

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL**

KÁTIA MICHELE ZINI

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO PARA O
TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA COM
USO DE ELETRODOS DE DIFERENTES MATERIAIS METÁLICOS**

FARROUPILHA

2019

KÁTIA MICHELE ZINI

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO PARA O
TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA COM
USO DE ELETRODOS DE DIFERENTES MATERIAIS METÁLICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Tecnologia da Transformação de Materiais

Orientador: Prof^a. Dra. Daniela Lupinacci Villanova

Coorientador: Prof^a. Dra. Janete Werle de Camargo Liberatori

FARROUPILHA

2019

KÁTIA MICHELE ZINI

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO PARA O
TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA COM USO
DE ELETRODOS DE DIFERENTES MATERIAIS METÁLICOS**

Qualificação ou Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Ana Maria Coulon Grisa
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Edson Luiz Francisquetti
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Prof^a. Dra. Melissa Dietrich da Rosa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Prof^a. Dra. Daniela Lupinacci Villanova - Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

Apresentado e aprovado em 30 de outubro de 2019.

Local da defesa: Avenida São Vicente, 785 | Bairro Cinquentenário | CEP:
95180-000 | Farroupilha/RS

RESUMO

Há mais de quarenta anos foram determinados parâmetros de atendimento à legislações e normas específicas para o tratamento de efluentes industriais, e dessa forma possibilitar o retorno da água utilizada nos processos produtivos à natureza. Atualmente o processo de tratamento de efluentes convencional é o mais utilizado pelas indústrias, porém esse processo requer o uso de produtos químicos e com isso o aumento dos resíduos finais desse tratamento. A proposta deste estudo foi utilizar o processo de eletrocoagulação utilizando três diferentes eletrodos metálicos, aço SAE 1020, alumínio e cobre para o tratamento dos efluentes industriais, o processo consiste em submeter o efluente industrial a tensão com uso de eletrodos metálicos ao qual proporciona a floculação dos contaminantes e posteriormente a sua decantação. A seleção dos materiais metálicos levou em consideração os valores de condutividade elétrica de cada um dos metais. Ao final das análises amostras de efluentes tratados por eletrocoagulação com os diferentes eletrodos foram analisadas em laboratório credenciado com o órgão de proteção ambiental – FEPAM para os principais parâmetros para liberação de efluentes conforme Resolução CONSEMA N° 355 (Brasil, 2017). Os resultados das análises laboratoriais foram comparados aos resultados do tratamento de efluentes convencional utilizado pela empresa. Os índices do processo de eletrocoagulação demonstraram-se satisfatórios com a redução do pH de 8 para 7,1 na análise pelo eletrodo de cobre. O resultado do processo de eletrocoagulação também foi positivo para o índice de turbidez do efluente, que bruto apresentava 158 NTU, sendo 20 NTU para o efluente tratado convencionalmente e 3,3 NTU para o eletrodo de aço SAE 1020. Para a análise de demanda química de oxigênio ambos os processos de tratamento de efluente não atenderam aos parâmetros definidos na resolução, o efluente tratado convencionalmente apresentou 369mg/L e o eletrodo de cobre apresentou 428 mg/L, ou seja, 13% acima do limite permitido em legislação, que não deve ultrapassar 330mg/L. Para a análise de presença de óleos e graxas tanto o processo de eletrocoagulação quanto o tratamento convencional apresentaram resultados positivos atendendo a resolução. Para a análise de sólidos totais suspensos ambos os processos de tratamento de efluente foram positivos, com resultados abaixo do índice definido em resolução, ou seja, menor que 140 mg/L. O sistema de tratamento de efluentes pela eletrocoagulação demonstrou-se tão eficiente quanto o tratamento de efluentes convencional utilizado pela empresa atualmente, portando o tratamento por eletrocoagulação independente do metal utilizado como eletrodo é viável, com a clarificação do efluente e o atendimento aos valores fixados em Resolução para os principais parâmetros de liberação do efluente.

Palavras-chave: Eletrocoagulação. Condutividade elétrica. Materiais metálicos. Tratamento de Efluentes. Legislação Ambiental.

ABSTRACT

For more than forty years, parameters for compliance with laws and specific standards for the treatment of industrial effluents were determined, thus enabling the return of water used in production processes to nature. Currently, the conventional wastewater treatment process is the most used by industries, but this process requires the use of chemicals and the increase of waste resulting from this treatment. The purpose of this study was to use the electrocoagulation process using three different metal electrodes, SAE 1020 steel, aluminum and copper for the treatment of industrial effluents. The process consists of subjecting or industrial effluent to the voltage using metallic electrodes to which it offers a flocculation. contaminants and then their decantation. The selection of metallic materials took into account the electrical conductivity values of each metal. At the end of the analysis of effluent tests applied by electrocoagulation with the different electrodes analyzed in an accredited laboratory or environmental protection agency. – FEPAM for the main parameters of effluent release according to resolution CONSEMA N° 355 (Brazil, 2017). The results of the laboratory analyzes were compared to the results of the conventional effluent treatment used by the company. The electrocoagulation process indices showed satisfactory satisfaction with pH reduction from 8 to 7.1 in the analysis by the copper electrode. The result of the electrocoagulation process was also positive for the effluent turbidity index, which has 158 NTU, being 20 NTU for conventionally treated effluent and 3.3 NTU for SAE 1020 steel electrode. For an analysis of chemical oxygen demand, both effluent treatment processes do not meet the resolution limits, or conventionally treated effluent 369mg / L and the displayed copper electrode 428mg / L, ie 13% above the allowable limit. in legislation, which should not exceed 330mg / L. For an analysis of the presence of oils and greases, both in the electrocoagulation process and in the conventional treatment, found positive results and understanding of the resolution. For an analysis of suspended complete components, both effluent treatment processes were positive, with results below the defined resolution index, ie less than 140 mg / L. The electrocoagulation effluent treatment system has been shown to be as efficient as the conventional effluent treatment used by the company today, carrying or treating by electrocoagulation independent of the metal used as the electrode is feasible, with effluent clarification and compliance with fixed values. Resolution for the main effluent release parameters.

Keywords: Electrocoagulation. Electric conductivity. Metallic materials. Wastewater treatment. Environmental legislation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Consumo de recursos hídricos no Brasil..... | 6 |
| Figura 2 – Esquema demonstrando as características dos efluentes..... | 8 |
| Figura 3 – Esquema de composição dos sólidos totais..... | 12 |
| Figura 4 – Escala logaritmica para o potencial hidrogeniônico..... | 14 |
| Figura 5 – Comparativo entre efluente com diferentes índices de turbidez | 15 |
| Figura 6 – Processo de eletrocoagulação das partículas | 18 |
| Figura 7 – Reator eletrolítico..... | 21 |
| Figura 8 – Processo de coagulação das partículas..... | 23 |
| Figura 9 – Etapas da eletrocoagulação..... | 24 |
| Figura 10 – Representação do tamanho das partículas | 25 |
| Figura 11 – Equipamentos para movimentação de cargas | 30 |
| Figura 12 – Sequencia processo produtivo | 30 |
| Figura 13 – Layout e coleta de efluentes da indústria em estudo..... | 31 |
| Figura 14 – Tanques ETE da empresa estudada..... | 32 |
| Figura 15 – Validação do processo através da filtração simples do efluente bruto..... | 33 |
| Figura 16 – Filtração do efluente | 34 |
| Figura 17 – Fluxo do processo de eletrocoagulação..... | 34 |
| Figura 18 – Aparato para realização da eletrocoagulação | 35 |
| Figura 19 – Comparativo entre os efluentes após pré-teste | 38 |
| Figura 20 – Eletrodos de aço SAE 1020 usados na eletrocoagulação do efluente bruto..... | 39 |
| Figura 21 – Fluxo de migração dos elétrons | 39 |
| Figura 22 – Lodo proveniente do processo de eletrocoagulação do efluente bruto..... | 40 |
| Figura 23 – Comparativo dos resultados entre os diferentes tratamentos de efluentes..... | 40 |
| Figura 24 – Fluxo de análise utilizando diferentes eletrodos metálicos | 43 |
| Figura 25 – Fonte de alimentação de energia usada | 44 |
| Figura 26 – Eletrodo adaptado a fonte de tensão | 45 |
| Figura 27 – Eletrodos submersos no efluente bruto..... | 45 |
| Figura 28 – Resultados comparativos dos valores de pH | 60 |
| Figura 29 – Resultados comparativos dos índices de turbidez dos efluentes tratados..... | 61 |
| Figura 30 – Resultados comparativos DQO para efluentes tratados..... | 61 |
| Figura 31 – Resultados comparativos óleos e graxas para efluentes tratados..... | 62 |
| Figura 32 – Resultados comparativos sólidos totais suspensos dos efluentes tratados..... | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Processos e íons químicos gerados em uma indústria metal mecânica | 8 |
| Tabela 2 – Legislação vigente no país para liberação dos efluentes líquidos | 10 |
| Tabela 3 – Características dos sólidos presentes no efluentes..... | 12 |
| Tabela 4 – Valores para sólidos suspensos totais | 13 |
| Tabela 5 – Valores óleos e graxas..... | 14 |
| Tabela 6 – Valores aceitáveis para pH | 15 |
| Tabela 7 – Valores para índice de turbidez..... | 16 |
| Tabela 8 – Valores para demanda química de oxigênio..... | 17 |
| Tabela 9 – Estudos relacionados à utilização da eletrocoagulação para tratamento de efluentes | 18 |
| Tabela 10 – Valores de condutividade dos metais | 23 |
| Tabela 11 – Parâmetros efluente bruto..... | 32 |
| Tabela 12 – Parâmetros pré-teste com eletrodos de aço SAE 1010..... | 35 |
| Tabela 13 – Resultados da eletrocoagulação com uso de eletrodos de aço SAE 1010 | 36 |
| Tabela 14 – Comparativo de massas dos eletrodos de aço SAE 1010 | 41 |
| Tabela 15 – Resultados do teste de teor de sólidos..... | 41 |
| Tabela 16 – Resultados do teste de teor de cinzas | 42 |
| Tabela 17 – Dimensões dos eletrodos de Aço SAE 1020, alumínio e cobre | 44 |
| Tabela 18 – Resultados da eletrocoagulação com eletrodos de Aço SAE 1020 | 47 |
| Tabela 19 – Comparativo visual após eletrocoagulação com eletrodos de aço SAE 1020... .. | 50 |
| Tabela 20 – Parâmetros antes e após a eletrocoagulação com eletrodos de aço SAE 1020 | 50 |
| Tabela 21 – Resultados da eletrocoagulação com eletrodos de Alumínio | 51 |
| Tabela 22 – Comparativo visual após eletrocoagulação com eletrodos de alumínio | 53 |
| Tabela 23 – Parâmetros antes e após a eletrocoagulação com eletrodos de alumínio | 53 |
| Tabela 24 – Resultados da eletrocoagulação com eletrodos de cobre | 54 |
| Tabela 25 – Comparativo visual após eletrocoagulação com eletrodos de Cobre | 57 |
| Tabela 26 – Parâmetros antes e após a eletrocoagulação com eletrodos de cobre | 57 |
| Tabela 27 – Comparativo entre os tratamentos com eletrodos metálicos após 60 minutos . | 58 |
| Tabela 28 – Comparativo entre os diferentes eletrodos metálicos após 60 minutos | 59 |
| Tabela 29 – Comparativo de resultados das análises para corrosão e eletrodeposição | 63 |
| Tabela 30 – Consumo de energia e custo total das análises com diferentes eletrodos | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANA | Agência Nacional das Águas |
| CNI | Confederação Nacional da Indústria |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONSEMA | Conselho Estadual do Meio Ambiente |
| DBO | Demanda Biológica de Oxigênio |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| DSC | Calorimetria Exploratória Diferencial |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluentes |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente |
| NBR | Norma Brasileira |
| NTU | <i>Nephelometric Turbidity Unit</i> |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| SEMA | Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura |
| TGA | Análise Termogravimétrica |
| SST | Sólidos Suspensos Totais |
| USEPA | Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA E PROBLEMA | 3 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.2.1 | Objetivo geral..... | 4 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 5 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 6 |
| 2.1 | Geração Atual de Efluentes na Indústria Nacional..... | 6 |
| 2.2 | Tratamento dos Efluentes | 9 |
| 2.2.1 | Tratamento físico-químico | 9 |
| 2.2.2 | Tratamento biológico..... | 9 |
| 2.3 | Exigências normativas para tratamento de efluentes | 10 |
| 2.4 | Características físico-químicas e biológicas dos efluentes | 11 |
| 2.4.1 | Sólidos suspensos totais..... | 11 |
| 2.4.2 | Presença de óleos e graxas..... | 13 |
| 2.4.3 | Potencial Hidrogênionico - pH..... | 14 |
| 2.4.4 | Índice de turbidez e cor | 15 |
| 2.4.5 | Demanda química de oxigênio - DQO | 16 |
| 2.5 | Tratamento de Efluentes Através da Eletrocoagulação | 17 |
| 2.5.1 | Conceitos de eletrocoagulação | 17 |
| 2.5.2 | Princípios da eletrocoagulação | 20 |
| 2.5.3 | Uso de eletrodos e a condutividade dos metais..... | 22 |
| 2.5.4 | Estado coloidal dos contaminantes..... | 25 |
| 2.5.5 | Fatores que interferem na eletrocoagulação..... | 26 |
| 2.5.5.1 | Densidade da tensão | 26 |
| 2.5.5.2 | Influência da temperatura | 26 |
| 2.5.5.3 | Materiais dos eletrodos | 27 |
| 2.5.5.4 | Distância entre eletrodos | 27 |
| 2.5.5.5 | Efeito do pH | 28 |
| 2.5.6 | Vantagens e desvantagens da eletrocoagulação..... | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.6.1 | Vantagens da eletrocoagulação | 28 |
| 2.5.6.2 | Desvantagens da eletrocoagulação | 29 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 3.1 | Processo produtivo – geração de efluentes industriais | 30 |
| 3.2 | Efluentes Industriais | 31 |
| 3.3 | Metodologia | 33 |
| 3.3.1 | Filtração simples | 33 |
| 3.3.2 | Pré teste de eletrocoagulação utilizando diferentes metais como eletrodos | 43 |
| 3.3.3 | Teste de eletrocoagulação utilizando diferentes eletrodos metálicos | 43 |
| 3.3.4 | Caracterização do processo de eletrocoagulação | 46 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 47 |
| 4.1 | Eletrocoagulação com eletrodos de aço SAE 1020 | 47 |
| 4.2 | Eletrocoagulação com eletrodos de alumínio | 51 |
| 4.3 | Eletrocoagulação com eletrodos de cobre | 55 |
| 4.4 | Comparativo entre os resultados da eletrocoagulação pelos diferentes eletrodos metálicos | 58 |
| 4.5 | Análises laboratoriais | 60 |
| 5 | CONCLUSÕES | 67 |
| | REFERÊNCIAS | 68 |

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de escassez dos recursos naturais somado ao crescimento industrial acelerado e aos interesses sociais e econômicos do país, fez com que as indústrias incorporassem na gestão de seus negócios o cuidado com o meio ambiente, ou seja, produzir sem causar impacto. A sustentabilidade é assunto obrigatório nos planos orçamentários das empresas, nos quais os valores previstos para tratamento e destinação dos resíduos podem afetar significativamente a lucratividade do negócio. Buscar alternativas para reduzir esses custos sem deixar de atender as legislações ambientais deve ser um compromisso prioritário das empresas.

Para Giordano (2004) a legislação para o tratamento de efluentes industriais é muito complexa e deve ser do conhecimento das empresas os padrões de liberação de efluentes, sendo que cada estado brasileiro possui seu enfoque e suas especificidades. No Brasil, na época dos anos 1930 ocorreu uma intensa industrialização, a partir de então, houve uma maior preocupação com o uso dos recursos naturais, conforme está descrito no site do governo sobre legislações ambientais (Brasil, 2018). No entanto, a preocupação ambiental foi influenciando o pensamento de alguns representantes oficiais brasileiros, e em 1973 foi criada a SEMA, Secretaria Especial de Meio Ambiente, e em 1988 na Constituição Federal é que a obrigatoriedade do licenciamento ambiental para todas as atividades que utilizavam recursos naturais passou a fazer parte do controle e adequação por parte das empresas, conforme Art. 10 do decreto 99.274 (Brasil, 1990). Apenas em 1989, após a junção de diversos Institutos e Secretarias é que um único órgão foi criado, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos, o IBAMA.

A presença de contaminantes nos efluentes industriais é variada e a geração do efluente bruto depende do processo industrial. Conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004), a classificação dos resíduos deve envolver a identificação dos processos de origem, suas características e seus constituintes.

Para Barros (2008) o dano ambiental além de motivar responsabilidade civil e administrativa, possibilita a responsabilidade penal conforme a gravidade ou o descumprimento da legislação pertinente. A Constituição Federal cita em seu Art. 225 (Brasil, 2017) o direito de todos ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, mas também o dever de preservá-lo para as futuras gerações. A responsabilidade para os

danos ambientais prevê a aplicação de multas, tendo em vista o valor da vantagem econômica pela não destinação dos resíduos que possam vir a causar dano ambiental severo, conforme Lei nº 9.605 (Brasil, 1998).

Conforme a resolução CONAMA Nº 430 (Brasil, 2011), efluentes são resíduos líquidos provenientes de diversas atividades e processos influenciam na qualidade da água. Para Giordano (2004) a geração de efluentes líquidos pela indústria acontece devido à incorporação de água nos processos produtivos, podendo ser pela lavagem das máquinas e equipamentos ou pela utilização de águas de sistemas de resfriamento, em processos galvânicos ou aqueles que utilizam pintura, em lavagens de pisos ou em esgotos sanitários das instalações. A legislação ambiental publicada pelo Ministério do Meio Ambiente regulamenta o descarte dos efluentes líquidos com o intuito de limitar a carga poluidora descartada nos mananciais.

Para Pereira (2002) no controle dos parâmetros para liberação dos efluentes, as características físicas, químicas e biológicas variam conforme os produtos químicos e a quantidade de água utilizada nos processos produtivos, com isso, o efluente pode conter contaminantes solubilizados ou com sólidos em suspensão, com ou sem coloração, ou presença de orgânicos ou inorgânicos.

Para Lora (2002) o tratamento dos efluentes industriais pode ser realizado pelos processos físico-químicos ou biológicos, ou ainda uma combinação destes. A determinação do método de tratamento está diretamente relacionada à característica do efluente gerado e ao controle operacional da atividade industrial. Entre as determinações mais comuns para caracterização dos efluentes estão as características físicas como cor, turbidez e presença de sólidos, e as características químicas como pH e teor de matéria orgânica e, ainda, as características biológicas, como bactérias, protozoários e vírus.

Além dos processos convencionais, existe ainda o processo de tratamento dos efluentes através da eletrocoagulação. O uso deste processo é entendido como fonte de energia limpa por não necessitar da adição de produtos químicos para descontaminação do efluente. A eletrocoagulação ocorre através da aplicação de carga elétrica através de dois eletrodos metálicos, que devem estar submersos no líquido a ser descontaminado. Para Fornari (2007 apud SILVA 2007) a tecnologia de tratamento através da eletrocoagulação é uma alternativa promissora, pois utiliza os

mesmos fundamentos básicos dos demais processos de coagulação e, adicionalmente, disponibiliza elementos que potencializam o método pela geração de oxigênio e hidrogênio nas reações químicas, formando um fluxo de microbolhas, facilitando a floculação da carga poluidora no efluente, aumentando a eficiência do tratamento.

Diversos estudos demonstraram que o método de eletrocoagulação é compatível com as demandas ambientais, conforme Carvalho, Souza e Zempulski (2015) o processo de eletrocoagulação, por ser de baixo custo e de fácil aplicação para o tratamento de efluentes industriais, os autores utilizaram eletrodos de aço com equipamentos em escala laboratorial e obtiveram resultados satisfatórios na remoção dos particulados, com baixo custo de montagem e operação e baixo tempo de reação. Para Fleck, Tavares e Eying (2013) a técnica de eletrocoagulação para o tratamento de efluentes de uma indústria têxtil utilizando eletrodos de aço e alumínio, apresentou ótimos resultados na remoção de poluentes orgânicos, conforme os autores é possível afirmar que a eletrocoagulação é um método viável para o tratamento de efluentes, como forma de diminuir os impactos da ação sobre a integridade química, física e biológica do meio natural. Para Meneses et al. (2012) que verificou as principais variáveis que influenciam no processo de eletrocoagulação e avaliou os parâmetros operacionais, como pH, tempo de tratamento e distância entre eletrodos com uso de eletrodos de alumínio, para efluente de um processo de obtenção de biodiesel, o processo de eletrocoagulação foi capaz de reduzir 99% da quantidade inicial do teor de óleos e graxas presentes no efluente testado. Nesses estudos é comum a utilização de eletrodos de alumínio e aço, porém existem materiais que apresentam melhor condutividade elétrica, como o caso do ouro, prata e cobre.

1.1 Justificativa e problema

Segundo Giordano (2004) a poluição pelos efluentes líquidos industriais deve ser controlada inicialmente pela redução de perdas nos processos, incluindo a utilização de processos mais modernos e a redução do consumo de água nas atividades produtivas.

A legislação ambiental exige que as empresas potencialmente poluidoras liberem os efluentes industriais gerados em seus processos produtivos, devidamente

descontaminados, conforme os parâmetros determinados nas leis ambientais, para evitar expor a população a problemas toxicológicos e garantir a preservação do meio ambiente. O atendimento à legislação ambiental passou a ser tema dos planos de desenvolvimento das empresas, já que o cumprimento das leis requer altos investimentos financeiros para a correta destinação dos resíduos e redução do impacto ambiental.

Para caracterizar a carga poluidora dos efluentes de uma indústria é necessário o conhecimento prévio do processo industrial para determinação dos métodos a serem selecionados e a realização de testes de amostragem, já que os limites aceitáveis de liberação estão determinados na CONSEMA N° 355. (Rio Grande do Sul, 2017).

O tratamento de efluentes através do processo de eletrocoagulação é uma alternativa promissora por possuir baixo custo, baixo consumo de energia, não requerer a adição de produtos químicos, além de apresentar baixa geração de resíduos de lodo quando comparado aos processos convencionais. O problema desse estudo é realizar o tratamento de efluentes através da eletrocoagulação, utilizando alumínio, aço SAE 1020 e cobre como eletrodos metálicos e realizar as análises laboratoriais para comparativo dos resultados conforme os padrões de liberação de efluentes definidos na CONSEMA n° 355 (Rio Grande do Sul, 2017) para cada eletrodo utilizado. A definição dos eletrodos a serem usados nesse estudo levou em consideração a condutividade elétrica dos metais. Para tanto foram selecionados os eletrodos de aço baixo carbono com condutividade elétrica de $0,6 \times 10^{-7} / \Omega \cdot m$, o eletrodo de alumínio com $3,8 \times 10^{-7} / \Omega \cdot m$ e o eletrodo de cobre com $6,0 \times 10^{-7} / \Omega \cdot m$.

1.2 Objetivos

1.2.2 Objetivo Geral

Avaliar a eficácia do processo de eletrocoagulação para o tratamento dos efluentes de uma indústria metalúrgica, por meio da utilização de eletrodos de diferentes materiais metálicos, com diferentes valores de condutividades, visando o atendimento aos parâmetros e padrões de liberação de efluentes líquidos industriais determinados na CONSEMA N° 355 (Rio Grande do Sul, 2017)

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, a seguir estão listados os objetivos específicos:

- ✓ Avaliar e comparar a eficiência da eletrocoagulação utilizando eletrodos de diferentes materiais metálicos como aço SAE 1020, alumínio e cobre;
- ✓ Comparar a quantidade de resíduos sólidos e cinzas gerados pelo tratamento através da eletrocoagulação e do tratamento de efluentes convencional;
- ✓ Determinar o índice de sólidos suspensos nas soluções obtidas pelo uso de diferentes eletrodos metálicos após o processo de eletrocoagulação;
- ✓ Determinar o índice de turbidez das soluções obtidas com uso de eletrodos metálicos após o processo de eletrocoagulação;
- ✓ Determinar o pH das soluções obtidas com uso de eletrodos metálicos após o processo de eletrocoagulação;
- ✓ Determinar a demanda química de oxigênio das soluções obtidas com uso de eletrodos metálicos após o processo de eletrocoagulação;
- ✓ Determinar a quantidade de óleos e graxas minerais das soluções obtidas com uso de eletrodos metálicos após o processo de eletrocoagulação;
- ✓ Comparar os resultados obtidos nos processos de eletrocoagulação obtidas com uso de diferentes eletrodos metálicos ao processo físico-químico convencional de tratamento de efluentes utilizado pela empresa;
- ✓ Avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação com uso de diferentes eletrodos metálicos comparando os resultados aos dados com o efluente bruto, ou seja, sem tratamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Geração Atual de Efluentes na Indústria Nacional

Segundo dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018) em 2018, o setor industrial cresceu pelo quarto ano seguido, sendo responsável por aproximadamente 22% do PIB nacional. Com o crescimento industrial, houve também um aumento do consumo de recursos hídricos pelas indústrias. No relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2018) elaborado pela Agência Nacional de Águas está demonstrado que a demanda hídrica, o volume de água retirado de um corpo hídrico em um determinado intervalo de tempo para atender um determinado uso, foi de 2.083m³/s em 2017. O principal uso de água no país, em termos de quantidade utilizada, é a irrigação com 52%, seguido do abastecimento humano com 23,8% e da indústria com 9,1% (Figura 1). A demanda por uso de água no Brasil é crescente, com aumento estimado de 80% no total retirado nas últimas duas décadas. A previsão é de que até 2030 a retirada aumente 24%. O histórico da evolução dos usos da água está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico do país conforme aponta o estudo de ANA (2018).

Figura 1 – Consumo de recursos hídricos no Brasil. Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Média anual 2017.



Fonte: Agência Nacional de Águas - ANA (2018)

Na indústria de modo geral, a água pode ser usada como matéria-prima, meio de transporte, agente de limpeza ou como fonte de vapor. (BRAILE e CAVALCANTI,

1993). A prática de descartar dos efluentes tratados em corpos de águas superficiais é a opção normalmente adotada pelas indústrias. Mancuso e Santos (2003) salientam a importância da eficiência do tratamento de efluentes na remoção de contaminantes toxicológicos, já que os mesmos corpos hídricos que recebem a carga de efluentes da indústria servem como fonte de abastecimento de comunidades, que fazem uso para consumo.

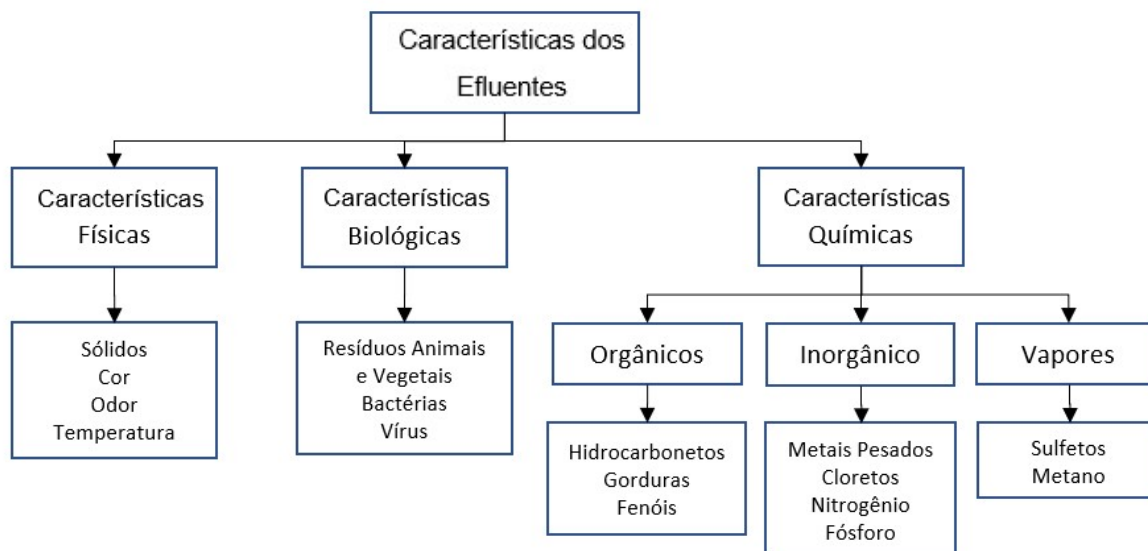
Para Lora (2002) o Brasil requer atenção especial nos cuidados com a poluição de águas, principalmente nas regiões de alta densidade populacional e de grandes centros industriais. A fim de identificar a origem da poluição das águas para definição do tratamento apropriado, se faz necessário levantar as principais fontes poluidoras, caracterizando o efluente gerado.

Conforme Libânio (2005), as tendências internacionais para regulamentação dos padrões de liberação de efluentes indicam uma preocupação crescente com a presença de novos contaminantes orgânicos e inorgânicos. Essa preocupação está em controlar, principalmente, os subprodutos introduzidos pelos processos industriais devido à inovação tecnológica a que as empresas estão submetidas.

Para Dellamatrice (2014), quando não há informações referentes aos constituintes existentes nos efluentes, buscam-se valores limitantes em legislações internacionais como, por exemplo, as referências da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e da União Europeia, porém, apesar dos avanços no cenário regulatório, os trabalhos nesta área ainda permanecem modestos.

Para Vesilind (2003), Braile e Cavalcante (1993) e Nunes (2001) a dificuldade está na falta de conhecimento dos resíduos gerados pela indústria. O desconhecimento da composição química do efluente dificulta o atendimento eficaz do tratamento, ou seja, para garantir o atendimento dos parâmetros fixados em legislação é fundamental entender a composição química do efluente gerado. Na Figura 2 visualiza-se as características básicas dos efluentes gerados pelas indústrias.

Figura 2 - Esquema demonstrando as características dos efluentes.



Fonte: adaptado de LORA (2002).

Para Braile e Cavalcanti (1993) os poluentes que geram maior preocupação são os orgânicos e os metais pesados. A poluição por matéria orgânica vem crescendo, principalmente pela utilização rotineira de derivados de petróleo. Na Tabela 1 visualiza-se o processo gerador poluente, os íons químicos formados e os efeitos da liberação desses poluentes no meio ambiente nos principais processos industriais.

Tabela 1 - Processos e íons químicos gerados em uma indústria metal mecânica.

| Processo gerador | Íons químicos liberados | Efeitos no meio ambiente |
|--------------------------------------|---|---|
| Limpeza de produto e peças de metais | Metais pesados | Contaminação da água, mortandade de peixes e moluscos, envenenamento de organismos. |
| Decapagem de aço | Ácidos e álcalis | Alteração do pH da água. |
| Processo de pintura | Cl ₂ , H ₂ O ₂ | Morte seletiva de microrganismos e odor característico. |

Continua

| | | |
|--|--|---|
| Processos predominantemente metalúrgicos | Fe, Ca, Mg, Mn, Cl ₂ e SO ₄ ⁻² | Mudanças nas características da água: aparecimento de coloração, dureza, salinidade e incrustações. |
|--|--|---|

Fonte: Adaptado de LORA (2002).

2.2 Tratamento dos Efluentes

O tratamento dos efluentes consiste em reproduzir em curto espaço de tempo, as condições necessárias normalmente encontradas nas condições originais, ou seja, promover a remoção dos contaminantes. Como essa não é uma possibilidade, a descontaminação deve ser realizada por processos distintos que aceleram a remoção dos contaminantes, podendo ocorrer através de processo físico-químico e tratamento biológico, ou ainda uma combinação de ambos.

2.2.1 Tratamento Físico-Químico

Conforme Comusa (2018) são chamados de processos físico-químicos todos aqueles que empregam instalações destinadas a reagir, separar, combinar elementos por processos físicos e químicos com a adição de produtos para promover a coagulação e decantação e posteriormente a filtração dos contaminantes.

Para Comusa (2018) o tratamento é realizado através da coagulação e decantação removendo a matéria inorgânica e parcialmente a carga orgânica do efluente, sendo necessário, em alguns casos, tratamento complementar, já que esse processo não remove todas as impurezas, usados para poluentes que não podem ser removidos por processo de tratamento biológico. Essa prática é usada em frigoríficos, tinturarias, indústrias químicas e petroquímicas, metal mecânicas e farmacêuticas.

2.2.2 Tratamento Biológico

Conforme Comusa (2018) o processo de tratamento biológico tem por objetivo remover a matéria orgânica dissolvida em suspensão para transformá-la em sólidos sedimentáveis e gases, utilizando o metabolismo de microrganismos.

Esse processo de tratamento é exclusivamente de natureza biológica, no qual a matéria orgânica é depurada, por meio de colônias de microrganismos, na presença de oxigênio. Essas colônias de microrganismos formam uma massa denominada lodo ativado ou biológico.

2.3 Exigências Normativas para Tratamento de Efluentes

Conforme Vesilind (2003) nos Estados Unidos a preocupação com os padrões de águas proveniente de efluentes datam de 1914, quando somente os padrões bacteriológicos de contaminação eram determinados na legislação vigente na época. Somente em 1974 a qualidade da água passou a ser regulamentada pela USEPA – *United States Environmental Protection Agency*, que recomenda os controles químicos dos efluentes liberados pós industrialização. No Brasil somente em 1977, a Portaria Nº 56 do Ministério da Saúde (Brasil, 1977), estabeleceu o primeiro padrão de potabilidade definindo limites máximos para diversas características químicas, físicas e biológicas.

Atualmente, conforme a Resolução Nº 430 (Brasil, 2011), os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos hídricos receptores após o devido tratamento, obedecendo às condições padrões de lançamentos para que não ultrapassem os limites definidos nessa Resolução.

As leis de tratamento de efluentes definem regras que devem ser conhecidas, entendidas e praticadas por todo ramo industrial e estão associadas à adoção de uma postura de responsabilidade com a sociedade. A Tabela 2 apresenta as principais legislações vigentes para lançamento de efluentes líquidos industriais e sanitários no nível nacional e estadual.

Tabela 2 – Legislação vigente no país para liberação de efluentes líquidos.

| Legislação | Nível | Texto de controle |
|-----------------------|--------------|---|
| CONAMA Nº 430/2011 | Federal | Determina as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão do lançamento dos efluentes em corpos de águas receptoras. |

Continua

| | | |
|------------------------|----------|--|
| CONSEMA Nº 355/2017 | Estadual | Determina os padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. |
| CONSEMA Nº 357/2017 | Estadual | Classifica os corpos d'água e diretrizes para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes no Estado do Rio Grande do Sul. |
| CONSEMA Nº 128/2006 | Estadual | Fixa os padrões de emissão de efluentes líquidos para efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. |

Fonte: Adaptado de CONAMA Nº 430 (2011), CONSEMA Nº 355 (2017), CONSEMA Nº 357 (2017) e CONSEMA Nº 128 (2006).

2.4 Características físico-químicas e biológicas dos efluentes

Para garantir a adequação do efluente conforme os parâmetros legais, devem ser atendidas as características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros permitem a avaliação da eficiência de determinado tratamento e os seus valores máximos são fixados através da legislação pertinente. Os principais indicadores físicos, químicos e biológicos de qualidade da água são:

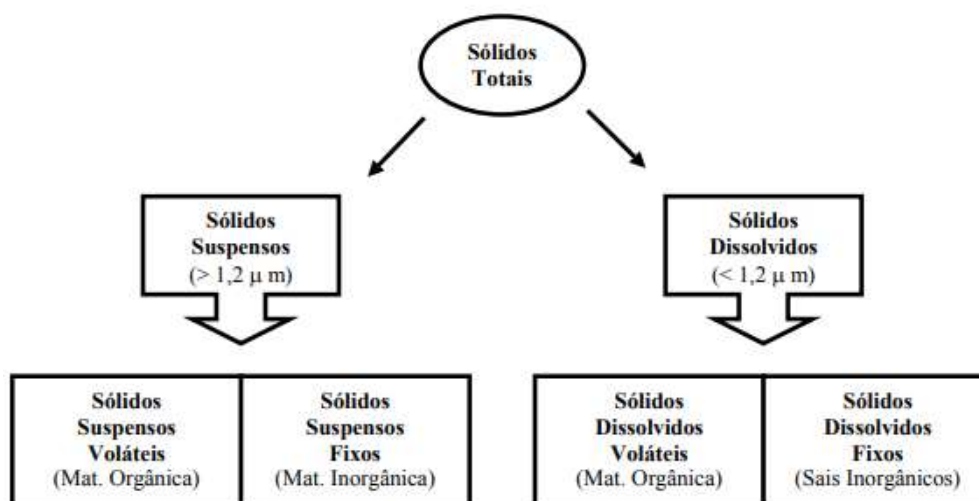
- ✓ Presença de sólidos suspensos totais
- ✓ Presença de óleos e graxas
- ✓ Valores de pH
- ✓ Índice de turbidez
- ✓ Demanda química de oxigênio (DQO)

2.4.1 Sólidos Suspensos Totais

Para Sperling (1996) todos os contaminantes da água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga sólida. Esses sólidos, conforme Figura 3 e

Tabela 3, podem ser classificados de acordo com as características físicas ou químicas.

Figura 3 - Esquema de composição dos sólidos totais.



Fonte: Adaptado de JORDÃO (1985, apud GIORDANO, 2004)

Tabela 3 – Características dos sólidos presentes nos efluentes.

| Sólidos | Características |
|---------------------|---|
| Sólidos suspensos | Partículas menores que 100 μm , com maiores suspensões retidas em filtros. |
| Sólidos coloidais | Partículas de difícil identificação, ficam entre os sólidos suspensos e dissolvidos, possuem diâmetro entre 10^{-3} μm e 100 μm . |
| Sólidos dissolvidos | Partículas menores 10^{-3} μm capazes de passar por papel de filtro. |
| Sólidos voláteis | São os sólidos que quando submetidos a temperaturas elevadas, acima de 550°C , a fração orgânica é volatilizada, permanecendo após a combustão apenas a fração inorgânica. Os sólidos voláteis representam estimativa orgânica, enquanto os não voláteis representam matéria inorgânica ou mineral. |

Fonte: Adaptado de Sperling (1996).

Os sólidos suspensos totais (SST) compreendem todo o material em suspensão que possui a mesma densidade que a água, ou seja, mesmo com o sistema de repouso, não há sedimentação das partículas. Portanto, a turbidez do efluente é diretamente proporcional a quantidade e tamanho de partículas presentes no líquido. (TCHOBANOGLIOUS, BURTON & STENSEL, 2003).

Conforme Resolução CONSEMA N° 355 (2017), os valores fixados para sólidos suspensos na liberação de efluentes tratados devem atender aos valores de concentrações conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Valores para sólidos suspensos totais.

| Faixa de Vazão do Efluente (m³/dia) | SST Permitidos (mg/L) |
|---|------------------------------|
| Q < 100 | 140 |
| 100 ≤ Q < 500 | 125 |
| 500 ≤ Q < 1.000 | 100 |
| 1.000 ≤ Q < 3.000 | 80 |
| 3.000 ≤ Q < 7.000 | 70 |
| 7.000 ≤ Q < 10.000 | 60 |
| 10.000 ≤ Q | 50 |

Fonte: Adaptado de CONSEMA N° 355 (2017).

2.4.2 Presença de óleos e graxas

Os óleos e graxas são substâncias orgânicas derivados do petróleo, despejados junto aos efluentes provenientes dos processos internos industriais. Conforme Sperling (1996) não é aconselhável o envio desse tipo de resíduos junto ao efluente, pois pode causar problemas na manutenção das unidades de tratamento. Normalmente formam uma camada flutuante, que em grandes quantidades, devem ser coletadas antes do tratamento propriamente dito. Conforme Resolução CONSEMA N° 355 (2017), os valores fixados para atender a concentração limite de óleos e graxas em águas residuais estão conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Valores para óleos e graxas.

| Faixa de Vazão do Efluente (m ³ /dia) | Óleos e graxas Permitidos (mg/L) |
|--|----------------------------------|
| óleos e graxas mineral | < 10 mg/L |
| óleos de graxas vegetal ou animal | < 30 mg/L |

Fonte: Adaptado de CONSEMA N° 355 (2017).

2.4.3 Potencial Hidrogeniônico - pH

O valor do pH é utilizado para expressar acidez ou a alcalinidade de uma solução. Esse parâmetro influencia diretamente na eficiência do tratamento do efluente, segundo Di Bernardo e Dantas (2005), o potencial hidrogeniônico representa a concentração de íons hidrogênio H⁺ ou íons de hidroxila OH⁻ em escala logarítmica, dando uma escala de acidez, neutralidade e alcalinidade da água. Essa variação pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Escala logarítmica do potencial hidrogeniônico.



Fonte: ATKINS e JONES (2006).

Para Derísio (2000) e Libânio (2005) a influência do pH pode desestabilizar a vida aquática. Valores afastados da neutralidade do pH podem influenciar na solubilidade de diversas substâncias, na distribuição das formas livres ou ionizadas de diversos compostos químicos, definindo inclusive o potencial de toxicidade de vários elementos afetando diretamente na mortalidade de peixes e de microrganismos. Conforme Resolução CONSEMA N° 355 (2017), os valores fixados para o pH do efluente devem atender as concentrações conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Valores aceitáveis para pH

| Faixa de Vazão do Efluente (m ³ /dia) | pH |
|--|---------------|
| Limites aceitáveis | ≥ 6,0 e ≤ 9,0 |

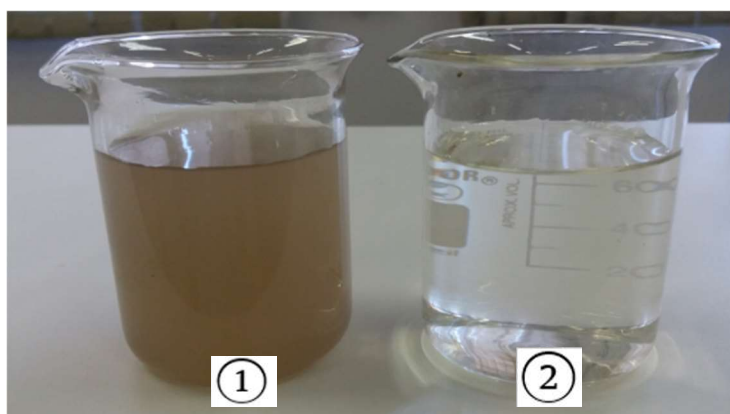
Fonte: Adaptado de CONSEMA N° 355 (2017).

2.4.4 Índice de turbidez e cor

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) e Sperling (1996) a turbidez dos efluentes é proporcional a presença de sólidos suspensos representando o grau de interferência da passagem de luz através da água. Dependendo da natureza dos sólidos, esses podem influenciar na cor do efluente, dando aspecto turvo.

Conforme Sperling (1996) a turbidez é a medida através da dificuldade de um feixe de luz atravessar uma certa quantidade de água, devido a presença de partículas suspensas com diferentes tamanhos, variando desde suspensões grosseiras até coloides. Os valores são expressos em *Nephelometric Turbidity Unit*, na unidade conhecida como NTU. Para Sperling (1996), valores inferiores a 20 NTU dispensam coagulação química, enquanto que valores superiores a 50 NTU usualmente requerem coagulação e filtração do efluente. Para comparação, a figura 5 demonstra dois efluentes com diferentes valores de turbidez.

Figura 5 - Comparativo entre efluente com diferentes índices de turbidez. 1 - Efluente com valor de turbidez de 158 NTU, 2 - Efluente com valor de turbidez de 1,5 NTU.



Fonte: Autor (2018).

Para Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) a análise da turbidez pode ser usada para determinar qualitativamente a natureza e o tamanho das partículas. A medida da turbidez se baseia na comparação da intensidade da luz dispersa em uma amostra de luz com suspensão de referência conforme métodos padrões da *Stanford Methods* (2012), nos quais a matéria espalhará ou absorverá luz evitando a transmitância. Conforme Resolução CONSEMA N° 355 (2017), os valores para o índice de turbidez devem atender as concentrações conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Valores para Índice de Turbidez.

| Faixa de Vazão do Efluente (m ³ /dia) | NTU |
|--|------|
| Limites aceitáveis | ≤ 40 |

Fonte: Adaptado de CONSEMA N° 355 (2017).

2.4.5 Demanda Química de Oxigênio - DQO

A Demanda Química de Oxigênio é a quantidade de oxigênio requerida para oxidar os compostos orgânicos presentes na amostra de efluente. A análise da DQO é indispensável para o controle da degradação da matéria orgânica no efluente avaliando a quantidade de oxigênio dissolvido. Conforme Aquino et al. (2006) a DQO mede, indiretamente, os elementos com baixo número de oxidação presentes nas amostras de efluentes tratados que contiver substâncias orgânicas e/ou inorgânicas passíveis de oxidação pelo dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) em meio ácido. Entretanto, conforme o processo realizado pela empresa pode conter significativas concentrações de substâncias inorgânicas reduzidas, que podem ser oxidadas pelo dicromato e elevar os índices de DQO e esse índice revela a biodegradabilidade dos despejos.

Conforme Resolução CONSEMA N° 355 (2017), os valores fixados para demanda química de oxigênio para liberação dos efluentes industriais tratados devem atender aos valores de concentração conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Valores para Demanda Química de Oxigênio.

| Faixa de Vazão do Efluente (m ³ /dia) | DQO Permitidos (mg/L) |
|--|-----------------------|
| Q < 500 | 330 |
| 500 ≤ Q < 1.000 | 300 |
| 1.000 ≤ Q < 3.000 | 260 |
| 3.000 ≤ Q < 7.000 | 200 |
| 7.000 ≤ Q < 10.000 | 180 |
| 10.000 ≤ Q | 150 |

Fonte: Adaptado de CONSEMA Nº 355 (2017).

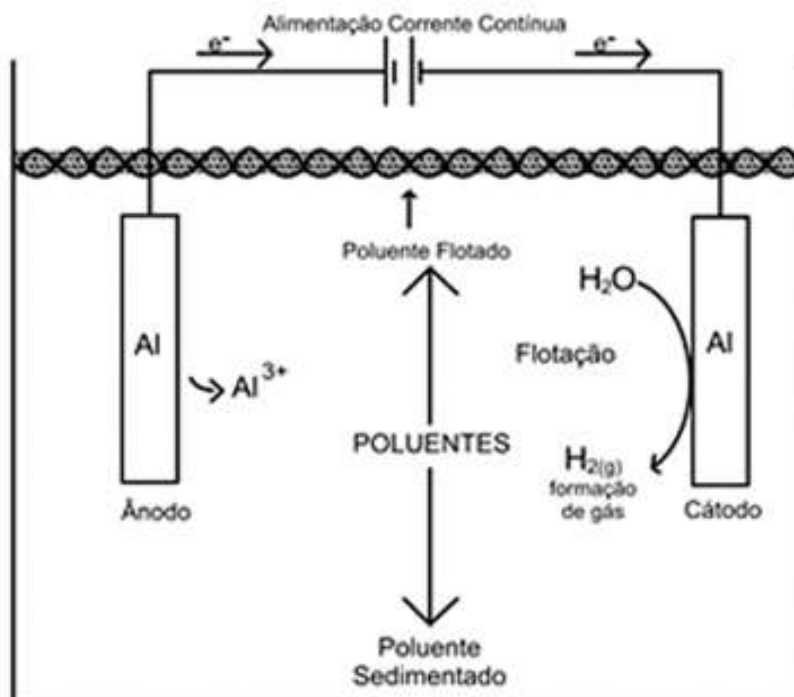
2.5 Tratamento de Efluentes Através da Eletrocoagulação

2.5.1 Conceito de Eletrocoagulação

Para Libânio (2005) coagular significa converter em sólido, envolvendo fenômenos químicos e físicos simultaneamente. A coagulação é proveniente do processo de hidrólise da água, onde os íons metálicos, positivamente carregados formam fortes ligações com átomos de oxigênio podendo coordenar até seis moléculas de água ao seu redor, liberando os átomos de H⁺, aumentando assim a concentração desse íon, aumentando o pH da suspensão, causando sua desestabilização e culminando no precipitado coagulado.

Conforme Di Bernardo e Dantas (2005) no mecanismo da eletrocoagulação as partículas suspensas e coloidais apresentam carga negativa, predominantemente, portanto, a aplicação de um campo elétrico induzirá o deslocamento das partículas coloidais. Conforme Cerqueira (2011) diversos nomes são atribuídos aos processos eletrolíticos, dentre os principais, eletrocoagulação e eletrofloculação são os frequentemente encontrados. A eletrocoagulação é um processo que envolve a geração de coagulantes pela ação da corrente elétrica aplicada nos eletrodos metálicos. A figura 6 demonstra o processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio.

Figura 6 - Processo de eletrocoagulação das partículas.



Fonte: HOTL et al. (2001, apud CERQUEIRA, 2011).

Diversos estudos têm apontado a eletrocoagulação como um método eficaz para o tratamento de grande variedade de efluentes, mostrando-se eficiente no processo de remoção dos contaminantes. A Tabela 9 apresenta os principais estudos relacionados à utilização da eletrocoagulação para o tratamento de efluentes.

Tabela 9 - Estudos relacionados à utilização da eletrocoagulação para o tratamento de efluentes.

Autor/Ano: Carvalho, Souza e Zempulski (2015)

Objetivo: Testar o processo de eletrocoagulação, por ser de baixo custo e de fácil aplicação para o tratamento de efluentes industriais, verificar a redução da demanda química de oxigênio, com baixo tempo de tratamento e elevada eficiência.

Eletrodo utilizado: Aço.

Resultados: Pode-se afirmar que ocorre uma redução brusca de resíduos de lodo, onde o efluente final teve aproximadamente uma medida três vezes menor que o efluente bruto tratado convencionalmente, ou seja aproximadamente 70% de

Continua

redução. Comparando os resultados obtidos com a literatura, observa-se que os ensaios de eletrocoagulação realizados em escala laboratorial apresentaram resultados satisfatórios em eficiência de remoção dos particulados, desta forma apresentando-se como um tratamento alta qualidade e eficácia, baixo custo de montagem e operação e baixo tempo de reação.

Autor/Ano: Fleck, Tavares e Eyng (2013)

Objetivo: Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis.

Eletrodos utilizados: Aço e Alumínio.

Resultados: A técnica de eletrocoagulação aplicada no tratamento de efluentes industriais apresenta ótimos resultados na remoção de poluentes orgânicos, com destaque para a indústria têxtil. Assim, é possível afirmar que a eletrocoagulação é um método viável para o tratamento de efluentes, como forma de diminuir os impactos da ação sobre a integridade química, física e biológica do meio natural.

Autor/Ano: Meneses et al. (2012)

Objetivo: Verificar as principais variáveis que influenciam no processo de eletrocoagulação e avaliar parâmetros operacionais, como pH, tempo de tratamento e distância entre eletrodos, para efluente de um processo de obtenção de biodiesel.

Eletrodo usado: Alumínio

Resultados: Pode-se verificar que os parâmetros tempo de tratamento, pH do efluente e espaçamento dos eletrodos são extremamente importantes no processo de eletrocoagulação. O pH do efluente após o tratamento está relacionado ao pH inicial e ao tempo de tratamento. Este fator também influenciou a remoção dos poluentes, visto que a formação do hidróxido $\text{Al}(\text{OH})_3$, maior responsável pela remoção de poluentes, ocorre numa faixa de pH de 5 a 9. O uso de pH alcalino induz o ataque químico no cátodo de alumínio, devido à evolução do hidrogênio, e isto contribuiu para a quantidade total de alumínio liberado dos ânodos. O consumo de energia também está ligado ao tempo de tratamento e ao espaçamento dos eletrodos. Verificou-se também que quanto menor o espaçamento menor o

consumo energético. O processo de eletrocoagulação foi capaz de reduzir 99% da quantidade inicial do teor de óleos e graxas presentes no efluente testado.

Autor/Ano: Borba et al. (2010)

Objetivo: Avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio para o tratamento de efluentes de uma indústria avícola e estimar a eficiência através da análise dos seguintes parâmetros: demanda química de oxigênio, descoloração, turbidez, condutividade e pH final.

Eletrodo usado: Alumínio

Resultados: A técnica da eletrocoagulação aplicada ao tratamento de efluentes da indústria de subprodutos avícolas apresentou ótima eficiência na remoção dos poluentes orgânicos, onde obteve-se aproximadamente 98% da redução dos parâmetros de demanda química de oxigênio, cor e turbidez. Outros fatores relevantes nesta pesquisa foram o tempo de eletrólise e a densidade de corrente mínima utilizadas para alcançar a ótima eficiência do processo, gerando com isso um menor custo operacional no tratamento do efluente.

Fonte: Adaptado pelo autor, 2018.

2.5.2 Princípios da Eletrocoagulação

A primeira menção ao uso de eletrólise para o tratamento de efluente data de 1887, quando Eugene Hermite patenteou um processo de tratamento, que consistia na mistura de água do mar com o esgoto bruto e na eletrólise da mistura para produzir cloro no ânodo, que por sua vez atuava como agente oxidante e bactericida. (ANGELIS, 1998).

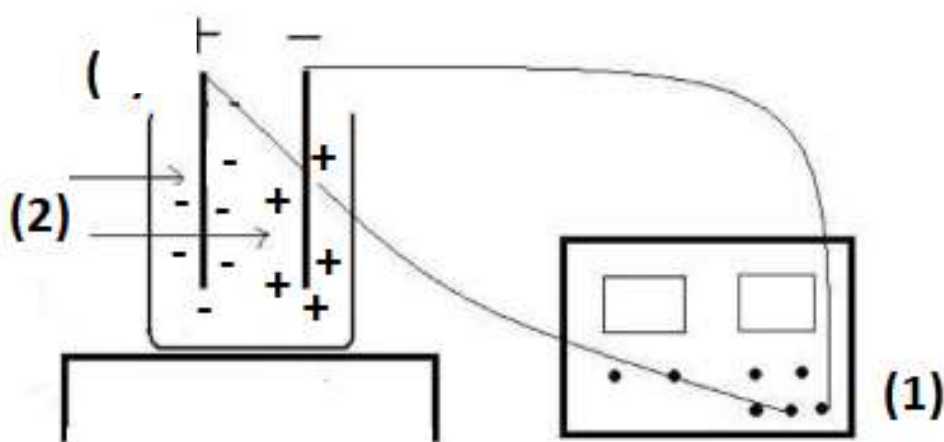
Para Combat et al. (2017) na eletrocoagulação é usada energia elétrica de modo a converter substâncias por oxidação ou por redução. A água é extremamente eficaz em promover a dissociação iônica, isso porque cada molécula contém íons positivos e negativos, logo cada molécula pode atrair um íon positivo (região negativa) e outro negativo (região positiva).

Conforme Atkins e Jones (2006) a eletrólise ocorre através da corrente elétrica aplicada nos eletrodos metálicos submersos no efluente industrial a ser

descontaminado, passando por um condutor metálico. A corrente elétrica não provoca nenhuma alteração química na estrutura dos eletrodos, nem mesmo no efluente, pois ela decorre da movimentação de elétrons livres que circulam pelo condutor. Ao passar pelo líquido a corrente elétrica ocasiona a formação de microbolhas de hidrogênio, que realizam o arraste dos contaminantes em suspensão na solução agrupando em flocos, auxiliando no processo de coagulação do efluente.

Atkins e Jones (2006) explicam que quando compostos iônicos se dissolvem em água, cada íon negativo está envolto por moléculas de água e cada íon positivo está envolvido pelas regiões negativas das várias moléculas de água. Os íons envolvidos pela molécula de água estão livres para se mover na solução. Quando eletrodos são colocados na solução, os cátions migram através da solução para o eletrodo negativo e os ânions se movem na direção do eletrodo positivo. A figura 7 apresenta um modelo de reator eletrolítico, a qual demonstra o reator eletrolítico com a fonte de alimentação de energia (1) e os eletrodos metálicos (2).

Figura 7 – Reator Eletrolítico.



(Fonte: Adaptado de MENESES et al. (2012).

Os íons envolvidos pela molécula de água proveniente da dissolução estão livres para se mover na solução. Em condições normais, o movimento do íon é aleatório, e os cátions e ânions que resultam da dissolução de um composto iônico, estão dispersos uniformemente ao longo da solução. Dois eletrodos são colocados em uma solução e conectados a uma fonte de energia, os cátions migram através da

solução para o eletrodo negativo e os ânions se movem na direção do eletrodo positivo. (KOTZ e TREICHEL, 2002).

2.5.3 Uso de eletrodos e a condutividade dos metais

Dentro todos os materiais, os metais se diferem das demais substâncias por serem bons condutores de eletricidade ou de calor, devido a facilidade com que os elétrons se movimentam por todo metal. A condutividade dos metais é um dos conceitos mais importantes para a engenharia de materiais, determinando a ampla utilização destes. Para Russell (1994) os chamados efeitos elétricos, ou seja, a condução de corrente elétrica ou térmica nos metais é possível devido a uma série de efeitos em nível atômico, onde esses materiais possuem uma estrutura de elétrons livres que circulam entre os íons metálicos positivos, facilitando dessa forma a movimentação e condutividade, esse modelo é chamado de mar de elétrons.

Para Naje e Abbas (2013) a condutividade elétrica não é constante na natureza dos metais, esse fator varia entre os metais, a Tabela 10 apresenta os valores de condutividade elétrica, através da lei de Ohm, que é estabelecida através de uma relação linear entre a voltagem aplicada no material e a corrente elétrica produzida pelo metal, ou seja, quanto maior a facilidade dos elétrons fluírem facilmente sobre um metal quando submetidos a um campo elétrico, maior a condutividade desse material.

Segundo Crespilho, Santana e Rezende (2004) a reação de eletrocoagulação para ser obtida de um processo eletroquímico deve possuir no mínimo dois eletrodos metálicos, onde são gerados íons em razão do potencial aplicado e esta etapa acontece no eletrodo anódico onde o metal é oxidado.

Conforme Crespilho, Santana e Rezende (2004), a água também é eletrolisada em uma reação paralela, produzindo pequenas bolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo. A etapa de coagulação das partículas é favorecida pelos íons metálicos, que são responsáveis por remover as impurezas do efluente e é denominado como agente coagulante.

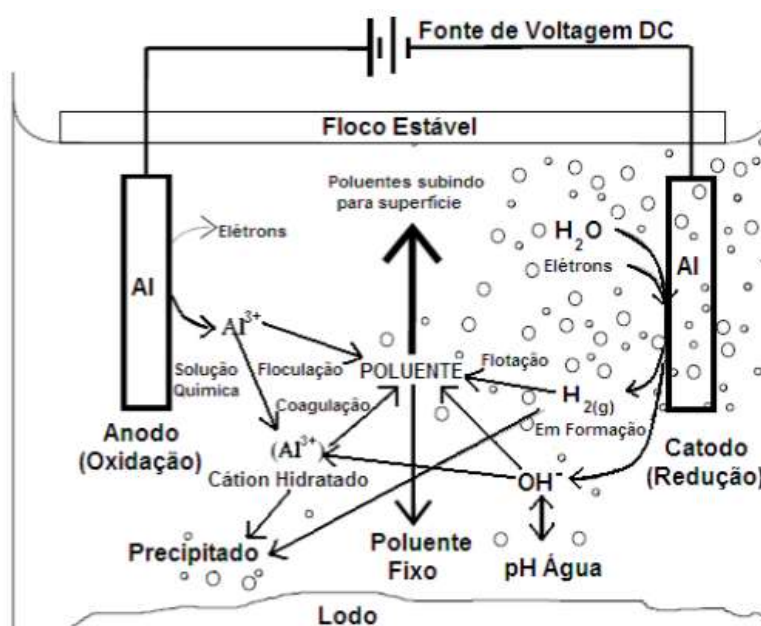
Tabela 10 – Valores de Condutividade dos Metais.

| Metal | Condutividade Elétrica [(Ω -m)] |
|-------------------------|---|
| Prata | $6,8 \times 10^{-7}$ |
| Cobre | $6,0 \times 10^{-7}$ |
| Ouro | $4,3 \times 10^{-7}$ |
| Alumínio | $3,8 \times 10^{-7}$ |
| Latão (70/30 - CU e ZN) | $6,8 \times 10^{-7}$ |
| Ferro | $1,0 \times 10^{-7}$ |
| Platina | $0,9 \times 10^{-7}$ |
| Aço Carbono | $0,6 \times 10^{-7}$ |
| Aço Inoxidável | $0,2 \times 10^{-7}$ |

Fonte: Adaptado pelo autor (2018).

Conforme a Figura 8, a geração de íons é seguida pela concentração de partículas ao redor do ânodo. Os íons são atraídos pelas partículas coloidais, neutralizando suas cargas e possibilitando a coagulação. O gás hidrogênio liberado no cátodo interage com as partículas floculadas, permitindo sua ascensão através da adsorção das partículas e remoção da solução, promovendo dessa forma a clarificação da solução. (CERQUEIRA, 2011).

Figura 8 - Processo de coagulação das partículas.



Fonte: HOTL et al. (2001, apud CERQUEIRA, 2011).

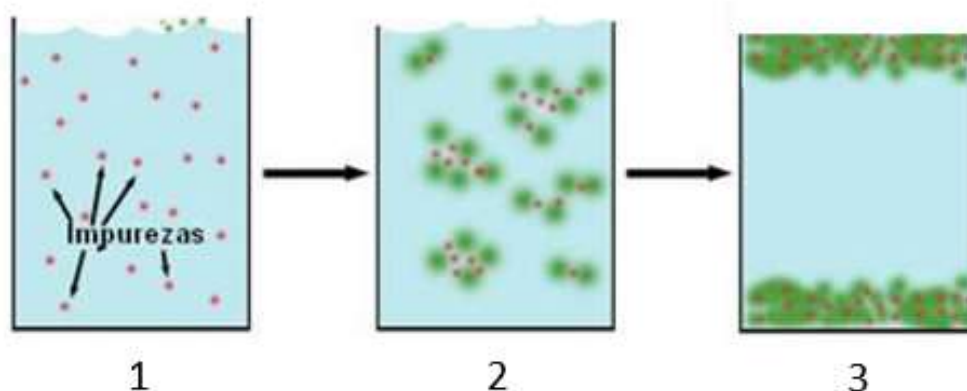
Cerqueira (2011) define três estágios sucessivos de operação da eletrocoagulação, são eles:

Etapa de Coagulação - Formação de agente coagulante através da oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício, ocasionando a neutralização das cargas superficiais e a desestabilização das partículas coloidais e quebra da emulsão coloidal.

Etapa de Flocculação – Promove a aglomeração das partículas em pequenos flocos devido à desestabilização das partículas no efluente. Essa aglutinação é promovida pelo agente de coagulação, com a colisão, aglomeração e o crescimento dos flocos.

Etapa de Flotação - Geração de microbolhas de oxigênio (O_2) no ânodo e hidrogênio (H_2) no cátodo, que emergem até a superfície ou decantam colidindo e sendo adsorvidos pelos flocos, carregando por arraste as partículas e impurezas em suspensão no meio e promovendo dessa forma a clarificação do efluente. A Figura 9 representa as três fases propostas por Cerqueira (2011), Coagulação (1), Flocculação (2) e Flotação (3).

Figura 9 - Etapas da eletrocoagulação. As três fases da eletrocoagulação, coagulação (1), flocculação (2) e flotação (3)



Fonte: Adaptado de CERQUEIRA (2011)

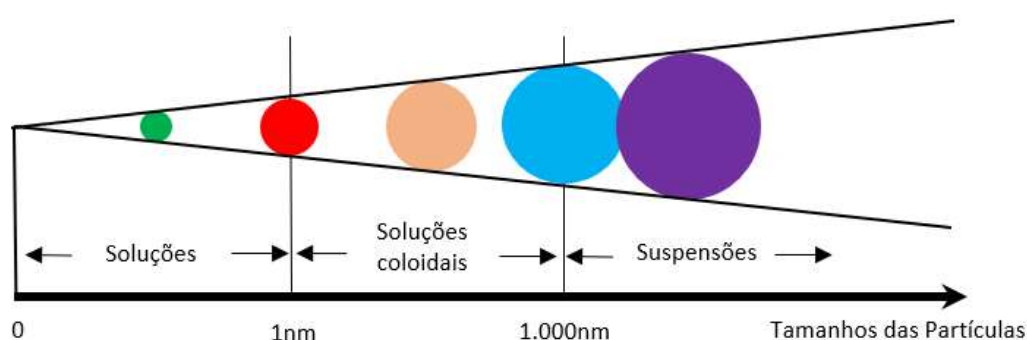
Para Naje e Abbas (2013) no processo de eletrocoagulação, íons produzidos estão envolvidos em três estágios sucessivos: formação do coagulante pela oxidação eletrolítica dos eletrodos, a desestabilização desses contaminantes, a suspensão das partículas e quebra de emulsões e a agregação das fases desestabilizadas formando aglomerados de contaminantes, chamados de flocos. As bolhas provenientes da

reação eletrolítica dos eletrodos atraem as partículas floculadas e submergem até a superfície ou decantam.

2.5.4 Estado Coloidal dos contaminantes

Atkins e Jones (2006) definem como coloide, partículas com tamanho menor que 10^{-3} μm em luz visível. Essas partículas passam através de papéis e filtros, mas podem ser observadas pela difusão da luz e pela sedimentação. Em geral, as partículas coloidais são agregados de numerosos átomos ou moléculas e uma corrente elétrica intensa circulando através de uma célula eletrolítica pode provocar a desagregação e formação de partículas coloidais. A Figura 10 demonstra uma representação do tamanho de partículas que podem ocorrer em uma solução.

Figura 10 – Representação do tamanho das partículas.



Fonte: Adaptado de SPERLING (1996).

Para Moore (1972) os coloides são partículas suspensas que não se separam após um tempo de repouso prolongado, consistindo por uma fase dispersa e um meio de dispersão. A estabilidade da dispersão depende da velocidade de agregação das partículas para formar agregados precipitados de sol (sólidos nos líquidos ou sólido em um sólido). A formação de sóis em reação de precipitação é promovida por uma pequena concentração de eletrólitos, pois os íons em solução tendem a neutralizar a carga elétrica nas partículas de sol, facilitando a sua coagulação.

Para Leme (1990) a eletrocoagulação de efluentes é basicamente a remoção de substâncias no estado coloidal, que geram turbidez do efluente ou de materiais finamente divididos em suspensão. Libânio (2005) comenta que a eletrocoagulação

consiste na desestabilização das partículas coloidais suspensas, ocorrida por um conjunto de ações físicas e com reações químicas entre a água e as impurezas. Netz e Ortega (2002) descrevem que coloides são sensíveis a presença de eletrólitos, os quais provocam a coagulação do sistema, tendo pouca influência na viscosidade do sistema.

Para Naje e Abbas (2013) o tamanho das partículas tem papel importante na velocidade de sedimentação, por exemplo uma partícula de sílica de 1 μ m, por exemplo, sedimenta com velocidade da ordem de 4mm por hora, o que inviabiliza em termos práticos sua remoção da água através da sedimentação simples.

2.5.5 Fatores que interferem na eletrocoagulação

Para Chen (2004 apud FORNARI, 2007) a eficiência de um sistema de eletrocoagulação é refletida na remoção de poluentes pela potência elétrica. Há diversos fatores que influenciam o tamanho das bolhas de gases de hidrogênio e oxigênio, tais como densidade de corrente, temperatura, material do eletrodo, distanciamento do eletrodo e pH do meio.

2.5.5.1 Densidade da tensão

Para Chen (2004 apud FORNARI, 2007) a capacidade de conduzir corrente elétrica no efluente é diretamente proporcional à quantidade de íons condutores presentes no líquido. Estes íons são os responsáveis pela condução da corrente elétrica, ou seja, quanto maior a concentração de íons no efluente, maior será a capacidade de condução de corrente elétrica e maior a possibilidade de ocorrência de reações de coagulação das substâncias presentes no efluente

2.5.5.2 Influência da Temperatura

Conforme Gili (2017), a variação da temperatura tem pouca influência no processo de eletrocoagulação, apesar de se esperar que a condutividade do efluente e a cinética de reação colaborassem para o aumento da temperatura. Segundo Chen (2004 apud FORNARI, 2007), a temperatura poderá apresentar um efeito positivo em

relação à condutividade do efluente, permitindo assim, uma redução no consumo de energia.

2.5.5.3 Material dos eletrodos

A definição dos materiais a serem usados como eletrodos devem atender as características a serem obtidas. Os eletrodos mais usados são os de alumínio e de ferro, devido à disponibilidade e o baixo custo desses materiais no mercado, porém outros metais podem ser usados. (CRESPILHO, SANTANA& REZENDE, 2004)

O eletrodo de ferro, em função do menor custo e por gerar coloração acentuada, é geralmente utilizado no tratamento de efluentes, enquanto o alumínio é usado no tratamento de água potável. Os eletrodos de alumínio não deixam cor no efluente resultante do tratamento, sendo bastante eficaz na remoção de substâncias, devido a sua capacidade superior de adsorção do hidróxido de alumínio em relação aos hidróxidos de ferro (II) e (III) quando usados eletrodos de ferro. SHEN et al. (2003 apud BENAZZI, 2013).

O eletrodo de cobre quando exposto a água, sofre oxidação adquirindo coloração verde, entretanto, é um metal resistente a corrosão. Conforme Dantas (2014) o comportamento eletroquímico do cobre em soluções aquosas envolve a formação de espécies solúveis de Cu (I) e Cu (II) e a formação de um filme anódico que provoca a passivação da superfície do cobre, esse processo é dependente do pH do efluente, ou seja, quanto maior o pH menor a quantidade de espécies solúveis.

2.5.5.4 Distância entre eletrodos

Quanto maior a distância entre os eletrodos, maior deverá ser a diferença de potencial aplicada, pois a solução possui resistividade à passagem de tensão. Portanto, conforme as características do efluente, a distância entre os eletrodos pode variar para melhorar a eficiência do processo. Por exemplo, distâncias maiores poderão ser impostas quando a condutividade do efluente for relativamente elevada, caso contrário, a distância deverá ser a menor possível para que não ocorra aumento exagerado do potencial. (CRESPILHO, SANTANA E REZENDE, 2004)

Conforme Combat et al. (2017) para alcançar um bom rendimento é necessário maximizar o contato entre o eletrodo e o eletrólito, algumas vezes é necessário aplicar potenciais elevados para ultrapassar a resistência da solução.

2.5.5.5 Efeito do pH

O efeito do pH do efluente na eletrocoagulação é refletido pela eficiência da corrente, bem como a solubilidade de hidróxidos metálicos. A potência consumida é mais alta em um pH neutro, do que em condições ácidas ou alcalinas devido à variação da condutividade. Quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo, CHEN (2004 apud FORNARI, 2007).

2.5.6 Vantagens e desvantagens da eletrocoagulação

As principais vantagens e desvantagens da tecnologia de eletrocoagulação são apresentadas a seguir.

2.5.6.1 Vantagens da eletrocoagulação

Segundo Mollah (2004 apud FORNARI, 2007) e Crespilho, Santana e Rezende (2004), as principais vantagens do uso da eletrocoagulação no tratamento de efluentes são:

- Requer equipamento simples e de fácil operação;
- Dispensa o uso de substâncias químicas, minimizando, conseqüentemente, o impacto negativo no ambiente;
- Os flocos formados são mais estáveis, sendo assim melhor removidos pelo processo de filtração;
- Remove as partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação;
- As bolhas de gás produzidas durante a eletrocoagulação adsorvem melhor o contaminante da solução, o qual pode ser removido com maior facilidade;

- A célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção;
- A técnica pode ser convenientemente usada em áreas onde a eletricidade não é disponível, através da energia solar;
- Variando a densidade de corrente pode-se variar a concentração do gás no meio, teoricamente aumentando a colisão das bolhas;
- A eletrocoagulação produz baixa quantidade de lodo.

2.5.6.2 Desvantagens da eletrocoagulação

A seguir são listadas as principais desvantagens no uso da eletrocoagulação no tratamento de efluentes conforme Mollah (2004 apud FORNARI, 2007) e Crespilho, Santana e Rezende (2004):

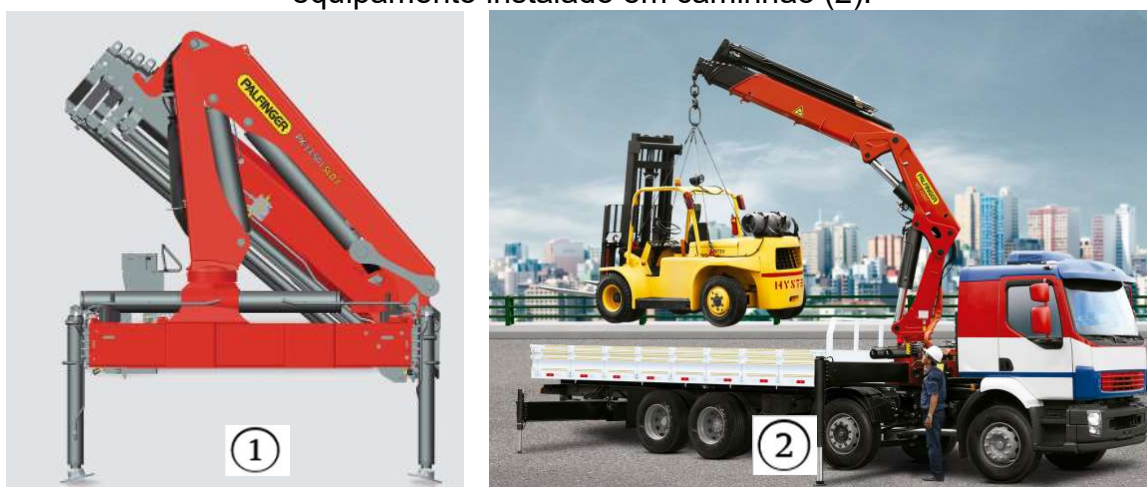
- Os eletrodos precisam ser substituídos regularmente, caso sofram passivação;
- O uso de eletricidade pode ter maior custo em alguns lugares;
- Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo à perda de eficiência da unidade;
- É requerida em alguns casos a condutividade do efluente;
- O hidróxido gelatinoso tende a se solubilizar em alguns casos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Processo produtivo - geração do efluente industrial

O efluente foi coletado de uma indústria metalúrgica situada na cidade de Caxias do Sul, com produção predominante de equipamentos para movimentação de cargas (Figura 11).

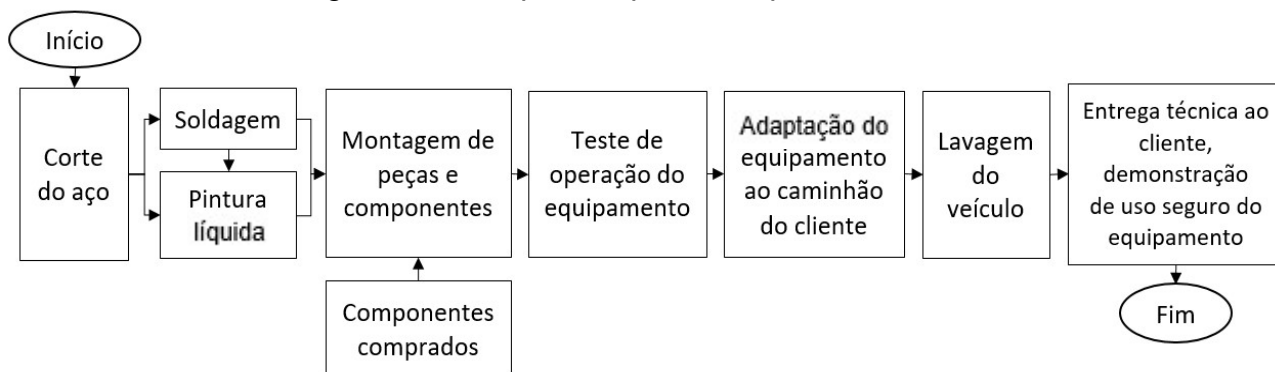
Figura 11 – Equipamentos para movimentação de cargas. Equipamento fabricado pela empresa para movimentação de carga (1) e equipamento instalado em caminhão (2).



Fonte: Adaptado de Palfinger (2019).

O efluente utilizado no estudo é gerado nos processos produtivo da empresa, conforme Figura 12. Nesses processos são gerados efluentes contaminados com óleos e graxas, provenientes do processo de pintura líquida e da lavagem de produtos.

Figura 12 – Sequência processo produtivo.

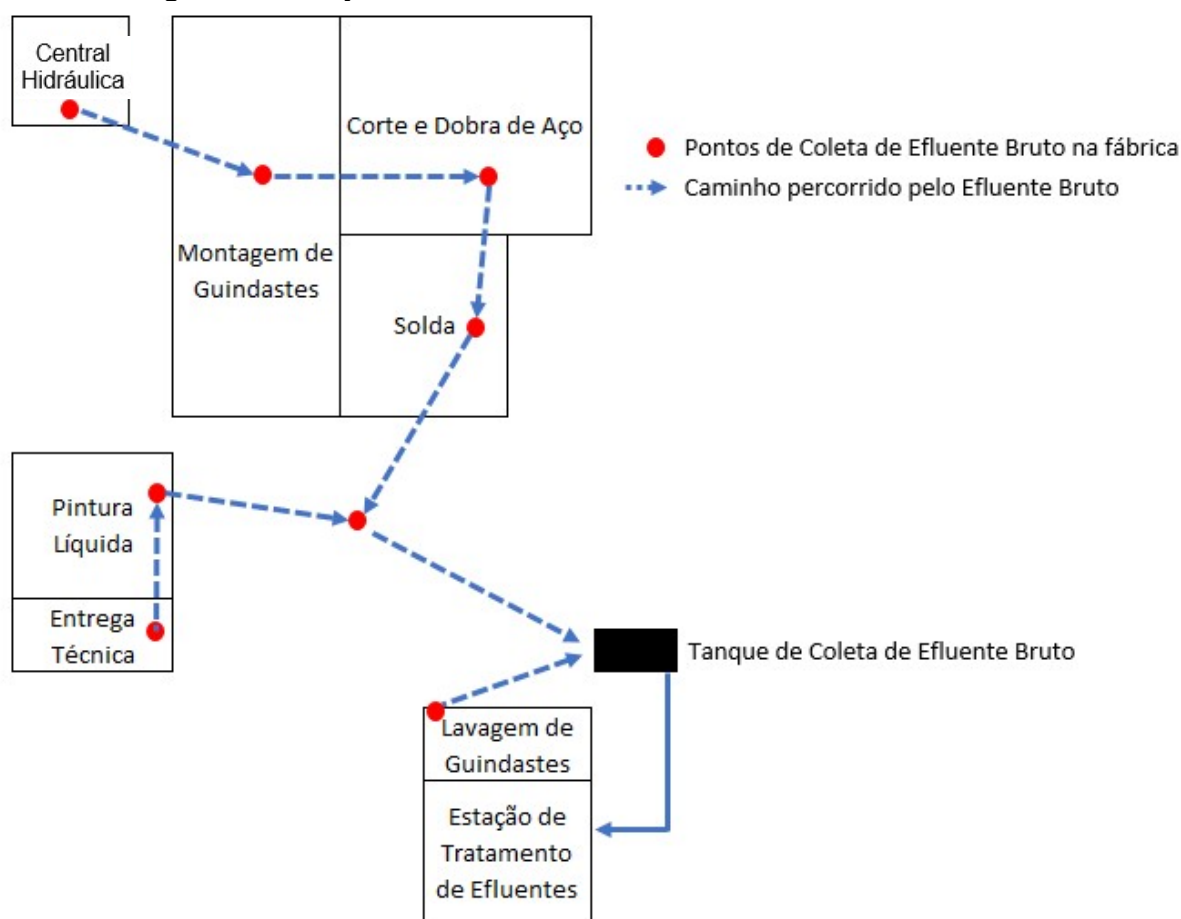


Fonte: A autora (2018).

3.2 Efluente industrial

A empresa possui uma estação de tratamento de efluentes na qual é realizado o tratamento físico químico. A Figura 13 demonstra o caminho do efluente pelos processos produtivos até a estação de tratamento de efluentes.

Figura 13 – Layout e coleta de efluentes da indústria em estudo



Fonte: A autora (2018).

O efluente bruto usado nesse estudo foi coletado na fase inicial do tratamento, quando é recebido na estação de tratamento de efluentes e armazenado no tanque 1 de recebimento (Figura 14). O tratamento do efluente convencional terá início quando o efluente for encaminhado ao tanque 2, com a adição de produtos químicos, como agente coagulantes, neutralizadores de pH e agente de oxidação e redução para coagulação e sedimentação do material. O efluente tratado é liberado e o material sedimentado é encaminhado para o filtro prensa 3, onde ocorrerá a separação do efluente tratado e do lodo, conforme Figura 14.

Figura 14 – Tanques ETE da Empresa Estudada. Tanque de Recebimento (1), tanque de separação (2) e filtro prensa (3).



Fonte: A autora (2018).

O efluente utilizado na análise apresentava os seguintes parâmetros antes do tratamento do efluente, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros do efluente bruto.

| Parâmetros | Resultados | Resultados |
|-----------------------------|---------------------|------------|
| pH | ≥ 6 e ≤ 9 | 8,5 |
| Índice de Turbidez | ≤ 40 NTU | 158 NTU |
| Demanda Química de Oxigênio | ≤ 330 mg/L | 1108 mg/L |
| Óleos e Graxas | ≤ 10 mg/L | 134 mg/L |

Continua

| | | |
|--------------------------|------------|----------|
| Sólidos suspensos totais | ≤ 140 mg/L | 167 mg/L |
|--------------------------|------------|----------|

Fonte: autor (2018)

3.3 Metodologia

Para análise do processo de eletrocoagulação foram realizadas três análises.

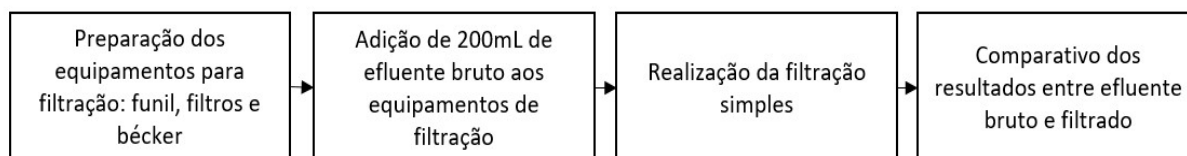
- ✓ Filtração simples do efluente bruto;
- ✓ Pré-teste da eletrocoagulação;
- ✓ Teste da eletrocoagulação utilizando três diferentes materiais metálicos;

Foram coletadas amostras de efluente e realizadas análises de bancada, com uso de diferentes materiais como eletrodos metálicos. Nesta análise foram selecionados parâmetros essenciais para o tratamento de efluentes, os resultados dos dados do tratamento através da eletrocoagulação e por tratamento convencional foram obtidos por análises efetuadas em laboratório externo.

3.3.1 Filtração Simples

A filtragem simples do efluente, conforme fluxograma apresentado na Figura 15.

Figura 15. Validação do processo através da filtração simples do efluente bruto.

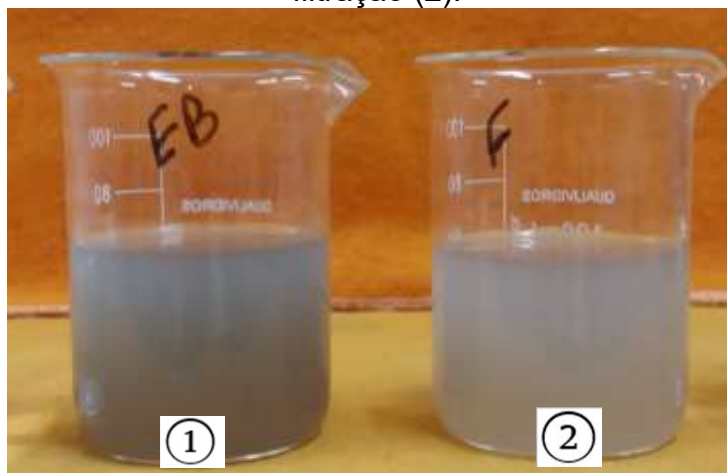


Fonte: A autora (2018).

Após a montagem do aparato para filtração foram adicionados 200 mL de efluente bruto ao funil de vidro com filtro, sendo o processo utilizado para filtração a gravidade.

Para validação, na Figura 16 é possível comparar os resultados do processo. Mesmo após a filtração o efluente permaneceu com coloração turva, o que caracteriza presença de sólidos suspensos.

Figura 16 – Filtração do Efluente. Efluente bruto (1) e efluente após o processo de filtração (2).

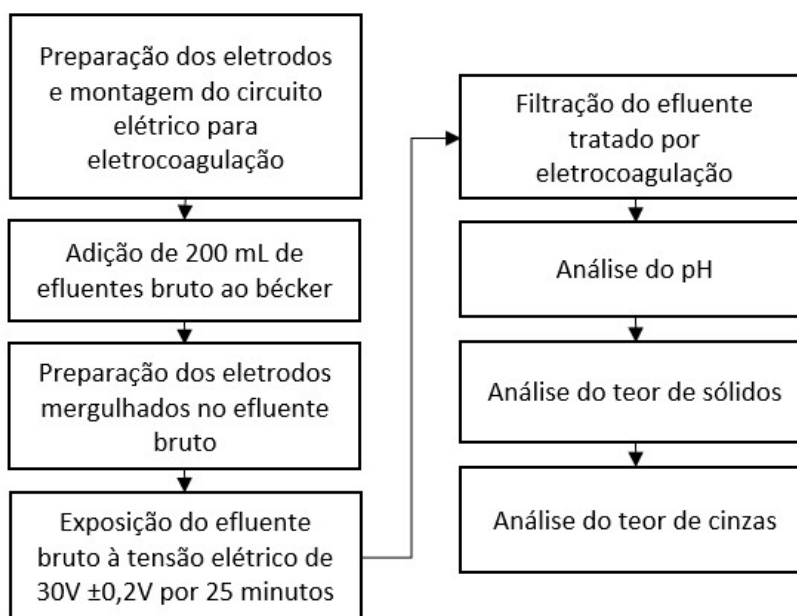


Fonte: A autora (2018).

3.3.2 Pré-teste da eletrocoagulação

A fim de validar o processo de eletrocoagulação foi realizado um pré-teste com eletrodos de aço carbono SAE 1010, conforme Figura 17.

Figura 17 – Fluxo do processo de eletrocoagulação.



Fonte: A autora (2018).

Inicialmente foram adicionados 200 mL de efluente bruto em um copo de bécker. Para montagem do circuito elétrico, os eletrodos de aço SAE 1010 foram preparados com lixados com lixa grão 150 micra, para remoção de resíduos de óleos e oxidações,

e posteriormente foram fixados aos fios de condução elétrica e conectados à fonte de tensão. Os eletrodos foram mergulhados no efluente bruto, sendo aplicada uma tensão de $30\text{ V} \pm 2\text{ V}$, por vinte e cinco minutos, conforme Figura 18.

Figura 18 – Aparato para realização da eletrocoagulação.



Fonte: A autora (2018).

Foram realizados quatro testes para validação do processo, sendo dois referentes às amostras do dia 10 de maio de 2018, identificadas como amostras “Eletrocoagulação 1” e “Eletrocoagulação 2” e duas amostras do dia 16 maio de 2018, identificadas como amostras “Eletrocoagulação 3” e “Eletrocoagulação 4”. Foram utilizados eletrodos de aço carbono SAE 1010 e no processo de eletrocoagulação foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros pré-teste com eletrodo de aço SAE 1010.

| Parâmetros | Inicial |
|------------------------------|------------------------------|
| pH | 5 |
| Distância entre os eletrodos | 55 mm |
| Tensão | $30\text{ V} \pm 2\text{ V}$ |
| Material dos eletrodos | Aço carbono SAE 1010 |

Continua

Continuação

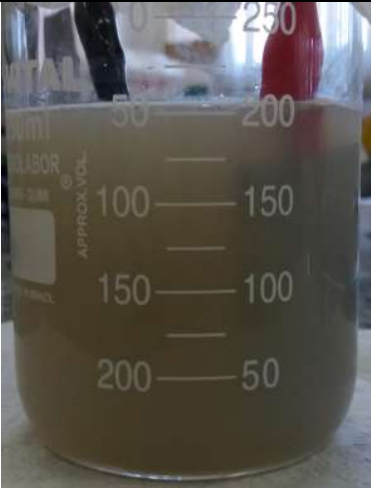

Temperatura do efluente

20,5 °C




Fonte: autor (2018)

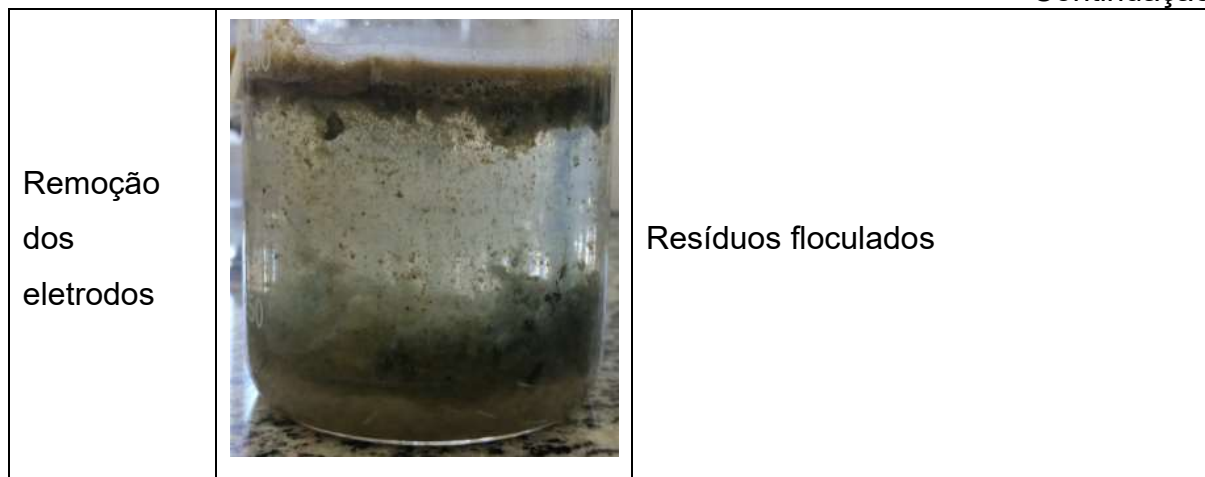
Os resultados são apresentados na Tabela 13. Para avaliação do processo de eletrocoagulação o efluente foi submetido à tensão de $30 \text{ V} \pm 2 \text{ V}$ e analisado nos tempos de 0 minuto, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos e 25 minutos.

Tabela 13 – Resultados da eletrocoagulação do efluente bruto com uso de eletrodos de aço SAE 1010.

| Tempo do Experimento | Imagem | Resultado |
|----------------------|---|---|
| 0 minuto |  | Efluente bruto |
| 10 minutos |  | Alteração da cor do efluente e o princípio da concentração dos contaminantes, chamada de floculação |

Continua

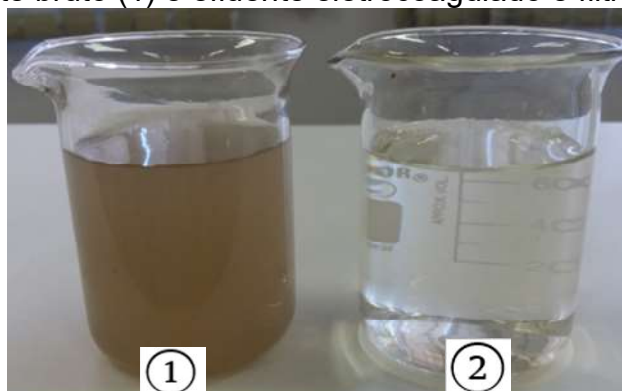
| | | |
|------------|---|--|
| 15 minutos |  | Formação de sobrenadante e decantado, princípio da flotação |
| 20 minutos |  | Processo quase que completo de formação de sobrenadante e precipitado. |
| 25 minutos |  | Princípio da clarificação do efluente. |



Fonte: a autora (2018)

Após os 25 minutos de experimento foi realizado o processo de filtração simples. O resultado pode ser observado na figura 19, na qual está apresentado um comparativo entre o efluente bruto (1) e o que passou pelo processo de eletrocoagulação (2).

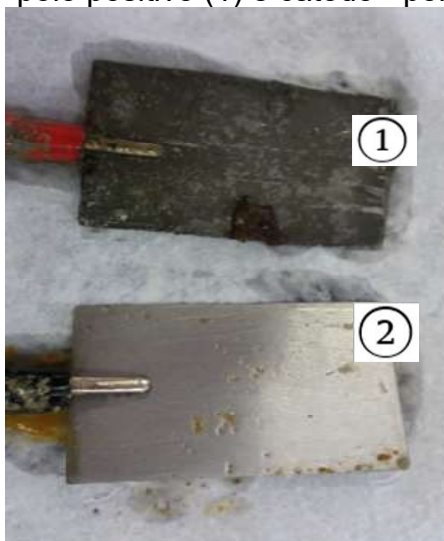
Figura 19 – Comparativo entre os efluentes após pré-teste. Efluente bruto (1) e efluente eletrocoagulado e filtrado (2).



Fonte: a autora (2018)

No processo de eletrocoagulação ocorre a corrosão de um dos eletrodos (Figura 20), conforme Meneses (2012) isso ocorre devido ao ataque químico dos íons hidroxila gerados durante a redução da água. A tensão no meio produz o coagulante liberado dos eletrodos, ocorrendo a liberação de hidrogênio gerada no cátodo. Na Figura 21 é possível verificar o fluxo de migração dos elétrons do ânodo (1) para o cátodo (2).

Figura 20 – Eletrodos de aço SAE 1010 usados na eletrocoagulação do efluente bruto. Ânodo - polo positivo (1) e cátodo - polo negativo (2).



Fonte: a autora (2018).

Figura 21 – Fluxo de migração dos elétrons. Ânodo (1) e cátodo (2).



Fonte: a autora (2018)

Conforme a Figura 22, o efluente submetido a eletrocoagulação foi filtrado e obteve-se um lodo com aspecto gelatinoso.

Figura 22 – Lodo proveniente do processo de eletrocoagulação do efluente bruto.



Fonte: a autora (2018).

Na Figura 23 é possível verificar o resultado do processo de pré-teste da eletrocoagulação com um comparativo entre os efluentes bruto, filtrado e eletrocoagulação. O efluente tratado por eletrocoagulação apresentou cor levemente turva, odor característico e pH 9. Fica evidente a redução significativa da turbidez entre os efluentes bruto filtrado e o eletrocoagulado.

Figura 23 – Comparativo dos resultados entre os diferentes tratamentos de efluentes. Efluente bruto (1), efluente filtrado em filtro de malha de 10 micra (2) e efluente tratado com Eletrocoagulação e filtragem (3).



Fonte: a autora (2018)

Para fins de comparação do fluxo de elétrons nos eletrodos, foram realizadas análises da redução de massa. A Tabela 14 apresenta um comparativo das massas dos eletrodos de aço SAE 1010 antes e após o pré-teste da eletrocoagulação do efluente bruto.

Tabela 14 – Comparativo de massas dos eletrodos de aço SAE 1010.

| Número de ensaios | Ânodo | | Cátodo | |
|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) |
| Eletrocoagulação 1 | 5,74 | 5,77 | 5,71 | 5,33 |
| Eletrocoagulação 2 | 5,78 | 5,82 | 5,77 | 5,28 |
| Eletrocoagulação 3 | 5,85 | 5,88 | 5,77 | 5,60 |
| Eletrocoagulação 4 | 5,80 | 5,81 | 5,79 | 5,59 |

Fonte: a autora (2018).

Para comparação entre o pré-teste da eletrocoagulação e o processo de tratamento de efluentes convencional, foi realizado um ensaio para avaliar o percentual de resíduos sólidos residuais após incineração, portanto, foram realizadas análises de teor de sólidos e teor de cinzas. Para a análise de teor de sólidos, as amostras foram aquecidas em estufa a 100 °C por 24 horas, sendo pesadas antes e depois do processo.

Os resultados são apresentados na Tabela 15. As análises “Eletrocoagulação 1” a “Eletrocoagulação 4” são referentes aos pré-testes de eletrocoagulação e o processo convencional é referente os resíduos do tratamento convencional do efluente brutos realizado pela empresa.

Tabela 15 – Resultados do teste de teor de sólidos.

| Número de ensaios | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | % de sólidos presentes no lodo |
|-----------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|
| Eletrocoagulação 1 | 63,3551 | 49,5270 | 78,2 |
| Eletrocoagulação 2 | 61,4341 | 49,2076 | 80,1 |
| Eletrocoagulação 3 | 57,5494 | 48,5675 | 84,4 |
| Eletrocoagulação 4 | 59,2527 | 49,5038 | 83,5 |
| Média | - | - | 81,6 |
| Processo Convencional | 65,0496 | 57,3078 | 88,1 |

Fonte: A autora (2018)

Todas as amostras do processo de eletrocoagulação apresentaram índice satisfatório uma vez que o resultado apresentou percentual de sólidos menor em relação ao processo convencional. A determinação do teor de cinzas é fundamental para definir o percentual de material orgânico e inorgânico na amostra, ou seja, quanto maior o percentual, maior a quantidade de resíduo final para descarte em aterros industriais ou coprocessamento.

Para a análise do teor de cinzas as amostras foram calcinadas em mufla a 900 °C por 60 min, sendo pesadas antes e após a queima. Os resultados são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Resultados do teste de teor de cinzas com eletrodos de aço SAE 1010.

| Número de ensaios | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | % de Cinzas |
|-----------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| Eletrocoagulação 1 | 49,5270 | 49,4230 | 99,8 |
| Eletrocoagulação 2 | 49,2076 | 49,0878 | 99,8 |
| Eletrocoagulação 3 | 48,5675 | 48,4884 | 99,8 |
| Eletrocoagulação 4 | 49,5038 | 49,4320 | 99,9 |
| Média | - | - | 99,8 |
| Processo Convencional | 57,3078 | 55,5864 | 97,0 |

(Fonte: A autora, 2018)

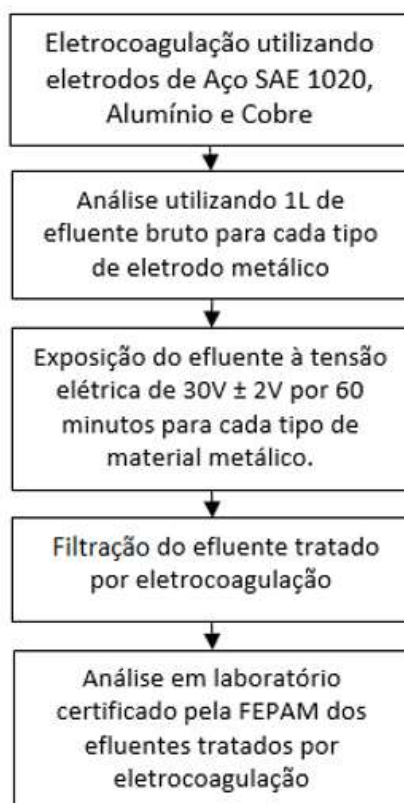
Analisando os dois processos, verificou-se que o teor de sólidos do processo convencional ficou com valor 7,4% maior comparado ao processo de eletrocoagulação. Conforme Crespilho, Santana e Rezende (2004) ficou evidenciada a menor geração de resíduos de lodo no processo de eletrocoagulação, já que o processo não requer adição de produtos químicos para a floculação e coagulação do efluente. As amostras do processo de eletrocoagulação apresentaram índices superiores de teor de inorgânicos em relação à amostra do processo convencional, na análise, o teor de cinzas residuais ficou com valor 2,8% superior, ou seja, o tratamento proporciona menor quantidade de matéria orgânica quando comparado ao processo convencional.

3.3.3 Teste de eletrocoagulação utilizando diferentes eletrodos metálicos

Para a eletrocoagulação foram utilizados eletrodos de diferentes materiais metálicos, selecionados devido ao índice de condutividade, sendo o cobre com índice de $6,0 \times 10^{-7} / \Omega \cdot m$, o de alumínio com índice de $3,8 \times 10^{-7} / \Omega \cdot m$ e o de aço carbono 1020 com índice de $0,6 \times 10^{-7} / \Omega \cdot m$. A Figura 24 apresenta o fluxo de análise deste estudo, a saber, a realização do processo de eletrocoagulação para validação da eficácia do método no tratamento dos efluentes industriais utilizando diferentes materiais metálicos como eletrodos.

Inicialmente, os eletrodos foram descontaminados para eliminação de quaisquer sujidades e contaminações na área de contato entre o metal e o efluente. Para tanto, foram lixados com uma lixa grão 150. Para cada análise de eletrocoagulação, foram utilizados um par de eletrodos de cada material metálicos de aço SAE 1020, alumínio e cobre. As informações dimensionais sobre cada eletrodo metálico estão descritas na Tabela 17.

Figura 24 – Fluxo de análise utilizando diferentes eletrodos metálico



Fonte: A autora (2018).

Tabela 17 – Dimensões eletrodos de aço SAE 1020, alumínio e cobre.

| Material | Dimensional | Imagem |
|--------------|---|--|
| Aço SAE 1020 | 93mm de altura 25mm de largura 3mm de espessura |  |
| Alumínio | 93mm de altura 25mm de largura 3mm de espessura |  |
| Cobre | 93mm de altura 25mm de largura 3mm de espessura |  |

Fonte: a autora (2018)

Para a montagem da célula eletrolítica foi utilizado um Bécker contendo 1 L do efluente bruto. Para a realização da eletrocoagulação foi empregada uma fonte de energia da marca Ya Xun, Modelo OS – 305D, conforme Figura 25, com tensão aplicada de 30 V e variação de ± 2 V.

Figura 25 – Fonte de energia usada.



(Fonte: a autora, 2018).

O teste requereu a adaptação dos eletrodos metálicos à fonte de tensão para condução da eletricidade. Assim, foram utilizados fios de cobre de espessura 0,5mm juntamente com garras em aço para melhor sustentação dos eletrodos no efluente, conforme Figura 26. Esse sistema de fixação foi utilizado para os três materiais testados nesse experimento.

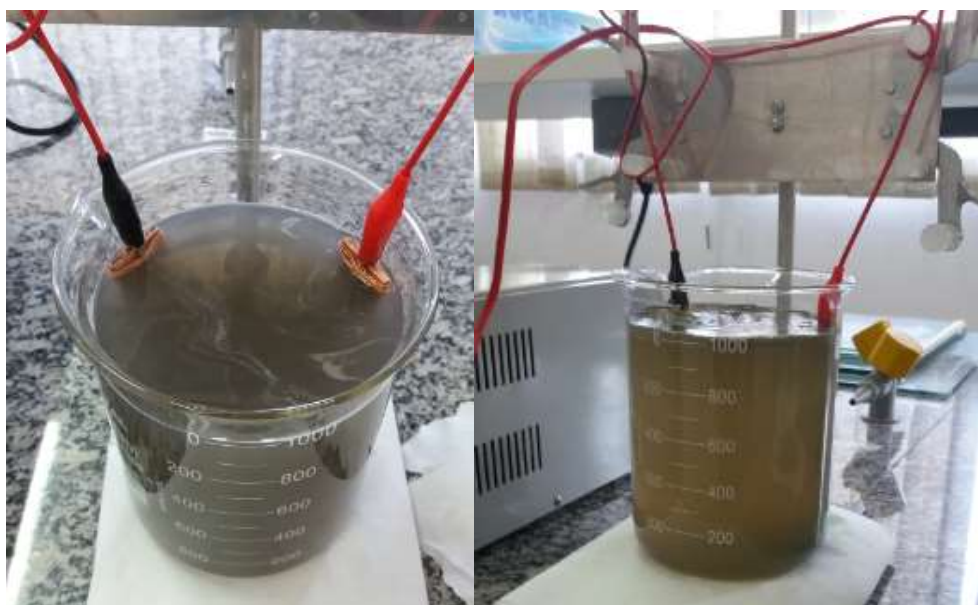
Figura 26 - Eletrodos adaptados à fonte de tensão.



Fonte: a autora (2018).

Os eletrodos foram inseridos no efluente de forma que ficassem submersos e distantes um do outro, a fim de evitar o fechamento do circuito elétrico, conforme Figura 27, sendo cada eletrodo ligado a um polo da fonte, um no negativo e outro no positivo.

Figura 27 – Eletrodos submersos no efluente bruto.



Fonte: a autora (2018).

Para avaliação do processo de eletrocoagulação o efluente foi submetido à tensão nos tempos de 0 minuto, 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos, 40 minutos, 50 minutos e 60 minutos. Após o término da eletrocoagulação foi realizado o processo de filtração simples em filtro de malha de 10 micra.

3.3.4. Caracterização do processo de eletrocoagulação

Foram coletadas duas amostras de efluentes, uma amostra de efluente bruto foi coletada no mês de novembro de 2018 e outra do mesmo efluente após o tratamento convencional, ambas as amostras foram submetidas às seguintes análises:

- análise visual
- pH inicial
- pH final
- tempo de execução das análises em minutos

As análises abaixo foram realizadas em laboratório certificado pela FEPAM, através do método *Stanford Methods for the examination of water and wastewater – SMWW 23^a*.




- índice de turbidez
- demanda química de oxigênio
- óleo e graxas minerais
- sólidos suspensos totais

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES




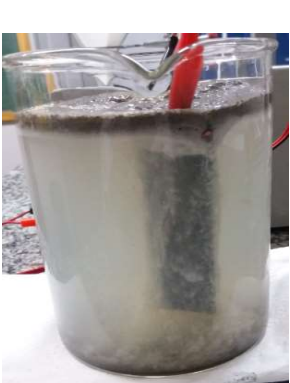
4.1 Eletrocoagulação com eletrodo de Aço SAE 1020


O efluente bruto foi submetido por sessenta minutos ao processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de aço SAE 1020, e o resultado da análise visual pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados da eletrocoagulação do efluente bruto com eletrodos de Aço SAE 1020.

| Tempo | Imagem | Resultado |
|------------|---|---|
| início |  | Efluente bruto. |
| 10 minutos |  | Com o início da oxidação do aço, o elemento químico majoritário é o ferro, sendo a oxidação representada pela reação. $\text{Fe}_{(s)} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^{-}$ Nesse momento é possível verificar a alteração da cor do efluente e o princípio da concentração dos contaminantes. |
| 20 minutos |  | A solvatação do polo positivo dá origem formação de sobrenadante e decantado, princípio da flotação, conforme reação abaixo. $\text{Fe}^{2+}_{(aq)} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ |

Continua




| | | |
|------------|---|--|
| 30 minutos |  | <p>Com a solvatação do polo positivo devido à corrente elétrica tem-se a formação de agente coagulante H⁺.</p> $\text{Fe (H}_2\text{O)}_6^{-3} \rightarrow \text{Fe (OH)}_{3(s)} + 3\text{H}^+ + 3\text{H}_2\text{O}$ <p>Com isso ocorre o aumento da concentração de sobrenadante e decantado.</p> |
| 40 minutos |  | Princípio de clarificação do efluente |
| 50 minutos |  | Processo de formação de sobrenadante e precipitado |
| 60 minutos |  | <p>As reações anteriores dão origem a outras reações secundárias</p> $n \text{Fe(OH)}_3 \rightarrow \text{Fe}_n (\text{OH})_{3n(s)}$ <p>Nesta etapa, ocorre o processo de eletrocoagulação, onde são formadas microbolhas de hidrogênio no cátodo, permitindo o arraste da suspensão coloidal.</p> |

| | | |
|---------------|---|---------------------------------------|
| Após 24 horas |  | Decantação completa dos contaminantes |
|---------------|---|---------------------------------------|

Fonte: Adaptado de Pertile, 2014.

Após o tempo total de sessenta minutos foi realizado o processo de filtração simples. Na tabela 18 é possível comparar visualmente os resultados comparando o efluente bruto, o resultado do efluente tratados por eletrocoagulação utilizando eletrodos de aço SAE 1020 e da água destilada, essa apenas como parâmetro de comparação.

Tabela 19 – Comparativo visual após eletrocoagulação com eletrodos de aço SAE 1020. Efluente bruto e o efluente tratado através da eletrocoagulação utilizando eletrodos de aço SAE 1020 e posteriormente filtrado.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Efluente Bruto | Efluente tratado por eletrocoagulação usando eletrodo de aço SAE 1020 | Água destilada |

Fonte: a autora (2018).

O resultado do processo foi satisfatório removendo quase que totalmente os contaminantes do efluente, a turbidez do efluente bruto era de 158 NTU passando a 3,3 NTU após o tratamento através da eletrocoagulação utilizando eletrodos de aço SAE 1020.

A Tabela 20 apresenta um comparativo dos principais parâmetros de eletrocoagulação antes e após o processo utilizando eletrodos de aço SAE 1020.

Tabela 20 – Parâmetros antes e após a eletrocoagulação com eletrodos de aço SAE 1020.

| | | |
|------------------------------|------------|------------|
| pH | 8,5 | 7,6 |
| Distância entre os eletrodos | 82 mm | 82 mm |
| Tensão | 30 V ± 2 V | 30 V ± 2 V |
| Temperatura do efluente | 22 °C | 36 °C |
| Massa Ânodo | 52,813 g | 52,838 g |
| Massa Cátodo | 52,855 g | 52,812 g |





Fonte: a autora (2018)

Conforme Tabela 19 a distância entre os eletrodos foi mantida, bem como a tensão aplicada por sessenta minutos. Com isso ocorreu um aumento da temperatura e a redução do pH da solução, isso ocorre por que no processo de eletrocoagulação ocorre a corrosão de um dos eletrodos e, conforme Meneses (2012), o ataque químico dos íons hidroxila gerados durante a reação de redução da água. O processo de eletrocoagulação pode ser comprovado através do aumento da massa do ânodo com variação de 0,02% e a redução de 0,08% de massa do cátodo, isso por que a corrente aplicada produz uma maior quantidade de coagulante liberado dos eletrodos, ocorrendo o aumento da taxa de hidrogênio gerada no cátodo. (CRESPILO, SANTANA e REZENDE, 2004).




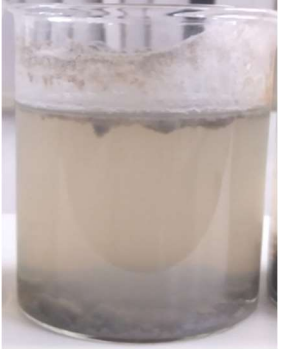
4.2 Eletrocoagulação com eletrodos de Alumínio

O efluente bruto foi submetido por sessenta minutos ao processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio, e o resultado da análise visual pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados da eletrocoagulação do efluente bruto com eletrodos de Alumínio.

| Tempo | Imagem | Resultado |
|------------|---|---|
| início |  | Efluente bruto. |
| 10 minutos |  | Com o início da oxidação do aço, o elemento químico majoritário é o ferro, sendo a oxidação representada pela reação. $\text{Al}_{(s)} \rightarrow \text{Al}^{3+}_{(aq)} + 3e^{-}$ Nesse momento é possível verificar a alteração da cor do efluente e o princípio da concentração dos contaminantes. |
| 20 minutos |  | A solvatação do polo positivo dá origem formação de sobrenadante e decantado, princípio da flotação, conforme reação abaixo. $\text{Al}^{3+}_{(aq)} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ |
| 30 minutos |  | Com a solvatação do polo positivo devido à corrente elétrica tem-se a formação de agente coagulante H^{+} . $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3(s) + 3\text{H}^{+} + 3\text{H}_2\text{O}$ Com isso ocorre o aumento da concentração de sobrenadante e decantado. |

Continua



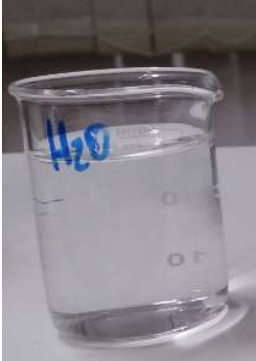
| | | |
|---------------|---|---|
| 40 minutos |  | Princípio de clarificação do efluente |
| 50 minutos |  | Processo de formação de sobrenadante e precipitado |
| 60 minutos |  | <p>As reações anteriores dão origem a outras reações secundárias</p> $n \text{ Al(OH)}_3 \rightarrow \text{Al}_n (\text{OH})_{3n} (\text{s})$ <p>Nesta etapa, ocorre o processo de eletrocoagulação, onde são formadas microbolhas de hidrogênio no cátodo, permitindo o arraste da suspensão coloidal.</p> |
| Após 24 horas |  | Decantação completa dos contaminantes |

Fonte: Adaptado de Pertile, 2014.

Após o tempo total de sessenta minutos foi realizado o processo de filtração simples. Na Tabela 22 é possível comparar visualmente os resultados comparando o efluente bruto, o resultado do efluente tratados por eletrocoagulação utilizando

eletrodos de alumínio e da água destilada, essa apenas como parâmetro de comparação.

Tabela 22 – Comparativo visual após eletrocoagulação com eletrodos de alumínio. Efluente bruto e o efluente tratado através da eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio e posteriormente filtrado.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Efluente Bruto | Efluente tratado por eletrocoagulação usando eletrodo de alumínio | Água destilada |

O resultado do processo foi satisfatório removendo quase que totalmente os contaminantes do efluente, a turbidez do efluente bruto era de 158 NTU passando a 11,6 NTU após o tratamento através da eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio. A Tabela 23 apresenta um comparativo dos principais parâmetros de eletrocoagulação antes e após o processo utilizando eletrodos de alumínio.

Tabela 23– Parâmetros antes e após a eletrocoagulação com eletrodos de alumínio.

| | | |
|------------------------------|------------|------------|
| pH | 8,5 | 7,5 |
| Distância entre os eletrodos | 86 mm | 86 mm |
| Tensão | 30 V ± 2 V | 30 V ± 2 V |
| Temperatura do efluente | 21 °C | 29 °C |
| Massa Ânodo | 11,471 g | 11,475 g |
| Massa Cátodo | 11,690 g | 11,686 g |

Fonte: a autora (2018).



Conforme Tabela 22 a distância entre os eletrodos foi mantida, bem como a tensão aplicada por sessenta minutos. Com isso ocorreu um aumento da temperatura e a redução do pH da solução, isso ocorre por que no processo de eletrocoagulação

ocorre a corrosão de um dos eletrodos e, conforme Meneses (2012), o ataque químico dos íons hidroxila gerados durante a reação de redução da água. O processo de eletrocoagulação pode ser comprovado através do aumento da massa do ânodo com variação de 0,07% e a redução de 0,06% de massa do cátodo, isso por que a corrente aplicada produz uma maior quantidade de coagulante liberado dos eletrodos, ocorrendo o aumento da taxa de hidrogênio gerada no cátodo. (CRESPILO, SANTANA e REZENDE, 2004).




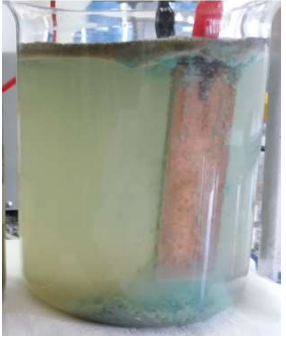
4.3 Eletrocoagulação com eletrodos de Cobre



O efluente bruto foi submetido por sessenta minutos ao processo de eletrocoagulação utilizando eletrodos de cobre, e o resultado da análise visual pode ser observado na tabela 24.

Tabela 24 – Resultados da eletrocoagulação com eletrodos de cobre.

| Tempo | Imagem | Resultado |
|------------|---|---|
| início |  | Efluente bruto |
| 10 minutos |  | Com o início da oxidação do aço, o elemento químico majoritário é o ferro, sendo a oxidação representada pela reação. $\text{Cu}_{(s)} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^{-}$ Nesse momento é possível verificar a alteração da cor do efluente e o princípio da concentração dos contaminantes. |

Continua




| | | |
|------------|---|---|
| 20 minutos |  | <p>A solvatação do polo positivo dá origem formação de sobrenadante e decantado, princípio da flotação, conforme reação abaixo.</p> $\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ |
| 30 minutos |  | <p>Com a solvatação do polo positivo devido à corrente elétrica tem-se a formação de agente coagulante H^+.</p> $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+} \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_3(\text{s}) + 3\text{H}^+ + 3\text{H}_2\text{O}$ <p>Com isso ocorre o aumento da concentração de sobrenadante e decantado.</p> |
| 40 minutos |  | <p>Princípio de clarificação do efluente</p> |
| 50 minutos |  | <p>Processo de formação de sobrenadante e precipitado</p> |

| | | |
|---------------|--|--|
| 60 minutos |  | <p>As reações anteriores dão origem a outras reações secundárias</p> $n \text{Cu(OH)}_3 \rightarrow \text{Cu}_n (\text{OH})_{3n} (\text{s})$ <p>Nesta etapa, ocorre o processo de eletrocoagulação, onde são formadas microbolhas de hidrogênio no cátodo, permitindo o arraste da suspensão coloidal.</p> |
| Após 24 horas |  | Decantação completa dos contaminantes |

Fonte: Adaptado de Pertile (2014).

Após o tempo total de sessenta minutos foi realizado o processo de filtração simples. Na Tabela 25 é possível comparar visualmente os resultados comparando o efluente bruto, o resultado do efluente tratados por eletrocoagulação utilizando eletrodos de cobre e da água destilada, essa apenas como parâmetro de comparação.

Tabela 25 – Comparativo visual após eletrocoagulação com eletrodos de cobre. Efluente bruto e o efluente tratado através da eletrocoagulação utilizando eletrodos de cobre e posteriormente filtrado.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Efluente Bruto | Efluente tratado por eletrocoagulação usando eletrodo de cobre | Água destilada |

Fonte: a autora (2018)

O resultado do processo foi satisfatório removendo quase que totalmente os contaminantes do efluente, a turbidez do efluente bruto era de 158 NTU passando a 10,8 NTU após o tratamento através da eletrocoagulação utilizando eletrodos de cobre. A Tabela 26 apresenta um comparativo dos principais parâmetros de eletrocoagulação antes e após o processo utilizando eletrodos de cobre.

Tabela 26 – Parâmetros antes e após a eletrocoagulação com eletrodos de cobre.

| | | |
|------------------------------|------------|------------|
| pH | 8,5 | 7,1 |
| Distância entre os eletrodos | 79 mm | 79 mm |
| Tensão | 30 V ± 2 V | 30 V ± 2 V |
| Temperatura do efluente | 20 °C | 27 °C |
| Massa Ânodo | 65,084 g | 65,120 g |
| Massa Cátodo | 65,060 g | 65,010 g |

Fonte: a autora (2018)

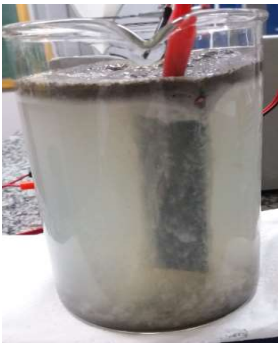


Conforme Tabela 25, assim como no resultado dos demais eletrodos a distância entre eles foi mantida, bem como a tensão aplicada por sessenta minutos.

Com isso ocorreu um aumento da temperatura e a redução do pH da solução, isso ocorre por que no processo de eletrocoagulação ocorre a corrosão de um dos eletrodos e, conforme Meneses (2012), o ataque químico dos íons hidroxila gerados durante a reação de redução da água. O processo de eletrocoagulação pode ser comprovado através do aumento da massa do ânodo com variação de 0,01% e a redução de 0,05% de massa do cátodo, isso por que a corrente aplicada produz uma maior quantidade de coagulante liberado dos eletrodos, ocorrendo o aumento da taxa de hidrogênio gerada no cátodo. (CRESPILHO, SANTANA e REZENDE, 2004).

4.4 Comparativo entre os resultados da eletrocoagulação pelos diferentes eletrodos metálicos

Após o período de sessenta minutos, na análise visual comparativa entre os diferentes eletrodos (Tabela 27), o de alumínio apresentou maior quantidade de suspensão gelatinosa e o eletrodo de cobre a menor quantidade. Segundo Crespilho, Santana e Rezende (2004), a formação de íons complexos confere uma característica de uma suspensão gelatinosa ao meio. Para Mollah (2004 apud THEODORO et al., 2010), durante a passagem de tensão, certa massa do eletrodo é dissolvida na solução, formado então o agente coagulante que é responsável por remover contaminantes do efluente por coagulação, adsorvendo as partículas de contaminantes.

Tabela 27 – Comparativo visual entre os tratamentos com eletrodos metálicos após 60 minutos. Anterior ao processo de filtração.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Aço SAE 1020 | Alumínio | Cobre |

Fonte: a autora (2018)

Na tabela 28 é possível verificar o resultado da oxidação dos eletrodos após o processo de eletrocoagulação, devido a migração dos elétrons entre o cátodo, polo positivo (1) e o ânodo, polo negativo (2).

Tabela 28 – Comparativo entre os diferentes eletrodos metálicos após 60 minutos. Cátodo (1) e Ânodo (2).

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Aço SAE 1020 | Alumínio | Cobre |

Fonte: a autora (2018)

É possível visualizar maior degradação dos eletrodos de aço SAE 1020 e cobre, aparentemente o eletrodo de alumínio apresentou menor incidência de oxidação. Segundo Crespilho, Santana e Rezende (2004), a justificativa para o eletrodo de alumínio apresentar menor variação de material entre os diferentes eletrodos, é que neste tipo de material ocorre a formação de um filme muito fino de óxido que faz com que o eletrodo de alumínio não seja afetado pela oxidação. A formação desse filme durante o processo de eletrocoagulação pode comprometer a eficiência do processo em decorrência do aumento da resistividade. Para os eletrodos de aço SAE 1020 e de cobre foi verificada a maior oxidação do ânodo.

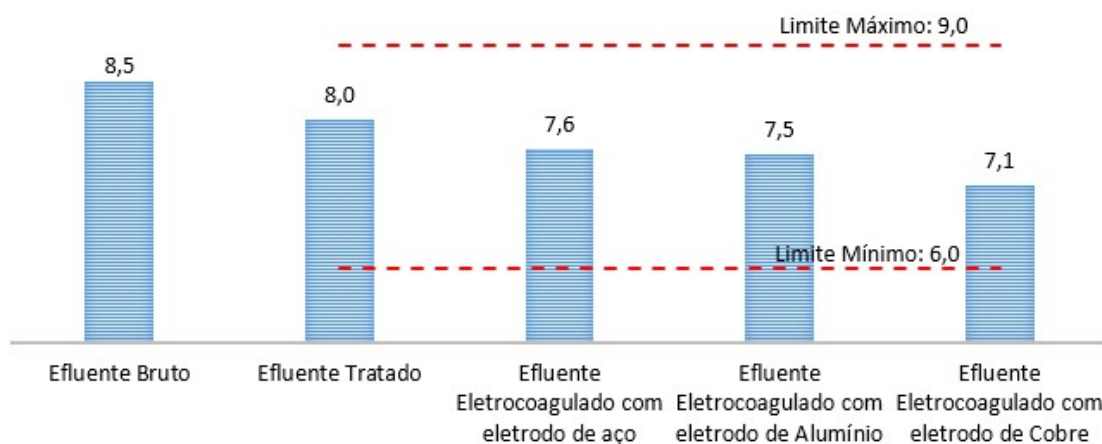
4.5 Análises laboratoriais

A seguir serão apresentados os resultados comparativos entre o efluente bruto, ou seja, sem tratamento, o efluente tratado por processo convencional e o efluente tratado pelo processo de eletrocoagulação usando diferentes eletrodos metálicos.

Para o pH a Resolução CONSEMA Nº 355 (BRASIL, 2017) determina que na liberação do efluente o pH esteja entre 6,0 e 9,0. Todos os efluentes apresentaram resultados satisfatórios conforme determina a legislação para tratamento de efluentes, conforme gráfico da Figura 28. Em relação ao processo convencional, o tratamento

por eletrocoagulação se mostrou mais eficiente. Comparando os diferentes materiais metálicos, o cobre apresentou o menor pH entre os eletrodos testados.

Figura 28 – Resultados comparativos dos valores de pH.

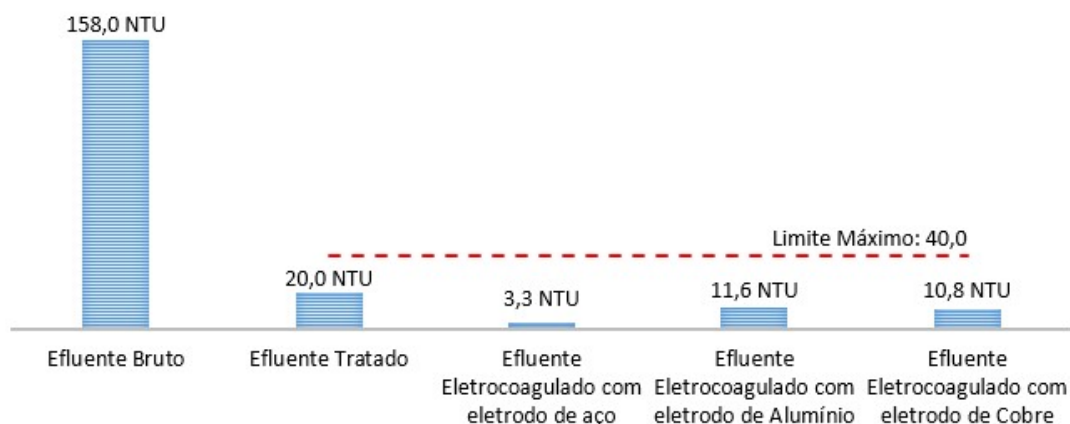


Fonte: a autora (2018).

O pH é a principal análise química para liberação de efluentes após tratamento, conforme Chen (2004 apud FORNARI, 2007) o efeito do pH na eletrocoagulação está refletido pela eficiência da corrente, bem como a solubilidade de hidróxidos metálicos. A potência consumida é mais alta a pH neutro, do que em condições ácidas ou alcalinas devido à variação da condutividade. Quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo.

Referente ao Índice de Turbidez das amostras testadas, todos os efluentes apresentaram resultados satisfatórios conforme determina a Resolução CONSEMA N° 355 (BRASIL, 2017), na qual o limite aceitável para os índices de turbidez devem estar abaixo de 40 NTU. Os resultados são expressos no gráfico da Figura 29. Em relação ao processo convencional, o tratamento por eletrocoagulação se mostrou mais eficiente, com redução dos valores de cor superiores a 98% para experimentos em todos os eletrodos testados. Comparando os diferentes materiais metálicos o aço SAE 1020 apresentou o menor valor.

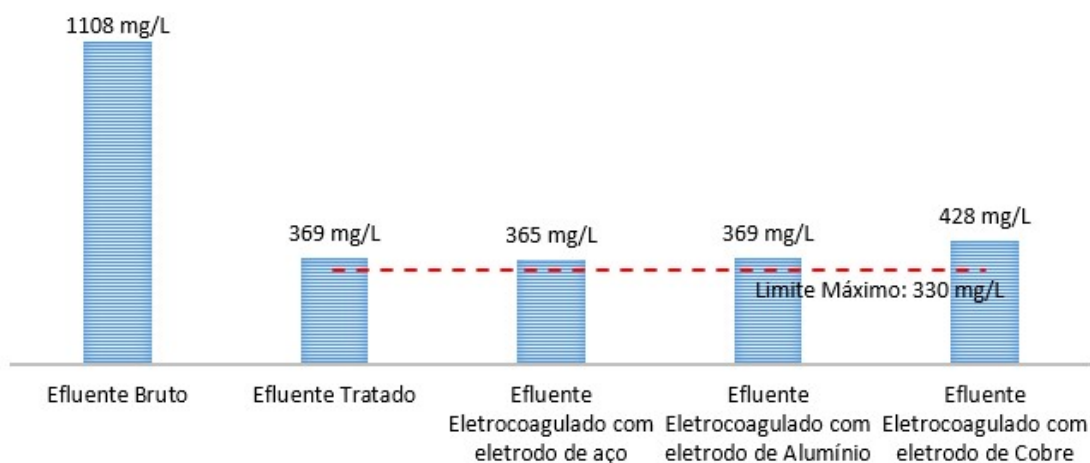
Figura 29 – Resultados para índice de turbidez dos efluentes tratados.



Fonte: a autora (2018).

Para a demanda química de oxigênio o limite fixado para liberação de efluentes industriais tratados conforme Resolução CONSEMA Nº 355 (BRASIL, 2017) são 330 mg/L de efluente para faixa de vazão menor que 500 m³/dia. Conforme Figura 30, os resultados ficaram acima dos limites exigidos em legislação, inclusive o efluente tratado pelo processo convencional. Para os efluentes tratados com os eletrodos de aço SAE 1020 e alumínio os resultados ficaram 10% e 11%, respectivamente, acima do permitido. O efluente tratado com eletrodo de cobre que apresentou índice 29% acima do permitido, que pode ser justificado pela quantidade de agente coagulante, que é o principal agente de adsorção responsável por remover contaminantes do efluente por coagulação e partículas contaminantes.

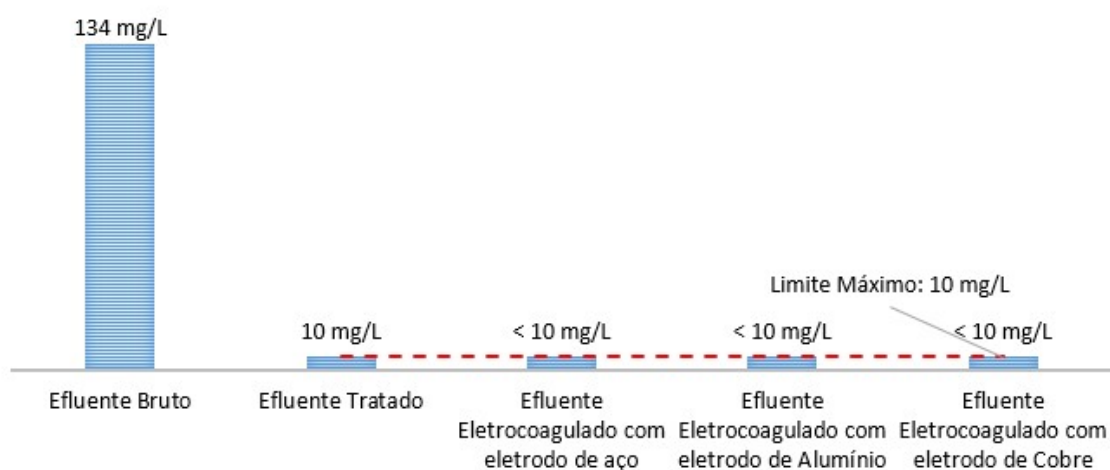
Figura 30 – Resultados do DQO para efluentes tratados.



Fonte: a autora (2018).

Para os limites de óleos e graxas presentes no efluente tratado, conforme Resolução CONSEMA N° 355 (BRASIL, 2017), os valores fixados para as quantidades despejadas em cursos d'água, devem ser menores que 10 mg/L para óleos e graxas mineral e menores que 30 mg/L para óleos de graxas vegetal ou animal. Todos os efluentes apresentaram índice dentro dos limites permitidos. Os resultados são na Figura 31.

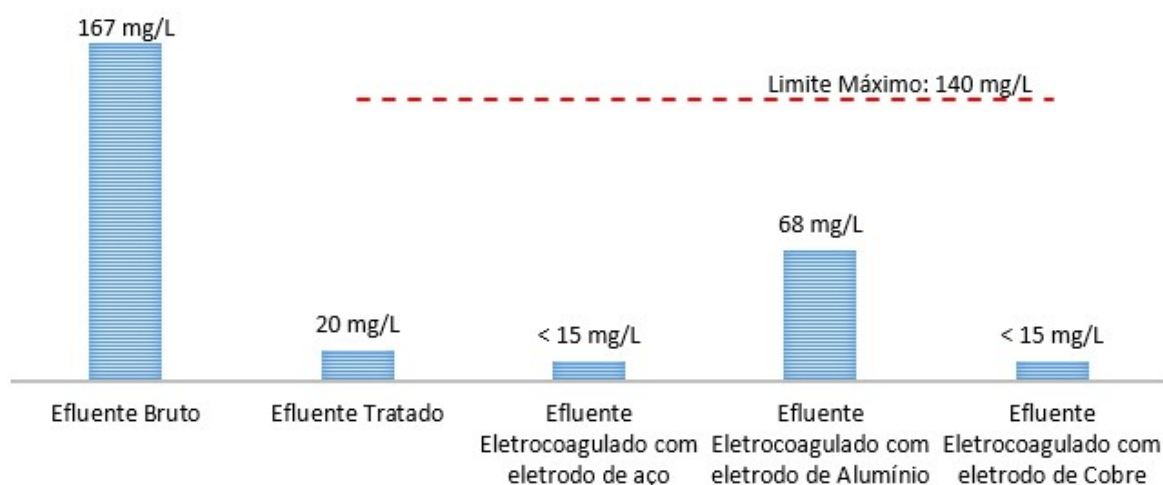
Figura 31 – Resultados de óleos e graxas para efluentes tratados.



Fonte: a autora (2018).

Os limites fixados para sólidos suspensos em solução não devem ultrapassar 140 mg/L a cada 100m³/dia de efluente liberado, conforme Resolução CONSEMA N° 355 (BRASIL, 2017). Todos os efluentes apresentaram índice dentro dos limites permitidos. Os resultados estão expressos na Figura 32. Apesar de dentro do limite, o alumínio apresentou resultado superior ao processo convencional. Conforme Crespilho, Santana e Rezende (2004) o alumínio ao sofrer corrosão em meio ácido ou alcalino forma uma camada passiva de óxido, uma vez formado esse filme o processo de eletrocoagulação pode estar comprometido pela perda de eficiência em decorrência do aumento da resistividade.

Figura 32 – Resultados sólidos totais suspensos nos efluentes tratados.



Fonte: a autora (2018).

Conforme Cerqueira (2006) quanto maior a concentração dos íons no efluente, maior será a capacidade de condução de corrente elétrica. A geração de íons metálicos ocorre no ânodo e quanto maior a liberação, maior a quantidade de agente coagulante na solução. Na análise, o eletrodo com maior liberação de íons metálicos na solução foi o eletrodo de alumínio, justificado maior quantidade de suspensão gelatinosa (figura 26), porém foi o metal que obteve o pior desempenho nas análises laboratoriais realizadas. A justificativa pode estar no fenômeno de passivação do alumínio, que conforme Oliveira (2019), ao contrário de outros metais, o alumínio não oxida facilmente, isso ocorre devido a formação de uma fina película de óxido de alumínio proveniente da eletrólise do metal, que cria uma barreira evitando que o processo de corrosão continue. Conforme análises realizadas, podemos comparar os seguintes resultados na Tabela 29.

Tabela 29 – Comparativo de resultados das análises para corrosão e eletrodeposição. Onde (+) corrosão (-) eletrodeposição.

| Material | Condutividade $\Omega.m$ | % Δ Massa Ânodo | % Δ Massa Cátodo | ΔT ($^{\circ}C$) | ΔpH |
|----------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| Aço | $0,6 \times 10^{-7}$ | (-) 0,02839 | (+) 0,08142 | 14 | 0,9 |
| Alumínio | $3,8 \times 10^{-7}$ | (-) 0,16563 | (+) 0,41230 | 8 | 1,0 |
| Cobre | $6,0 \times 10^{-7}$ | (-) 0,01229 | (+) 0,05228 | 7 | 1,4 |

Fonte: a autora (2019).

Conforme Gili (2017), a variação da temperatura tem pouca influência no processo de eletrocoagulação, apesar de se esperar que a condutividade do efluente e a cinética de reação colaborassem para o aumento da temperatura. Porém, esse fenômeno não se mostrou relevante na análise, já que a variação de temperatura entre os diferentes eletrodos foi de, no máximo, 14 °C para o aço. Também não foi observada uma relação de proporcionalidade entre a condutividade elétrica do material e o aumento da temperatura do efluente.

Conforme Chen (2004 apud FORNARI, 2007) o efeito do pH na eletrocoagulação está refletido na solubilidade de hidróxidos metálicos e aglutinação dos contaminantes. Para Libânio (2005) a eletrocoagulação por ser proveniente do processo de hidrólise da água, que libera átomos de H⁺, aumentando assim a concentração desse íon, reduzindo o pH da solução, causando sua desestabilização e culminando no precipitado coagulado. Todas as amostras de efluentes tratados com diferentes eletrodos metálicos não apresentaram variação decorrente da eletrocoagulação, mesmo assim apresentaram desempenho satisfatório.

Outro parâmetro importante, que afeta a aplicação de qualquer método de tratamento de efluente é o custo. Além dos eletrodos usados em uma célula de eletrocoagulação o maior custo operacional é a energia consumida para o tratamento do efluente. O consumo de energia elétrica de uma fonte de alimentação é quantificado através da aplicação da Lei de Ohm, na qual a tensão aplicada é multiplicada pela corrente elétrica, apresentado assim a potência consumida. Neste caso, para realização das análises a fonte de alimentação utilizada consumiu 12 watts por um período de 60 minutos para cada tipo de eletrodos e os resultados são apresentados na tabela 30.

Tabela 30 – Consumo de energia e custo total da eletrocoagulação com diferentes eletrodos.

| Material | Watts C x A | Tempo de utilização | Consumo (kWh) | Custo estimado (kWh) | Custo total (R\$/kWh) |
|----------|----------------|------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| Aço | 12 | 1 hora | 0,012 | R\$0,80 | R\$0,009 |
| alumínio | 12 | 1 hora | 0,012 | R\$0,80 | R\$0,009 |
| cobre | 12 | 1 hora | 0,012 | R\$0,8 | R\$0,009 |

Continua

Continuação

| | |
|--|----------|
| Custo total da análise com uso dos três diferentes materiais metálicos | R\$0,027 |
|--|----------|

Fonte: a autora (2019).

5 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a viabilidade do processo de eletrocoagulação do efluente de uma indústria metal mecânica, localizada na cidade de Caxias do Sul, através da variação do metal dos eletrodos, aço SAE 1020, alumínio e cobre. Conforme literatura, a eletrocoagulação mostra-se como uma técnica bastante promissora devido à simplicidade dos equipamentos necessários e o baixo custo de instalação, o que foi verificado nesse trabalho.

Os resultados deste estudo demonstraram-se satisfatórios com a clarificação do efluente após sessenta minutos de experimento e aplicação da tensão em $30 \text{ V} \pm 2 \text{ V}$ para os eletrodos de aço e cobre. Para o alumínio a clarificação se deu em aproximadamente 30 min. Foram comparados os resultados do processo de eletrocoagulação ao tratamento de efluentes convencional, conforme Resolução CONSEMA N° 355 (BRASIL, 2017) e as análises foram realizadas em laboratório autorizado pela FEPAM. O resultado para o pH quando comparado o processo convencional ficou até 11% menor para o eletrodo de cobre.

Os valores de turbidez o desempenho do eletrodo de aço SAE 1020 foi superior a 83%. Os valores de demanda química de oxigênio o aço SAE 1020 foi o que apresentou melhor resultado quando comparado ao processo de tratamento de efluentes convencional e a diferença entre ambos os processos foi de 1%. Os resultados de presença de óleos e graxas, em ambos os processos apresentaram desempenho igual. O índice de sólidos totais suspensos o desempenho dos eletrodos de aço SAE 1020 e cobre foram 25% superiores ao tratamento de efluentes convencional. Neste comparativo, os eletrodos de aço carbono SAE 1020 e cobre obtiveram desempenho similar, porém quando comparados, o aço possui baixo custo, o que facilitaria a reposição dos eletrodos.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional da Água. **Conjuntura Nacional dos Recursos Hídricos**. Disponível em: < <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos> > Acesso em 23 de setembro de 2017.
- ANGELIS, D. F. et al. Eletrólise de resíduos poluidores: l-efluente de uma indústria liofilizadora de condimentos. **Revista Química Nova**, v.21, n.1, pp.20-24, 1998.
- AQUINO, S. F.; SILVA, S. Q.; CHERNICHARO, C. A. L.; Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.11, n.4, p.29 - 42, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, p. 71. 2014.
- ATKINS, P.W.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BARROS, W. P. **Curso de Direito Penal**. São Paulo: Editora Atlas, 2008.
- BENAZZI, T. L. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para tratamento de líquidos das indústrias de laticínios**. 2013. Dissertação – Departamento de Química, Erechim, 2013.
- BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A.; **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 3.ed. São Paulo: CETESB, 1993.
- BRASIL, CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646> > Acesso em 23 de setembro de 2017.
- BRASIL. **Decreto Nº 99.274, de 09 de junho de 1990**. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/CCivil_03/decreto/Antigos/D99274.htm > Acesso em 13 de março de 2019.
- BRASIL. **Decreto Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/l9605.htm > Acesso em 21 de setembro de 2018.
- BRASIL. **Artigo Nº 255, de 09 de junho de 1990**. Disponível em: < <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/constfed.nsf/16adba33b2e5149e032568f60071600f/62e3ee4d23ca92ca0325656200708dde?OpenDocument> > Acesso em 21 de setembro de 2018
- BRASIL. **Portaria Nº 56, de 14 de março de 1977**. Disponível em: < https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=1403:processo-de-revisao-do-padrao-de-potabilidade-de-agua-para-consumo-humano&Itemid=685 > Acesso em 21 de setembro de 2018

BRASIL. **Legado Brasil – Legislação ambiental no Brasil é uma das mais completas do mundo, de 23 de dezembro de 2017.** Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/noticias/meio-ambiente/2010/10/legislacao>> Acesso em 17 de março de 2019.

BORBA, F. H. et al. Avaliação da eficiência da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas. *Estudos Tecnológicos*, V. 6, n.1, pp. 36-47, 2010.

CARVALHO, D. L.; SOUZA, M. A. C.; ZEMPULSKI, D. A.; Utilização do método eletrofloculação para tratamento de efluentes industriais. **Revista Nacional de Gerenciamento das Cidades**, v.3, n.14, pp.14-28, 2015.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Reuso de Efluentes - Metodologia para análise do potencial do uso de efluentes tratados para abastecimento industrial.** Disponível em: < <http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2017/9/reuso-de-efluentes-metodologia-para-analise-do-potencial-do-uso-de-efluentes-tratados-para-abastecimento-industrial/>> Acesso em 12 de setembro de 2017.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de Efluente da Indústria de Processamento de Coco Utilizando Eletrofloculação. **Revista Química Nova**, v.27, n.3, pp.387-392, 2004.

CERQUEIRA, A. A.; **Aplicação da Técnica de Eletro floculação Utilizando Corrente Alternada de Corrente Variável no Tratamento de Água de Produção da Indústria do Petróleo.** Tese – Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

COMBAT, M. P.M.; MENDONÇA, R. C. S.; VALENTE, G. F. S.; SILVA, C. M.; Validação dos processos de eletrocoagulação e avaliação da eletrodissolução de eletrodos no tratamento de efluente de abatedouros de aves. **Revista Química Nova**, v.40, n.4, p.447-453, 2017

COMUSA – Companhia Municipal de Saneamento da Cidade de Novo Hamburgo – RS – Serviço de Água e Esgoto. **Tratamento de Água – Etapas de um Sistema de Tratamento de água.** Disponível em: < <http://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua> > Acesso em 30 de Junho de 2018.

DELLAMATRICE, P. M. Principais aspectos da poluição de rios brasileiros por pesticidas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.18, n.12, p.1296–1301, 2014.

DERÍSIO, José Carlos. **Introdução ao controle de poluição ambiental.** São Paulo: Signus, 2000.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Águas.** São Paulo: Editora Rima, 2005.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Utilização da técnica de eletrocoagulação para tratamento de efluentes têxteis: Uma Revisão. **Revista Eixo**, v.2, n.1, p.39-52, 2013.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de curtume**. Dissertação – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Toledo, 2007.

GILLI, I.; **Tratamento de Efluentes por Eletrólise: Estudo de Caso para Efluentes Têxteis**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**, v. 4, n. 76, 81p, 2004.

KOTZ, J. C; TREICHEL, P. – Química e Reações Químicas. Rio De Janeiro, Editora LTC. 2002.

LEME, Francílio Paes. **Teoria e Técnica de tratamento de água**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 1990.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de Qualidade e tratamento de água**. Campinas: Editora Átomo, 2005.

LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F.; **Reuso de Água**. São Paulo: Editora Manole, 2003.

MENESES, J. M.; VASCONCELOS, R. F.; FERNADES, T. F.; ARAÚJO, G. T.; Tratamento do Efluente do Biodiesel Utilizando a Eletrocoagulação/Flotação: Investigação dos Parâmetros Operacionais. **Revista Química Nova**, v.35, n.2, p.235-240, 2012.

MOORE, W. J.; **Físico - Química**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1972

NAJE, A. S.; ABBAS, S. A.; Eletrocoagulation Technology in Wastewater Treatment: A Review o Methods and Applications. **Civil and Environmental Reserarch**, v.3, n.11, p.29 - 42, 2013.

NETZ, P. A.; ORTEGA, G. G.; **Fundamento de Físico – Química: Uma Abordagem conceitual para as Ciências Farmacêuticas**. 1ª Edição. Porto Alegre. Editora Artmed 2002.

NUNES, JOSE ALVES. **Tratamento físico – químico de águas residuárias Industriais**. 3ª edição. Aracaju. Editora Triunfo 2001.

OLIVEIRA, M. E. R.; **Proteção de superfícies de ligas de alumínio contra corrosão utilizando bicamada de recobrimentos à base de nano partículas e polímero condutor**. Tese de Doutorado – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

PERTILE, T. S. **Avaliação do processo de eletrocoagulação aplicado a efluentes cianídrico da indústria galvânica**. 2014. Dissertação - Departamento de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

PEREIRA, J. A. R. Geração de resíduos industriais e controle ambiental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.18, n.12, p.1296–1301, 2002.

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA nº 355**, de 13 de julho de 2017. Disponível em: < <http://www.sema.rs.gov.br/resolucoes> > Acesso em 15 de novembro de 2017.

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA nº 357**, de 10 de agosto de 2017. Disponível em: < <http://www.sema.rs.gov.br/resolucoes> > Acesso em 15 de novembro de 2017.

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA nº 128**, de 24 de novembro de 2006. Disponível em: < <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201611/30155644-resolucao-128-06-efluentes.pdf> > Acesso em 15 de novembro de 2017.

RUSSELL, John B. *Química Geral*, 2-ed, 2 vols. São Paulo: Makron, 1994. 1268p

USEPA - STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, **Method 5520 D - 22nd Edition, 2012**. American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation. Disponível em: <<http://www.standardmethods.org/store/>>. Acesso em 12 de julho de 2017.

SPERLING, M. V.; **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: FCO, 1996.

VESILIND, P. Aarne. **Wastewater treatment plant design**. Lewisburg: IWA Publishing, 2003.

TCHOBANOGLIOUS, G; BURTON, F.L; STENSEL. H.D. **Wastewater Engineering: Treatment and reuse/Metcalf &Eddy, Inc**. New York: MC Graw Hill, 2003.

THEODORO, P. S.; **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria galvânica**. 2010. Dissertação – Mestrado em desenvolvimento de processos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.