

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**

**BEATRIZ GATTI GARBIM**

**TRATAMENTOS DE EFLUENTE INDUSTRIAL COM ELEVADA**  
**CARGA ORGÂNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**BEATRIZ GATTI GARBIM**

**TRATAMENTOS DE EFLUENTE INDUSTRIAL COM ELEVADA  
CARGA ORGÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli.

**PONTA GROSSA**

**2017**



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

TRATAMENTOS DE EFLUENTE INDUSTRIAL COM ELEVADA CARGA ORGÂNICA

por

Beatriz Gatti Garbim

Monografia apresentada no dia 09 de novembro de 2017 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dra. Giane Gonçalves Lenzi  
(UTFPR)

---

Químico Diogo Ingles Zarpellon  
(SANEPAR)

---

Profa. Dra. Juliana M. T. de Abreu Pietrobelli  
(UTFPR)  
Orientadora

---

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus: por ter me iluminado e possibilitado a execução desse trabalho. Sem Ele, nada seria possível.

Aos meus pais, João e Leodeneia Garbim, por sempre me incentivarem e me apoiarem em todas as minhas decisões. À minha irmã, Juliana Gatti Garbim, e ao meu namorado, Fabio Hobal, pela paciência e suporte nesse período.

Meus sinceros agradecimentos à minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli. Agradeço pela oportunidade, direcionamento e sabedoria compartilhada durante o curso, principalmente nessa etapa final.

Aos professores Ms. Celso Gonçalves de Quadros, Dr. Ciro Maurício Zimmermann e Dr. Eduardo Sidinei Chaves, ao Diogo da SANEPAR, Rosiane do Departamento de Física da UTFPR e à aluna de mestrado Bruna Cassia da Silva por todo auxílio.

Agradeço a todos meus professores, pelo conhecimento transmitido durante o curso, e aos meus amigos, pelos momentos compartilhados.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a minha graduação.

## RESUMO

GARBIM, Beatriz Gatti. **Tratamentos de efluente industrial com elevada carga orgânica**. 2017. 47 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

A água é um recurso natural essencial utilizado em ampla escala na produção industrial, resultando em efluentes com potencial poluidor. Um exemplo de indústria que utiliza água em diversas etapas é a de produção de painéis de madeira de fibra de média densidade (MDF), que gera efluente com elevada demanda química de oxigênio (DQO) no descascamento de toras, preparação da madeira e tratamento/cozimento. Para reduzir a capacidade poluidora do efluente, tratamentos são aplicados, podendo ser químicos, físicos, físico-químicos ou biológicos. Como exemplo de tratamento físico-químico há o convencional de coagulação/floculação pela adição de agentes coagulantes, que tem como finalidade desestabilizar as partículas do líquido pela adição de químicos, possibilitando a aglomeração e posterior separação de partículas poluidoras. Como alternativa ao tratamento convencional, pode-se substituir os agentes coagulantes pela aplicação de uma corrente elétrica. Buscando melhores resultados, o processo de bio-sorção pode ser aliado ao tratamento de coagulação/floculação, melhorando a coloração e reduzindo a DQO do efluente pela sorção de poluentes por uma biomassa morta – como a torta de chia ou o bagaço de malte. No presente trabalho, analisou-se a eficiência do tratamento convencional pela adição dos agentes coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico em diferentes concentrações, e do tratamento eletroquímico de coagulação e floculação pela aplicação de corrente elétrica de tensão de 10 V e 20 V, com base na porcentagem de redução da DQO do efluente bruto de uma indústria de MDF. Depois de realizados individualmente, os tratamentos que apresentaram melhores resultados foram combinados e então aliados ao processo de bio-sorção com torta de chia ou bagaço de malte, resultando em um tratamento em série composto pela etapa eletroquímica, convencional e de bio-sorção. O estudo teve como principal desafio o manuseio de um efluente industrial com DQO na escala de 130.000 mg/L, atingindo a remoção entre aproximadamente 45% e 80% nos tratamentos aplicados.

**Palavras-chave:** Efluente; Indústria de MDF; tratamento convencional; tratamento eletroquímico; bio-sorção.

## ABSTRACT

GARBIM, Beatriz Gatti. **Treatments of industrial effluent with high organic load.** 2017. 47 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Water is an essential natural resource used in industrial production on a large scale, resulting in effluents with polluting potential. An example of industry that uses water in several stages is the one that produces medium density fiberboard (MDF), which generates effluent with high chemical oxygen demand (COD) in the debarking of logs, wood preparation and treatment/cooking. To reduce the pollutant capacity of the effluent, treatments are applied, which may be chemical, physical, physicochemical or biological. As an example of physical-chemical treatment there is the conventional coagulation/flocculation by the addition of coagulating agents, that has as purpose the destabilization of particles of the liquid by the addition of chemicals, allowing the agglomeration and subsequent separation of pollutant particles. As an alternative to conventional treatment, coagulating agents may be replaced by the application of an electric current. In order to obtain better results, the biosorption process can be combined with the coagulation/flocculation treatment, improving the staining and reducing the COD of the effluent by the sorption of pollutants by a dead biomass – such as residual meal of chia seeds or malt bagasse. In the present study, the efficiency of the conventional treatment (by the addition of coagulating agents aluminum sulfate and ferric chloride in different concentrations) and the electrochemical treatment of coagulation and flocculation by the application of electric current of 10 V and 20 V were evaluated based on percentage reduction of COD of the effluent from an MDF industry. After being individually applied, the treatments that presented the best results were combined and then allied to the biosorption process with the residual meal of chia seeds or malt bagasse, resulting in a series of treatment processes consisting of the electrochemical, conventional and biosorption stages. The main challenge was dealing with an industrial effluent with COD in the 130,000 mg/L scale, reaching between 45% and 80% removal in the applied treatments.

**Keywords:** Effluent; MDF industry; conventional treatment; electrochemical treatment; biosorption.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de fabricação de painel MDF.....	14
Figura 2 – Organograma dos tipos de tratamento de efluentes contendo exemplos de etapas.....	17
Figura 3 – Esquema de um tratamento preliminar.....	18
Figura 4 – Tanque de floculação.....	20
Figura 5 – Sistema utilizado na eletrocoagulação/floculação.....	24
Figura 6 – Cloreto férrico acumulado na superfície do agitador.....	28
Figura 7 – Diluição do efluente bruto (esquerda) e diluição do efluente tratado com adição de 200 ppm de cloreto férrico (direita).....	29
Figura 8 – Início do tratamento eletroquímico com tensão de 10 V. Em destaque, acúmulo de cargas no polo negativo.....	31
Figura 9 – Efluente após tratamento eletroquímico com aplicação de tensão de 10 V. Em vermelho, polo positivo destacado.....	32
Figura 10 – Efluente após tratamento eletroquímico com aplicação de tensão de 20 V. Em vermelho, polo positivo destacado.....	33
Figura 11 – Flocos depositados no fundo do béquer após decantação (experimento com 20 V).....	33
Figura 12 – Efluente antes (à esquerda) e após (à direita) tratamento de bioadsorção utilizando a torta de chia como bioadsorvente.....	35
Gráfico 1 – Espectro de absorção do efluente (A).....	37
Gráfico 2 – Espectro de absorção do efluente (B).....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de lançamento de efluente .....	16
Tabela 2 – Agentes coagulantes e concentrações utilizadas nos ensaios.....	23
Tabela 3 – Caracterização inicial do efluente bruto.....	27
Tabela 4 – Resultados obtidos nos tratamentos convencionais com adição de sulfato de alumínio.....	29
Tabela 5 – Resultados obtidos nos tratamentos convencionais com adição de cloreto férrico.....	30
Tabela 6 – Resultados obtidos nos tratamentos eletroquímicos.....	34
Tabela 7 – Resultados obtidos no tratamento em série.....	36
Tabela 8 – Áreas calculadas para as curvas obtidas pelas varreduras e porcentagens de remoção dos processos de biossorção.....	38
Tabela 9 – Valores de DBO medidos de dois ensaios do tratamento com adição de 200 ppm de cloreto férrico.....	39



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### LISTA DE ABREVIATURAS

A	Amperes
°C	Graus Celsius
cm	Centímetros
g	Gramas
L	Litro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mS	Milisiemens
nm	Nanômetros
ppm	Partes por milhão
rpm	Rotações por minuto
S	Segundo
V	Volts

### LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
DBO	Demanda biológica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
MDF	Medium Density Fiberboard

NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial Hidrogeniônico
TMR	Tempo de movimentação rápida
TML	Tempo de movimentação lenta
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

### **LISTA DE ACRÔNIMOS**

APHA	American Public Health Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UV-Vis Visível	Espectrometria de absorção molecular na região do Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
3.1 INDÚSTRIAS GERADORAS DE EFLUENTES COM ELEVADA CARGA ORGÂNICA.....	13
3.2 TRATAMENTOS DE EFLUENTE.....	15
3.2.1 Tratamentos de efluente industrial via processos físicos e químicos.....	18
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	22
4.2 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS CONVENCIONAIS.....	23
4.3 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS ELETROQUÍMICOS.....	24
4.4 TRATAMENTO EM SÉRIE: ELETROQUÍMICO, CONVENCIONAL E BIOSSORÇÃO.....	25
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	27
5.2 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS CONVENCIONAIS.....	28
5.3 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS ELETROQUÍMICOS.....	31
5.4 TRATAMENTO EM SÉRIE: ELETROQUÍMICO, CONVENCIONAL E BIOSSORÇÃO.....	35
5.5 ANÁLISE DA DBO.....	39
<b>6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>40</b>
6.1 CONCLUSÃO.....	40
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	41
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial que é utilizado em atividades industriais nas etapas de processamento, sistemas de refrigeração, geração de vapor, entre outras. Após seu uso, diversos poluentes são incorporados, alterando suas características físicas, químicas e sensoriais, gerando assim os efluentes líquidos. Esses efluentes não podem ser descartados diretamente no meio ambiente, por apresentarem alta capacidade de poluição.

No processamento industrial de fabricação de painéis de madeira ocorre a geração de efluente nas etapas de descascamento de toras, preparação da madeira e tratamento/cozimento. Esse efluente apresenta elevada carga orgânica, ou seja, substâncias contendo carbono, hidrogênio, nitrogênio, entre outras, que lhe confere maior capacidade de poluição (GAUTO; ROSA, 2011; MEYER, 2012). Assim, uma preocupação é reduzir o potencial poluidor do efluente com essas características.

Para reduzir o potencial poluidor do efluente e melhorar suas características são aplicados os chamados tratamentos de efluentes, que podem ser físicos, químicos, biológicos ou uma combinação. Os métodos convencionais empregados em tratamentos físico-químicos são de coagulação pela adição de agentes coagulantes, floculação por agitação e sedimentação. Como alternativas aos processos convencionais pode-se utilizar processos oxidativos avançados e processos eletroquímicos, que têm ganhado espaço devido a fácil aplicação e eficiência na redução da carga orgânica de efluentes. A eletrocoagulação é um processo eletroquímico em que a separação da matéria dispersa do líquido ocorre pela ação de uma corrente elétrica, que desestabiliza as partículas, resultando na coagulação.

Outro processo que pode ser aliado aos citados é o de biossorção, que tem como finalidade reter substâncias do efluente na superfície de um biossorvente, reduzindo sua coloração e capacidade poluidora.

Os métodos citados permitem a remoção de materiais insolúveis, poluentes inorgânicos, material orgânico, sólidos em suspensão e cor, apresentando benefícios para a indústria e o ambiente. Com a aplicação de diferentes processos, busca-se reduzir a carga orgânica do efluente, melhorando suas características.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Utilizar processos físico-químicos, eletroquímico e de biossorção para o tratamento de efluente industrial gerado na fabricação de painéis de madeira.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Empregar os processos físico-químicos como a coagulação, floculação e sedimentação, o eletroquímico de eletrocoagulação e o de biossorção no efluente industrial.

Realizar análises laboratoriais para caracterizar o efluente pré e pós tratamento.

Comparar e analisar a eficiência dos métodos convencionais e eletroquímico testados.

Comparar e analisar a eficiência dos biossorventes bagaço de malte e torta de chia para tratamento do efluente.

Definir as melhores condições para tratamento do efluente industrial estudado.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na indústria ocorre diariamente a contaminação da água utilizada em lavagens, sistemas de resfriamento, geração de vapor e em etapas do processamento, resultando em efluentes que não devem ser descartados diretamente na natureza (GAUTO; ROSA, 2011). A NBR 9800 (ABNT, 1987) estabelece como efluentes líquidos industriais o “Despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo efluentes de processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico”.

Via de regra, o processamento industrial gera resíduos e efluentes, uma vez que podem existir impurezas na matéria-prima e todos equipamentos e componentes utilizados nas operações devem ser limpos após o uso. Uma dificuldade em relação aos efluentes é defini-los em uma só composição, dado que eles variam de acordo com os equipamentos, materiais, rota de produção e matérias-primas utilizadas. Para melhorar suas características e diminuir o potencial poluidor, estes despejos são submetidos a diferentes tipos de tratamentos (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Para caracterizar o efluente, são analisados alguns parâmetros, que podem ser físicos, químicos ou bacteriológicos. Um exemplo é a turbidez, decorrente da presença de matéria em suspensão na água, o que diminui sua transparência. A turbidez é um parâmetro utilizado para identificar a interferência que a luz sofre ao passar pelo líquido (GAUTO; ROSA, 2011; RAPOSO, BARROS, MAGALHÃES JUNIOR; 2009).

Outro parâmetro que pode ser analisado é a demanda de oxigênio. De acordo com Gauto e Rosa (2011), os compostos orgânicos – que são substâncias químicas que contêm carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e/ou fósforo, por exemplo – presentes no efluente podem ser oxidados biologicamente e quimicamente, a fim de obter compostos mais estáveis e, para que isso ocorra, a matéria requer uma demanda de oxigênio. A Demanda Bioquímica de Oxigênio, ou DBO, é a medida de oxigênio necessária para bactérias destruírem a matéria orgânica. Já a Demanda Química de Oxigênio, DQO, é utilizada na avaliação da carga de poluição do efluente em relação à quantidade de oxigênio necessária para sua oxidação total em dióxido de

carbono e água. Portanto, quanto menor o valor da DBO e DQO, menor a carga orgânica e capacidade de poluição dos efluentes.

O pH é determinado em várias etapas de tratamento e para a utilização da água, uma vez que pode afetar os processos. Um pH ácido abaixo de 7 indica que as águas ou o efluente são corrosivos, podendo danificar tubulações. Um pH básico (acima de 7) indica que são incrustantes, o que também pode danificar aparelhos (GAUTO, ROSA; 2011).

### 3.1 INDÚSTRIAS GERADORAS DE EFLUENTES COM ELEVADA CARGA ORGÂNICA

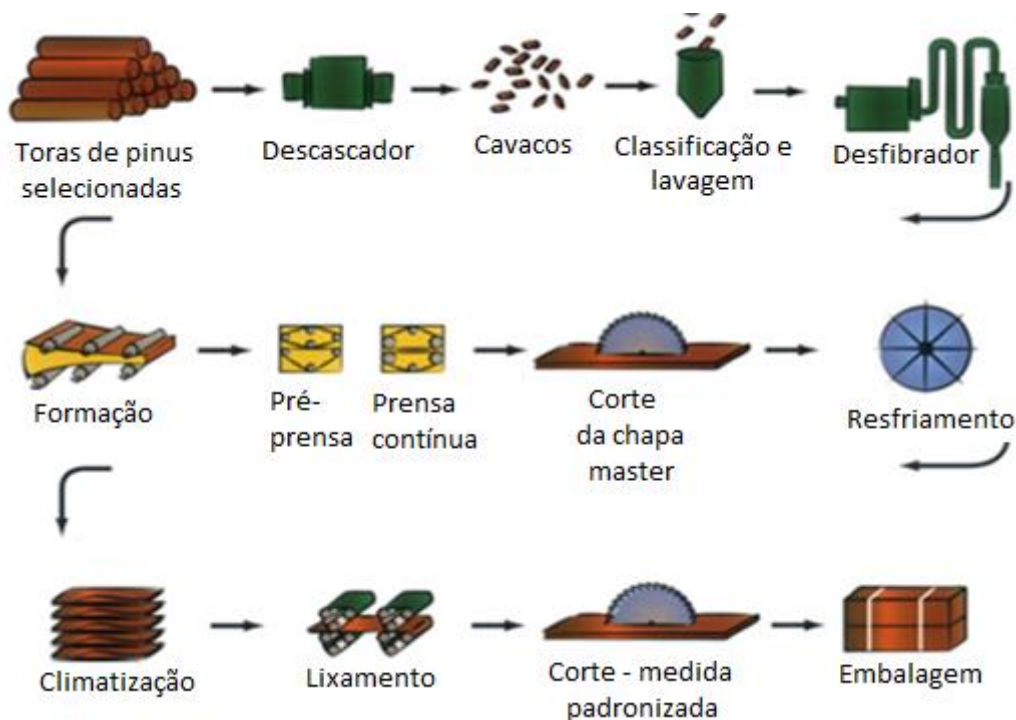
De acordo com a ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – a produção de papel e celulose no Brasil é expressiva e apresenta elevado volume de produção, sendo responsável pela geração de toneladas de efluentes: somente em um dia, este setor industrial é capaz de liberar 62 milhões de metros cúbicos de efluentes, que se forem descartados sem tratamento e de maneira incorreta, podem impactar gravemente o meio ambiente (PERALTA-ZAMORA et al., 1997, apud SANT'ANNA, 1992).

O principal processo utilizado na obtenção da celulose e conversão da mesma em papel é o denominado Kraft. Neste processo ocorrem as etapas de preparação e corte da madeira, cozimento, lavagem alcalina, branqueamento, secagem, embalagem e fabricação de papel (GAUTO; ROSA, 2011). As etapas que mais geram efluentes são a de cozimento e branqueamento: do cozimento resultam efluentes com elevada DBO e baixas concentrações de oxigênio dissolvido; do branqueamento resultam efluentes coloridos, tóxicos e resistentes à degradação (SILVEIRA, 2010).

Outro processo que libera efluente de elevada carga orgânica é a produção de painéis de madeira de fibra de média densidade, denominados MDF (Medium Density Fiberboard). A produção em larga escala de MDF iniciou na América do Norte e Europa na década de 80 e atualmente esse painel é utilizado principalmente na fabricação de móveis, apresentando um aumento significativo no consumo entre os anos de 1995 e 2005, de aproximadamente 18%. O MDF foi fabricado primeiramente pela Duratex no Brasil e, atualmente, cinco empresas – Duratex, Tafisa, Masisa, Placas do Paraná e Fibraplac –

produzem esse tipo de painel nas regiões Sul e Sudeste do país. O processo de fabricação de MDF pode ser dividido em várias etapas, como apresentado na Figura 1 (MARÍA, 2016; MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

**Figura 1 – Processo de fabricação de painel MDF.**



Fonte: AECWeb.

Primeiramente ocorre o descascamento da madeira, seguida da fragmentação das toras para obter cavacos, que são separados através de peneiramento. Os cavacos são armazenados em silos, passando por lavagens, recebendo em seguida tratamento por meio do cozimento, a fim de amolecer as fibras da madeira, enfraquecer as ligações da lignina entre as fibras e facilitar a formação da polpa. A etapa seguinte é o desfibramento, que faz uso da força centrífuga, e então segue a mistura de resina, na qual se misturam à matéria-prima os aditivos, resina e catalisador (MEYER, 2012; STADLER et al, 2009).

Em seguida, ocorre a secagem das fibras, na qual a porcentagem de água da madeira é reduzida. Essa etapa tem como finalidade a redução de problemas na prensagem dos painéis. As fibras seguem para a etapa de entrelaçamento e então para o seccionamento, etapa responsável por operações que vão dar o formato do painel de MDF. Na etapa seguinte, a de



prensagem, ocorre a injeção de vapor, que objetiva uma cura eficiente da resina. Então, a chapa é resfriada, e por fim passa para a etapa de corte e lixamento (MEYER, 2012; STADLER et al, 2009).

Segundo Meyer (2012), as etapas do processamento de MDF que geram despejo líquido são as de descascamento, preparação e tratamento/cozimento. No descascamento, ocorre a fricção entre as toras e um tambor giratório, que resulta na ruptura das cascas. Para separar as cascas, jatos d'água são lançados, gerando efluente contendo particulados e elevada quantidade de material orgânico.

Antes da fragmentação, as toras são lavadas, gerando novamente efluente com particulados. No tratamento, a madeira é disposta em tanques com soluções aquosas de hidróxido de sódio aquecidas, gerando efluente de pH alcalino e elevada carga orgânica devido à quebra da lignina, que é o ligante que confere firmeza e rigidez às fibras, mantendo-as unidas e formando a estrutura da madeira (MEYER, 2012; GAUTO; ROSA, 2011).

O efluente gerado no processo apresenta elevada DQO, que pode variar de 30.000 a 40.000 mgO<sub>2</sub>/L e, para cada m<sup>3</sup> de painel produzido, consome-se aproximadamente 1,52 m<sup>3</sup> de água. Uma grande dificuldade no tratamento do efluente proveniente da produção de painéis de MDF é a definição das características físico-químicas desse resíduo, uma vez que a composição química das madeiras não é constante, devido a sua dependência com a composição do solo e mudanças climáticas. Uma certeza é a impossibilidade de descartar esse resíduo na rede de esgoto e no meio ambiente (MARÍA, 2016; MEYER, 2012; BORBA; SOTTORIVA; MÓDENES, 2008).

### 3.2 TRATAMENTOS DE EFLUENTE

A principal consequência do lançamento do efluente não tratado em corpos receptores aquáticos é o desequilíbrio desse ambiente, resultando na mortalidade de espécies que ali habitam, na eutrofização de algas e redução do oxigênio. Se descartado em águas utilizadas para consumo humano, as consequências são ainda mais graves: podem resultar em doenças como

cólera, disenteria, amebíase, entre outras, além de contaminação (TERA AMBIENTAL, 2013). No Brasil, segundo a Resolução nº 430 do CONAMA (BRASIL, 2011), o efluente só pode ser liberado em corpos receptores se passar por tratamento e, após a conclusão deste, obedecer aos padrões estabelecidos nas legislações. As condições de lançamento de efluente de acordo com a Resolução e com o Instituto Ambiental do Paraná – IAP – seguem na Tabela 1.

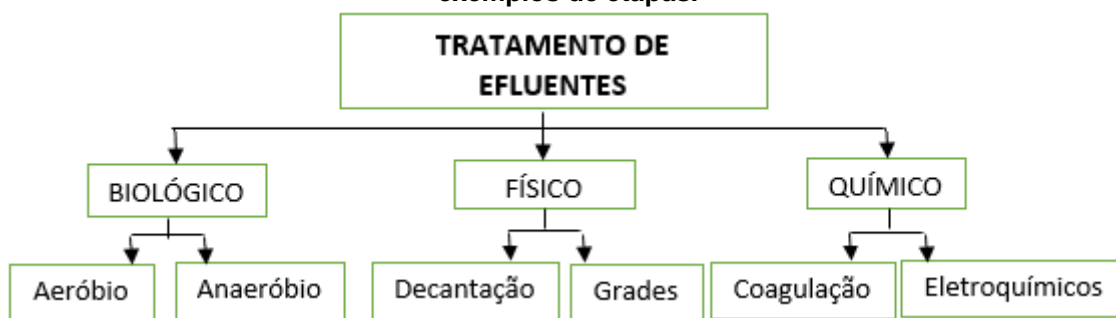
**Tabela 1 – Condições de lançamento de efluente**

<b>Parâmetro</b>	<b>Limite aceito</b>
pH	5 a 9
Temperatura	Inferior a 40°C
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L
Vazão máxima de lançamento	1,5 vez a vazão do período de atividade diária do agente poluidor
Óleos minerais	Até 20 mg/L
Óleos vegetais e gorduras animais	Até 50 mg/L
Materiais flutuantes	Ausente
DBO <sub>5</sub>	Remoção mínima de 60%; limite de 50 mg/L
DQO	Até 150 mg/L

**Fonte: adaptado de CONAMA (2011) e IAP.**

Assim, se tornou necessário o tratamento de efluente gerado em atividades industriais. As características físico-químicas e biológicas da água são levadas em conta para escolher qual o tratamento indicado para o efluente, e esse tratamento pode ser físico, químico ou biológico, sendo cada tratamento composto por uma série de etapas (SILVEIRA, 2010; GAUTO; ROSA, 2011). A Figura 2 ilustra alguns dos tratamentos que o efluente pode receber.

**Figura 2 – Organograma dos tipos de tratamentos de efluentes contendo exemplos de etapas.**



Fonte: Adaptado de Rosa (2004).

No tratamento físico estão envolvidas operações unitárias em que a força física é predominante, como as etapas de gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração. Os tratamentos químicos baseiam-se na redução de contaminantes pela adição de reagentes ou ocorrência de reações químicas, sendo exemplos as etapas de coagulação, eletrocoagulação e processos oxidativos avançados. Por sua vez, nos tratamentos biológicos ocorre a remoção de contaminantes devido à atividade biológica, podendo utilizar tratamentos aeróbios (no qual os microrganismos necessitam de oxigênio para agir), anaeróbios (que ocorrem na ausência de oxigênio) e enzimáticos (ROSA, 2004; VON SPERLING, 1996).

Comumente, o efluente é tratado por meio de uma combinação de tratamentos, buscando maior eficiência na remoção de poluentes, dado que cada tratamento pode retirar determinadas partículas, matérias e até mesmo organismos. O tratamento final total então pode ser dividido em etapas, que são compostas pelo tratamento preliminar, primário, secundário e terciário (MEYER, 2012; GAUTO; ROSA, 2011).

O tratamento preliminar tem como objetivo remover os sólidos suspensos e decantáveis do efluente. O primário, retirar o material em suspensão não grosseiro. O secundário seria o tratamento biológico, que tem como finalidade remover a matéria orgânica suspensa ou solúvel por meio da ação de microrganismos. Utiliza-se o tratamento terciário quando deseja-se remover substâncias que não foram removidas até então, como nutrientes (GAUTO, ROSA; 2011).

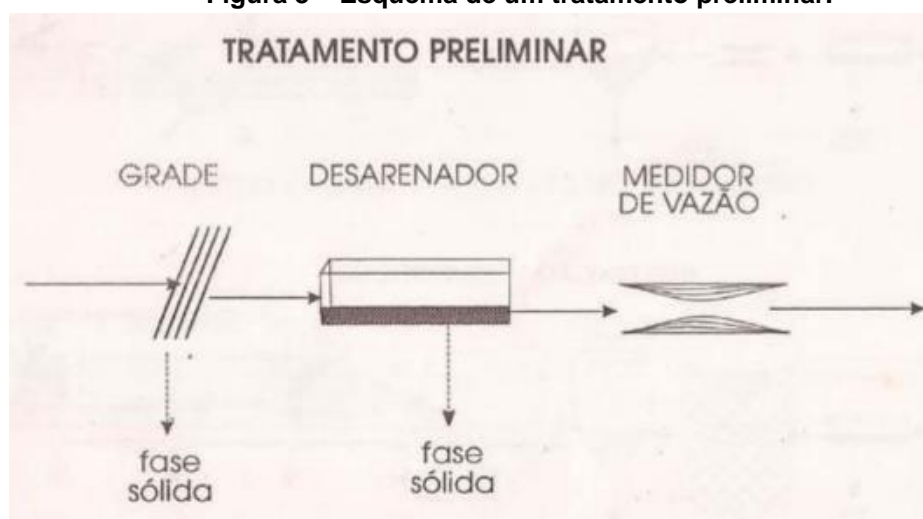
Um tratamento que pode ser utilizado aliado a outros para melhorar a qualidade do efluente é o de biossorção, que consiste na remoção de

substâncias em biomassa viva ou morta. As biomassas que se ligam às substâncias são denominadas biossorventes (SILVA; PIETROBELLI, 2017; SILVA; ZANUTTO, 2016).

### 3.2.1 Tratamentos de efluente industrial via processos físicos e químicos

Para melhorar as características do efluente, pode-se realizar o tratamento preliminar, que visa eliminar sólidos grosseiros e decantáveis, como a areia, lascas de madeira, entre outros. Nessa etapa é utilizado o sistema de gradeamento, que consiste em grades espaçadas para reter os sólidos e permitir a passagem do fluido. Em seguida, se faz uso do desarenador, em que o efluente passa por caixas de areia nas quais ocorre a sedimentação: os sólidos, por serem mais pesados, se aglomeram no fundo do tanque, enquanto a matéria orgânica continua em suspensão e segue para as etapas seguintes (VON SPERLING, 1996; GAUTO; ROSA, 2011).

**Figura 3 – Esquema de um tratamento preliminar.**



**Fonte: Von Sperling (1996).**

Depois de passar pelo tratamento preliminar, uma opção de tratamento do efluente é o tratamento primário composto por processos físico-químicos de coagulação e sedimentação. As etapas convencionais deste tratamento são de correção do pH, coagulação, floculação, decantação ou sedimentação. Este tratamento é utilizado principalmente para separar partículas em suspensão fina, como a matéria orgânica, auxiliando na remoção da cor e turbidez (MEYER, 2012).

De acordo com Meyer (2012), o pH do efluente deve estar numa faixa ótima, determinada pela ação dos agentes coagulantes, com a finalidade de otimizar a coagulação e floculação. O pH então deve ser analisado e, se necessário, corrigido antes de começar qualquer tratamento, visando a eficiência das etapas e a otimização do processo, uma vez que, se o despejo líquido estiver com o pH adequado, a coagulação ocorrerá em um curto período de tempo e economizará reagentes. Essa correção pode ser feita a partir da adição de cal hidratada, carbonato de cálcio, carbonato de sódio, hidróxido de sódio, gás carbônico, ácido clorídrico, ácido sulfúrico, entre outros.

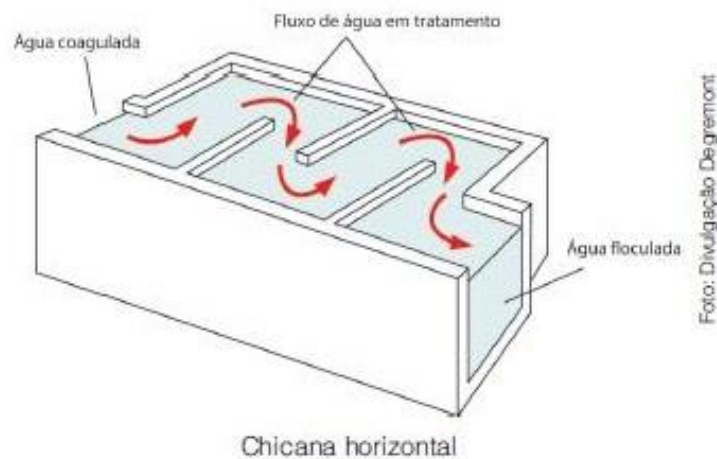
Uma característica do efluente é apresentar substâncias coloidais – partículas com diâmetros na faixa de 1 a 100 nanômetros – que são pequenas demais para precipitar e sedimentar no tratamento preliminar de sedimentação, muito menos são retidas no gradeamento. Essas partículas possuem a mesma carga elétrica e sofrem repulsão entre si, impedindo que se aproximem a ponto de se chocar, o que permitiria a formação de partículas maiores que poderiam sedimentar pela ação da gravidade. Como precedente à sedimentação, nesses casos, é utilizada a coagulação: reagentes coagulantes são adicionados ao efluente, reagindo e neutralizando a carga das partículas, o que permite o choque entre elas e a formação de aglomerados (GAUTO; ROSA, 2011; HARRIS, 2010).

A coagulação química é amplamente utilizada para tratar soluções coloidais e oleosas, visto que a adição de sais inorgânicos auxilia na desestabilização dessas soluções. O agente coagulante mais utilizado é o sulfato de alumínio, que em solução aquosa é hidrolisado. Na forma hidrolisada,  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ , é um ácido que reage com as bases encontradas no resíduo líquido, resultando numa redução do pH, que inicialmente deve estar numa faixa de 5 a 7,5. Muitas vezes, após utilizar esse agente, é necessário corrigir o pH novamente. Outro sal que pode ser utilizado é o cloreto férrico, que neutraliza cargas negativas presentes no efluente, formando hidróxidos insolúveis de ferro. A desvantagem no uso desses sais é a contaminação do lodo – material orgânico residual da coagulação e floculação (RUBÍ-JUÁREZ *et al*, 2015; GAUTO; ROSA, 2011; MANAHAN, 2013; VAZ *et al*, 2010).

Após as partículas do efluente sofrerem desestabilização na coagulação, este é encaminhado para a floculação. Para que haja maior

contato entre as partículas e aumente o volume de flocos, na floculação ocorre agitação do líquido, provocada por agitadores mecânicos ou chicanas – espécies de barreiras existentes no floculador que obrigam o efluente a desviar seu percurso (GAUTO; ROSA, 2011).

**Figura 4 – Tanque de floculação.**



**Fonte: Rubim (2013).**

Na etapa seguinte ocorre a sedimentação, na qual o fluido contendo os flocos resultantes das etapas de coagulação e floculação é conduzido para decantadores ou tanques de sedimentação, onde ocorrerá a separação dos flocos e do fluido devida a ação da gravidade e inércia. Nesses tanques, o fluido se desloca lentamente, ficando retidos por horas, para que os flocos possam sedimentar no fundo (GAUTO; ROSA, 2011; MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Uma alternativa aos métodos convencionais citados é a eletrocoagulação/flotação, processo eletroquímico que desestabiliza as partículas suspensas no efluente a partir de uma corrente elétrica. Esse método tem como vantagem o uso de equipamentos simples, de fácil manuseio, necessitando de uma fonte de corrente contínua, eletrodos (feitos a partir de metais como alumínio, cobre, ferro) e um reator com agitação. A corrente elétrica aplicada no reator contendo efluente age como coagulante, formando íons catiônicos e aniônicos, que coagulam os poluentes. Os íons metálicos reagem com diferentes íons e a agitação promove a interação entre esses, auxiliando na floculação, permitindo a remoção de diversos poluentes,

como tinturas, metais pesados e substâncias orgânicas. A eletrocoagulação/flotação depende da corrente elétrica, condutividade do fluido e do tempo de eletrólise, ou seja, tempo necessário para a decomposição do efluente (NAJE *et al*, 2015; RUBÍ-JUÁREZ *et al*, 2015; VALENTE; MENDONÇA; PEREIRA, 2015).

Por fim, pode-se realizar o tratamento terciário, que é utilizado para se obter efluente tratado de qualidade superior, retirando microrganismos e nutrientes (como o nitrogênio e fósforo). Como exemplos de etapas de tratamentos terciários temos a filtração, desinfecção e desnitrificação (GAUTO; ROSA, 2011).

Outro processo que pode ser aplicado como tratamento terciário é o de biossorção, que consiste na ligação de uma fase líquida (o efluente) contendo uma espécie dissolvida que é o adsorvato (poluentes) à uma fase sólida – biomassa (materiais sólidos de origem natural e seus derivados). Ou seja, componentes da fase líquida são sequestrados para a superfície do biossorvente (biomassa). Vários materiais podem ser utilizados como biossorvente, como a torta de chia, que é o resíduo orgânico da extração de semente de chia, e o bagaço de malte, um subproduto da indústria cervejeira (SILVA; PIETROBELLI, 2017; SILVA; ZANUTTO, 2016; PIETROBELLI, 2007).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de efluente utilizadas para o estudo foram coletadas no mês de maio do ano de 2017, segundo a Norma ABNT NBR 9898:1987 – Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores, numa indústria de processamento de painéis MDF da região dos Campos Gerais, no Paraná. O volume de amostras coletado foi de 20 litros, guardados em um galão de plástico de 10 litros e dois galões de 5 litros, sob refrigeração de  $5\pm 2^{\circ}\text{C}$ , na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Os parâmetros avaliados do efluente foram o pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Primeiramente, mediu-se o pH das amostras com o auxílio de um peagâmetro digital para verificar se o mesmo estava na faixa de 5 a 7,5, na qual os agentes coagulantes a ser testados reagem. Se necessário corrigir o pH antes de realizar os tratamentos físico-químicos com hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).

Para a análise de DQO, utilizou-se o método Hach de reator digestor aprovado pela Agência Nacional de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) para efluente, executado por meio do kit adquirido comercialmente. As amostras analisadas foram diluídas e homogeneizadas e, para cada análise de DQO, foi colocado 2 mL da diluição no tubo de digestão. Um branco foi preparado da mesma forma, substituindo a amostra por água deionizada. Os tubos foram colocados no reator DRB 200 já aquecido na temperatura de  $150^{\circ}\text{C}$ , durante 2 horas. Passadas as 2 horas e após os tubos resfriarem, foi realizada a leitura no espectrofotômetro na faixa alta de 620 nanômetros. Essa análise foi realizada em todos os experimentos para determinação da eficiência de cada método com base na porcentagem de remoção da DQO.

A DBO foi medida pelo método respirométrico simplificado Oxitop® (Merck), no qual as amostras foram transferidas para garradas âmbar com



nutrientes e microrganismos, sob temperatura controlada e agitação, de forma que o oxigênio presente nesse sistema se dissolvesse e fosse respirado pelos microrganismos, liberando dióxido de carbono. O dióxido de carbono foi absorvido em um reservatório de borracha que contém hidróxido de sódio, resultando em uma diferença de pressão na garrafa, medida digitalmente pelo sensor Oxitop. Devido ao tempo necessário de 5 dias para realizar a DBO, essa análise foi realizada somente para caracterizar o efluente bruto e no tratamento que apresentou melhor resultado (APHA, 1998).

#### 4.2 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS CONVENCIONAIS

Para o método convencional de coagulação utilizou-se dois agentes coagulantes: o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. Os ensaios experimentais foram realizados com o auxílio de um agitador mecânico, para reproduzir em escala laboratorial os processos de coagulação e floculação. A função do agitador é promover agitação rápida e moderada nas amostras, facilitando assim a formação de flocos com a matéria orgânica presente na água analisada. Já a sedimentação ocorreu devido ação da gravidade, ao deixar o fluido em repouso. Os ensaios foram realizados em triplicatas para diferentes concentrações de agentes coagulantes, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Agentes coagulantes e concentrações utilizadas nos ensaios.**

<b>Agentes coagulantes</b>	<b>Concentrações (ppm)</b>		
<b>Sulfato de alumínio</b>	200	500	800
<b>Cloreto férrico</b>	200	500	800

Fonte: Autoria própria.

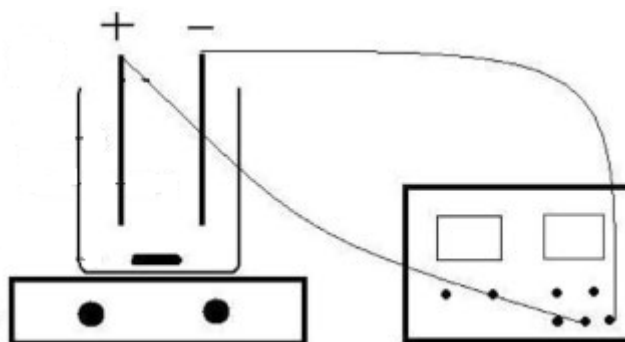
As condições e concentrações utilizadas foram determinadas a partir de experimentos iniciais, após avaliação dos resultados obtidos. Cada ensaio teve um Tempo de Movimentação Rápida (TMR) de 15 segundos com gradiente de velocidade de 300 rpm, para a homogeneização da solução com o agente coagulante, caracterizando a etapa de coagulação. Em seguida, realizou-se a floculação, com Tempo de Movimentação Lenta (TML) de 15 minutos e gradiente de velocidade de 100 rpm. Por fim, o tempo de

sedimentação foi de 40 minutos. Todas as etapas ocorreram em temperatura ambiente e, para determinar qual a melhor concentração e o melhor reagente para o tratamento do efluente em questão, analisou-se a porcentagem de remoção de DQO obtida pela média aritmética simples das triplicatas em cada ensaio.

#### 4.3 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS ELETROQUÍMICOS.

Antes de realizar o tratamento eletroquímico, mediu-se a condutividade do efluente com o auxílio de um condutivímetro para verificar se haveria condução significativa da eletricidade. Para a realização dos experimentos de eletrocoagulação/flotação, foi utilizado um béquer com volume de 1 litro, agitação suave manual e sistema de eletrodos formado por duas placas de alumínio com dimensões de 11 cm x 6,5 cm, espaçadas entre si por 6 cm, conectadas por cabos de cobre a uma fonte de corrente contínua DC Power Supply MPL-1305M, marca Minipa. A Figura 5 representa o sistema montado para o tratamento eletroquímico.

**Figura 5 – Sistema utilizado na eletrocoagulação/floculação.**



**Fonte: Meneses et al (2012).**

Para este, colocou-se 700 mL de amostra do efluente bruto no reator e inseriu-se os eletrodos, que estavam conectados à fonte pelos cabos com plugs do tipo jacaré, resultando em uma placa que conduziria corrente positiva (eletrodo positivo) e a outra a corrente negativa (eletrodo negativo). A aplicação da corrente ocorreu durante 30 minutos e a decantação, realizada pelo efeito da gravidade, durante 1 hora. Para analisar o efeito deste tratamento foram

realizados dois ensaios em triplicatas: um com tensão de 10 V e outro com tensão de 20 V. As condições do tratamento eletroquímico foram estabelecidas devido a limitação da fonte de energia utilizada.

Para determinar a eficiência dos ensaios e comparar os resultados obtidos foram analisadas as porcentagens de remoção de DQO obtidas em cada ensaio, efetuando a média aritmética simples das triplicatas.

#### 4.4 TRATAMENTO EM SÉRIE: ELETROQUÍMICO, CONVENCIONAL E BIOSSORÇÃO.

Por fim, foi realizado um tratamento em série com as melhores faixas obtidas do tratamento eletroquímico e convencional, seguido do tratamento de bioissorção com dois bioissorventes separadamente – a torta de chia e o bagaço de malte – para analisar a remoção da coloração do efluente. O tratamento em série foi realizado em duplicatas, sendo os de bioissorção realizados novamente em duplicatas para cada duplicata já existente.

Como tratamento primário, realizou-se o eletroquímico (conforme descrito no item 3.3) com a faixa de tensão que apresentou melhor desempenho no efluente bruto. Após a decantação, retirou-se o volume de 300 mL e realizou-se o tratamento convencional (conforme descrito no item 3.2) com o agente coagulante que obteve maior remoção de DQO. Terminado esse tratamento, foi retirada uma alíquota de 100 mL de cada duplicata, para a realização da bioissorção com torta de chia e com o bagaço de malte.

Para cada duplicata, foram realizados quatro experimentos de bioissorção: dois utilizando de bagaço de malte e dois com de torta de chia. Os bioissorventes foram previamente secos e triturados e, antes de iniciar o processo de bioissorção foi medido o pH do efluente e corrigido para 2 com a adição de HCl concentrado, pois estudos de Silva e Pietrobelli (2017) e Silva e Zanutto (2016) apontaram essa faixa como a que apresentou maior remoção de corantes. Então, colocou-se o volume de 25 mL do efluente parcialmente tratado em um erlenmeyer de 150 mL contendo 0,15 g de bioissorvente, submetendo-o à agitação de 150 rpm e temperatura de 30°C °C em uma incubadora tipo shaker orbital (durante 10 minutos para os experimentos com

torta de chia e durante 6 horas contendo bagaço de malte). Passados os tempos de agitação, as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm durante 10 minutos, para que fosse realizada a leitura do sobrenadante em espectrofotômetro UV-Vis, na faixa de comprimento de onda de 200 a 700 nanômetros. Todas as condições definidas para o processo de bioissorção foram baseadas nos trabalhos de Silva e Pietrobelli (2017) e Silva e Zanutto (2016).

Para análise do tratamento em série, realizou-se a leitura de DQO de cada experimento e a porcentagem de redução obtida. Para a etapa de bioissorção foram plotados os gráficos dos valores de absorbância obtidos nas varreduras do espectrofotômetro na faixa UV-Vis e calculadas as áreas de cada experimento – antes e após a bioissorção – para analisar a porcentagem de remoção do poluente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram representados por meio de tabelas, quadros e gráficos. A seguir, serão apresentados e discutidos.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Inicialmente foi medido os valores de pH, DQO e DBO do efluente bruto, obtendo os valores apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Caracterização inicial do efluente bruto.**

pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)
6,70	130.000	27.000

**Fonte: Autoria própria.**

Percebe-se que a DQO medida apresenta valor 3,25 vezes mais elevado que o máximo de 40.000 mg/L encontrado na literatura por María (2016) e aproximadamente 867 vezes maior que o permitido na legislação (150 mg/L) para lançamento do efluente. Por ser um efluente industrial, sua carga poluidora é muito maior que um efluente gerado em escala laboratorial, trazendo maior desafio para tratá-lo. Uma justificativa para a diferença entre o valor real e o encontrado na literatura se deve ao fato da carga do efluente variar de acordo com a matéria-prima utilizada, desde a espécie da madeira até os aditivos químicos.

Como o pH estava dentro da faixa ótima – entre 5 e 7,5 – em que ocorre o tratamento com adição de agentes coagulantes, não foi necessário corrigi-lo. Para a leitura de DQO e DBO foi necessário realizar sucessivas diluições da amostra, devido limitação dos equipamentos para valores tão elevados.

A condutividade elétrica do efluente foi medida por um condutivímetro digital, com valores variando entre 10,71 mS (líquido recém tirado da geladeira) e 12,86 mS (líquido em temperatura ambiente de 22,6°C). A condutividade indica que o efluente é capaz de conduzir energia e, portanto, o processo eletroquímico poderá ser aplicado.

## 5.2 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS CONVENCIONAIS

Para o método convencional de coagulação utilizou-se dois agentes coagulantes: o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. O sulfato de alumínio não apresentou mudanças ao entrar em contato com a luz e calor ambiente, sendo de fácil manuseio. Já o cloreto de ferro, ao ser exposto à luz e temperatura ambiente, condensava levemente, sendo depositado nas paredes do béquer e na superfície do agitador, principalmente nas maiores concentrações (500 e 800 ppm) do agente. O acúmulo de cloreto férrico no agitador pode ser visualizado na Figura 6.

**Figura 6 – Cloreto férrico acumulado na superfície do agitador.**



Fonte: Acervo pessoal.

Ao iniciar o tratamento de coagulação com adição de agentes coagulantes o efluente rapidamente espumava, mas essa espuma dissolvia ao fim da decantação. Visualmente não era perceptível qualquer mudança no

estado do efluente: não ocorria formação de flocos e não havia clareamento significativo na coloração do líquido. Porém, ao realizar as análises de DQO, constatou-se que houve clareamento em relação à diluição da amostra bruta (Figura 7).

**Figura 7 – Diluição do efluente bruto (esquerda) e diluição do efluente tratado com adição de 200 ppm de cloreto férrico (direita).**



Fonte: Acervo pessoal.

Para interpretação e análise dos resultados foi medida a DQO de cada experimento, conforme descrito na seção 4.1. Os resultados estão apresentados na Tabela 4 para o sulfato de alumínio.

**Tabela 4 – Resultados obtidos nos tratamentos convencionais com adição de sulfato de alumínio.**

Concentração (ppm)	Ensaio	DQO (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Média de remoção (%)
200	I – A	63.000	51,54	50,51 ± 0,89
	I – B	65.000	50	
	I – C	65.000	50	
500	II – A	43.000	66,92	64,62 ± 2,03
	II – B	48.000	63,08	
	II – C	47.000	63,85	
800	III – A	55.000	57,69	56,92 ± 0,77
	III – B	56.000	56,92	
	III – C	57.000	56,15	

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o tratamento com adição de sulfato de alumínio apresentou remoção superior a 50% em todas as condições, sendo a melhor concentração de 500 ppm.

Os dados obtidos com a adição de cloreto férrico estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Resultados obtidos nos tratamentos convencionais com adição de cloreto férrico.**

Concentração (ppm)	Ensaio	DQO (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Média de remoção (%)
200	I – A	26.000	80	
	I – B	31.000	76,15	78,21 ± 2,72
	I – C	28.000	78,46	
500	II – A	62.000	52,31	
	II – B	70.000	46,15	51,79 ± 5,40
	II – C	56.000	56,92	
800	III – A	77.000	40,77	
	III – B	68.000	47,69	44,87 ± 3,63
	III – C	70.000	46,15	

Fonte: Autoria própria.

Apesar de apresentar os valores menos satisfatórios de remoção em sua maior concentração, o cloreto férrico em sua menor concentração apresentou a melhor média de remoção dentre os ensaios de coagulação/floculação com adição de agente coagulante. Provavelmente, devido ao elevado acúmulo de cloreto férrico nas extremidades, os valores obtidos entre as triplicatas não foram tão próximos quanto os obtidos com o sulfato de alumínio.

O cloreto férrico apresenta um custo de mercado (R\$ 21,50/250 gramas) maior que o sulfato de alumínio (R\$ 12,00/250 gramas), porém o primeiro apresentou melhor desempenho e em menor quantidade, o que o torna mais viável economicamente.

Diversos autores estudaram o uso de agentes coagulantes para o tratamento convencional de efluentes. Jerônimo (2012) atingiu uma porcentagem de remoção de 43% da DQO de um efluente têxtil com DQO inicial de 4.006 mg/L, aplicando o tratamento com sulfato de alumínio em



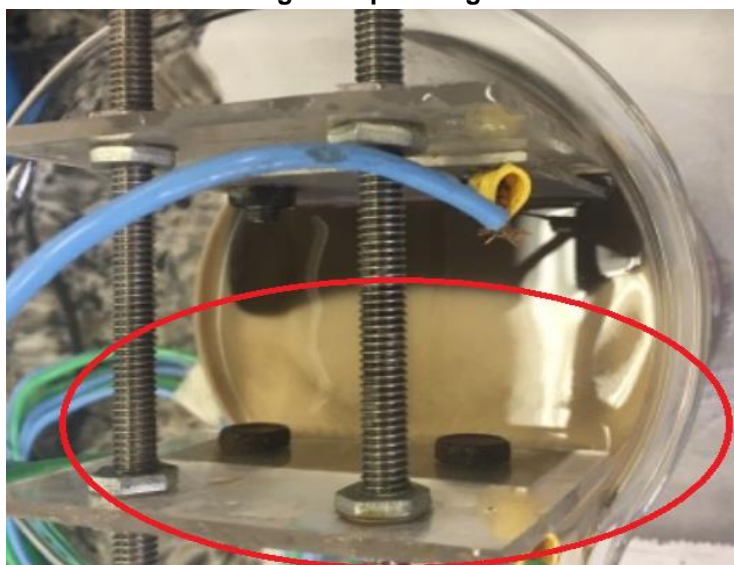
diferentes condições. Peralta et al (2015) obtiveram 29% de remoção da DQO, que inicialmente era 8.763 mg/L, de um efluente de indústria alimentícia de doces tratado com adição de sulfato de alumínio e o agente floculante Metil Azoteto de Glicidila. Comparando os valores obtidos no presente estudo com os dos autores citados, percebe-se que foram atingidos resultados ainda mais satisfatórios que os anteriormente citados.

Ainda que a porcentagem de remoção desse estudo seja próxima a 80% é necessário buscar métodos complementares ou alternativos para atingir os padrões mínimos exigidos pela legislação. Para o efluente testado, seria necessária uma remoção de aproximadamente 99,89% de DQO para que atingisse o limite máximo (150 mg/L) para descarte permitido por lei.

### 5.3 TRATAMENTO PRIMÁRIO VIA PROCESSOS ELETROQUÍMICOS

No tratamento eletroquímico, foi utilizada uma fonte de corrente contínua que fornecia corrente positiva para uma placa e negativa para a outra. Assim que iniciada a condução, partículas do efluente começaram a acumular nas placas – independente da tensão aplicada –, conforme indica a Figura 8. O polo que atraiu maior volume de cargas foi o negativo.

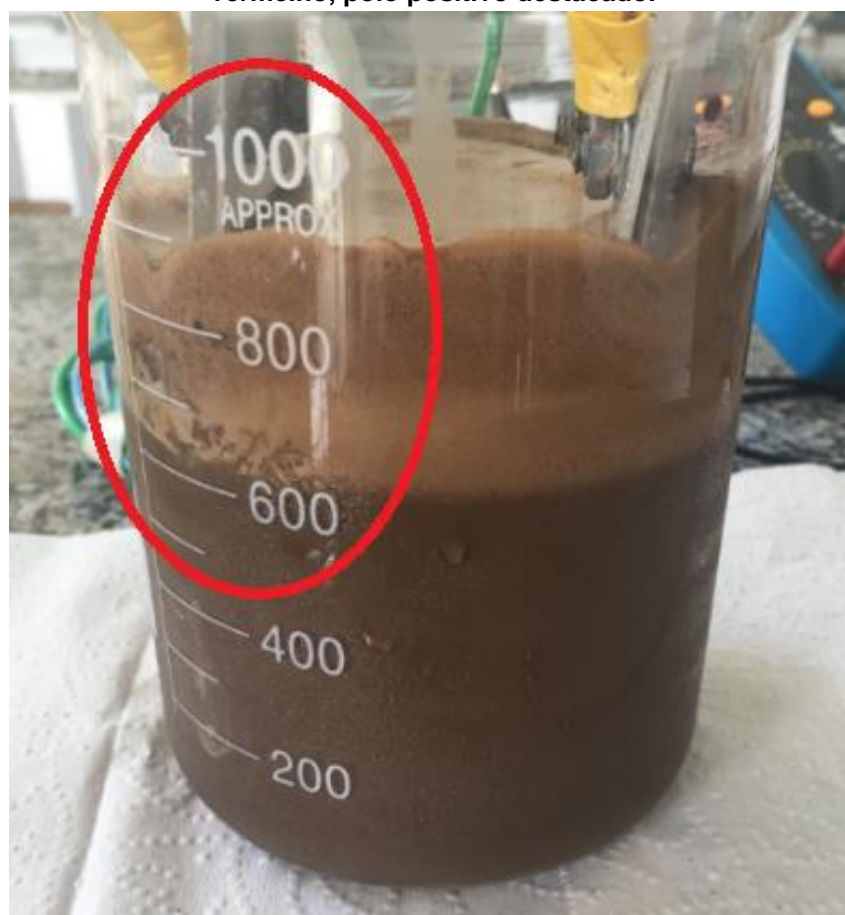
**Figura 8 – Início do tratamento eletroquímico com tensão de 10 V. Em destaque, acúmulo de cargas no polo negativo.**



Fonte: Acervo pessoal.

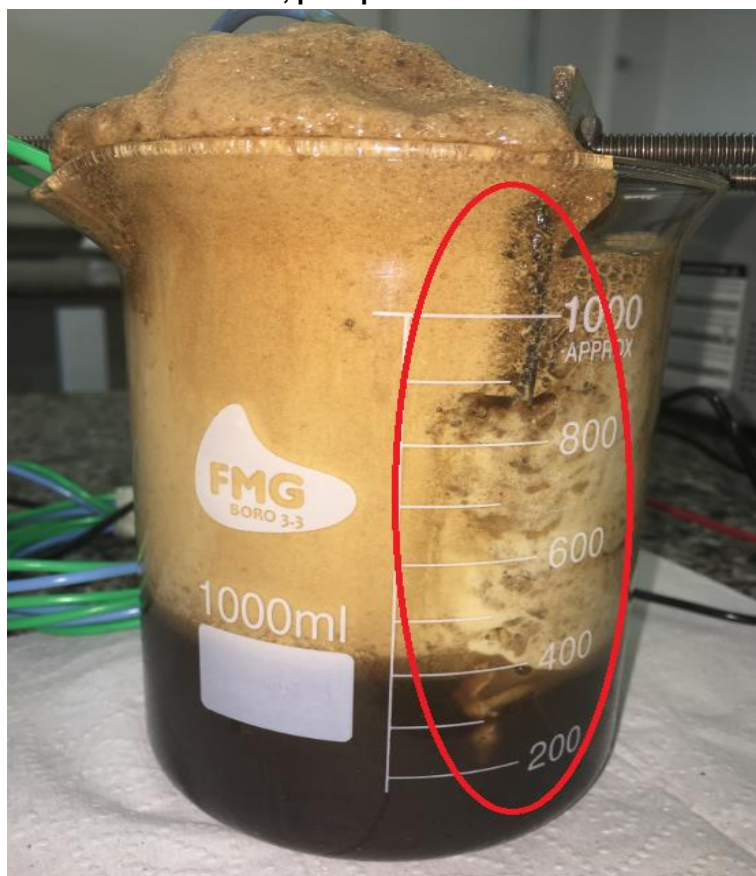
Durante a aplicação de corrente, a espuma continuou sendo formada e as partículas continuaram acumulando na superfície das placas de alumínio. Percebeu-se que o polo negativo atraía maior volume de partículas, porém as partículas atraídas pelo polo positivo eram maiores e mais densas. O líquido também esquentou durante o procedimento, principalmente para os ensaios com o maior valor de tensão. O volume de espuma aumentou de acordo com a tensão aplicada, sendo o volume final de espuma menor para a tensão de 10 V (Figura 9) que para a tensão de 20 V (Figura 10); esse fato ocorreu devido ao aumento de energia elétrica aplicada. Também pôde-se notar a deposição de flocos ao fim do período de decantação para os ensaios com maior valor de tensão – mostrado na Figura 11 – ainda que existisse grande quantidade de espuma. A espuma formada era densa e exalava mau odor. Seguem imagens dos experimentos.

**Figura 9 – Efluente após tratamento eletroquímico com aplicação de tensão de 10 V. Em vermelho, polo positivo destacado.**



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 10 – Efluente após tratamento eletroquímico com aplicação de tensão de 20 V. Em vermelho, polo positivo destacado.**



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 11 – Flocos depositados no fundo do béquer após decantação (experimento com 20 V).**



Fonte: Acervo pessoal.

Embora visualmente mais eficiente, o processo eletroquímico com tensão de 20 V foi mais difícil de aplicar, pois demorou para atingir 20 V e, mesmo depois de conseguir, não estabilizou, variando entre 15,5 V e 20 V. Outro detalhe importante de ressaltar é a variação da corrente medida em amperes: para ambos valores de tensão, a corrente aplicada oscilava para manter a voltagem desejada.

Para determinar o melhor valor de tensão, foi medida e analisada a DQO, calculando a porcentagem de remoção obtida em cada tratamento. Seguem os valores na Tabela 6.

**Tabela 6 – Resultados obtidos nos tratamentos eletroquímicos.**

Tensão	Ensaio	Variação da corrente (A)	DQO (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Média de remoção (%)
<b>10 V</b>	I – A	0,60 – 0,94	72.000	44,62	39,49 ± 5,63
	I – B	1,10 – 1,15	77.500	40,38	
	I – C	1,06 – 1,29	86.500	33,46	
<b>15,5 V – 20 V</b>	II – A	2,04 – 2,73	41.500	68,08	70,51 ± 4,21
	II – B	1,64 – 2,82	41.500	68,08	
	II – C	0,89 – 2,17	32.000	75,38	

**Fonte: Autoria própria.**

A melhor faixa de remoção foi obtida pela tensão que variou entre 15,5 – 20 V, porém não apresentou melhor resultado que o cloreto férrico em concentração de 200 ppm. Apesar de não apresentar melhores valores de remoção, o tratamento eletroquímico foi o único em que pôde-se verificar a formação e deposição de flocos e provavelmente teria maior remoção com um tempo elevado de decantação.

Aplicando o tratamento de eletrocoagulação/floculação, os autores Meneses et al (2012) obtiveram remoção de 45% da DQO de um efluente da produção de biodiesel; Valente, Mendonça e Pereira (2015) reduziram em 57% a DQO (inicialmente variando entre 2.060 e 5.249 mg/L) de efluente proveniente de indústria de derivados de leite e Naje et al (2015) atingiram uma remoção de 76% da DQO (inicialmente 985 mg/L) de um efluente de indústria têxtil.

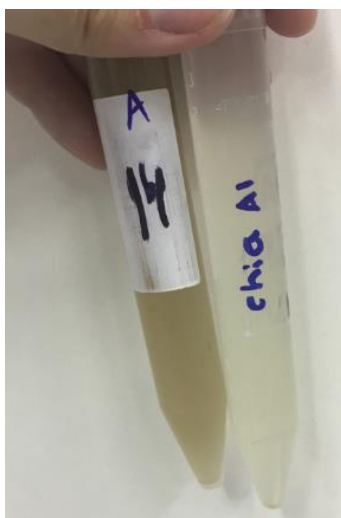
Ao comparar os resultados obtidos no presente estudo com os dos autores citados, percebe-se que aplicando a tensão entre 15,5 V e 20 V um melhor desempenho em geral foi atingido. Embora Naje et al (2015) tenham apresentado melhores resultados, deve-se levar em consideração a diferença da DQO analisada: a tratada nesse trabalho é mais de 131 vezes maior.

#### 5.4 TRATAMENTO EM SÉRIE: ELETROQUÍMICO, CONVENCIONAL E BIOSSORÇÃO

A partir dos valores obtidos com os experimentos anteriores foi proposto um tratamento em série: primeiramente o tratamento eletroquímico, seguido do tratamento convencional com adição de 200 ppm de cloreto férrico e então retirada a alíquota do efluente tratado para a etapa de bioissorção. Para que houvesse maior controle do processo eletroquímico, foi feita a média da tensão que variava entre 20 e 15,5 V, aproximando para o valor de 18 V. Com esse valor, foi possível manter uma tensão estável.

Ao fim da etapa de bioissorção, percebeu-se um leve clareamento no sobrenadante, principalmente para o experimento utilizando a torta de chia como bioissorvente. Esse clareamento foi evidenciado ao diluir a amostra – ilustrado na Figura 12.

**Figura 12 – Efluente antes (à esquerda) e após (à direita) tratamento de bioissorção utilizando a torta de chia como bioissorvente.**



Fonte: Acervo pessoal.

Para análise do tratamento em série foi retirada uma alíquota de todos os experimentos após cada etapa para medição da DQO, analisando a remoção tanto individualmente quanto do tratamento em série. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 7.

**Tabela 7 – Resultados obtidos no tratamento em série.**

<b>Etapa</b>	<b>Ensaio</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>Remoção ensaio (%)</b>	<b>Média remoção ensaio (%)</b>	<b>Remoção total (%)</b>	<b>Média remoção total (%)</b>
<b>Tensão 18 V</b>	I – A	75.000	42,31		42,31	
	I – B	67.000	48,46	45,39 ± 4,35	48,46	45,39 ± 4,35
<b>Cloreto férico 200 ppm</b>	II – A	73.000	2,67		43,85	
	II – B	70.500	-5,22	-1,28 ± 5,58	45,77	44,81 ± 1,36
<b>Biossorção torta de chia</b>	III – A	37.730	48,32		70,98	
	III – B	34.500	51,06	49,69 ± 1,94	73,46	72,22 ± 1,75
<b>Biossorção bagaço de malte</b>	IV – A	46.500	36,30		64,23	
	IV – B	44.500	36,88	36,59 ± 0,41	65,77	65 ± 1,09

**Fonte: Autoria própria.**

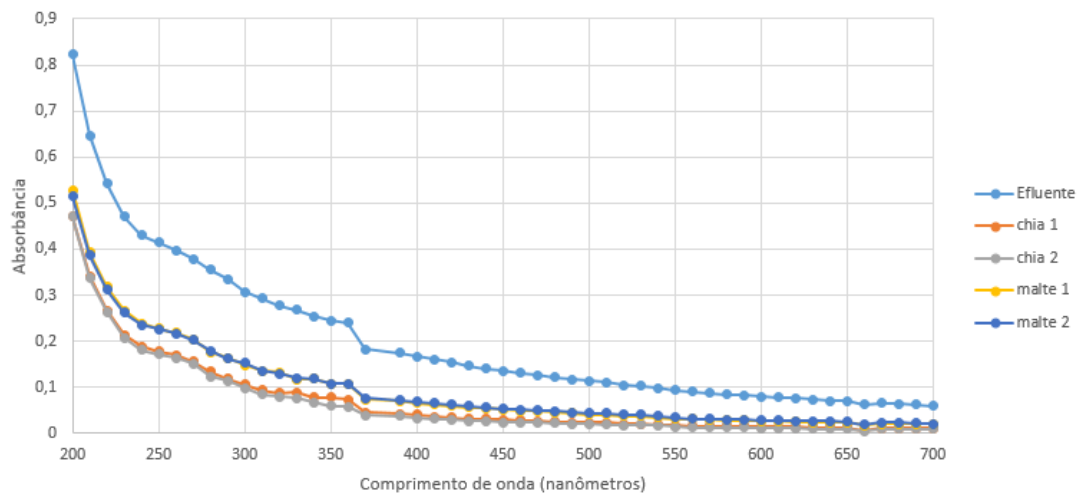
Analisando os valores de DQO para a tensão de 18 V percebe-se que o resultado obtido foi inferior ao retratado na seção 4.3, portanto melhores resultados provavelmente seriam obtidos se utilizada uma fonte mais estável com aplicação de tensão de 20 V.

Ao seguir para o tratamento com adição de agente coagulante houve uma estabilização ou até elevação no valor da DQO. Isso ocorreu possivelmente devido ao alto volume de efluente retirado, que provavelmente continha partículas com poluentes mais concentrados e que foram reincorporadas ao efluente ao submeter o líquido à agitação, resultando num aumento da carga orgânica.

Quanto ao processo de biossorção, esse apresentou eficiência na remoção de poluentes do efluente obtendo-se melhores resultados com a

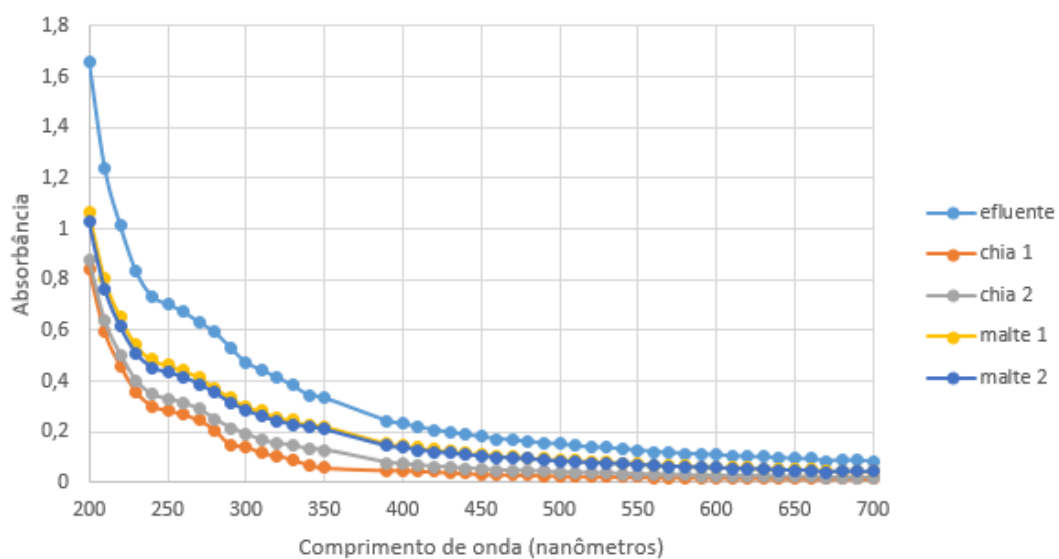
utilização da torta de chia. Sendo que, para analisar a bioissorção, além da análise de DQO também foi realizada uma varredura em espectrofotômetro de cada processo, antes e depois da realização da bioissorção, na faixa de 200 a 700 nanômetros. Para realização da leitura em espectrofotômetro, as amostras da análise A foram diluídas com adição de água destilada até atingirem a concentração de 0,00125 mL/L; já as amostras de B foram diluídas até atingirem a concentração de 0,0025 mL/L. Com os valores de absorvância plotaram-se gráficos para cada duplicata, ilustrados nos Gráficos 1 e 2.

**Gráfico 1 – Espectro de absorção do efluente (A).**  
Bioissorção - A



Fonte: Acervo pessoal.

**Gráfico 2 – Espectro de absorção do efluente (B).**  
Bioissorção - B



Fonte: Acervo pessoal.

A partir desses gráficos, pode-se observar que o efluente é composto principalmente por matéria da faixa não-visível (com comprimento de onda inferior à 400 nm), o que explica sua carga orgânica elevada. O processo de bioissorção reduziu tanto compostos da faixa não-visível quanto da visível e é perceptível que a utilização da torta de chia como bioissorvente removeu maior quantidade de partículas. Outra forma de analisar a eficiência desse tratamento foi calcular a área de cada curva dos gráficos, obtendo a porcentagem de diminuição da área após o tratamento final. Na Tabela 8 estão apresentados esses valores, que não levam em conta os resultados obtidos a partir da remoção da DQO (apresentados anteriormente na Tabela 7).

**Tabela 8 – Áreas calculadas para as curvas obtidas pelas varreduras e porcentagens de remoção dos processos de bioissorção.**

Análise	Ensaio	Área (u.a.)	Área removida (%)	Média de remoção (%)
A	-	103,28	-	-
	Chia 1	35,175	65,94	67,35 ± 1,99
	Chia 2	32,26	68,76	
	Malte 1	48,71	52,84	52,63 ± 0,29
	Malte 2	49,13	52,43	
B	-	154,465	-	-
	Chia 1	48,05	68,89	64,59 ± 6,07
	Chia 2	61,33	60,30	
	Malte 1	97,675	36,77	38,64 ± 2,65
	Malte 2	91,875	40,52	

Fonte: Autoria própria.

Realizando a média da porcentagem de remoção de partículas de cada bioissorvente obtém-se 65,97% de eficiência para o processo utilizando torta de chia e 45,64% para o processo com bagaço de malte, confirmando a afirmação anterior de que o uso da torta de chia apresentou melhores resultados. Comparando a média da remoção de DQO (49,69% para torta de chia e 36,59% para bagaço de malte) com a média de remoção da área, percebe-se que a segunda é maior, demonstrando que o processo de bioissorção removeu outras matérias além da carga orgânica.



## 5.5 ANÁLISE DA DBO

A partir dos resultados obtidos e listados anteriormente, percebe-se que o tratamento que apresentou melhor remoção da carga orgânica foi o convencional com adição de 200 ppm de cloreto férrico. Portanto, mediu-se a DBO e porcentagem de remoção para dois desses experimentos, conforme indicado na Tabela 9.

**Tabela 9 – Valores de DBO medidos de dois ensaios do tratamento com adição de 200 ppm de cloreto férrico.**

DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	% Remoção DBO	Média de remoção DBO (%)
26.000	17.000	37,04	40,74 ± 5,23
28.000	15.000	44,44	

**Fonte: Autoria própria.**

O tratamento convencional com adição de cloreto férrico apresentou redução na DBO, embora não suficiente para que o efluente pudesse ser descartado (limite de 50 mg/L pela legislação vigente). Apesar da DBO do efluente ser inferior à DQO – o que justifica a aplicação inicial de um tratamento físico-químico – seu valor é muito elevado se comparado ao aceito pela legislação, sendo interessante aplicar um tratamento biológico para atingir melhores resultados.

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

### 6.1 CONCLUSÃO

Todos os tratamentos realizados apresentaram remoção superior a 39% do efluente industrial com carga orgânica de 130.000 mg/L.

Analisando os resultados obtidos com o tratamento convencional de coagulação e floculação pela adição de agentes coagulantes, percebe-se que o melhor aditivo é o cloreto férrico na proporção de 200 ppm, sendo mais eficiente no ponto de vista de remoção da DQO e economicamente, se comparado com o melhor valor obtido para o sulfato de alumínio (500 ppm). Porém, o cloreto requer maior cuidado ao ser manuseado, devido sua sensibilidade à luz e ao calor.

Dentre os valores calculados para o tratamento eletroquímico a melhor faixa de tensão é a entre 15,5 V e 20 V, porém a fonte elétrica não se mostrou estável durante esse experimento. Realizando a média dessa faixa e aproximando para 18 V foi possível estabilizar a fonte, mas os resultados obtidos não foram os mesmos. Diferente do esperado, o tratamento eletroquímico não teve o melhor desempenho se comparado ao convencional.

O tratamento em série, iniciado pelo processo eletroquímico, para as condições estudadas, seguido pelo sistema convencional com adição de agentes coagulantes não obteve boa performance. Isso ocorreu provavelmente devido a necessidade de retirar grande quantidade do efluente, colhendo parcela da carga orgânica que deveria ter sido removida e reestabilizando o líquido ao submetê-lo em agitação intensa.

O tratamento de biossorção utilizando a torta de chia obteve melhores resultados que utilizando bagaço de malte. O uso da torta de chia como biossorvente possibilita o aproveitamento de um material tido como resíduo, além de ser necessário menor tempo de agitação que o bagaço de malte, resultando em um tratamento economicamente favorável.

De todos os experimentos realizados, o que apresentou melhor resultado foi o tratamento convencional com adição de 200 ppm de cloreto férrico, atingindo em média 78,21% de remoção.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para os trabalhos futuros, sugere-se que o tempo de decantação de todos os tratamentos seja maior, para analisar se em ambos os tratamentos ocorrerá a deposição de flocos.

Em relação ao tratamento eletroquímico, sugere-se que seja utilizado um maior número de placas de metal, para aumentar a área de contato entre as placas e o efluente. Também é interessante utilizar fontes elétricas que atinjam valores mais elevados de tensão que os testados, e analisar a eficiência da remoção variando o valor da corrente conduzida (em amperes).

Quanto ao processo de biossorção, pode-se estudar a eficiência do processo variando diversos parâmetros, tais como: pH do efluente, temperatura da incubadora e quantidade de biossorvente utilizado.

Por se tratar de um efluente industrial com carga orgânica e biológica elevada, sugere-se aliar ao tratamento físico-químico convencional um tratamento secundário biológico.

## REFERÊNCIAS

AECWeb – O Portal da Arquitetura, Engenharia e Construção. **Painéis MDF da DURATEX**. Disponível em:

<<http://www.aecweb.com.br/duratex/destaques/guia-defornecedores-e-fabricantes/detalhes/7505/0/20>>. Acesso em: 11 set. 2016.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed., 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9800**: critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898**: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **O setor**. Disponível em: <<http://abtcp.org.br/o-setor/posicionamento-setorial/>>. Acesso em: 09 set. 2016.

BORBA, F. H.; MÓDENES, A. N.; SOTTORIVA, P. R. S. Tratamento do efluente madeireiro por processo foto-Fenton. **Estudos Tecnológicos**, v. 4, p. 12-20, 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 16 Mai. 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 15 set. 2016.

GAUTO, M. A.; ROSA, G. R. **Processos e operações unitárias da indústria química**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011.

HACH. **Oxygen Demand, Chemical**. Disponível em: <[www.hach.com/asset-get.download.jsa%3Fid=7639983816](http://www.hach.com/asset-get.download.jsa%3Fid=7639983816)>. Acesso em: 14 out. 2016.

IAP – Instituto Ambiental do Paraná. **Parâmetros de Lançamentos de Efluentes Líquidos**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/pagina-49.html>>. Acesso em: 07/09/2017.

JERÔNIMO, C. E. Uso de técnicas combinadas para o tratamento de efluentes têxteis: separação físico-química e fotodegradação UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. **Rev. Elet. Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, RS, v. 8, n. 8, set-dez, 2012.

MANAHAN, S. E. **Química ambiental**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 944p. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/6244/pdf>> Acesso em: 20 out. 2017.

MARÍA, P. D. **Industrial Biorenewables: A Practical Viewpoint**. Wiley, 2016. 576 p.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas**. Departamento de Papel e Celulose da Área de Insumos Básicos do BNDES, 2008

MENESES, J. M. et al. Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 235-240, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422012000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422012000200002&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 01 out. 2016.

MERCK. **Manual de procedimento de análise de DBO5**. Método respirométrico Simplificado – Oxitop. Rio de Janeiro, 2004.

MEYER, S. A. S. **Aproveitamento de Água Residuária Tratada e Lodo Físico-Químico Provenientes da Produção de Painéis de MDF**. 2012. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MIERZWA J. C.; HESPANHOL, I. **Água na Indústria: Uso Racional e Reuso**; São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

PERALTA-ZAMORA, P. et al. Remediação de efluentes derivados da indústria de papel e celulose: tratamento biológico e fotocatalítico. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 186-190, Abr. 1997. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40421997000200010&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40421997000200010&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 09 set. 2016.

PERALTA, A. H.; CASSIANO, D. M.; CARDOSO, M. L.; COSTANZI, R. N. Tratamento físico-químico de efluentes de indústria alimentícia de doces. **Hipótese**, Itapetininga, v. 1, n. 3, p. 124-146, 2015. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/londrina/cursos/mestrados-doutorados/Ofertados-neste-Campus/mestrado-academico-em-engenharia-ambiental/producao-cientifica/2015/peralta-a-h-cassiano-d-m-cardoso-m-l-costanzi-r-n-tratamento-fisico-quimico-de-efluentes-de-industria-alimenticia-de-doces-1-124-146>> Acesso em: 20 out. 2017.

PIETROBELLI, J. M. T. A. **Avaliação do potencial de bio-sorção dos íons Cd (II), Cu (II) e Zn(II) pela macrófita Egeria Densa**. 2007. 98f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Toledo, PR, 2007.

RAPOSO, A.A.; BARROS, L.F.P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.P.M. O parâmetro de turbidez das águas como indicador de impactos humanos na dinâmica fluvial da bacia do rio maracujá- Quadrilátero Ferrífero/MG. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Viçosa. **Anais...**Viçosa: UFV, 2009.

ROSA, M. A. **Tratamento de Efluente de Indústria Papeleira por Processo Combinado Químico (Ozonização) e Enzimático (Lacase)**. 2004. 70 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

RUBIM, C. **Ação dos Floculadores**. 2013. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticialnt.asp?id=5464>> . Acesso em: 15 set. 2016.

SANT'ANNA, G. L. **Proc 2nd Braz. Symp. Chem. Lignins and Other Wood Comp.** 3: 297, 1992.

SILVA, B. C.; ZANUTTO, A. **Avaliação do bagaço de malte como bioissorvente do corante Amarelo Reafix B2R**. 2016. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

SILVA, D. C. C.; PIETROBELLI, J. M. T. A. Estudo cinético da bioissorção do corante amarelo reativo B2R em resíduo orgânico da extração do óleo de semente de chia (*Salvia hispanica*). **Anais do 8º Forum Internacional de Resíduos Sólidos**. Curitiba: UTFPR, 2017.

SILVA, J. F. **Modelagem para Remoção de Metais Pesados através de Algas: Análise para um Componente em Processo Batelada e Contínuo**. 2000. 130 f. Tese (mestrado) – Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

SILVEIRA, G. E. **Sistemas de Tratamento de Efluentes Industriais**. 2010. 36f. Trabalho de Conclusão em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010.

STADLER, K. et al. Análise do processo produtivo e geração de resíduos em uma indústria de painéis compensados. **Acta Ambiental Catarinense**, v.6, n.1, p.45-55, jan/jun, 2009.

TERA AMBIENTAL. **Como funciona o tratamento de efluentes industriais.** 2013. Disponível em: <<http://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/338190/como-funciona-o-tratamento-de-efluentes-industriais>>. Acesso em: 03 out. 2016.

VALENTE, G. F. S.; MENDONÇA, R. C. S.; PEREIRA, J. A. M. The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 9, p. 1713-1719, Set. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782015000901713&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782015000901713&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 01 out. 2016.

VAZ, L. G. L. et al. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclet. Quím.** São Paulo, v. 35, n. 4, p. 45-54, 2010. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-46702010000400006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46702010000400006&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 03 out. 2016.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996. 240 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).