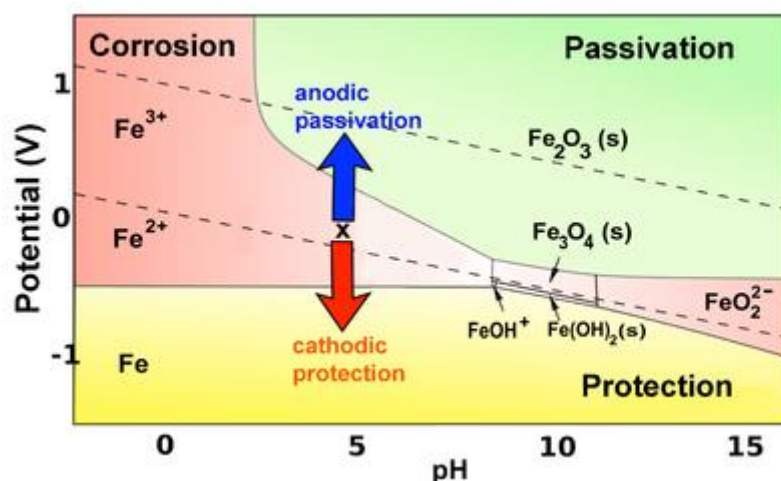
**Figura 15** – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 4 (referente à tabela 8 do apêndice)

A redução da DQO (%) em função do tempo de eletrocoagulação para diferentes valores de corrente com pH inicial 10 é mostrada na Figura 15. Pode ser observado que a redução da DQO foi maior no ensaio com 2,0 A, atingindo uma remoção de 35% após 60 min de eletrocoagulação. Com 1,0 A, a redução da DQO obtida foi de 21% após 150 min de eletrocoagulação.



**Figura 16** – Influência da corrente na remoção da DQO (em %) com pH inicial 10 (referente à tabela 9 do apêndice)

Para a interpretação de todos os resultados, utilizou-se o Diagrama de Pourbaix do ferro, mostrado na Figura 16.



**Figura 17** – Diagrama de Pourbaix do ferro  
 ([https://chem.libretexts.org/Textbook\\_Maps/Inorganic\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Map%3A\\_Inorganic\\_Chemistry\\_\(Wikibook\)/Chapter\\_04%3A\\_Redox\\_Stability\\_and\\_Redox\\_Reactions/4.5%3A\\_Pourbaix\\_diagrams](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Inorganic_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Inorganic_Chemistry_(Wikibook)/Chapter_04%3A_Redox_Stability_and_Redox_Reactions/4.5%3A_Pourbaix_diagrams))

A baixa remoção de DQO com pH inicial 10 já era prevista. Pode ser observado pelo diagrama de Pourbaix, que nessa faixa de pH, o eletrodo (anodo) tende a ser passivado, e isso é desfavorável à eletrocoagulação. O mesmo pode ser dito para o pH inicial 7.



A melhor remoção foi obtida com pH 2, e isso é condizente com o diagrama de Pourbaix, pois essa faixa de pH corresponde à oxidação de espécies solúveis,  $Fe^{3+}$ , e isso favorece a eletrocoagulação.

Esse melhor resultado foi obtido com a corrente de 1,0 A, e isso pode ter ocorrido, pois com 2,0 A, a voltagem atingiu valores tão elevados, que no diagrama de Pourbaix pode corresponder à região de passivação do eletrodo (anodo), fazendo com que a eletrocoagulação perca sua eficiência.

O melhor resultado é mostrado com mais detalhes na Tabela 2, onde é apresentada a quantidade de ferro dissolvida durante 120 min de eletrocoagulação a uma corrente de 1,0 A e pH 2 necessária para proporcionar remoção de 47,4% da DQO. Para o valor teórico da massa consumida foi utilizada a equação 9. O segundo melhor resultado é mostrado na Tabela 3, onde é apresentada a quantidade de ferro dissolvida durante 30 min de eletrocoagulação a uma corrente de 2,0 A e pH 4 necessária para proporcionar remoção de 44% da DQO.

Tabela 2 – Massa de ferro dissolvida durante 120 min de eletrocoagulação a uma corrente de 1,0 A e pH 2 necessária para proporcionar remoção de 47,4% da DQO

Tempo (min)	Massa de ferro consumida teórica em 120 min (g)	Massa de ferro consumida teórica em 150 min (g)	Massa de ferro consumida medida após 150 min (g)	Remoção DQO (%)
120	1,3930	1,7412	3,0121	47,36

Tabela 3 – Massa de ferro dissolvida durante 30 min de eletrocoagulação a uma corrente de 2,0 A e pH 4 necessária para proporcionar remoção de 44% da DQO

Tempo (min)	Massa de ferro consumida teórica em 30 min (g)	Massa de ferro consumida teórica em 150 min (g)	Massa de ferro consumida medida (g)	Remoção DQO (%)
30	0,6965	3,4824	5,5839	44

A diferença entre a massa de ferro consumida teórica e a medida é justificada pelo fato de ocorrerem também reações de dissolução química e eletrolítica no anodo, e a equação considera apenas a oxidação do metal.

## 5.2 Consumo dos Eletrodos

A partir dos dados das tabelas de perda de massa dos eletrodos usados nos ensaios (Tabelas 13 a 21 do apêndice), pode-se observar que o consumo dos anodos nos ensaios com 2,0 A de corrente praticamente dobra em relação aos ensaios realizados com 1,0 A. Assim, tem-se que os ensaios realizados com 2,0 A consomem o ferro dos anodos mais rapidamente.

Também foi observado que o consumo dos eletrodos não sofreu variação em função do pH inicial utilizado, permanece praticamente o mesmo quando se compara experimentos com a mesma corrente, porém pHs iniciais diferentes.

Para se fazer essa avaliação, foram avaliados principalmente os resultados obtidos com pHs iniciais 2, 4 e 10, pois os experimentos com pH inicial 7 foram feitos com durações diferentes para cada corrente utilizada.

Assim, pode-se afirmar que o consumo de massa dos eletrodos depende da corrente utilizada, e quanto maior ela for, maior será o consumo do material do anodo.

### **5.3 Observações Visuais**

Durante os ensaios, outros aspectos também foram observados, como a variação da voltagem, mudança de cor do efluente e formação de espuma.

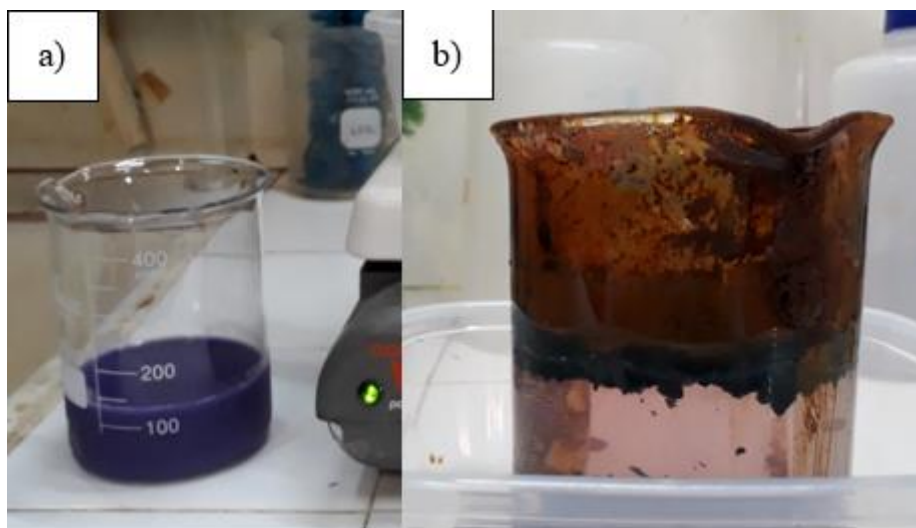
Pode-se dizer que com o aumento da corrente aplicada, a voltagem sobe bem rápido, provavelmente devido à passivação dos eletrodos, pois quando se usou pH inicial ácido, com a corrente de 1,0 A, a voltagem permaneceu constante por todo o experimento. E quando foi usada corrente de 2,0 A com pH inicial ácido, o aumento na voltagem não foi tão intenso quanto o observado nos experimentos com pH inicial 7 ou 10.

Quanto à geração de espuma, ela foi muito maior nos ensaios realizados com pH inicial ácido, e se tornou maior ainda quando a corrente aplicada foi de 2,0 A, que foi a mais alta utilizada nesses experimentos.

Em relação ao comportamento do pH, observou-se que em todos os ensaios o pH aumentou ao final do procedimento.

Na questão da remoção de cor do efluente, observou-se que ela foi mais intensa e acontecia mais rapidamente nos ensaios realizados com pH ácido. Nesses ensaios, o efluente ficava totalmente transparente após 1 h de eletrocoagulação. Já quando o pH inicial foi 10, o efluente só ficou totalmente transparente no experimento realizado com 2,0 A de corrente aplicada, e mesmo assim, somente com 2 h de eletrocoagulação.

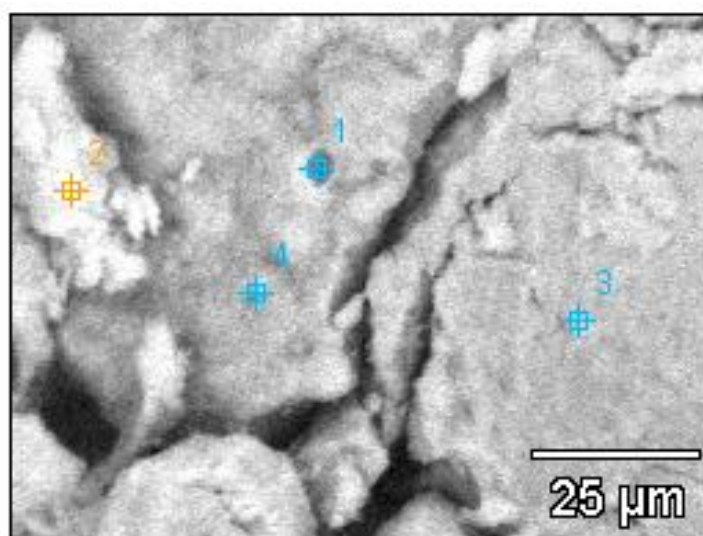
Assim, pode-se dizer que os experimentos com pH inicial ácido são mais eficientes para a remoção de cor, porém, neles há uma maior geração de espuma, e com 2,0 A, a voltagem não fica estável, o que significa que está ocorrendo a passivação do eletrodo, que ocorre de forma muito mais intensa em pH neutro e básico, e isso leva a uma perda na eficiência do processo.



**Figura 18** - Efluente original a) e efluente depois de 150 min de eletrocoagulação b).

#### **5.4 Resultados de MEV**

Para se verificar a composição da espuma gerada nos ensaios de eletrocoagulação do efluente industrial feito com eletrodos de aço, foi feita uma análise em MEV dessa espuma depois de seca e espectros de EDS são mostrados na Figura 19 e nas Tabelas 4 e 5.



**Figura 19** - Imagem da espuma obtida pelo MEV com aumento de 1200x

Tabela 4 – Percentual em massa de cada elemento presente na espuma obtido através da análise em MEV

	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Fe</b>
5 1200x 1(3)_pt1	27,99%	14,11%	0,46%	1,33%	3,49%	52,62%
5 1200x 1(3)_pt2	23,83%	13,55%	0,19%	0,67%	1,87%	59,88%
5 1200x 1(3)_pt3	27,34%	12,62%	0,22%	1,73%	3,51%	54,57%
5 1200x 1(3)_pt4	33,21%	23,12%	0,37%	1,00%	2,46%	39,84%

Tabela 5 – Percentual do número de mols de cada elemento presente na espuma obtido através da análise em MEV

	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Fe</b>
5 1200x 1(3)_pt1	54,06%	20,46%	0,38%	0,96%	2,28%	21,85%
5 1200x 1(3)_pt2	49,80%	21,26%	0,17%	0,53%	1,32%	26,91%
5 1200x 1(3)_pt3	54,16%	18,77%	0,19%	1,29%	2,35%	23,24%
5 1200x 1(3)_pt4	54,90%	28,68%	0,26%	0,62%	1,38%	14,16%

Com os resultados obtidos, confirmou-se que a maior parte da espuma era composta por ferro, proveniente da oxidação dos anodos. Os demais elementos presentes em menor percentual, provavelmente fazem parte da composição inicial do efluente industrial.

## 6. CONCLUSÕES

Nas condições experimentais investigadas, pode-se concluir que a eletrocoagulação do efluente industrial usando anodo de aço:

- Ensaios realizados com pH inicial na faixa ácida levaram aos melhores resultados de remoção da DQO;
- Ensaios realizados com pH inicial nas faixas neutra e básica não levaram a resultados satisfatórios. A eficiência foi menor quando comparada com o pH inicial na faixa ácida. Isso ocorre principalmente porque a passivação dos anodos ocorre muito mais rapidamente e de forma mais intensa em pH na faixa neutra e básica.
- Os ensaios com correntes de 1,0 A e 2,0 A deram resultados próximos, porém, os ensaios com 1,0 A levam uma ligeira vantagem devido ao fato de proporcionarem um menor consumo do material do anodo, quando comparados com a mesma duração.

- Quando tem-se resultados bem próximos para correntes de 1,0 e 2,0 A, porém com tempos diferentes que levem a esses resultados, deve-se avaliar o consumo de massa teórico dos eletrodos, como por exemplo a comparação feita entre as Tabelas 2 e 3. Nesse caso, a melhor opção é a que obteve 44% de remoção da DQO obtidos com 30 min de eletrocoagulação com corrente de 2,0 e pH inicial 4 do que a que obteve 47,36% de remoção da DQO obtidos com 120 min de eletrocoagulação com corrente de 1,0 A e pH inicial 2.
- A melhor taxa de remoção da DQO obtida foi de 47,4% com 120 min no ensaio realizado com corrente de 1,0 A e pH inicial 2. A segunda melhor taxa de remoção obtida foi de 44,0% com 30 min do ensaio feito com corrente de 2,0 A e pH inicial 4.
- O efluente foi clarificado em quase todos os ensaios, principalmente nos realizados com pH inicial na faixa ácida, ficando praticamente transparente.

Como uma técnica de pré-tratamento do efluente, os resultados obtidos são satisfatórios, a eletrocoagulação com eletrodos de ferro pode ser utilizada com pHs ácidos e posteriormente ser encaminhado para tratamento biológico ou outros.

Contudo, ainda é uma técnica que carece de mais estudos para se observar quais os melhores parâmetros a serem utilizados a fim de se obter as melhores eficiências de remoção da DQO de um efluente industrial. E apesar de terem sido resultados razoáveis e superiores aos obtidos anteriormente (estudo já realizado pelo grupo do laboratório) com eletrodos de alumínio para este mesmo tipo de efluente, ainda não se conseguiu reduzir a DQO para 4000 mg/L, conforme a meta estabelecida pelo grupo de tratamento biológico do PEQ/COPPE.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<<http://portal.anvisa.gov.br/registros-e-autorizacoes/agrotoxicos/produtos/monografia-de-agrotoxicos>> Acesso em 04/12/2017.

BORELLI, ELIZABETH, 2011, PUC-SP, “Sustentabilidade e Riscos Ambientais na Indústria Química”.

BAIOTTO, ALEXANDRE; COSTA, AUGUSTO CESAR DA; SCHMIDT, ALBERTO. “Práticas ambientais em uma indústria de fertilizantes”.

<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/informacoes-basicas/poluicao-das-aguas-subterraneas/> acesso 19 de junho de 2017.

CHAKCHOUK, I. et al., “A Combined Electrocoagulation-Electrooxidation Treatment for Dairy Wastewater”, Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 34, n. 1, p. 109-117, 2017.

CHEN, GUOHUA; CHEN, XUEMING; YUE, PO LOCK, “Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater”, Journal of environmental engineering, v. 126, n. 9, p. 858-863, 2000.

CHEN, Xueming; CHEN, Guohua; YUE, Po Lock. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. Chemical Engineering Science, v. 57, n. 13, p. 2449-2455, 2002.

CHEN, GUOHUA, “Electrochemical technologies in wastewater treatment”. Separation and purification Technology, v. 38, n. 1, p. 11-41, 2004.

COMBATT, MARIA PAULINA MENDOZA et al. “Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouros de aves”, 2014.

COSTA, AUGUSTO CESAR DA; SCHMIDT, ALBERTO, 2011, “Práticas Ambientais em uma Indústria de Fertilizantes”. In: XVI Mostra de Iniciação Científica, Brasil, 04-06 Outubro.

CUNHA, GUSTAVO DOS SANTOS, “Tratamento de Efluentes da Indústria Petrolífera por Eletroflotação/Eleto-oxidação”, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

DE PAULA BELTRÃO, TAMIRES STER; SCALCO, PAULO ROBERTO, “O Uso da Inovação como Estratégia Competitiva no Mercado de Defensivos Agrícolas no Brasil”, Revista de Economia do Centro-Oeste, v. 2, n. 1, p. 2-25.

<[www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1441-os-problemas-causados-pelos-agrotoxicos-justificam-seu-uso.html](http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35/1441-os-problemas-causados-pelos-agrotoxicos-justificam-seu-uso.html)> Acesso em 19 nov. 2017.

EATON, A. D. et al., “Standard methods for the examination of water and wastewater” 2005. Washington, DC: American Public Health Association, v. 21, 2005.

HENRIQUES, DANIELLE MARRANQUIEL, “Degradação de Nonilfenol Polietoxilado e de Efluente Têxtil por Meio de Eletrocoagulação e Processos Fenton”, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 2004.

KOBYA, MEHMET; CAN, ORHAN TANER; BAYRAMOGLU, MAHMUT. “Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes” *Journal of hazardous materials*, v. 100, n. 1, p. 163-178, 2003.

MIRLEAN, NICOLAI; OSINALDI, GUILLERMO MARTINEZ, “Impacto da Indústria de Fertilizantes sobre a Qualidade da Água Subterrânea”. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.

<<http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/agrotoxicos>> Acesso em 19 nov. 2017

MOLLAH, M. YOUSUF A. et al., “Electrocoagulation (EC)—science and applications”, *Journal of hazardous materials*, v. 84, n. 1, p. 29-41, 2001.

MOLLAH, MOHAMMAD YA et al., “Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation”, *Journal of hazardous materials*, v. 114, n. 1, p. 199-210, 2004.

NETTO, MARIANA CORRÊA, “A Legislação Ambiental Brasileira e o Uso de Agrotóxicos Proibidos no Exterior: Permissibilidade da Lei ou Falta de Efetividade?”, *Revista internacional de direito ambiental*, v. 3, n. 7, p. 265-290, 2014.

QUARTUCCI, JOÃO PAULO, “Análise da Competitividade do Cluster da Indústria de Fertilizantes da Região Metropolitana de Salvador”, Universidade Federal da Bahia, Bahia, Brasil, 2007.

RIEDER, ARNO et al., “Classes de Potencial de Periculosidade Ambiental (PPA) dos Pesticidas Receitados em Municípios do Pantanal Norte, Mato Grosso (MT), Brasil, no Biênio 1999-2000”, In: IN: SIMPOSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SÓCIO-ECONÔMICOS DO PANTANAL, 2004.

ŞENGİL, İ. AYHAN et al., “Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes”, *Journal of hazardous materials*, v. 137, n. 2, p. 1197-1205, 2006.

SOUZA, ALINE HABIBE DE et al, “Desafios e Reflexões na Contemporaneidade: Um Estudo Sobre a Indústria de Agrotóxicos”, 2016.

“The Fertilizer Industry, World Food Supplies and the Environment”, International Fertilizer Industry Association, 1998.

VALENTE, GERSON DE FREITAS SILVA, “Avaliação da Eletrocoagulação no Tratamento de Efluente Líquido da Indústria de Laticínios”, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2012.

WIMMER, ANA CHRISTINA SOUZA, “Aplicação do Processo Eletrolítico no Tratamento de Efluentes de uma Indústria Petroquímica”, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

YAVUZ, YUSUF; KOPARAL, A. SAVAS; ÖĞÜTVEREN, ÜLKER BAKIR, “Treatment of petroleum refinery wastewater by electrochemical methods”, *Desalination*, v. 258, n. 1, p. 201-205, 2010.

ZUCCARI, MARIA LUCIA; GRANER, CELSO AUGUSTO FESSEL; LEOPOLDO, PAULO R., “Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) em águas e efluentes por método colorimétrico alternativo”, *Embrapa Monitoramento por Satélite-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 2005.



## 8. APÊNDICE

Nesta seção são apresentadas as tabelas obtidas pela realização dos ensaios, e que foram usadas para a elaboração dos gráficos.

Tabela 6 - % DQO total com pH inicial 7

Tempo (min)	DQO Total 1,0 A	DQO Total 2,0 A	DQO Total 0,5 A
0	100,00%	100,00%	100,00%
15	76,68%	78,54%	83,47%
30	60,83%	69,10%	72,90%
60	59,74%	73,19%	80,14%
90	57,73%	71,95%	67,62%
120	60,47%		79,55%
150			72,51%

Tabela 7 - % DQO total com pH inicial 2

Tempo (min)	DQO Total 1,0 A	DQO Total 2,0 A
0	100,00%	100,00%
15	103,05%	82,82%
30	102,58%	88,22%
60	97,42%	76,93%
90	56,39%	71,29%
120	52,64%	73,50%
150	75,85%	72,03%

Tabela 8 - % DQO total com pH inicial 4

Tempo (min)	DQO Total 1,0 A	DQO Total 2,0 A
0	100,00%	100,00%
15	89,27%	83,35%
30	85,95%	55,99%
60	81,36%	73,21%
90	82,89%	68,08%
120	82,12%	63,74%
150	78,80%	65,34%

Tabela 9 - % DQO total com pH inicial 10

Tempo (min)	DQO Total 1,0 A	DQO Total 2,0 A
0	100,00%	100,00%
15	95,32%	83,52%
30	90,12%	69,79%
60	84,92%	66,80%
90	80,24%	86,27%
120	80,24%	65,30%
150	78,94%	65,30%

Tabela 10 - Perda de massa eletrodos pH inicial 7, 1,0 A

Eletrodo	g	%
1	0,003	0,0024
2	1,1337	0,9173
3	0,0108	0,0085
4	1,1511	0,9738
5	0,0092	0,0077

Tabela 11 - Perda de massa eletrodos pH inicial 7, 2,0 A

Eletrodo	g	%
1	0,0076	0,005
2	0,6486	0,5298
3	0,013	0,0103
4	0,6538	0,5587
5	0,0087	0,0073

Tabela 12 - Perda de massa eletrodos pH inicial 7, 0,5 A

Eletrodo	g	%
1	1,6184	1,2772
2	0,0129	0,011
3	1,6432	1,2977
4	0,0103	0,0088
5	0,0077	0,0064

Tabela 13 - Perda de massa eletrodos pH inicial 2, 1,0 A

<b>Eletrodo</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
1	1,4595	1,1671
2	0,0057	0,0047
3	1,5526	1,2425
4	0,015	0,0129
5	0,022	0,0184

Tabela 14 - Perda de massa eletrodos pH inicial 2, 2,0 A

<b>Eletrodo</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
1	2,8826	2,3332
2	0,0031	0,0025
3	2,7761	2,2502
4	0,0104	0,0089
5	0,0069	0,0058

Tabela 15 - Perda de massa eletrodos pH inicial 4, 1,0 A

<b>Eletrodo</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
1	0,0137	0,0114
2	1,4293	1,1848
3	1,5213	1,2625
4	0,0187	0,0161
5	0,0109	0,0091

Tabela 16 - Perda de massa eletrodos pH inicial 4, 2,0 A

<b>Eletrodo</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
1	2,4355	2,0349
2	3,1484	2,6418
3	0,0148	0,0124
4	0,0236	0,0203
5	0,0172	0,0144

Tabela 17 - Perda de massa eletrodos pH inicial 10, 1,0 A

<b>Eletrodo</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
1	0,0029	0,0025
2	0,0047	0,004
3	1,2225	1,0283
4	0,0034	0,0093
5	1,4954	1,2523

Tabela 18 - Perda de massa eletrodos pH inicial 10, 2,0 A

<b>Eletrodo</b>	<b>g</b>	<b>%</b>
1	0,0045	0,0038
2	2,6778	2,3099
3	0,0091	0,0077
4	0,006	0,0052
5	2,5517	2,1649