

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA CARVALHO SIA

**EFICIÊNCIA DO SULFATO DE ALUMÍNIO E CLORETO FÉRRICO EM ENSAIO DE
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO PARA EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE
SORVETES E AÇAÍ.**

LONDRINA

2025

CAROLINA CARVALHO SIA

**EFICIÊNCIA DO SULFATO DE ALUMÍNIO E CLORETO FÉRRICO EM ENSAIO DE
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO PARA EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE
SORVETES E AÇAÍ.**

**ALUMINUM SULFATE AND FERRIC CHLORIDE EFFICIENCY IN COAGULATION
AND FLOCCULATION TESTS OF EFFLUENTS FROM AN ICE CREAM AND AÇAÍ
INDUSTRY.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Orlando de Carvalho Junior

LONDRINA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CAROLINA CARVALHO SIA

**EFICIÊNCIA DO SULFATO DE ALUMÍNIO E CLORETO FÉRRICO EM ENSAIO DE
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO PARA EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE
SORVETES E AÇAÍ.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Orlando de Carvalho Junior

Data de aprovação: 2 de julho de 2025.

Dr. Joseane Debora Peruco Theodoro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina

Dr. Rafael Montanhini Soares De Oliveira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina

Dr. Orlando de Carvalho Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Londrina

LONDRINA

2025

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e a mim mesma pelo apoio, compreensão, parceria e incentivo durante todo o processo.

AGRADECIMENTOS

Concluir um TCC é um marco importante na vida acadêmica, e os agradecimentos são a oportunidade perfeita para celebrar essa conquista e reconhecer o apoio fundamental que você recebeu ao longo do caminho.

Uma gratidão especial aos meus pais e minha irmã que sempre colocaram a minha educação em primeiro lugar e nunca me abandonaram, sem eles essa realização seria impossível. Agradeço as minhas amigadas feitas em Londrina que me ampararam no momento de saudade de casa, e me fizeram criar aqui meu próprio lar.

Agradeço meu namorado por dividir todas as fases da faculdade comigo, sendo meu verdadeiro ombro de acolhimento e paz.

Agradeço a Amadelli Alimentos LTDA por me permitir usar seu nome para o presente trabalho, empresa onde diariamente aprendo a dar meu melhor.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, a Secretaria do Curso, pelo serviço prestado e dúvidas tiradas.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Este estudo destacou a importância do tratamento de efluentes industriais, como os provenientes de fabricantes de sorvetes e açaís, para reduzir impactos ambientais e assegurar a conformidade com a Resolução nº 430 do CONAMA. Os tratamentos físico-químicos são comumente empregados sozinhos ou combinados com outras tecnologias em ETEs usadas para tratamento de águas residuárias. Assim, avaliou-se a eficiência de dois coagulantes inorgânicos, sulfato de alumínio e cloreto férrico, em ensaios de coagulação-floculação, teste dos jarros (jar-test), conduzidos com amostras brutas do efluente de uma indústria de açaís e sorvetes, a fim de se verificar a redução do parâmetro turbidez e encontrar a melhor condição para o respectivo teste empregando cada coagulante. Como o efluente bruto apresentava pH 3,4, valor fora da faixa ideal de atuação dos coagulantes, foi realizado um ajuste de pH por meio da adição de 2 mL de NaOH, elevando o pH da amostra para 6,15, a fim de favorecer a performance dos coagulantes durante os ensaios. Para a amostra com turbidez de 1050 NTU, foram aplicadas concentrações variáveis de sulfato de alumínio (0,050 a 0,325 g/L), enquanto para outra amostra, com turbidez de 2090 NTU, utilizaram-se concentrações de cloreto férrico (0,250 a 1,625 g/L). Os resultados mostraram que a concentração de 0,325 g/L de sulfato de alumínio resultou em uma redução de até 81,76% da turbidez da amostra correspondente, enquanto a aplicação de 0,750 g/L de cloreto férrico alcançou uma redução de 74,64%.

Palavras-chave: ensaio, efluentes, coagulantes, turbidez

ABSTRACT

This study highlighted the importance of treating industrial effluents, such as those generated by ice cream and açai manufacturers, in order to reduce environmental impacts and ensure compliance with CONAMA Resolution No. 430. Physicochemical treatments are commonly applied either alone or in combination with other technologies in wastewater treatment plants (WWTPs) for the treatment of residual water. Accordingly, the efficiency of two inorganic coagulants—aluminum sulfate and ferric chloride—was evaluated through coagulation-flocculation tests (jar test) conducted with raw effluent samples from an açai and ice cream industry, aiming to assess the reduction of turbidity and determine the optimal conditions for each coagulant. Since the raw effluent had an initial pH of 3.4, which is outside the ideal working range for the coagulants, a pH adjustment was performed by adding 2 mL of NaOH, raising the pH of the sample to 6.15 to improve coagulant performance during the tests. For the sample with an initial turbidity of 1050 NTU, variable concentrations of aluminum sulfate (0.050 to 0.325 g/L) were applied, while for another sample, with 2090 NTU, ferric chloride was used at concentrations ranging from 0.250 to 1.625 g/L. The results showed that the concentration of 0.325 g/L of aluminum sulfate led to a turbidity reduction of up to 81.76%, whereas the application of 0.750 g/L of ferric chloride resulted in a 74.64% reduction.

Keywords: jar test, effluents, coagulants, turbidity

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIS	Associação Brasileira das Indústria e do Setor de Sorvetes
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BPF	Boas Práticas de Fabricação
CIP	<i>Clean-In-Place</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
PAC	Policloreto de Alumínio
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
COT	Carbono Orgânico Total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivo específico	11
3.1 A indústria de gelados comestíveis	12
3.1.1 Característica de efluente de indústria de sorvetes e açais.	14
3.2 Legislação ambiental pertinente	17
3.3 Impactos ambientais do efluente industrial	18
3.4 Fases do tratamento de efluentes	19
3.4.1 Tratamento preliminar	19
3.4.2 Tratamento primário ou físico-químico	20
3.4.3 Tratamento secundário ou biológico	22
3.4.4 Tratamento terciário ou avançados	23
3.5 Coagulantes inorgânicos	24
3.5.1 Sulfato de alumínio	24
3.5.2 Cloreto férrico	25
3.6 JAR-TEST	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Coleta e análise do efluente	28
4.2 Parâmetros analisados	29
4.3 Ajuste de pH	29
4.4 Configurações do Jar-test	30
4.4 ENSAIO	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Condições observadas durante o ensaio	33
5.2 Resultados de turbidez	33
7. CONCLUSÃO	37
8. REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Gelados comestíveis são produtos alimentícios produzidos a partir de uma emulsão de gorduras e proteínas, podendo conter outros ingredientes e substâncias, que para garantir sua conservação são congelados ou parcialmente congelados durante o armazenamento, transporte, comercialização e consumo. Dentro desta categoria, os sorvetes são definidos como produtos feitos principalmente com leite, derivados lácteos ou gorduras comestíveis, podendo incluir outros ingredientes alimentares. Esses produtos são misturas homogêneas ou não de ingredientes alimentares, batidas e resfriadas até atingirem a consistência congelada, resultando em uma massa aerada (ANVISA, 2013).

A indústria de gelados se destaca por seu sabor, qualidade e variedade, conquistando cada vez mais consumidores e impulsionando a economia local. De acordo com Shikama (2020), dados da Associação Brasileira das Indústrias de Sorvete (ABIS) mostram que o mercado sorveteiro está em destaque, com mais de 10.000 empresas de sorvetes, mais de 300.000 empregos gerados e mais de 13 bilhões de faturamento anual no Brasil.

Sabe-se que a indústria é um dos principais consumidores de água no mundo, e seu crescimento contínuo tem levado a um aumento significativo na demanda hídrica. No entanto, esse aumento na atividade industrial também resultou no lançamento de água residuárias não tratadas, em desacordo com os padrões legais de descarte (Zhao et al., 2019).

O desafio enfrentado por essas indústrias é a eficácia do tratamento do efluente industrial, tendo em vista a variedade de substâncias orgânicas, sólidos sedimentáveis, óleos e graxas dentre outros contaminantes que podem causar sérios danos aos corpos d'água se não tratados de forma adequada (Pereira et al., 2004).

A solução para esse desafio reside na implementação de um sistema eficiente de estações de tratamento de efluentes (ETEs). Isso significa investir em tecnologias e processos que reduzam a carga poluente dos efluentes, tornando-os seguros para o meio ambiente e para a saúde pública (Von Sperling, 2005).

A problemática central reside na necessidade de tratar esses efluentes de forma eficiente para minimizar os impactos ambientais negativos e atender às regulamentações ambientais como preconiza, por exemplo, a resolução 430/11 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011).

Diante disso, este trabalho propôs utilização de sulfato de alumínio e cloreto férrico, em testes de coagulação-floculação (Jar-Test) para encontrar a concentração adequada de cada coagulante para efluente produzido por uma indústria de sorvetes e açaís.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência do sulfato de alumínio e do cloreto férrico, por meio de testes de coagulação-floculação (Jar-Test), gerado por uma indústria de sorvetes e açai's.

2.2 Objetivo específico

Realizar ensaios de coagulação-floculação com sulfato de alumínio e cloreto férrico, em diferentes concentrações, utilizando o método Jar-Test, a fim de avaliar a eficiência dos coagulantes na remoção do parâmetro turbidez.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A indústria de gelados comestíveis

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias e do Setor de Sorvetes (ABIS), no Brasil há mais de dez mil empresas ligadas à produção e comercialização de sorvetes industriais e artesanais. Em 2019 foram consumidos mais de um bilhão de litros.

No Brasil, o sorvete é um dos produtos regulamentados, sendo incluído na legislação de gelados comestíveis pela Resolução RDC nº 267, de 25 de setembro de 2003, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Esta resolução estabelece claramente os parâmetros e requisitos para a produção e comercialização do sorvete, garantindo sua qualidade e segurança para os consumidores e o definindo como:

“Gelados Comestíveis: são produtos alimentícios obtidos a partir de uma emulsão de gorduras e proteínas, com ou sem a adição de outros ingredientes e substâncias, ou de uma mistura de água, açúcares e outros ingredientes e substâncias que tenham sido submetidas ao congelamento, em condições que garantam a conservação do produto no estado congelado ou parcialmente congelado, durante o armazenamento, o transporte, a comercialização e a entrega ao consume” (ANVISA, 2005).

A definição é ampla, e no Brasil não há classificações sobre quantidades necessárias, fazendo com que cada indústria tenha suas próprias proporções. Diferentemente do Canadá que um produto tradicional tem que ter entre 8% e 10% de teor de gordura, nos Estados Unidos, produtos com mais de 10% de teor de gordura são considerados *premium* (Renhe, Weisberg e Pereira, 2015).

Essa variação nas normas reflete a importância de padrões de segurança alimentar consistentes para garantir a qualidade dos produtos. Independentemente das proporções de ingredientes, a segurança alimentar nas indústrias é de suma importância para a saúde de toda a população. Ela garante que os produtos sejam não apenas de alta qualidade, mas também seguros para o consumo, assegurando que os alimentos estejam livres de contaminantes e micro-organismos que podem causar doenças.

A fabricação de sorvetes geralmente inicia-se com o preparo da mistura, onde ingredientes como leite (em pó ou líquido), açúcar, gorduras, estabilizantes, emulsificantes, sabores e corantes são pesados e combinados. Em seguida, a mistura passa pela pasteurização, um aquecimento rápido (tipicamente a 80°C por 25 segundos ou lentamente a 65°C por 30 minutos) seguido de resfriamento veloz, crucial para eliminar microrganismos patogênicos e otimizar a solubilização dos componentes (Finamac, 2025).

Após a pasteurização, a homogeneização refina as partículas de gordura sob alta pressão, garantindo uma textura suave e cremosa ao produto. A calda então é submetida ao resfriamento e maturação, sendo resfriada a aproximadamente 4°C e mantida em tanques sob agitação lenta. Esse processo é vital para a solidificação da gordura, o aumento da viscosidade e aprimoramento da textura do sorvete. A fase subsequente é o congelamento e incorporação de ar (aeração), onde a mistura é congelada rapidamente sob agitação intensa para incorporar ar, conferindo volume e a textura característica. Por fim, o sorvete é levado a câmaras frias para endurecimento e armazenamento completos antes de ser embalado (Finamac, 2025).

No caso do açaí industrializado, o processo é similar em algumas etapas, porém, tem como base a polpa de açaí. Geralmente, envolve a mistura da polpa com água, açúcar e guaraná, seguida de pasteurização, homogeneização, resfriamento e congelamento, resultando em uma massa homogênea e consistente pronta para o envase (Bertollo, 2025).

Na Resolução RDC nº 267, de 25 de setembro de 2003, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), para assegurar a produção de um produto de alta qualidade e a segurança do consumidor, é fundamental adotar boas práticas de fabricação (BPF), definido na resolução:

Boas Práticas de Fabricação: práticas de fabricação que devem ser adotadas pelas indústrias de alimentos a fim de garantir a qualidade sanitária e a conformidade dos produtos alimentícios com os regulamentos técnicos específicos.

A segurança do consumidor é a bússola que guia a indústria alimentícia, e a higienização é uma das chaves para alcançar esse objetivo. Ela é necessária em todo o processo produtivo: na matéria-prima, nos equipamentos e componentes utilizados na fabricação. Andrade (2011) verificou que a prática mais utilizada nas limpezas de

indústrias foi a CIP (Clean-In-Place). Segundo Cavalcanti (2016), a CIP é um sistema que limpa e sanitiza equipamentos e instalações por meio de uma lavagem química.

Além da CIP dos equipamentos, a água é utilizada também nas limpezas dos pisos, paredes, utensílios, das estruturas dentro e fora da produção. De acordo com Maganha (2016) esse processo indispensável de desinfecção tem como foco a remoção de minerais e resíduos orgânicos, que são constituídos por carboidratos, lipídeos e proteínas impedindo assim que colônias de microrganismos se instalem.

3.1.1 Característica de efluente de indústria de sorvetes e açaís.

As etapas de produção e higienização geram um grande volume de efluentes com elevada carga orgânica (Castro, 2007; Saraiva & Pereira, 2009), nesse contexto, o efluente é um termo usado para caracterizar os despejos líquidos provenientes de diversas atividades ou processos (CONAMA, 2011), sendo a principal delas a limpeza do ambiente fabril.

Os efluentes gerados pela indústria de sorvetes são semelhantes da indústria de laticínio, ambas contem leite e seus derivados, além de açúcares, essências e condimentos usados na fabricação desses produtos. Também podem incluir lubrificantes, e produtos químicos resultantes dos processos de limpeza citado acima. Substâncias como detergentes e soluções ácidas e alcalinas podem alterar o pH do efluente (Machado et al., 2000; Silva 2011.)

No processo de fabricação de sorvetes e açaís, o leite é um dos principais ingredientes, seja em sua forma integral ou como derivados lácteos. Da mesma forma, as indústrias de laticínios utilizam o leite como matéria-prima para a produção de diversos produtos, como queijos, iogurtes e manteiga. Essa semelhança na base de matérias-primas resulta em características comuns nos efluentes gerados por essas indústrias, como a alta carga orgânica e a presença de sólidos dissolvidos, gorduras e proteínas. Essas substâncias são características tanto do leite quanto de seus derivados, tornando os efluentes de ambos os setores passíveis de tratamento similar para reduzir o impacto ambiental e atender aos padrões de qualidade exigidos.

De forma geral, os efluentes provenientes de atividades industriais apresentam elevada carga poluidora, o que torna indispensável seu adequado tratamento antes de qualquer descarte no meio ambiente. Essa medida visa garantir que o efluente

tratado contribua para a geração de água com potencial para reuso (Ibrahin et al., 2015).

O efluente bruto proveniente de indústrias apresentam uma composição bastante complexa e diversificada, contendo diferentes tipos de substâncias. Entre os compostos frequentemente encontrados, destacam-se sais como sulfeto, sulfato, cloreto, sódio, cálcio e amônio; ácidos como o sulfúrico, clorídrico, fórmico e láctico; além de tensoativos, aminas, proteínas, aminoácidos, álcoois, ácidos carboxílicos e graxos, lipídios, enzimas, polímeros, solventes orgânicos, compostos aromáticos e diversos metais. Essas substâncias conferem ao efluente uma variedade significativa de propriedades físico-químicas, como pH, concentração de sólidos, turbidez, acidez, alcalinidade, condutividade elétrica, cor, dureza, além de parâmetros como a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), entre outros (Class, Maia, 1994).

Nesse cenário, torna-se fundamental o acompanhamento dos parâmetros que indicam a qualidade do efluente, com o objetivo de verificar se ele está apto para ser lançado ou reutilizado. Entre os principais indicadores avaliados em efluentes industriais, destacam-se os seguintes:

- **Turbidez:** Este parâmetro está relacionado à presença de partículas em suspensão, como materiais coloidais ou sólidos muito finos. Quanto maior a concentração dessas partículas, menor será a transparência do efluente. A turbidez é geralmente expressa em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), conforme descrito por Ibrahin et al. (2015).
- **Cor:** Em efluentes industriais, a coloração pode ser atribuída à presença de compostos corantes – tanto orgânicos quanto inorgânicos – dissolvidos na água residual (Nascimento, 2013).
- **Carbono Orgânico Total (COT):** Trata-se de um parâmetro que mensura a concentração total de compostos orgânicos presentes no efluente, englobando tanto os biodegradáveis quanto os não biodegradáveis. A unidade mais comumente utilizada para expressar o COT é miligrama por litro (mg/L) (Nascimento, 2013).
- **pH:** Representa a concentração de íons hidrogênio (H^+) na amostra, sendo um dos parâmetros-chave no controle e otimização de processos físico-químicos de tratamento. Por exemplo, a remoção de metais pesados por precipitação

química ocorre preferencialmente em faixas elevadas de pH, o que é particularmente relevante nas indústrias de tintas (Santana et al., 2020).

- **Demanda Química de Oxigênio (DQO):** Refere-se à quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente os compostos orgânicos e inorgânicos presentes no efluente. Embora semelhante ao COT, a DQO se distingue por englobar substâncias que podem ser oxidadas por reagentes químicos. Sua medição também é expressa em mg/L (Nascimento, 2013).
- **Condutividade elétrica:** Este parâmetro fornece uma estimativa rápida da concentração de sólidos dissolvidos, especialmente sais, no efluente. Quanto maior a quantidade de sais presentes, maior será a condutividade elétrica registrada, cuja unidade usual é microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Ibrahin et al., 2015).

Diante da variabilidade na composição dos efluentes industriais, os processos físico-químicos, como a coagulação, floculação, decantação e filtração, tornam-se ferramentas fundamentais tratamento desses resíduos líquidos. Esses processos atuam principalmente na remoção de sólidos suspensos (SS), redução dos sólidos totais (ST) e, em menor escala, dos sólidos dissolvidos (SD). Além disso, contribuem significativamente para a diminuição da Demanda Química de Oxigênio (DQO), uma vez que grande parte da matéria orgânica particulada pode ser removida por sedimentação após a coagulação e floculação (Nascimento, 2013).

Outro benefício importante dos tratamentos físico-químicos é a remoção de óleos e graxas, que, embora sejam menos densos que a água e tendam a flotar, podem ser separados em etapas de flotação ou por reagentes específicos. Esses contaminantes, se não removidos, podem comprometer as etapas subsequentes do tratamento, especialmente os processos biológicos. O ajuste do pH também faz parte dessas etapas iniciais, visto que o desempenho dos coagulantes depende diretamente da faixa de pH ideal, o que torna esse parâmetro não apenas de controle, mas também de correção operacional (Souza, 2017).

Portanto, a aplicação dos processos físico-químicos não apenas prepara o efluente para etapas posteriores mais avançadas (como o tratamento biológico), mas também remove uma fração significativa dos poluentes responsáveis por impactos ambientais diretos, otimizando o desempenho global da estação de tratamento (Souza, 2017).

3.2 Legislação ambiental pertinente

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/05 define a classificação dos corpos d'água (BRASIL, 2005). Já o lançamento de efluentes em rios é regulamentado pela Resolução nº 430 do CONAMA (BRASIL, 2011), de 13 de maio de 2011, que define os parâmetros inorgânicos, orgânicos e seu valores máximos, essa resolução complementa e modifica parcialmente a Resolução nº 357/2005.

A Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, estabelece as diretrizes para a classificação dos corpos de água e define os padrões de qualidade a serem atendidos, incluindo o parâmetro turbidez. A turbidez é uma medida que indica a presença de partículas em suspensão na água, interferindo em sua transparência e podendo afetar tanto a estética quanto a segurança do uso, especialmente para abastecimento e preservação ambiental. De acordo com essa resolução, o limite máximo de turbidez para águas doces de Classe 1 é de 40 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez), enquanto para águas doces de Classe 2 o valor permitido é de até 100 UNT.

A diferença entre essas classes está relacionada ao grau de proteção exigido para o corpo hídrico e aos usos permitidos. As águas de Classe 1 são destinadas a usos mais sensíveis, como o abastecimento público com desinfecção, recreação de contato primário e preservação da fauna aquática, o que justifica limites mais rigorosos. Já as águas de Classe 2 admitem usos como abastecimento com tratamento convencional, irrigação e dessedentação animal, permitindo uma turbidez mais elevada, desde que ainda dentro de padrões considerados seguros. Esses limites servem como referência essencial para avaliação da qualidade da água e para o controle de lançamentos de efluentes, garantindo a manutenção dos usos preconizados para cada classe.

A Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, dispõe sobre as condições e padrões para o lançamento de efluentes em corpos de água, complementando e detalhando a Resolução nº 357/2005. Embora estabeleça diversos parâmetros de controle, como pH (entre 5 e 9), temperatura (limite de 40 °C e aumento máximo de 3 °C no corpo receptor), materiais sedimentáveis (até 1 mL/L em 1 hora) e óleos e graxas (com limites específicos para óleos minerais e vegetais), a resolução não apresenta um limite específico para turbidez nos efluentes lançados. No entanto, a turbidez pode ser controlada de forma indireta por meio de parâmetros como

materiais sedimentáveis e pela exigência de que o lançamento não comprometa os usos preestabelecidos do corpo receptor. Dessa forma, embora a turbidez não esteja expressamente quantificada na CONAMA nº430, sua presença excessiva pode levar ao descumprimento de outros critérios de qualidade e de impacto ambiental, devendo ser monitorada com atenção nos processos de tratamento e descarte de efluentes.

Em nível nacional, o CONAMA é responsável pela formulação de diretrizes ambientais, enquanto a implementação das medidas ambientais em nível estadual no Paraná fica a cargo do Instituto Água e Terra (IAT).

3.3 Impactos ambientais do efluente industrial

Poluição, de acordo com a Política Nacional de Meio Ambiente, a lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população.

O impacto ambiental da geração de efluente industrial é uma realidade, e por isso exige atenção, medidas e estudos. O controle das ações de manejo se torna menos eficiente quando os efluentes não são bem caracterizados.

Os efluentes líquidos sem tratamento alteram a qualidade das águas, podendo inviabilizar o uso múltiplo da água a jusante do lançamento (Azzolini & Fabro, 2013), mas também interferir na qualidade do solo, ar e a saúde pública.

A poluição aquática, uma das mais sérias, provoca mudanças nas características físicas, químicas e biológicas das águas, as quais interferem na sua qualidade, impossibilitando o seu uso para o consumo humano. Ainda sobre a poluição das águas, o lançamento do efluente sem tratamento pode levar a eutrofização, mortalidade de peixes, desequilíbrio nos ecossistemas aquáticos e proliferação de microrganismos patogênicos, e que secundariamente impacta a atividade social e econômica, com a perda de atividade como pesca, turismo e recreação (Fellenber, G., 1980).

Vazamentos e descartes inadequados do efluente industrial podem contaminar o solo, tornando-o inadequado para uso agrícola por exemplo, levando também à uma contaminação das águas subterrâneas (Lucas & Cunha, 2007).

O tratamento inadequado de efluente pode gerar gases como metano e amônia, contribuindo para o efeito estufa e a formação de chuvas ácidas. Outro

impacto ao ar são os odores desagradáveis dos efluentes com alto teor orgânico (Metcalf, 2016).

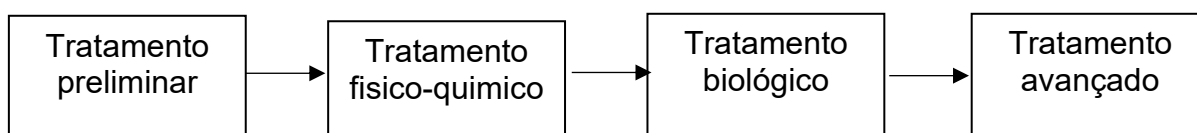
O mais grave é que os cursos d'água abastecem a população ao mesmo tempo em que recebem esgotos e efluentes industriais (Lucas & Cunha, 2007), aumentando os custos e as dificuldades de tratamento para o consumo, e representando risco à saúde pública.

O controle das ações de manejo se torna menos eficiente quando os efluentes não são bem caracterizados. O crescente rigor das legislações ambientais e a necessidade de práticas mais sustentáveis no setor industrial exigem a adoção de métodos eficientes para o tratamento de efluentes. Nesse contexto, os processos físico-químicos, como a coagulação e floculação, se destacam como alternativas viáveis, eficazes e de rápida implementação para a remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica, cor e turbidez dos efluentes industriais (Azzolini & Fabro, 2013).

3.4 Fases do tratamento de efluentes

Diante do crescimento das atividades industriais as abordagens disponíveis incluem tratamentos físicos, tratamentos químicos, tratamentos biológicos, que podem ser aeróbios ou anaeróbios, e tratamentos avançados. A Figura 1 mostra a sequência em que os tratamentos costumam acontecer.

Figura 1 – Sequência comum em tratamento de efluentes



Fonte: Autoria Própria (2025).

3.4.1 Tratamento preliminar

O tratamento de efluentes tem início com o tratamento preliminar ou pré tratamento. Nas indústrias esta fase é caracterizada pelos processos de gradeamento, peneiramento. Os processos de peneiramento e gradeamento são considerados tratamentos físicos porque envolvem a remoção de sólidos presentes no efluente sem alteração química ou biológica das substâncias. Eles se baseiam exclusivamente em

métodos mecânicos de separação por tamanho de partícula, ou seja, a separação ocorre por barreiras físicas (Metcalf, 2016).

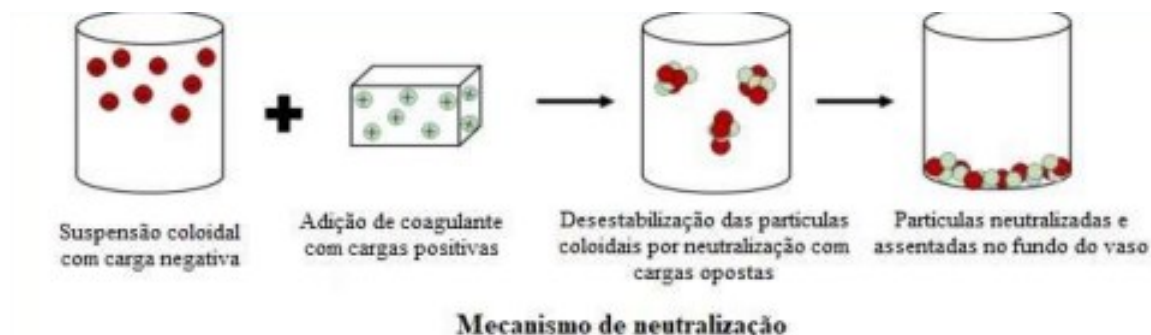
3.4.2 Tratamento primário ou físico-químico

Os processos físico-químicos desempenham um papel essencial no tratamento de efluentes, podendo ser aplicados tanto como etapa principal quanto como pré-tratamento, com o objetivo de otimizar a eficiência das fases biológicas subsequentes (Tatsi et al., 2003). Dentre esses processos, destacam-se a coagulação, a floculação e a sedimentação, amplamente utilizados para remover sólidos suspensos, matéria orgânica e coloidal (Nunes, 2012).

Durante os processos de coagulação e floculação, as partículas coloidais presentes na água, como matéria orgânica, permanecem dispersas devido às forças de repulsão eletrostática entre elas. No entanto, atuam simultaneamente forças atrativas de curta distância, conhecidas como forças de Van der Waals, que promovem uma leve atração entre partículas neutras ou fracamente carregadas. Essas interações, embora fisicamente fracas, são essenciais para a formação de flocos, principalmente quando a repulsão eletrostática é reduzida pela adição de coagulantes e pela compressão da dupla camada elétrica. Quando as partículas se aproximam o suficiente, promovidas pela agitação rápida inicial, as forças de Van der Waals podem prevalecer sobre as forças de repulsão, facilitando a aglomeração e a formação de flocos mais estáveis (Felici, 2010).

Segundo Claas e Maia (1994), esse processo de floculação é caracterizado, primeiramente, pela neutralização das cargas elétricas das partículas coloidais, que permite sua aproximação e posterior aglomeração. Para isso, utilizam-se coagulantes com íons positivos, como os sais de alumínio ou ferro, responsáveis por desestabilizar as partículas carregadas negativamente (Figura 2).

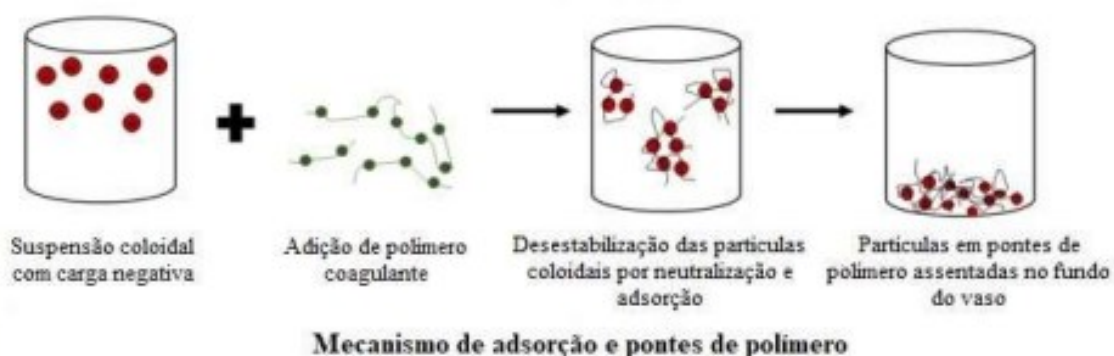
Figura 2 – Mecanismo de neutralização.



Fonte: Owodunni; Ismail (2021).

Posteriormente, segundo Owodunni (2021), pode-se empregar polímeros sintéticos (polieletrólitos), que são macromoléculas de alto peso molecular com cargas elétricas fracas ou moderadas. Esses polímeros promovem a formação de pontes entre partículas, aumentando a robustez e o tamanho dos flocos (Figura 3).

Figura 3 – Pontes de polímeros.



Fonte: Owodunni; Ismail (2021).

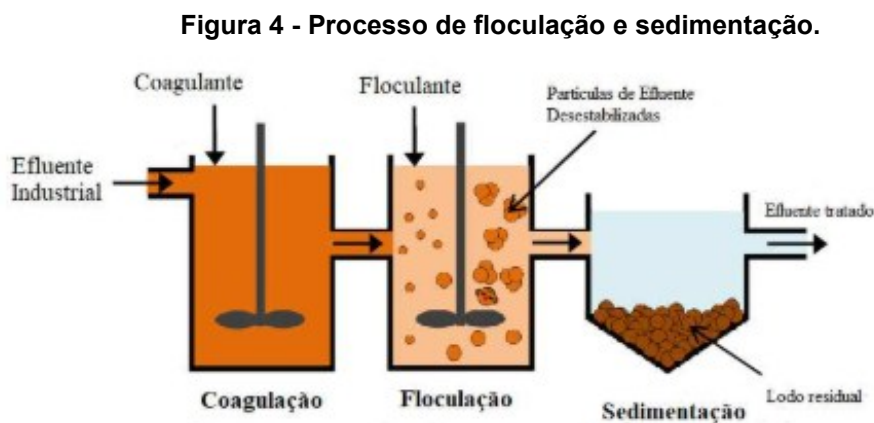
A eficiência da coagulação está diretamente relacionada a uma série de variáveis operacionais que devem ser cuidadosamente ajustadas para cada tipo de efluente. Dentre essas variáveis, segundo Couto Junior, 2011 estão:

- A escolha do coagulante, que pode incluir sais inorgânicos como sulfato de alumínio ou cloreto férrico, polímeros sintéticos ou coagulantes naturais como quitosana e tanino vegetal.
- A dosagem adequada, geralmente determinada por meio do ensaio de Jar-Test.
- A cor e turbidez do efluente, indicadoras da presença de partículas coloidal.

- O pH, que influencia diretamente a atuação dos coagulantes e muitas vezes exige correção prévia.
- O tempo de mistura, dividido em uma etapa de agitação rápida para dispersão do coagulante e uma etapa lenta para permitir a formação de flocos.
- A temperatura, que pode afetar a solubilidade dos produtos químicos.
- E as características químicas do meio, como alcalinidade e teor de ferro.

A fase de floculação segue imediatamente à coagulação e consiste em um processo físico no qual os flocos se desenvolvem por colisões sucessivas entre partículas, promovidas por agitação lenta e controlada. Isso resulta na formação de estruturas porosas e maiores, favorecendo a posterior separação física por sedimentação (Metcalf et al., 2016).

A sedimentação, por sua vez, é o processo que permite a remoção dos flocos formados pela ação da gravidade. À medida que esses flocos descem pela câmara de sedimentação, continuam a agregar partículas menores, acumulando-se no fundo do tanque sob a forma de lodo (Girard, 2009). A sequência entre floculação e sedimentação é ilustrada na Figura 4.



Fonte: Metcalf, et al., 2016.

3.4.3 Tratamento secundário ou biológico

Após passar pela etapa de tratamento primário, o efluente industrial ainda pode conter uma quantidade significativa de matéria orgânica dissolvida ou em suspensão que o impede de atender aos limites legais para lançamento no meio ambiente (Oliveira, 2010).

Esse tipo de tratamento utiliza microrganismos como bactérias, fungos, protozoários e vírus, que se alimentam da matéria orgânica presente no efluente, promovendo sua degradação. O processo pode ocorrer de duas formas: com presença de oxigênio (aeróbio) ou sem oxigênio (anaeróbio). Para isso, os efluentes são mantidos em tanques específicos durante um tempo determinado, o suficiente para permitir que os microrganismos realizem sua atividade metabólica (Von Sperling, 2002).

No tratamento anaeróbio, os microrganismos atuam em ambientes sem oxigênio, promovendo a decomposição de compostos orgânicos complexos e convertendo-os principalmente em dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) (Von Sperling, 2002).

Dentre os processos aeróbios, os lodos ativados envolvem tanques equipados com sistemas de aeração e agitação, nos quais o efluente entra em contato com microrganismos que oxidam a matéria orgânica, transformando-a em substâncias simples como água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), promovendo a eliminação de grande parte dos poluentes orgânicos remanescentes. Finalizada essa etapa, a agitação é interrompida, permitindo que os microrganismos se depositem no fundo do tanque, formando um lodo biológico (Kunz e Duran, 2002).

3.4.4 Tratamento terciário ou avançados

A etapa final do tratamento de efluentes, conhecida como tratamento terciário ou avançados, geralmente é aplicada de maneira simplificada. Nessa fase, é comum que se realize apenas a desinfecção do efluente já tratado, utilizando compostos à base de cloro ativo, um agente oxidante potente, capaz de eliminar microrganismos patogênicos (Silva Filho, 2009).

Apesar disso, existe uma variedade de tecnologias avançadas que podem ser incorporadas ao processo para aumentar significativamente sua eficiência, permitindo a remoção total (ou próxima de 100%) dos poluentes. No entanto, essas alternativas geralmente envolvem custos operacionais e de implantação muito elevados. Por essa razão, em grande parte das situações industriais, opta-se por não utilizá-las, já que os parâmetros legais costumam ser atendidos com as etapas anteriores do tratamento convencional (Giustina et al, 2010).

Entre os métodos disponíveis para aprimorar o tratamento terciário de efluentes, diversas tecnologias podem ser aplicadas de acordo com o tipo de poluente a ser removido. Para a eliminação de sólidos dissolvidos, utilizam-se processos como a osmose reversa, a troca iônica, a eletrodialise reversa e a evaporação. Quando o objetivo é a remoção de sólidos suspensos, as alternativas incluem macrofiltração, microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e clarificação, que pode ser potencializada com o uso de ozonização (Akhter et al., 2018).

No caso da remoção de compostos orgânicos presentes no efluente, os métodos mais utilizados são a ozonização e o emprego de carvão ativado, ambos altamente eficientes na degradação de substâncias indesejadas (Schiavon, 2012).

Por fim, a desinfecção pode ser realizada por meio de diferentes agentes e processos, tais como o cloro, o ozônio (O_3), o dióxido de cloro (ClO_2), o permanganato de potássio, as cloraminas e a radiação ultravioleta, entre outras opções disponíveis (Costa, 2007).

3.5 Coagulantes inorgânicos

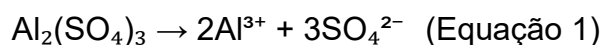
De acordo com Magnan (2010), a escolha do coagulante e sua aplicabilidade são fatores importantes para o tratamento de efluentes industriais. Os coagulantes mais comumente utilizados são os inorgânicos, e os mais conhecidos são o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, que através da produção de hidróxidos gelatinosos, conseguem aglomerar as impurezas.

3.5.1 Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio, cuja fórmula química é $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$, apresenta uma variação no número de moléculas de água de cristalização, geralmente entre 14 e 18. Quando contém 14 moléculas de água, sua estrutura torna-se aproximadamente 12% mais rígida em comparação à versão com 18 moléculas (Pavanelli, 2001). A forma líquida desse coagulante é obtida a partir do hidrato de alumínio e apresenta uma concentração de alumina (Al_2O_3) entre 7% e 8%, já que concentrações superiores a 8,26% podem levar à cristalização do produto. Quando de boa procedência, o sulfato de alumínio líquido é incolor e isento de resíduos insolúveis (Pavanelli, 2001).

Sua ação como coagulante é mais eficiente em ambientes com pH entre 5,5 e 8,5, intervalo no qual ocorrem as reações de hidrólise de forma mais favorável. Ao

ser adicionado à água, o sulfato de alumínio se dissocia rapidamente, liberando íons alumínio e íons sulfato, conforme a Equação 1 química (Rosalino, 2011):

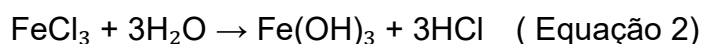


O sulfato de alumínio demonstra alta eficiência na redução de parâmetros como DQO, DBO, turbidez e cor aparente. No entanto, o uso do sulfato de alumínio pode representar um risco à saúde humana, especialmente se for utilizado em doses inadequadas. A exposição excessiva ao alumínio pode contribuir para o desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como Alzheimer, Parkinson e a Síndrome de Down, em razão da incapacidade dos rins de eliminar os metais acumulados no sangue, que são então transportados para o cérebro (Piantá, 2008).

3.5.2 Cloreto férrico

O uso do cloreto férrico no processo de coagulação é amplamente eficaz na remoção de sólidos suspensos e fósforo, sendo sua dosagem normalmente ajustada em conjunto com compostos como cal ou hidróxido de sódio, que contribuem para a elevação do pH e favorecem a formação de flocos (Mancuso & Santos, 2003). Quando adicionado à água, o cloreto férrico sofre uma reação de hidrólise, formando complexos de ferro com carga positiva. Esses complexos atuam neutralizando as partículas de sólidos em suspensão, que geralmente apresentam carga negativa, promovendo sua aglomeração e facilitando a etapa de floculação (Franco, 2009).

Essa reação de hidrólise pode ser representada conforme a Equação 2, onde o cloreto férrico reage com moléculas de água, originando hidróxido de ferro, que atua como principal agente coagulante no meio, além de liberar ácido clorídrico como subproduto. O hidróxido de ferro formado é responsável pela desestabilização das partículas presentes no efluente, favorecendo sua aglutinação e posterior remoção (Magnan, 2010):



Ainda de acordo com Franco (2009), o cloreto férrico é amplamente utilizado no tratamento de esgotos domésticos e industriais. No entanto, é necessário tomar cuidados especiais durante sua manipulação devido à sua natureza corrosiva, o que requer o uso de equipamentos de proteção. Libânio (2010) destaca que algumas vantagens do cloreto férrico em relação ao sulfato de alumínio incluem flocos mais

densos, mais resistentes ao cisalhamento e com maior sedimentabilidade, embora seja importante considerar o risco de corrosão nas tubulações.

No artigo publicado no VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campina Grande/PB, por Mello da Silva et. al. mostrou que a melhor concentração do cloreto férrico para remoção de turbidez ocorreu na concentração próxima de 50g/L.

O cloreto férrico apresenta um pH ótimo de trabalho mais amplo e ligeiramente mais ácido, geralmente entre 4,0 e 9,0, com melhor desempenho em pH mais baixos. Os íons férricos hidrolisam-se para formar hidróxidos de ferro, que são excelentes varredores de impurezas. A manutenção do pH dentro dessas faixas otimizadas é crucial para garantir a máxima remoção de turbidez, cor e outras impurezas da água, resultando em um tratamento mais eficaz e econômico (Richelmi, C. C., & Gherardi, 2007).

3.6 Jar-test

Segundo Letterman et al. (1999), a eficiência da coagulação e floculação é fundamental para a qualidade da água tratada, sendo o Jar Test a ferramenta essencial para a otimização dos parâmetros operacionais.

O Jar Test, ou teste de jarros, Figura 5, é uma simulação em escala de laboratório que reproduz as etapas de coagulação, floculação e decantação do tratamento de água. Sua importância reside na capacidade de determinar a dosagem ótima de coagulantes (como sulfato de alumínio e cloreto férrico), ajustar o pH e otimizar as condições de mistura, minimizando os custos operacionais e maximizando a eficiência da remoção de impurezas. Essa metodologia permite aos operadores e engenheiros avaliar, em tempo real, o comportamento das partículas em suspensão e a formação dos flocos, antes de aplicar as condições testadas em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) ou Estação de Tratamento de Efluente (ETE) em grande escala (Metcalf, et al, 2016).

Figura 5 – Jar-test com capacidade de 6 análises simultâneas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Embora as condições ideais variem de acordo com as características da água bruta e os coagulantes utilizados, o Jar Test segue uma sequência de fases bem definida, simulando os processos de mistura rápida, mistura lenta e sedimentação. Os parâmetros de rotação e tempo são cruciais para o sucesso do teste. Isso inclui uma fase inicial de mistura rápida, com agitação intensa (geralmente entre 100-200 rpm por 1-3 minutos) para promover a dispersão imediata do coagulante e a desestabilização das partículas. Segue-se a mistura lenta (floculação), com agitação mais suave (20-50 rpm por 15-30 minutos), que favorece as colisões e o crescimento dos flocos. Por fim, uma fase de decantação, onde a agitação é interrompida (0 rpm por 30-60 minutos), permite a sedimentação dos flocos formados, e a clareza do sobrenadante é avaliada (Di Bernardo, 2005).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Coleta e análise do efluente

O efluente utilizado neste estudo foi gerado em uma indústria de sorvetes e açaís e coletado diretamente do tanque de equalização, em estado bruto, ou seja, sem qualquer tipo de tratamento prévio. A coleta foi realizada em galões de 5 litros previamente higienizados. Para a realização dos ensaios, o efluente foi coletado em dois dias distintos, gerando dois galões separados. O primeiro galão, obtido na primeira coleta, foi utilizado tanto no pré-ensaio quanto nos testes com o coagulante cloreto férrico. Já o segundo galão, coletado posteriormente, foi destinado exclusivamente às análises com o coagulante sulfato de alumínio. Essa separação permitiu melhor organização dos testes e rastreabilidade das amostras utilizadas em cada etapa do experimento.

Apesar de ambas amostras terem sido retiradas da mesma etapa do processo – o tanque de equalização – observou-se diferença na turbidez inicial. Essa variação estava diretamente relacionada à dinâmica produtiva da fábrica, que trabalhava com uma diversidade de sabores de sorvetes e açaís. Como a produção variava ao longo da semana e do dia, o efluente gerado também apresenta flutuações nas suas características físico-químicas, mesmo após o processo de equalização.

Todos os ensaios e análises foram realizados no bloco S, no Laboratório de Saneamento (Labsan) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Londrina (Figura 6).

Figura 6 – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina

Fonte: Google Earth (2025).

4.2 Parâmetros analisados

Durante o estudo foram analisados os seguintes parâmetros: pH, com um Phamento Ion pHB 500 e turbidez com um turbidímetro Del Lab. Os procedimentos foram realizados conforme o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). As análises do processo de coagulação, floculação e sedimentação com uso dos coagulantes inorgânicos cloreto férrico e sulfato de alumínio foram realizadas no equipamento Jar Test da marca Policontro.

4.3 Ajuste de pH

Foi realizado um pré-ensaio com o objetivo de avaliar a variação do pH do efluente e determinar a dosagem adequada de NaOH 8mol/L necessária para garantir condições ideais de aplicação dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico. O efluente bruto apresentava caráter ácido, com pH inicial de 3,4. Considerando que ambos os coagulantes tendem a reduzir ainda mais o pH da solução, foram adicionados inicialmente 2 mL de solução de NaOH 8mol/L em 500 mL de efluente, com o intuito de corrigir o pH para a faixa de atuação ideal dos coagulantes, entre 5 e 7. O pH após a adição de 2mL de NaOH 8mol/L subiu para 6,15. A tabela 1 Indica o pH inicial e ajustado de amostras de efluente bruto, com indicação da data de coleta e tipo de teste realizado.

Tabela 1 – pH inicial e ajustado de amostras de efluente bruto, com indicação da data de coleta e tipo de teste realizado

Data da coleta na amostra	Ensaio realizado	pH inicial	pH após ajuste	Turbidez (UNT)
05/04/2025	Pré-ensaio e testes do cloreto férrico	3,4	6,15	2090
12/04/2025	Testes do sulfato de alumínio	3,4	6,15	1050

Fonte: Autoria Própria (2025).

A seguir, iniciou-se a aplicação gradual dos coagulantes. A solução de cloreto férrico (50 g/L) e de sulfato de alumínio (10 g/L) em incrementos de dosagem 1,25 mL, observando-se visualmente a formação de flocos a cada volume adicionada de coagulante, e monitorando se o pH permanecia na faixa ideal de trabalho.

O ajuste de pH e o pré-ensaio de coagulação foram realizados em dias diferentes, utilizando amostras distintas de efluente. Por esse motivo, os resultados podem apresentar variações, considerando as possíveis diferenças nas características físico-químicas entre as coletas.

4.4 Configurações do Jar-test

Os ensaios foram conduzidos em frascos com 500 mL de efluente bruto utilizando o equipamento de jar test. Foram preparados 12 frascos contendo o efluente para cada coagulante, submetidos ao processo de coagulação-floculação conforme metodologia proposta por Letterman (1999) ano, ilustrado no Tabela 2. Após a decantação na sequência, alíquotas de 20ml foram retiradas na metade da profundidade de cada jarro e o parâmetro turbidez foi medida para cada amostra.

Tabela 2 - Parâmetros Típicos do Jar Test por Fase do Processo.

Fase do processo	Rotação (rpm)	Tempo (min)
Coagulação	200	2
Floculação	30	15
Sedimentação	0	30

Fonte: Letterman (1999)

4.4 Ensaio

A fim de garantir que os coagulantes atuassem em suas faixas ideais de pH, foi realizado o monitoramento do pH do efluente após a adição de diferentes concentrações de sulfato de alumínio e cloreto férrico. Como etapa prévia aos ensaios de coagulação-floculação, foi adicionado um volume fixo de 2 mL de solução de NaOH 8mol/L em 500 mL de efluente bruto, cujo pH inicial era 3,4.

A Tabela 3 apresenta os valores de pH resultantes para cada concentração dos coagulantes testados. Observa-se que, mesmo com o efeito acidificante característico de ambos os coagulantes, o ajuste com NaOH 8mol/L foi suficiente para manter o pH dentro da faixa ideal de atuação, condição fundamental para a formação eficiente de flocos e conseqüente remoção da turbidez.

Tabela 2 - Variação do pH após correção em função da concentração dos coagulantes.
Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – 10 g/L) | **Cloreto Férrico (FeCl_3 – 50 g/L)**

Volume da Solução (mL)	Concentração (g/L)	pH da Amostra	Volume da Solução (mL)	Concentração (g/L)	pH da Amostra
0,00	0,000	6,15	0,00	0,000	6,15
2,50	0,050	6,04	2,50	0,250	6,03
3,75	0,075	6,03	3,75	0,375	6,01
5,00	0,100	6,03	5,00	0,500	6,00
6,25	0,125	6,02	6,25	0,625	5,98
7,50	0,150	5,99	7,50	0,750	5,96
8,75	0,175	5,95	8,75	0,875	5,94
10,00	0,200	5,92	10,00	1,000	5,93
11,25	0,225	5,89	11,25	1,125	5,90
12,50	0,250	5,86	12,50	1,250	5,87
13,75	0,275	5,84	13,75	1,375	5,85
15,00	0,300	5,81	15,00	1,500	5,83
16,25	0,325	5,79	16,25	1,625	5,80

Fonte: Autoria Própria (2025).

Os ensaios com sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), aplicando dosagens de 0 a 16,25 mL, mantiveram o pH do efluente ajustado dentro da faixa ideal para sua atuação, entre 5,5 e 7,5 (Di Bernardo, 2005)

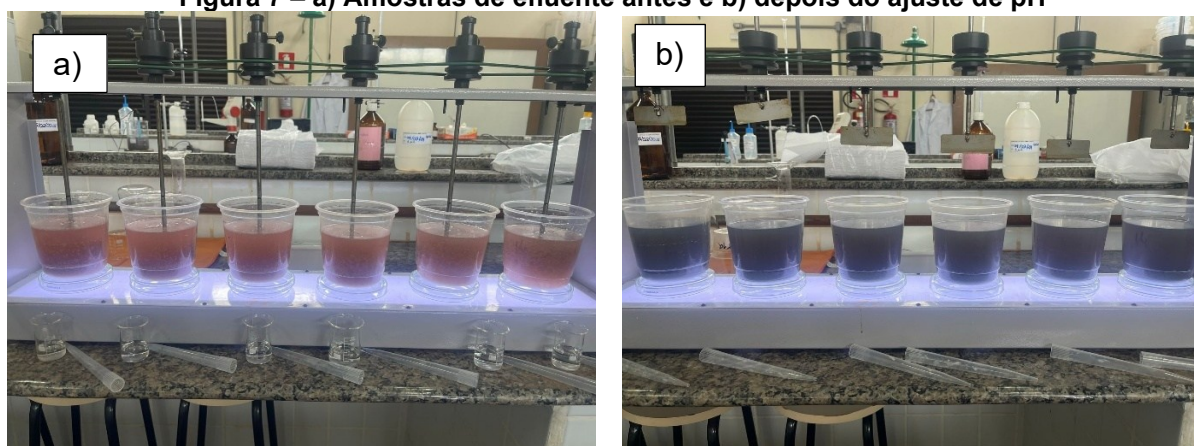
De forma semelhante, durante os testes com cloreto férrico (FeCl_3), observou-se que as dosagens variando de 0 até 16,25 mL mantiveram o pH dentro da faixa ótima de operação do coagulante, entre 4,0 e 9,0 (Richelmi, 2007).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Condições observadas durante o ensaio

A Figura 7 ilustra a diferença aparente na cor do efluente antes e após aplicação de NaOH 8mol/L para controle de pH. Durante os ensaios de jar test, observou-se que o efluente bruto apresentava pH inicial de 3,4 e coloração rosada. Após a adição de 2 mL de solução de NaOH (8N), o pH foi ajustado para 6,15, e a amostra apresentou uma mudança visível na coloração, passando de rosado para um tom acinzentado.

Figura 7 – a) Amostras de efluente antes e b) depois do ajuste de pH



Fonte: Autoria Própria (2025).

Essa alteração pode ser atribuída à precipitação de compostos orgânicos e metálicos presentes no efluente, que, em pH ácido, se mantinham dissolvidos ou em forma coloidal, conferindo coloração ao meio. Com o aumento do pH, esses compostos sofreram reações de neutralização e precipitação, formando partículas insolúveis que alteram a aparência do efluente (Metcalf & Eddy, 2016). Esse comportamento é comum em efluentes com alta carga orgânica ou presença de corantes e aditivos alimentares, como ocorre na indústria de sorvetes e açaís, onde a composição do efluente varia conforme a produção.

5.2 Resultados de turbidez

Tabela 4 apresenta os dados obtidos nos ensaios de coagulação-floculação realizados com os coagulantes cloreto férrico (FeCl_3) e sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Para cada dosagem aplicada, foi medida a turbidez final do efluente e calculada a

concentração do coagulante na amostra e a porcentagem de remoção, com base nos valores iniciais de turbidez de cada amostra.

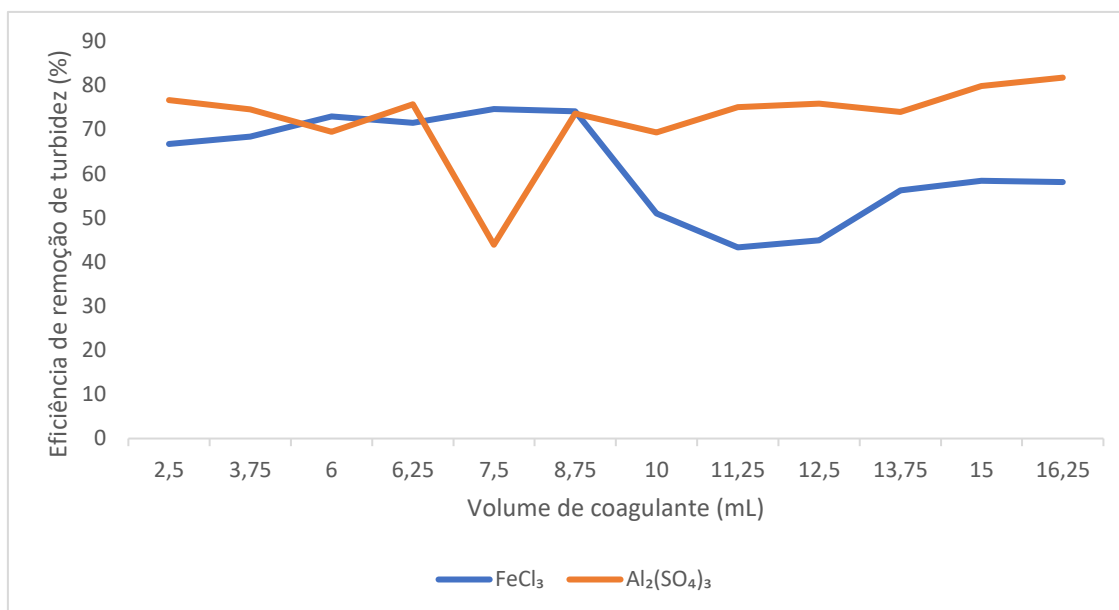
É importante destacar que as amostras utilizadas apresentaram turbidez inicial diferente, devido à coleta ter sido realizada em dias distintos. Essa variação está diretamente relacionada à diversidade de sabores produzidos na fábrica de sorvetes e açaís, que impacta a composição e a carga poluente do efluente gerado, mesmo após o processo de equalização.

Tabela 4 – Eficiência na Redução de Turbidez com Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio.

FeCl₃ (50 g/L)				Al₂(SO₄)₃ (10 g/L)			
Volume (mL)	Concentração (g/L)	Turbidez (NTU)	Redução (%)	Volume (mL)	Concentração (g/L)	Turbidez (NTU)	Redução (%)
0,00	0,000	2090	–	0,00	0,000	1050	–
2,50	0,250	695	66,75	2,50	0,050	245	76,67
3,75	0,375	660	68,42	3,75	0,075	267	74,57
5,00	0,500	565	72,97	5,00	0,100	320	69,52
6,25	0,625	595	71,53	6,25	0,125	254,50	75,76
7,50	0,750	530	74,64	7,50	0,150	589	43,90
8,75	0,875	540	74,16	8,75	0,175	277	73,62
10,00	1,000	1025	50,96	10,00	0,200	322	69,33
11,25	1,125	1185	43,30	11,25	0,225	261,50	75,10
12,50	1,250	1150	44,89	12,50	0,250	253	75,90
13,75	1,375	915	56,22	13,75	0,275	273,50	73,95
15,00	1,500	870	58,37	15,00	0,300	211,50	79,86
16,25	1,625	875	58,13	16,25	0,325	191,50	81,76

Fonte: Autoria Própria (2025)

A partir desses dados, construiu-se o Gráfico 1, que representa a eficiência de redução da turbidez em função da dosagem de coagulante aplicada. Esse gráfico permite visualizar o comportamento do processo de coagulação, evidenciando o ponto de maior eficiência para cada coagulante testado, bem como o possível excesso de dosagem que pode gerar uma queda na eficiência devido à destabilização dos flocos. A interpretação do Gráfico 1 é fundamental para determinar a dosagem ótima a ser utilizada no tratamento do efluente.

Gráfico 1 - Eficiência de redução de turbidez x volume de coagulante

Fonte: Autoria Própria (2025)

Ao analisar os resultados obtidos com o uso do cloreto férrico, observa-se uma redução inicial significativa da turbidez com o aumento da dosagem, atingindo os melhores resultados até a faixa de 7,50 mL, com 74,64% de remoção. No entanto, dosagens superiores resultaram em aumento da turbidez, chegando a 1185 UNT na dosagem de 11,25 mL, antes de voltar a reduzir nas dosagens finais. Esse comportamento é explicado pelo fenômeno conhecido como reestabilização das partículas, que ocorre quando há excesso de coagulante no meio. A partir de uma certa concentração, os íons metálicos presentes no coagulante deixam de atuar apenas na neutralização das cargas e começam a inverter a carga superficial das partículas, promovendo nova repulsão eletrostática entre elas, o que impede a formação de flocos e aumenta a turbidez da água (Tchobanoglous et al., 2014). Esse efeito ressalta a importância da definição de uma dosagem ótima, que promova a máxima remoção de partículas sem ultrapassar o ponto de reestabilização.

O sulfato de alumínio apresentou seu melhor desempenho na concentração de 0,325 g/L, atingindo 81,76% de redução de turbidez de uma amostra bruta com 1050 NTU. Já o cloreto férrico demonstrou maior eficiência com a concentração de 0,750 g/L, promovendo 74,64% de redução de turbidez da amostra inicial com 2090 NTU. Um comportamento semelhante foi observado com o sulfato de alumínio: dosagens abaixo da faixa ideal resultaram em remoção insuficiente de turbidez, caracterizando

subdosagem,, possivelmente devido à reestabilização das partículas em suspensão — fenômeno similar ao identificado nos testes com cloreto férrico.

Além disso, a Resolução CONAMA nº 357/2005, que classifica os corpos hídricos segundo seu uso e estabelece padrões de qualidade, inclui um limite de turbidez de até 40 UNT para águas doces de Classe 1, e de até 100 UNT para as de Classe 2. Já a Resolução CONAMA nº 430/2011, que atualiza as regras para lançamento de efluentes, não define um valor específico de turbidez para despejo, focando em parâmetros como pH, temperatura, materiais sedimentáveis, óleos e DBO, mas sem especificar um limite de turbidez. Isso reforça a importância de monitorar esse parâmetro nos efluentes tratados, para garantir que não haja impacto indesejado na turbidez do corpo receptor.

7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, foi possível identificar as condições ótimas para aplicação dos coagulantes avaliados, tanto em eficiência na remoção de turbidez quanto da manutenção do pH dentro das faixas recomendadas para cada coagulante.

Como o efluente bruto possuía pH inicial de 3,4, o que está abaixo das faixas ideais para a atuação de ambos os coagulantes (5,5 a 8,5 para o sulfato de alumínio e 4,0 a 9,0 para o cloreto férrico) foi previamente realizada uma correção alcalina com a adição de 2 mL de solução de NaOH 8N em 500 mL de efluente, equivalente a 1,275g NaOH/L, antes da aplicação dos coagulantes. Essa adição garantiu que os coagulantes atuassem dentro de suas respectivas faixas ótimas de pH, mesmo com o acréscimo progressivo de concentração.

Para o sulfato de alumínio, o pH final variou de 6,15 (sem coagulante) até 5,79 na dosagem de 0,325 g/L. Para o cloreto férrico, o pH variou de 6,15 a 5,96 na concentração ótima de 0,750 g/L. Em ambos os casos, os valores permaneceram dentro das zonas ideais de atuação dos coagulantes, evidenciando que a alcalinização inicial foi eficaz em neutralizar a tendência de acidificação provocada pelos sais metálicos.

Portanto, os ensaios demonstram que, sob as condições testadas, as dosagens de 0,325 g/L de sulfato de alumínio e 0,750 g/L de cloreto férrico, combinadas com a correção de pH por NaOH, resultaram na remoção de turbidez.

Em relação aos resultados de turbidez, o coagulante cloreto férrico (FeCl_3) apresentou sua maior eficiência ao reduzir a turbidez de 2.090 NTU para 530 NTU, correspondendo a uma remoção de 74,64%. Já o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) obteve desempenho superior, reduzindo a turbidez de 1.050 NTU para 191,5 NTU, o que representa uma remoção de 81,76%. Esses resultados evidenciam a eficácia de ambos os coagulantes, com destaque para o sulfato de alumínio nas condições testadas.

Adicionalmente, ressalta-se a importância de avaliar outros tipos de coagulantes, inclusive alternativas naturais e sustentáveis, e expandir a pesquisa para condições operacionais em escala piloto ou real. Assim, os dados apresentados neste estudo oferecem um ponto de partida para tomada de decisão em projetos industriais, para tratamento deste tipo de efluente, além de contribuir para o avanço técnico-científico em sistemas físico-químicos com características variáveis.

8. REFERÊNCIAS

AKHTER, Mohsan et al. **Application of electro dialysis in waste water treatment and impact of fouling on process performance**. Journal of membrane, 2018.

ANDRADE, N. J.; MACEDO, J. A. B. **Higienização na indústria de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 2011.182 p.

AZZIOLINI, J. C.; FABRO, L. F. **Monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de um laticínio da região Meio-Oeste de Santa Catarina**. *Unoesc & Ciência ACET*, [s.l.], v. 4, p. 43-60, 2013.

BERTOLLO. **Produção de açaí: conheça como funciona seu processo industrial**. Disponível em: <https://www.bertollo.com.br/blog/producao-de-acai-conheca-o-processo-industrial/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 267, de 25 de setembro de 2003. *Diário Oficial da União, Brasília*, 25 set. 2003.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União, Brasília*, 18 mar. 2005

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 16 de maio de 2011. *Diário Oficial da União, Brasília*, 17 maio 2011.

CASTRO, V. C. Diagnóstico do consumo de água e geração de efluentes e de resíduos sólidos em um laticínio de pequeno porte. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007

CAVALCANTI, J. E. W. A. Manual de tratamento de efluentes industriais. Engenho, 2016. Disponível em: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=be02e40b-49dd-3802-8e05-6bce92bf3d15>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CLAAS, I. C.; MAIA, R. A. M. **Manual básico de resíduos industriais de curtume**. Senai, 1994.

COSTA, Juliana B. da. **Avaliação toxicológica de efluente de tratamento secundário de esgoto sanitário após desinfecção com ácido peracético, cloro, ozônio e radiação ultravioleta**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia

Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DE ARAÚJO, B. M.; SANTOS, A. S. P.; DE SOUZA, F. P. Comparativo econômico entre o custo estimado do reuso do efluente de ETE para fins industriais não potáveis e o valor da água potável para a região Sudeste do Brasil. *Exatas & Engenharias*, v. 7, n. 17, p. 60, 24 mar. 2017.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos, SP: RiMa, 2005. 2 v. ISBN 8576560666 (v.1).

FELICI, E. M. **Coagulação-floculação-sedimentação como pós-tratamento de efluente de sistema biológico em batelada aplicado a lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificação e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

FINAMAC. **Conheça como funciona cada etapa da produção de sorvetes**. Disponível em: <https://blog.finamac.com/conheca-como-funciona-cada-etapa-da-producao-de-sorvetes/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

FRANCO, Elton S. **Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água**. 2009. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GIUSTINA, S.V.D.; MIRANDA, L.A.S.; MONTEGGIA, L.O. **Remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos por nova configuração de biofiltro aeróbio submerso no pós-tratamento de efluente de reator UASB**. *Eng Sanitaria e Ambiental*. v.15. Jul/set 2010.

IBRAHIN, F.I. D., IBRAHIN, F. J., & CANTUÁRIA, E. R. **Análise Ambiental - Gerenciamento de Resíduos e Tratamento de Efluentes**. [s.l.] Editora Saraiva, 2015.

KUNZ, Airton; DURÁN, Nelson. **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis**. *Revista Química Nova*, Vol. 25, N. 1, 78-82, 2002.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. São Paulo: Editora Átomo, 2010

LUCAS, L. M.; CUNHA, S. B. **Rede de drenagem urbana em área tropical: mudanças na morfologia do canal e níveis de poluição das águas** – Rio dos Macacos – Rio de Janeiro – RJ. *GEOUSP: Espaço e Tempo*, n. 22, p. 39-64, 2007.

MAGANHA, M. F. B. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Produtos Lácteos**. São Paulo: CETESB, 2006.

MAGNAN, Rafael B. **Análise da viabilidade técnica e financeira da substituição do coagulante cloreto férrico por policloreto de alumínio durante o processo físico-químico no tratamento de efluente de abatedouro avícola**. 2010. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental. Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, p.3; 17-19, 2010.

MANCUSO, PEDRO C. S.; SANTOS, F. **Reúso da água**. 3 ed. Barueri: Manuelie, 2003.

METCALF & EDDY; TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; VESTAL, W. R. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

METCALF, E.; EDDY, H. **Wastewater Engineering: Treatment and reuse**. Revisado por: George Tchobanoglous, Franklin L. Burton e H. David Stensel. 5.ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MILKPOINT. **Composição e tratamento de efluentes na indústria de laticínios**. 2018. Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/artigos/industria-de-laticinios/tratamento-de-efluentes-na-industria-de-laticinios-211719/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

NASCIMENTO, F. C. **Tratamento de efluentes da produção de tintas industriais, automotivas e de repintura por irradiação com feixe de elétrons**. São Paulo: 59 Universidade de São Paulo, 9 set. 2013.

NUNES, J.A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6 revisada, ampliada e atualizada. Aracaju: Editora J. Andrade, 2012. p. 315

OLIVEIRA, H. A. **Avaliação do processo de tratamento biológico de águas residuárias sanitária e industrial em sistema combinado com reator biológico de**

contato seguido de filtro aerado submerso. 2010. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

OWODUNNI, A. A.; ISMAIL, S. **Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment—A review.** *Journal of Water Process Engineering*, v. 42, p. 102096, 2021.

PIANTÁ, Cyro A. V. **Emprego de coagulantes orgânicos naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água.** 2008. 78 f. Trabalho de Diplomação – Curso Superior de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008

RENHE, I. R. T.; WEISBERG, E.; PEREIRA, D. B. C. **Indústria de gelados comestíveis no Brasil.** *Informe Agropecuário*, v. 36, n. 284, p. 81-86, 2015.

REVISTA AIDIS. **Tratabilidade de efluente de uma indústria de açaí.** *Revista AIDIS*, v. 14, n. 2, p. 550-563, 6 ago. 2021. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/download/71476/70693>. Acesso em: 21 jun. 2025.

ROSALINO, Melanie R. R. **Potenciais efeitos da presença de alumínio na água de consumo humano.** 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SANTANA, G. B. et al. **Aplicação da semente de moringa (Moringa oleífera) como coagulante natural no tratamento de efluente de indústria de tintas no Ceará.** *Revista Tecnologia*, v. 41, n. 1, 7 mar. 2020.

SARAIVA, C. B.; PEREIRA, D. A. **Subsídios para o uso sustentável da água em uma indústria de laticínio de pequeno porte: avaliação do consumo e geração de efluentes.** *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 4, n. 2, 2009

SCHIAVON, Gilson J. **Modelagem, desenvolvimento e análise de um sistema gerador de ozônio, operando em alta frequência com controlador digital de sinais.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química (DEQ), Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, 2012.

SHIKAMA, Felipe. **ABIS lança campanha para que o alimento ocupe papel similar ao do tradicional cafezinho no Brasil.** Associação Brasileira das Indústrias de

Sorvetes, 23 set. 2020. Disponível em: <https://www.abis.com.br/sorvete-movimentou-r-13-bilhoes-em-2019/>. Acesso em: 20 abril. 2024..

SILVA FILHO, A. **Tratamento terciário de efluentes de uma indústria de refrigerantes visando ao reuso – Um estudo de caso**. Dissertação de mestrado, Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2009.

SILVA, Camila de Mello; PORTO, Camila de Almeida; RODRIGUES, Elisângela Maria Rocha; SILVA, Erika Lima; ANJOS JÚNIOR, Romildo Henriques. **Pré-tratamento de efluentes de laticínio visando a remoção da turbidez**. 2016. Publicação. Campina Grande. 2016.

SOUZA, A. P. **Physical and chemical parameters for the characterization of industrial effluents: a review**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 8, 2017.

TATSI, A. A; et al. **Coagulation – flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates**. *Chemosphere*, v. 53, p.737–744, 2003.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; EDDY, M.; VESTAL, W. R. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

VON SPERLING, M. V.. **Lodos Ativados**. 2. ed. ampl. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 428 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 4) ISBN 85-7041-129-4.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2005.