

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**BIANCA TAQUES DE OLIVEIRA
TAMIRIS MIDORI IBATA DARIO**

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA CARGA ORGÂNICA DE UM EFLUENTE
INDUSTRIAL CONTENDO COMPOSTOS ORGÂNICOS DE UMA INDÚSTRIA DE
RESINAS POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM POLICLORETO DE
ALUMÍNIO E POLIACRILAMIDA NÃO-CATIÔNICA**

PONTA GROSSA

2026

**BIANCA TAQUES DE OLIVEIRA
TAMIRIS MIDORI IBATA DARIO**

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA CARGA ORGÂNICA DE UM EFLUENTE
INDUSTRIAL CONTENDO COMPOSTOS ORGÂNICOS DE UMA INDÚSTRIA DE
RESINAS POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM POLICLORETO DE
ALUMÍNIO E POLIACRILAMIDA NÃO-CATIÔNICA**

**Evaluation of organic load reduction in a resin industry wastewater containing
organic compounds by coagulation–flocculation using Polyaluminum Chloride
and Non-Cationic Polyacrylamide**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Juliana Martins Teixeira de Abreu
Pietrobelli.

**PONTA GROSSA
2026**



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

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

**BIANCA TAQUES DE OLIVEIRA
TAMIRIS MIDORI IBATA DARIO**

**AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA CARGA ORGÂNICA DE UM EFLUENTE
INDUSTRIAL CONTENDO COMPOSTOS ORGÂNICOS DE UMA INDÚSTRIA DE
RESINAS POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM POLICLORETO DE
ALUMÍNIO E POLIACRILAMIDA NÃO-CATIÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02/julho/2026

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Peixoto de Araújo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Graciela Leila Heep
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2026**

Dedicamos esse trabalho aos nossos pais, que
andaram sob o sol para que andássemos na
sombra.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela formação acadêmica e pelas oportunidades proporcionadas ao longo destes anos, que contribuíram significativamente para nosso desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradecemos à nossa orientadora, Prof. Dra. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli, pela orientação, paciência, disponibilidade e confiança durante a realização deste trabalho. Seus conhecimentos e direcionamentos foram fundamentais para a conclusão desta pesquisa.

Agradecemos aos técnicos, professores e colegas que auxiliaram na execução dos experimentos, análises laboratoriais e discussões científicas, tornando este trabalho possível.

Aos nossos pais, irmãos e cônjuge, por todo apoio, incentivo e compreensão ao longo desta jornada. Obrigada por acreditarem em nós mesmas, nos momentos em que mais duvidamos.

Agradecemos a todas as experiências que vivemos durante a graduação, nas pesquisas, projetos de extensão e nos estágios. Cada desafio enfrentado contribuiu para as profissionais que nos tornamos.

"Nada na vida deve ser temido, apenas
compreendido. Agora é hora de
compreender mais, para que possamos
temer menos" (Marie Curie, 1930).

RESUMO

Os efluentes gerados na indústria de resinas sintéticas representam um importante desafio ambiental devido à presença de compostos orgânicos recalcitrantes, como tolueno, xileno, butanol e resíduos de formaldeído, os quais contribuem para elevadas concentrações de matéria orgânica e baixa biodegradabilidade. Essas características limitam a eficiência de tratamentos biológicos convencionais, tornando necessária a aplicação de processos físico-químicos para sua adequação. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a eficiência da coagulação-floculação utilizando policloreto de alumínio (PAC) associado à poliacrilamida não catiônica na redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e da turbidez de um efluente proveniente de uma indústria de resinas sintéticas. Foram realizados doze ensaios de bancada, nos quais foram avaliadas diferentes dosagens de PAC e poliacrilamida, bem como a influência da temperatura do efluente no processo. Os resultados demonstraram que a temperatura exerceu influência significativa na formação dos flocos, sendo observada maior eficiência de coagulação em temperaturas superiores a 25 °C. Na melhor condição experimental, obteve-se redução de 60% da DQO e 97,87% da turbidez, evidenciando a eficiência do processo na remoção de matéria orgânica e na clarificação do efluente. A análise do teor de formaldeído indicou remoção limitada pelo processo, sendo observada redução máxima de 15,18%, apontando que o composto permaneceu predominantemente na fase dissolvida após o tratamento. Os resultados indicam que a coagulação-floculação com PAC e poliacrilamida não catiônica constitui uma alternativa promissora para o pré-tratamento de efluentes industriais complexos, contribuindo para a redução da carga orgânica, melhoria das características físicas do efluente e potencialização de etapas subsequentes de tratamento, devido à caracterização do efluente.

Palavras-chave: efluentes complexos; resinas; compostos orgânicos; demanda química de oxigênio.

ABSTRACT

Wastewater generated in the synthetic resin industry represents a major environmental challenge due to the presence of recalcitrant organic compounds, such as toluene, xylene, butanol, and formaldehyde residues, which contribute to high concentrations of organic matter and low biodegradability. These characteristics limit the efficiency of conventional biological treatments, making the application of physicochemical processes necessary for their proper conditioning. In this context, the present study evaluated the efficiency of coagulation-flocculation using polyaluminum chloride (PAC) combined with non-cationic polyacrylamide in reducing the Chemical Oxygen Demand (COD) and turbidity of an effluent from a synthetic resin industry. Twelve bench-scale tests were performed, evaluating different dosages of PAC and polyacrylamide, as well as the influence of wastewater temperature on the process. The results demonstrated that temperature exerted a significant influence on floc formation, with higher coagulation efficiency observed at temperatures above 25 °C. Under the best experimental condition, a 60% reduction in COD and 97.87% reduction in turbidity were achieved, highlighting the efficiency of the process in organic matter removal and effluent clarification. Formaldehyde removal was limited, with a maximum reduction of 15.18%, indicating that a significant fraction of the compound remained dissolved in the treated effluent. The results indicate that coagulation-flocculation with PAC and non-cationic polyacrylamide constitutes a promising alternative for the pretreatment of complex industrial effluents, contributing to the reduction of the organic load, improvement of the physical characteristics of the wastewater, and the enhancement of subsequent treatment stages, given the effluent's characterization.

Keywords: complex effluent; resins; organic compounds; chemical oxygen demand.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pilares da sustentabilidade.....	19
Figura 2 - Estrutura química do formaldeído.....	25
Figura 3 - Estrutura molecular do butanol.....	25
Figura 4 - Estrutura molecular do tolueno.....	26
Figura 5 - Atuação do processo de coagulação-floculação.....	29
Figura 6 - Polimerização da acrilamida pura.....	32
Figura 7 - Titulador automático Metrohm 906 Titrando.....	36
Figura 8 - Efluente puro.....	41
Figura 9 - Efluente após processo de coagulação-floculação em temperatura de 25°C.....	43
Figura 10 - Efluente após processo de coagulação-floculação em temperatura de 45°C.....	44
Figura 11 - Efluente no processo de coagulação-floculação em temperatura de 30°C.....	44
Figura 12 - Amostra 10 após o processo de de filtração.....	47
Figura 13 - Comparativo das amostras com o efluente puro após refrigeração.....	49
Figura 14 - Efluente puro em comparação com as amostras 7,8 e 9 logo após refrigeração.....	50
Figura 15 - Amostra 10 mantida à temperatura ambiente após refrigerada.....	50
Figura 16 - Amostras 9 e 7 antes centrifugação.....	51
Figura 17 - Amostra 9 após centrifugação.....	52
Figura 18 - Amostra 7 após centrifugação.....	52
Figura 19 - Mapas de contorno das respostas do processo de coagulação-floculação.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de resinas em relação à matéria-prima, produção e características.....	16
Tabela 2 - Características dos níveis de tratamento.....	27
Tabela 3 - Ensaio de coagulação-floculação.....	39
Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos desejáveis.....	41
Tabela 5 - Características físico-químicas iniciais do efluente de lavagem.....	42
Tabela 6 - Quedas de pH após coagulação-floculação.....	45
Tabela 7 - Resultados da DQO.....	46
Tabela 8 - Resultados da turbidez.....	47
Tabela 9 - Resultados da Concentração de Formaldeído.....	53
Tabela 10 - Melhores resultados obtidos no processo de coagulação-floculação.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ESG	Environmental, Social and Governance
ETEs	Estação de Tratamento de Efluentes
IBC	Intermediate Bulk Containers
NPAM	Poliacrilamida não-catiônica
OD	Oxigênio Dissolvido
PAC	Policloreto de alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
POAs	Processos Oxidativos Avançados
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Indústria Química de Resinas e Sustentabilidade.....	16
3.1.1	Cenário Industrial e Processos Produtivos.....	16
3.1.2	Alinhamento aos Pilares Sustentáveis e Economia Circular.....	18
3.2	Efluentes industriais.....	19
3.2.1	Parâmetros físico-químicos relevantes para efluentes industriais.....	20
3.2.2	Legislação ambiental aplicável a efluentes industriais.....	23
3.3	Compostos orgânicos em efluentes industriais.....	24
3.4	Tratamento de efluentes.....	26
3.4.1	Métodos físicos e biológicos.....	28
3.4.2	Métodos físico-químicos.....	29
3.5	O processo de coagulação-floculação.....	29
3.5.1	Coagulação.....	30
3.5.2	Floculação.....	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1	Origem e coleta do efluente industrial.....	34
4.2	Determinações analíticas e caracterização físico-química inicial.....	34
4.2.1	pH.....	34
4.2.2	Turbidez.....	35
4.2.3	Percentual de formaldeído.....	35
4.2.4	Matéria orgânica por DQO.....	36
4.3	Ensaio de coagulação-floculação.....	37
4.4	Declaração de ferramentas de Inteligência Artificial Generativa.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1	Caracterização do efluente.....	41
5.2	Ensaio de coagulação-floculação.....	42
5.2.1	A variação da temperatura do efluente.....	42
5.2.2	As dosagens de coagulantes.....	44
5.3	Avaliação dos ensaios sobre a DQO.....	46
5.4	Avaliação do comportamento visual e estabilidade coloidal.....	49
5.5	Avaliação dos ensaios sobre o formol.....	53
6	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A relevância da responsabilidade ambiental e a consolidação de conceitos como Environmental, Social and Governance (ESG) impulsionaram as indústrias a reavaliar suas operações no ramo ambiental. Uma vez que, tal aprimoramento não se limita apenas à conformidade legal, mas representa uma iniciativa estratégica para mitigar impactos ambientais e fortalecer a sustentabilidade corporativa, visando, por sua vez, tanto a otimização de custos operacionais quanto o fomento de práticas alinhadas à responsabilidade socioambiental da empresa.

Para setores como a indústria química de resina, que gera efluentes com elevada Demanda Química de Oxigênio (DQO) e compostos de difícil degradação, o desenvolvimento de alternativas eficientes de tratamento interno é crucial, devido ao fato de que a geração de efluentes com alta carga orgânica é uma característica inerente aos seus processos produtivos. Por exemplo, são produzidos principalmente pelo processo de limpeza do reator e em sua composição pode conter: água, solventes, detergentes e destilados de resina (CETESB, 2008). Como resultado, o efluente final oriundo dessa atividade industrial se apresenta como um desafio ambiental relevante devido à complexidade de tratamento.

A DQO é um parâmetro amplamente utilizado como um indicador de carga orgânica em efluentes, muito aplicado no monitoramento de estações de tratamento de efluentes (Rezende, 2020). Esse parâmetro fornece uma estimativa da quantidade de matéria orgânica presente em um efluente que pode ser oxidada por agentes químicos, logo, amostras que possuem valores altos de DQO indicam que os componentes consomem uma elevada quantidade de oxigênio para a sua decomposição, caracterizando-se, em muitos casos, como de difícil degradação.

Essa característica do efluente torna o tratamento por meio de métodos biológicos muitas vezes insuficiente, além de prejudiciais para o próprio sistema de tratamento. Os processos convencionais de tratamento biológico não são suficientes para remover compostos orgânicos persistentes ou recalcitrantes em águas residuais, sendo necessário o acréscimo de etapas de pré-tratamento ou tratamento terciário (Oturán; Aaron, 2025).

Nesse contexto, o presente trabalho tem por propósito desenvolver e analisar o desempenho do coagulante Policloreto de alumínio com conjunto com o floculante polímero poliacrilamida para a redução de DQO como fase de

pré-tratamento de um efluente industrial proveniente de uma indústria química de resinas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a redução da carga orgânica de um efluente industrial contendo compostos orgânicos de uma indústria química de resinas por coagulação-floculação com policloreto de alumínio (PAC) e poliacrilamida não-catiônica.

2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar a eficiência do policloreto de alumínio (PAC), associado a poliacrilamida não-catiônica, na redução da carga orgânica expressa em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO);
- b) Avaliar o comportamento do processo em efluentes compostos por diversas substâncias orgânicas;
- c) Investigar a influência das características físico-químicas do efluente e das dosagens dos agentes químicos no desempenho do método de coagulação-floculação;
- d) Realizar a caracterização físico-química inicial do efluente bruto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Indústria Química de Resinas e Sustentabilidade

3.1.1 Cenário Industrial e Processos Produtivos

A indústria de resinas é um dos segmentos mais relevantes dentro do setor químico. A cadeia produtiva das resinas têm papel estratégico na indústria brasileira, não apenas pelo volume de produção, mas também por sua forte integração com diversos setores industriais, como os de tintas, adesivos e embalagens (Borschiver; Antunes; Wongtschowski, 2002).

As resinas podem ser classificadas em dois grandes grupos principais: naturais e sintéticas. As naturais são aquelas obtidas a partir de fontes vegetais ou animais, já as sintéticas, amplamente utilizadas na indústria, são obtidas por meio de processos químicos com formulações que permitem um maior controle das propriedades finais do material. Dentro do grupo das sintéticas, Fazenda (2009) cita as alquídicas, epóxi, acrílicas e melamínicas, que correspondem aos principais tipos de resinas produzidos pela empresa estudada, apresentando para cada uma as matérias-primas utilizadas, as formas de produção e suas principais características. A Tabela 1 apresenta um comparativo dessas resinas em relação aos tópicos mencionados.

Tabela 1 - Comparativo de resinas em relação à matéria-prima, produção e características

(continua)

Resina	Matéria-prima principal	Forma de produção	Característica
Alquídica	Ácidos graxos, poliácidos e poliálcoois	Reação de esterificação entre os componentes	Flexibilidade, boa aderência, brilho e resistência moderada à água
Epóxi	bisfenol A e epicloridrina	Polimerização envolvendo grupos glicídila	Alta adesão, dureza, resistência química e mecânica, resistência à corrosão.
Acrílica	Monômeros acrílicos e metacrílicos	Polimerização em cadeia, geralmente em emulsão	Boa transparência, retenção de brilho e cor, resistência aos raios UV, secagem rápida.

Tabela 1 - Comparativo de resinas em relação à matéria-prima, produção e características

(conclusão)			
Resina	Matéria-prima principal	Forma de produção	Característica
Melamínica	Melamina e formaldeído	Condensação entre melamina e formaldeído	Alta resistência térmica, excelente dureza, durabilidade e estabilidade

Fonte: Adaptado de Fazenda (2009)

O processo industrial de produção de resinas consiste, genericamente, na adição de matérias-primas sólidas e líquidas em reatores aquecidos, onde a agitação promove suas misturas e reações (Silva, 2008). Após a reação, a resina é encaminhada para diluição e posteriormente para a filtração.

Um dos principais desafios ambientais deste setor é o gerenciamento dos efluentes líquidos gerados ao longo dessas etapas. Eles são formados principalmente pelas lavagens de reator e pisos (que contêm resíduos de solventes e resinas), pela regeneração do sistema de osmose, pelas descargas das torres de resfriamento e caldeiras. Já a sua composição varia de acordo com a resina produzida, podendo conter: água com detergente, tolueno, butanol, anidrido, formaldeído, óleos vegetais, entre outros.

Dentre os compostos presentes nos efluentes gerados, destacam-se substâncias com características físico-químicas diversas que podem interferir no desempenho das etapas de tratamento. O tolueno e o butanol, por exemplo, são solventes orgânicos voláteis com baixa solubilidade em água e alta toxicidade (Braskem; Basf, 2025), o tolueno pode inibir o crescimento das bactérias do lodo ativado, especialmente quando adicionado diretamente ao meio (Nahar; Alauddin; Quilty, 2000). Já o butanol é tóxico para culturas bacterianas, pois à medida que a concentração dele aumenta, as atividades biológicas diminuem significativamente (Chen et al., 2012). O anidrido ftálico, utilizado na produção de resinas alquídicas, apresenta baixa solubilidade em água, caráter ácido e estrutura aromática estável (Brisco, 2021) dificultando sua degradação por microrganismos.

O formaldeído, por sua vez, é um composto altamente solúvel em água, com odor pungente e pH ácido, classificado como tóxico por diversas vias de exposição. É amplamente utilizado como bactericida e, mesmo em baixas concentrações, pode causar severa irritação no trato respiratório e sensibilização cutânea. Essas características comprometem a atividade microbiana nos sistemas biológicos de tratamento, uma vez que o composto pode inibir ou eliminar os microrganismos responsáveis pelos processos de degradação, afetando diretamente a eficiência do sistema (GPC Química, 2016).

Portanto, a compreensão das rotas produtivas e das matérias-primas utilizadas no setor de resinas é fundamental para contextualizar a complexidade dos efluentes gerados e a busca por alternativas operacionais mais sustentáveis.

3.1.2 Alinhamento aos Pilares Sustentáveis e Economia Circular

O setor químico precisa conciliar a produção industrial com práticas sustentáveis, buscando reduzir os impactos ambientais causados por suas atividades. Conforme a Confederação Nacional das Indústrias (2018), o modelo de produção-consumo-descarte enfrenta crescentes limitações decorrentes da escassez de matéria-prima e insumos, mesmo diante dos contínuos avanços tecnológicos e industriais.

Como os avanços nas indústrias tem-se o desenvolvimento econômico e o social e, atualmente, devido a popularização e mudanças do ponto de vista das sociedades modernas, economias baseadas em uso de recursos de curto prazo e foco no processo, precisam migrar para economias baseadas em agregação de valor e visão sistêmica, tornando os processos mais sustentáveis ao longo do tempo.

Na indústria química, a adoção de práticas de sustentabilidade nos processos produtivos demonstra a necessidade de abordagens que equilibrem o meio ambiente, a sociedade e a economia. Esse equilíbrio fundamental entre esses pilares pode ser observado na Figura 1. Essas abordagens visam à restauração ambiental e à geração de impactos socioeconômicos positivos, conforme ressaltado pela CNI (2018).

Figura 1 - Pilares da sustentabilidade

Fonte: RPC (2019)

A associação do crescimento econômico a um ciclo de desenvolvimento positivo e contínuo representa um desafio significativo. Nesse contexto, a economia circular surge como uma alternativa capaz de conciliar prosperidade econômica e sustentabilidade por meio da gestão eficiente de recursos finitos e fluxos renováveis. Além de contribuir para o desenvolvimento sustentável, esse modelo busca mitigar desafios ambientais, como as mudanças climáticas e a perda da biodiversidade, fundamentando-se em três princípios: a eliminação de resíduos e poluição, a manutenção de produtos e materiais em circulação pelo maior tempo possível e a regeneração dos sistemas naturais (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

No setor industrial de resinas, embora os desafios ambientais abranjam diferentes frentes, a gestão sustentável direciona-se fortemente para o controle e a redução dos impactos associados aos seus efluentes líquidos complexos.

3.2 Efluentes industriais

Associado ao crescimento industrial do setor químico, o gerenciamento das águas residuais tornou-se um dos pontos mais críticos para mitigar os impactos em faunas e floras locais e adjacentes. Como consequência de processos complexos, as indústrias produzem volumes expressivos de efluentes compostos por elementos nocivos ou de difícil remoção, exigindo uma caracterização rigorosa antes de qualquer destinação.

Efluentes gerados por atividades humanas podem conter uma ampla variedade de contaminantes, cuja composição está diretamente relacionada aos processos desenvolvidos no local. Grande parte dos resíduos industriais líquidos é

formada por sobras de matérias-primas que não são integralmente aproveitadas nos processos produtivos (Parente; Silva, 2002). Efluentes dessa natureza, como resultado, apresentam frequentemente elevadas concentrações de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Esses elementos lançados no meio ambiente sem tratamento adequado, favorecem o crescimento excessivo de bactérias heterotróficas e organismos autotróficos, reduzindo o oxigênio dissolvido nos corpos hídricos (Von Sperling, 1996).

Além dos impactos ambientais sobre os ecossistemas, a presença de contaminantes químicos em efluentes industriais representa um importante risco toxicológico à saúde humana. Compostos como solventes orgânicos, aldeídos e outras substâncias potencialmente perigosas podem permanecer no efluente após tratamentos ineficientes (Ratola et al., 2012), alcançando mananciais utilizados para abastecimento público ou acumulando-se na cadeia alimentar. A exposição humana a esses contaminantes, seja por meio do consumo de água ou de organismos aquáticos contaminados, pode resultar em efeitos adversos agudos e crônicos, reforçando a necessidade de processos de tratamento capazes de assegurar a remoção desses compostos e garantir a proteção da saúde pública

A caracterização das águas residuais industriais é fundamental para a definição do tratamento adequado. Devido à complexidade e variabilidade desses despejos, países em desenvolvimento enfrentam grandes desafios na proteção ambiental (Braile; Cavalcanti, 1993). Portanto, é essencial o monitoramento de parâmetros físico-químicos como cor, odor, temperatura, turbidez, oxigênio dissolvido, pH, alcalinidade, acidez e carga orgânica. O acompanhamento dessas variáveis permite o diagnóstico da eficiência dos processos e evita que compostos tóxicos ou refratários sejam lançados nos corpos hídricos sem controle.

3.2.1 Parâmetros físico-químicos relevantes para efluentes industriais

Como apresentado por Von Sperling (1996), a cor e odor presentes em efluentes são variáveis, diretamente relacionados à atividade industrial e, em grande parte, resultantes da decomposição de matéria orgânica. O autor também aponta que a temperatura elevada acarreta malefícios como a redução de concentração de oxigênio dissolvido, coagulação de proteínas e diminuição da viscosidade.

A turbidez corresponde à dificuldade que um feixe de luz tem de atravessar uma amostra de água, sendo classificada como um parâmetro físico de qualidade.

Este fenômeno está associado à presença de partículas sólidas de diferentes tamanhos, normalmente materiais coloidais (Braile; Cavalcanti, 1993).

O oxigênio dissolvido (OD) representa a concentração de oxigênio molecular presente na água em sua forma dissolvida. É um parâmetro fundamental tanto para a manutenção da biota aquática quanto para a eficiência de processos biológicos em estações de tratamento de efluentes, principalmente para a degradação de matéria orgânica, pois é indispensável para a respiração aeróbica de microrganismos (Von Sperling, 1996). A concentração de OD no meio é influenciada por variáveis como temperatura, solubilidade do gás no meio líquido e presença de sólidos em suspensão, fatores que podem limitar a transferência de oxigênio da atmosfera para a fase líquida (Braile; Cavalcanti, 1993).

O potencial hidrogeniônico (pH) expressa a atividade dos íons hidrogênio (H^+), em solução aquosa, sendo um parâmetro químico que indica o grau de acidez de um meio, em escala logarítmica de 0 a 14. Para efluentes industriais, o pH possui um papel importante, uma vez que interfere diretamente na eficiência de reações físico-químicas, atividades enzimáticas dos microrganismos e na solubilidade de substâncias. Valores extremos ou fora da faixa ideal podem dificultar os processos biológicos de tratamento, tornando necessário o ajuste prévio do pH para que o sistema opere de forma eficiente (Braile; Cavalcanti, 1993).

Para a determinação se a solução é ácida, neutra ou básica, existem diferentes métodos de testes, como papel tornassol indicador, pHmetro e indicadores ácido-base. Os resultados numéricos são interpretados com base na escala de pH: valores inferiores a 7 indicam solução ácida, igual a 7 neutra; e superiores a 7, alcalina. Quando o método utiliza colorimetria, como no caso de indicadores ácido-base, a mudança da cor ocorre ao atingir um pH específico.

A alcalinidade refere-se à concentração de íons com capacidade de neutralizar os íons de hidrogênio, por meio de compostos como bicarbonato, carbonato e hidróxido. Como apresentado por Von Sperling (1996), a alcalinidade é um parâmetro importante para o tratamento de águas residuais, pois baixos valores de alcalinidade reduzem o pH, afetando as atividades dos microrganismos responsáveis pela biodegradação. Diferentemente da acidez, uma característica química com função de neutralizar bases, evitando grandes mudanças de pH na solução.

A fração orgânica dos efluentes industriais é composta predominantemente por elementos como carbono, oxigênio e hidrogênio, podendo conter também, em menores quantidades, nitrogênio, fósforo e enxofre, dependendo do processo industrial envolvido. Essa carga orgânica apresenta ampla diversidade estrutural, podendo incluir desde compostos simples até moléculas complexas, como surfactantes, fenóis e outras substâncias recalcitrantes que conferem alta carga poluente ao efluente (Braile; Cavalcanti, 1993).

A parcela de matéria orgânica presente nos efluentes industriais é ambientalmente significativa, pois representa uma das principais causas da poluição hídrica. Muitas dessas substâncias apresentam baixa biodegradabilidade, o que compromete a eficiência dos processos convencionais de tratamento biológico, pois a presença desses compostos orgânicos dificulta a oxidação completa da carga poluente, exigindo, em muitos casos, tratamentos complementares ou alternativos (Von Sperling, 1996).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um indicador que determina indiretamente a concentração de matéria orgânica biodegradável através da demanda de oxigênio dos microrganismos por meio da respiração celular. A metodologia é amplamente utilizada para a avaliação de águas residuárias, sendo um dos parâmetros usuais para quantificar a carga orgânica biodegradável. No Brasil, essa metodologia é regulamentada pela ABNT NBR 12614, a qual estabelece a medição da variação da concentração de oxigênio dissolvido antes e após o período de incubação (ABNT, 1992).

A DQO também é usual para medir o conteúdo de matéria orgânica de águas residuais. Por meio deste método, o oxigênio equivalente à matéria orgânica presente no efluente e que pode ser oxidado é determinado por um oxidante em meio ácido (Braile; Cavalcanti, 1993). O procedimento laboratorial no território brasileiro é baseado na ABNT NBR ISO 15705:2007, que estabelece o processo por meio de digestão em tubos de pequena escala com dicromato de potássio (ABNT, 2007).

A determinação DQO é essencial no monitoramento de estações de tratamento de efluentes, pois permite avaliar o potencial poluidor dos despejos líquidos e sua conformidade com os limites estabelecidos pela legislação ambiental. Uma das principais preocupações associadas ao lançamento de efluentes industriais é a elevada concentração de matéria orgânica, refletida em altos valores

de DBO e DQO. Quanto maiores esses parâmetros, maior será a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação da matéria orgânica presente, resultando na redução de oxigênio dissolvido disponível nos corpos hídricos, comprometendo o equilíbrio ecológico (Von Sperling, 1996; Braile; Cavalcanti, 1993).

A relação entre DQO/DBO₅ fornece uma estimativa de fração biodegradável da matéria orgânica (Von Sperling, 1996). Quando os valores DBO correspondem de 25 a 50% do valor da DQO, a relação da razão entre esses parâmetros pode ser interpretada como:

- Razão DQO/DBO₅ baixa (entre 1,9 e 2,4): indica alta biodegradabilidade, sendo favorável à implementação de processos biológicos;
- Razão DQO/DBO₅ alta (acima de 3): sugere predominância de matéria orgânica não biodegradável ou recalcitrante, indicando a necessidade de processos físico-químicos ou tratamentos mais avançados.

O estudo dessa relação auxilia na escolha da estratégia de tratamento mais adequada, sendo um parâmetro importante para o diagnóstico da natureza da carga poluente.

3.2.2 Legislação ambiental aplicável a efluentes industriais

Os efluentes líquidos podem ser descartados no meio ambiente, desde que tenham passado por um tratamento adequado para atender aos parâmetros estabelecidos pela legislação ambiental vigente. Nesses casos, cabe ao gerador garantir uma destinação final ambientalmente adequada.

A Resolução nº 357/2005, do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, estabelece a classificação dos corpos de água em diferentes classes, com em suas características físico-químicas, biológicas e nos usos preponderantes. Essa classificação é dividida em classe especial, classe 1, 2, 3 e 4, e tem como objetivo assegurar a preservação da qualidade dos recursos hídricos, promovendo o uso sustentável da água de acordo com padrões estabelecidos para cada classe.

A Resolução determina que o lançamento de efluentes em corpos hídricos só pode ser realizado após tratamento adequado, de modo que não comprometa a classe de enquadramento. Isso significa que a carga poluidora lançada deve estar em conformidade com os limites estabelecidos, de modo a não interferir na qualidade da água nem inviabilizar seu uso. Para garantir o controle, a norma estabelece limites de parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (DBO),

sólidos em suspensão, temperatura, pH, nutrientes, metais pesados e compostos tóxicos.

A Resolução nº 430/2011, do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, estabelece que o lançamento direto de efluentes em corpos hídricos no território brasileiro deve atender a parâmetros rigorosos. Entre as exigências, o pH entre 5 e 9, temperatura menores ou iguais a 40 °C, materiais sedimentáveis menores ou iguais a 1 mL L⁻¹, óleos minerais menores ou mais a 20 mg L⁻¹, óleos vegetais/animais menores ou iguais a 50 mg L⁻¹ e redução de DBO pela técnica de DBO₅ em 60%.

Embora a referida Resolução do CONAMA não contemple parâmetros específicos de DQO, esses limites são determinados por órgãos fiscalizadores estaduais. No estado do Paraná, de acordo com a Instrução Normativa IAT nº 45/2025 do Instituto Água e Terra (IAT), os efluentes lançados em corpos hídricos advindos de indústrias químicas podem possuir concentração de DQO até 300 mg L⁻¹, outros parâmetros que devem ser considerados são pH, óleos e materiais sedimentáveis.

Em casos que os limites estabelecidos na legislação tenham sido ultrapassados, faz-se necessário o tratamento prévio das águas residuais para a adequação de seus parâmetros. Diante da impossibilidade, há a alternativa de destinação final por meio de empresas terceirizadas para destinações previstas pela Lei nº 12.305 (Brasil, 2010) e aceita por órgãos competentes.

3.3 Compostos orgânicos em efluentes industriais

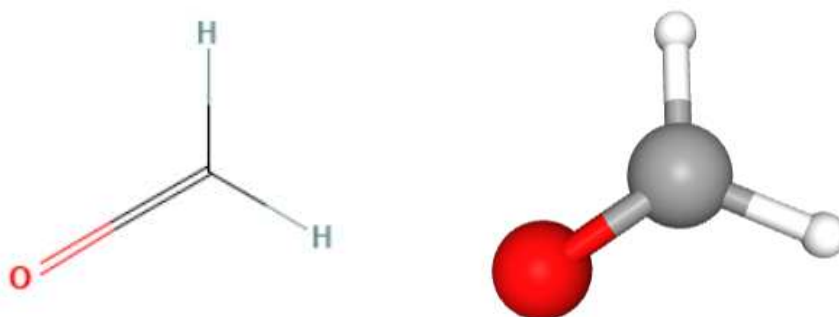
Efluentes multicomponentes, como águas residuais resultantes de indústrias de impressões, tingimentos, metais pesados, pesticidas e outras produções em massa, são produtos indiretos inevitáveis devido à complexidade dos processos. Esses efluentes são geralmente considerados complexos em composição, contendo diversos poluentes orgânicos e inorgânicos, muitas vezes de difícil remoção (Liu et al., 2021).

Em grande parte das indústrias químicas a presença de solventes orgânicos torna o tratamento de efluentes complexos mais desafiador. Devido à especificidade dos processos produtivos, nota-se a coexistência de diferentes composições de diferentes compostos orgânicos. Por exemplo, Jingcun et al. (2025) evidenciaram

que águas residuais provenientes de indústrias de resinas fenólicas contém elevadas concentrações de compostos poluentes advindos de fenol e formaldeído.

O formaldeído (Figura 2) é um composto amplamente utilizado nas indústrias de resinas. Em uréicas e melamínicas, utilizadas na aplicação de adesivos e aglutinantes em indústrias como madeira, papel e celulose, fibras de vidro, e nas indústrias de revestimento e no acabamento têxtil (National Center for Biotechnology Information, 2026). Conforme Chedid (2015) a reação entre os fenóis e o formol é a base desse segmento industrial, pois viabiliza as reações de polimerização, tornando-os os principais componentes encontrados nos rejeitos desse ramo.

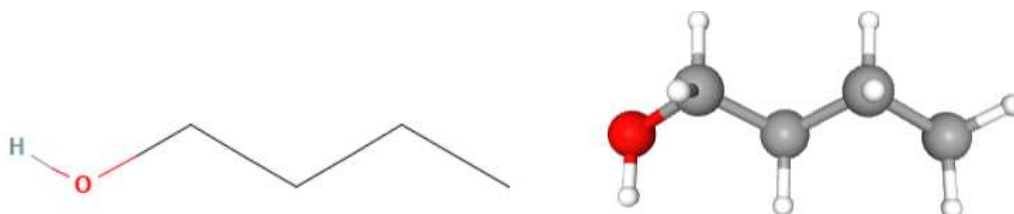
Figura 2 - Estrutura química do formaldeído



Fonte: Biblioteca Nacional De Medicina Dos Estados Unidos Da América (2026)

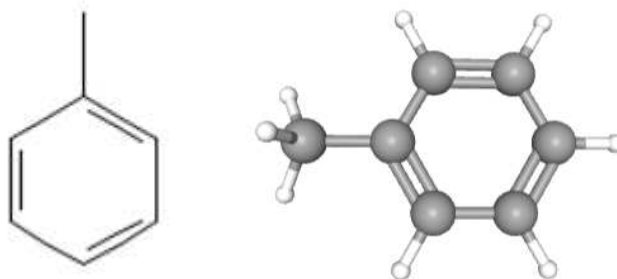
Compostos orgânicos também são identificados em indústrias do setor de tintas, couro, borracha e cimento, e é possível encontrá-los na fabricação de materiais para moldagem, moldes e resinas. Outros como derivados do benzeno, butanol (Figura 3) e tolueno (Figura 4) também são facilmente encontrados nesse processo industrial. Ma et al. (2021) confirmam que para a indústria de resinas sintéticas é comum encontrar cetonas, toluenos, benzenos, propanos e diclorometano, sendo os mais abundantes no ramo.

Figura 3 - Estrutura molecular do butanol



Fonte: Biblioteca Nacional De Medicina Dos Estados Unidos Da América (2026)

Figura 4 - Estrutura molecular do tolueno



Fonte: Biblioteca Nacional De Medicina Dos Estados Unidos Da América (2026)

A presença desses compostos pode influenciar diretamente no tratamento do efluente industrial gerado, por conta das suas propriedades químicas. E em um efluente complexo, como o de indústrias químicas de resinas, os compostos podem atuar de formas distintas. Por exemplo, alguns compostos são facilmente degradados por microrganismos, enquanto outros podem ser tóxicos e uma grande ameaça a microbiota (Dörr, 2008).

Diante disso, Lofrano e Meric (2016) sustentam que compostos fenólicos e análogos apresentam resistência à degradação por métodos biológicos convencionais. A toxicidade dessas substâncias pode diminuir a eficiência global do sistema, resultando em quantidades consideráveis de matéria orgânica e dos compostos fenólicos ao fim do tratamento, comprometendo a viabilidade econômica e a sustentabilidade do tratamento.

3.4 Tratamento de efluentes

A necessidade de implantar uma estação de tratamento de efluente adequada para diminuir o potencial poluidor industrial é uma prática consolidada no setor produtivo. Atualmente, o escopo das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) visa a remoção de contaminantes das águas residuais por meio de diversas etapas, permitindo o seu lançamento em corpos hídricos ou reuso, garantindo iniciativas sustentáveis.

Para a remoção eficiente dos poluentes em estações, é necessário adequar os processos para que sejam compatíveis com os diferentes níveis de tratamento, de modo a alcançar padrões de qualidade desejados ou vigentes perante a legislação (Von Sperling, 1996). O tratamento de águas residuárias é classificado em os níveis: preliminar, primário, secundário e terciário.

O tratamento preliminar tem como função a remoção de materiais de dimensões maiores, sólidos em suspensão e areia, enquanto o tratamento primário visa à remoção de sólidos sedimentáveis e da fração particulada da DQO. Para esses primeiros estágios, os processos de remoção ocorrem por mecanismos estritamente físicos. Já no tratamento secundário, o foco principal passa a ser a remoção da carga remanescente do tratamento primário e da DQO solúvel, correspondente à matéria orgânica dissolvida (Von Sperling, 1996).

Morais e Guandique (2008) afirmam que os tipos de tratamento de efluentes mais comuns são físico-químicos e biológicos, características do tratamento primário e secundário (Tabela 2). No entanto, em alguns casos, são necessários processos mais avançados, os quais possuem um elevado custo financeiro, usualmente no nível terciário. Esse nível atua na eliminação de poluentes específicos ou remoção complementar de poluentes que não foram removidos em etapas antecedentes.

Tabela 2 - Características dos níveis de tratamento

Níveis de tratamento			
Item	Preliminar	Primário	Secundário
Poluentes removidos	Sólidos	Sólidos sedimentáveis; DBO em suspensão.	Sólidos não sedimentáveis; DBO em suspensão; DBO solúvel; Nutrientes; Patogênicos.
Eficiências de remoção	-	SS: 60-70%; DBO: 30-40%; Coliformes: 30-40%	DBO: 60-99%; Coliformes: 60 a 99%; Nutrientes: 10 a 50%
Mecanismo de tratamento	Físicos	Físicos-químicos	Biológicos
Cumprimento padrão de lançamento	Não	Não	Sim

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996)

A escolha dos processos varia com a necessidade específicas de cada indústria. Por exemplo, Von Sperling (1996) cita que uma ETE a nível secundário provavelmente utilizará de tratamentos preliminares, porém não necessariamente

terá tratamentos primários, fator que dependerá da qualidade e composição do efluente.

3.4.1 Métodos físicos e biológicos

Diante do cenário geral de tratamento de efluentes, constata-se que a classificação das etapas de tratamento não depende da ordem cronológica, mas sim da natureza dos fenômenos e das substâncias presentes no efluente. Deste modo, destaca-se a relevância dos tratamentos preliminares e secundários, sendo os métodos físicos e biológicos, respectivamente.

O tratamento preliminar é a primeira etapa do processo de tratamento de efluente, e consiste na remoção de sólidos grosseiros e areia, por meio de métodos físicos de separação. Von Sperling (1996) publicou que a principal função desta etapa é proteger as unidades de tratamento subsequentes, evitando obstruções, desgastes e o acúmulo de materiais inertes, facilitando o transporte do fluido. Entre os principais mecanismos utilizados, destacam-se gradeamento, peneiramento e sedimentação de sólidos densos.

Por sua vez, o tratamento secundário baseia-se na estabilização da matéria orgânica por meio de métodos biológicos com o uso de microrganismos aeróbios e facultativos. Von Sperling (1996) citou que os mais comuns são as lagoas de estabilização, lodos ativados, filtros biológicos e tratamentos anaeróbios.

Os tratamentos aeróbios promovem a degradação da matéria orgânica por meio da ação de microrganismos na presença de oxigênio dissolvido, convertendo os poluentes em produtos mais estáveis, como água, dióxido de carbono e biomassa. Por exemplo, nos sistemas de lodos ativados, o efluente é misturado à biomassa em tanques de aeração, favorecendo a atividade microbiana e a remoção da carga orgânica, sendo posteriormente realizada a separação do lodo por sedimentação.

Apesar da ampla aplicação desses processos, sua eficiência pode ser comprometida por efluentes contendo compostos tóxicos e recalcitrantes, como aqueles provenientes da produção de resinas, que podem inibir ou até mesmo inviabilizar a atividade dos microrganismos responsáveis pelo tratamento (Braille; Cavalcanti, 1993; Moraes; Guandique, 2008; Chedid, 2015).

3.4.2 Métodos físico-químicos

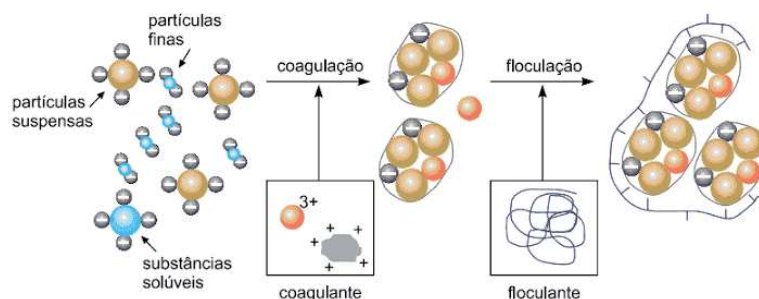
Os métodos físico-químicos de tratamento de efluentes são amplamente aplicados, sobretudo quando a carga poluente contém compostos recalcitrantes ou tóxicos à microbiota, como solventes orgânicos e derivados fenólicos. Nesse contexto, o tratamento primário combina processos químicos e físicos para a remoção de contaminantes, destacando a eliminação de sólidos suspensos, coloidais e de uma fração da matéria orgânica (Von Sperling, 1996).

No contexto da indústria química de resinas, os métodos físico-químicos assumem papel fundamental no pré-tratamento de efluentes com alta carga orgânica e presença de solventes orgânicos, tornando o efluente mais compatível com os processos biológicos posteriores. Podem incluir coagulação-floculação, neutralização, oxidação química, adsorção, precipitação e flotação, sendo utilizados principalmente nas etapas de tratamento primário.

3.5 O processo de coagulação-floculação

De acordo com Von Sperling (1996), a etapa físico-química coagulação-floculação é frequentemente utilizada para remover partículas coloidais e parte da carga orgânica por meio da adição de coagulantes, como sais de alumínio ou ferro, e auxiliares de floculação, como polímeros, exemplificado na Figura 5. Essa etapa tem ampla aplicabilidade, dado que, águas residuais de diversos processos industriais possuem não apenas carga orgânica dissolvida, como também partículas sólidas, colóides, óleos e graxas.

Figura 5 - Atuação do processo de coagulação-floculação



Fonte: Cagliari (2018)

3.5.1 Coagulação

Efluentes provenientes de indústrias poliméricas contém resíduos de polímeros e, devido aos seus processos, tendem a possuir grandes quantidades de partículas em escalas nanométricas que ficam dispersas no fluido sem se dissolver totalmente ou sedimentar, conhecidas como colóides.

Eckenfelder (1989) afirmou que a grande maioria dessas partículas em efluentes industriais possuem cargas negativas, ocasionando uma repulsão eletrostática, pois a presença dessas cargas na superfície acarreta o afastamento entre os colóides e impedem que elas se depositem, ficando em suspensão (Sher; Malik; Liu, 2015), essa interação entre as partículas, indica muitas vezes turbidez e cor no efluente.

Essa característica eletrostática e a alta dificuldade de separação de colóides por meio de processos físicos comuns, considerando o tamanho das partículas, tornam necessária a utilização de processos químicos para a neutralização das cargas elétricas superficiais das partículas coloidais.

Comumente utilizado como pré-tratamento de efluentes industriais, a coagulação é um processo físico-químico que ocorre entre a alcalinidade do efluente e um coagulante adicionado a solução, o qual resulta na formação de flocos insolúveis, envolvendo a desestabilização de partículas coloidais e substâncias que estão presentes no efluente. Para Tzoupanos e Zouboulis (2008), nesse método podem ser utilizados como coagulantes sais inorgânicos, polímeros orgânicos sintéticos ou coagulantes naturais, apresentando vastas possibilidades.

Eckenfelder (2000) avaliou, em escala de bancada, a eficiência de coagulantes inorgânicos por meio de ensaios em Jar Test, proporcionando análise de desempenho em diferentes condições. Esse procedimento simula integralmente as etapas do processo físico-químico de coagulação-floculação, no qual parâmetros como pH, gradiente de velocidade e dosagem do coagulante atuam como variáveis de controle para a identificação e otimização das condições operacionais. O autor evidenciou que, em virtude da complexidade das reações químicas intervenientes, torna-se imprescindível a determinação prévia desses parâmetros especificamente para a matriz residual a ser tratada.

Dado essa perspectiva, Zhao et al. (2021) afirmam que o tratamento por coagulação se torna complexo pois é necessário que o coagulante seja definido

antes da sua aplicação, e o mecanismo e sua eficiência do tratamento dependem das condições do processo, incluindo dosagem, agitação, pH, concentrações iniciais e temperatura, como evidenciado por Eckenfelder.

Em relação à eficiência do processo de coagulação, El Bied et al. (2021) demonstraram que a técnica promove não apenas a remoção de sólidos suspensos, mas também a redução da turbidez, cor e DQO, consolidando-se como uma das operações unitárias mais difundidas no tratamento de efluentes industriais. Em contrapartida, Shah (2022) salienta que, dada a complexidade química dessas matrizes, a coagulação, quando aplicada de forma isolada, mostra-se insuficiente para a depuração completa do efluente, demandando a integração de processos complementares.

O Policloreto de alumínio, é um sal inorgânico denominado pela fórmula química $Al_a(OH)_bCl_c$, onde a, b e c são variáveis determinantes da basicidade do sal. Comumente conhecido como PAC, por ser um coagulante polimerizado, esse sal tem sido amplamente utilizado para tratamento de água e efluentes há anos (Suhardi et al., 2024).

A utilização do PAC no tratamento de efluentes tornou-se uma das práticas devido às suas diversas vantagens quando comparado a coagulantes convencionais como sulfato de alumínio e sais de ferro.

Ao ser adicionado ao efluente, o sal hidrolisa rapidamente no meio aquoso e gera precipitados amorfos de $Al(OH)_3$, no entanto, diferentemente de outros compostos químicos, a estrutura molecular do policloreto de alumínio permanece no precipitado gerado (Kamiwada; Andrade; Reis, 2020).

Esse sal tende a formar flocos mais rígidos e volumosos, proporcionando uma velocidade de sedimentação mais rápida, sendo essa uma das suas qualidades no uso (Pernitsky; Edzwald; 2006). Além disso, o PAC possui um acentuado controle de basicidade, devido à sua pré-hidrólise durante o processo de fabricação, permitindo amplas faixas de atuação em efluente de pH entre 5 a 9, gera menores quantidades de alumínio residual na água tratada e permite uma floculação mais rápida (Duan; Gregory, 2001).

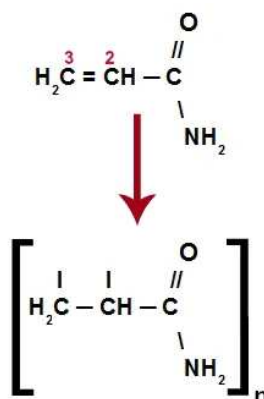
3.5.2 Floculação

Shah (2022) descreve a coagulação-floculação como um conjunto de processos interdependentes. A coagulação consiste em uma etapa rápida, responsável pela redução da carga elétrica superficial das partículas e microflocos presentes no efluente, promovendo sua desestabilização. Em seguida, ocorre a floculação, uma etapa mais lenta, na qual os flocos formados aumentam progressivamente de tamanho por meio de colisões e interações favorecidas pela adição de polímeros. Esse mecanismo resulta na formação de aglomerados maiores e mais densos, que permanecem suspensos temporariamente e posteriormente precipitam, facilitando sua remoção por sedimentação.

O uso desses agentes poliméricos é amplamente consolidado. De acordo com Eckenfelder (2000), polímeros aniônicos e não-aniônicos podem ser acrescentados durante a agitação baixa da floculação para obter flocos maiores, otimizando tanto a sedimentação do efluente quanto a filtração posterior.

A poliacrilamida não-catiônica (NPAM), também intitulada como iônica ou neutra, é um polímero utilizado como auxiliar de floculação formado pela reação de polimerização por adição radical de um monômero acrilamida (Figura 6).

Figura 6 - Polimerização da acrilamida pura



Fonte: Brasil Escola [s.d.]

Os polímeros podem ser descritos como compostos orgânicos de cadeias longas, e atuam aumentando a dimensão dos flocos por meio de interações físicas de sua estrutura com a matéria suspensa (Choe et al., 2025).

NPAM é um polímero amplamente utilizado em tratamentos de águas residuais, devido sua natureza não-catiônica e bom desempenho em amplas faixas de pH e temperaturas, conferindo versatilidade ao processo (Ashouri; Khorasani,

2025). Contudo, a eficiência do processo é também fortemente influenciada por variáveis como a dosagem do composto, as propriedades específicas do polímero e as condições termodinâmicas e químicas do meio (Thipathy; De, 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Origem e coleta do efluente industrial

O efluente em estudo foi gerado em uma indústria química de resinas, onde mensalmente são preenchidos dezenas de contentores do tipo Intermediate Bulk Container (IBC), com capacidade de 1000 L cada. Essa matriz é constituída por uma mistura complexa de águas residuárias provenientes da lavagem de reatores e pisos das áreas produtivas, além de fundos de colunas de destilação de formaldeído

Devido à natureza do processo produtivo, o efluente pode conter diversos compostos orgânicos, sendo eles, benzeno, formaldeído, paraformaldeído, butanol e tolueno, além de insumos químicos residuais, como detergentes.

Para a realização dos ensaios experimentais, foram coletados 3 litros do efluente diretamente de um dos IBCs no dia 12 de março de 2026. O efluente foi devidamente acondicionado e armazenado sob refrigeração a aproximadamente 4 °C, no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, para preservar as propriedades deste para as análises posteriores. Os parâmetros base deste estudo foram os mesmos utilizados pela empresa química de resinas para o pré-tratamento de seus efluentes industriais

4.2 Determinações analíticas e caracterização físico-química inicial

Para a caracterização inicial do efluente realizou-se uma série de determinações analíticas. As metodologias empregadas nas análises seguiram as recomendações dos fabricantes dos equipamentos, reagentes e kits utilizados, sendo executadas de acordo com os procedimentos operacionais específicos de cada método analítico. Os ensaios foram conduzidos com base em princípios amplamente utilizados para a caracterização de águas e efluentes, compatíveis com aqueles descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) e estão detalhadas a seguir:

4.2.1 pH

O pH é um parâmetro químico que indica o grau de acidez de um meio, em escala logarítmica de 0 a 14. Foi determinado por método potenciométrico direto,

utilizando pHmetro de bancada digital PHS-3E-BI. Antes de iniciar, o equipamento foi devidamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0; para assegurar os resultados obtidos. Ao aguardar o tempo de estabilização, o resultado foi registrado na tela e expresso em $-\log [H^+]$.

4.2.2 Turbidez

Turbidez é a medida da resistência da água à passagem da luz devido à presença de partículas suspensas, como argila, silte, matéria orgânica, microrganismos e outros sólidos finos. O teste foi realizado via método nefelométrico em turbidímetro microprocessado digital a partir do equipamento BLI-2500 - Turbidímetro Microprocessado Digital.

Antes do início das análises, o equipamento foi calibrado utilizando os padrões estabilizados fornecidos pelo fabricante, nas concentrações de $< 0,10$ NTU, 10 NTU, 100 NTU e 800 NTU, conforme procedimento recomendado para calibração automática em quatro pontos.

Para a realização das leituras, as amostras foram transferidas para as cubetas (vials) de vidro fornecidas pelo fabricante do equipamento. As cubetas foram previamente limpas externamente para evitar interferências ópticas e, em seguida, inseridas no compartimento de leitura do turbidímetro. Após a estabilização da leitura, os valores de turbidez foram registrados e expressos em NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

4.2.3 Percentual de formaldeído

Devido à complexidade e variabilidade dos compostos presentes nas misturas de efluentes, e considerando a ampla utilização do formaldeído na indústria de resinas, a presença desse composto era provável em muitos IBCs.

A determinação do percentual de formaldeído nas amostras foi realizada por meio de titulação potenciométrica automatizada, utilizando o titulador automático do modelo Metrohm 906 Titrando (Figura 7).

Figura 7 - Titulador automático Metrohm 906 Titrando



Fonte: Metrohm [s.d.]

Inicialmente, foi preparada uma solução saturada de sulfito de sódio pela dissolução de 216 g de sulfito de sódio em 1 L de água deionizada, sob agitação até completa homogeneização. A solução preparada foi utilizada como reagente para a análise do formaldeído.

Para cada determinação, aproximadamente 1,0 g da amostra foi pesado em béquer de 100 mL previamente limpo e seco. Em seguida, foram adicionados 50 mL da solução saturada de sulfito de sódio, medidos com auxílio de uma proveta graduada de 50 mL. A mistura foi então submetida à análise em titulador automático, utilizando o método previamente programado para determinação de formaldeído.

O princípio do método baseia-se na reação entre o formaldeído presente na amostra e o sulfito de sódio, formando um composto de adição. A quantidade de formaldeído é posteriormente determinada por titulação com solução padronizada de ácido clorídrico 0,5 N, sendo o ponto final detectado automaticamente pelo equipamento. O teor de formol foi calculado pelo próprio titulador, com base na massa da amostra e no volume de titulante consumido, sendo os resultados expressos em porcentagem.

4.2.4 Matéria orgânica por DQO

A DQO é um parâmetro que mede a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por meio de um agente químico. Para os testes, foi

utilizado o Fotômetro Multiparâmetro com DQO para Água e Efluentes - HI83399 da marca HANNA instruments.

O método baseia-se na oxidação da matéria orgânica presente na amostra por meio do dicromato de potássio em meio ácido. Durante o processo de digestão, a matéria orgânica oxidável consome o agente oxidante, promovendo a redução dos íons de cromo de Cr^{6+} para Cr^{3+} . Essa reação provoca uma alteração de cor no reagente, cuja intensidade é proporcional à quantidade de matéria orgânica presente na amostra.

Após a digestão, a concentração de DQO é determinada por leitura fotométrica. Fundamenta-se na absorção de luz pela solução colorida, de modo que a intensidade da cor formada está diretamente relacionada à concentração de matéria orgânica oxidada. Assim, o fotômetro mede a absorbância da amostra e converte esse valor em concentração de DQO, expressa em mg L^{-1} de O_2 .

Para a leitura da DQO no equipamento, foi selecionado o método COD HR (16), destinado à análise de amostras com elevadas concentrações de matéria orgânica. Para a análise, uma alíquota de 0,2 mL da amostra foi transferida para o tubo da HANNA instruments (HI93754C-25) contendo o reagente específico para DQO com auxílio de micropipeta. Em seguida, os tubos foram homogeneizados e submetidos ao processo de digestão térmica a $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos.

Após o resfriamento à temperatura ambiente, as amostras foram analisadas no fotômetro. Quando os valores obtidos ultrapassaram o limite de quantificação do método utilizado, foi necessária a diluição da amostra e a repetição da análise. Nesses casos, o resultado final foi corrigido pelo fator de diluição, calculado pela razão entre o volume final e o volume inicial da amostra, permitindo a determinação da concentração real de DQO. O fator de diluição foi utilizado como ferramenta de controle da concentração das amostras e para correção dos resultados obtidos após as diluições realizadas.

4.3 Ensaios de coagulação-floculação

Os ensaios de coagulação-floculação foram realizados em escala de bancada com o objetivo de avaliar a eficiência da remoção de matéria orgânica e da turbidez presente no efluente industrial estudado.

As condições experimentais foram definidas por meio de experimentos preliminares devido ao desconhecimento do comportamento do efluente. Os testes iniciais consistiram em diversos volumes e temperaturas do efluente, em virtude da natureza da matriz orgânica. Consequentemente, conduziram-se ensaios de coagulação-floculação sob diferentes condições térmicas, compreendendo a faixa de 15 °C a 60 °C, em que era possível a formação dos flocos e clarificação do efluente.

Desse modo, resultou-se na avaliação de doze condições experimentais definitivas (Tabela 3). Os testes consistiram em variar as dosagens de policloreto de alumínio (PAC) e da poliacrilamida não-catiônica (NPAM) dado os resultados preliminares obtidos, visando determinar a combinação mais eficiente para a formação e sedimentação dos flocos, devido à alta reatividade e ampla composição orgânica do efluente.

O PAC foi utilizado na sua forma de solução aquosa concentrada sem diluição prévia. A NPAM em estado sólido foi solubilizada em água destilada, obtendo-se uma solução estoque com concentração de 415 mg L⁻¹, método fundamentado por Haydar e Aziz (2009). As diferentes dosagens de polímero foram obtidas pela adição de volumes específicos da solução estoque em cada condição experimental.

Os testes do tratamento físico-químico foram conduzidos utilizando béqueres de 250 mL com amostras de 100 mL de efluente bruto, submetidos à agitação em chapa agitadora com o auxílio de barra magnética. Tal método aplicou-se devido a quantidade de efluente disponibilizado que continha a mesma característica química. Inicialmente, o efluente foi aquecido até atingir temperaturas próximas de 30 °C, variando entre 28 °C e 32 °C, na chapa aquecedora em total repouso e brevemente agitado antes do início da coagulação-floculação, a temperatura do efluente foi controlada durante todo o processo. Sucedeu-se a etapa de coagulação, com duração de 5 minutos, mediante adição do PAC utilizando um conta gotas e agitação rápida de 150 rpm. Em seguida, a etapa de floculação ocorreu com duração de 15 minutos, com a adição do NPAM via pipeta automática e agitação lenta de 50 rpm. Ao término da floculação, as amostras permaneceram em repouso por 30 minutos para sedimentação.

Para cada ensaio houve uma combinação de dosagens de coagulante e polímero floculante, para o coagulante policloreto de alumínio foram utilizadas as concentrações de 3000 mg L⁻¹, 4000 mg L⁻¹, 6000 mg L⁻¹ e 8000 mg L⁻¹ e de

floculante poliacrilamida não-catiônica foram utilizados os volumes de 0,1 mL, 0,15 mL e 0,2 mL da solução descrita anteriormente.

Tabela 3 - Ensaios de coagulação-floculação

Ensaio	Coagulante (mg L ⁻¹)	Floculante mL
1	6000	0,1
2	4000	0,1
3	8000	0,1
4	4000	0,15
5	6000	0,15
6	4000	0,2
7	8000	0,15
8	8000	0,2
9	6000	0,2
10	3000	0,1
11	3000	0,15
12	3000	0,2

Fonte: Autoria própria (2026)

Após a sedimentação, o sobrenadante foi separado através de filtração a vácuo, utilizando sistema de kitassato, funil de Büchner e papel filtro, para a remoção dos macros sólidos e flocos formados. O filtrado obtido foi utilizado para as análises físico-químicas e para a avaliação da eficiência do processo e armazenado em refrigeração.

Durante a execução dos ensaios, a temperatura ambiente foi monitorada, uma vez que se observou influência significativa desse parâmetro na eficiência do processo.

4.4 Declaração de ferramentas de Inteligência Artificial Generativa

Utilizou-se a ferramenta de Inteligência Artificial Gemini 4.0 (Google IA) e LeapSpace (ScienceDirect IA).

Foram utilizadas nesse trabalho ferramentas de Inteligência Artificial Generativa nas seguintes etapas: para refinamento estilístico, estruturação de tópicos presentes no referencial teórico e na exploração de tópicos vinculados ao tema.

Os comandos inseridos serviram para otimizar a clareza do texto e auxiliar na busca de pesquisas relevantes, sendo todas as informações geradas posteriormente

checadas, validadas e complementadas pelas autoras com base na literatura científica citada.

Assim, as autoras assumem integral responsabilidade pelo conteúdo intelectual e técnico do trabalho, em conformidade com a Portaria CNPq nº 2664/2026.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros físico-químicos considerados desejáveis para o efluente foram definidos com base nas condições operacionais adotadas pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) biológica da organização. Os valores de referência utilizados para a condução e avaliação dos ensaios estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos desejáveis

DQO	pH	Temperatura
mg L ⁻¹	-log [H ⁺]	°C
200	5 a 9	Até 40

Fonte: Autoria própria (2026)

5.1 Caracterização do efluente

Devido às características do efluente, buscou-se avaliar condições ótimas de redução de DQO após o tratamento e de clarificação do efluente (Figura 8).

Figura 8 - Efluente puro



Fonte: Autoria própria (2026)

Os parâmetros físico-químicos obtidos na caracterização no início dos testes do efluente bruto estão apresentados na Tabela 5. Os resultados confirmam a elevada carga poluidora da matriz residual, caracterizada por valores expressivos de DQO, alto valor de turbidez e a concentração inicial de 6,26% de formol.

Tabela 5 - Características físico-químicas iniciais do efluente de lavagem

Parâmetro	Unidade	Valor
DQO	mg L ⁻¹	420,852
pH	-log [H ⁺]	6,98
Turbidez	NTU	>1000
Temperatura	°C	12,4
% Formol	%	6,26

Fonte: Autoria própria (2026)

Com o objetivo de identificar os possíveis compostos presentes no efluente, foi realizada uma análise do histórico de produção e dos solventes orgânicos utilizados na limpeza dos reatores nas duas semanas que antecederam a coleta da amostra. Essa avaliação permitiu identificar os potenciais solventes presentes no efluente, sendo eles: dimetilbenzeno, tolueno e n-butanol.

5.2 Ensaio de coagulação-floculação

Os ensaios de coagulação foram realizados com base no planejamento estabelecido nos Materiais e Métodos (Tabela 3), avaliando doze condições experimentais distintas através da variação das dosagens do coagulante PAC e do auxiliar de floculação NPAM.

Conforme descrito na metodologia, o efluente bruto apresentava uma temperatura inicial de 12,4 °C nos primeiros experimentos. Os ensaios preliminares realizados nessa condição e à temperatura ambiente (~21 °C) resultaram em ausência completa de formação de flocos ou alterações na turbidez, indicando que a baixa temperatura e a elevada viscosidade do meio reduziam a taxa de colisão entre as partículas coloidais e inibiam a hidrólise do coagulante.

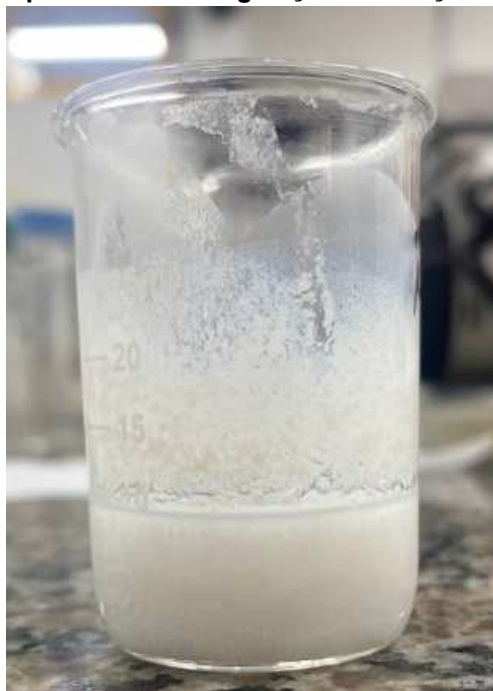
5.2.1 A variação da temperatura do efluente

Para contornar essa limitação, foi introduzida a etapa de aquecimento prévio. O comportamento do processo sob diferentes faixas térmicas revelou três cenários distintos: condicionamento térmico inferior a 25 °C, acima de 30 °C e o ótimo de 30°C.

Temperaturas inferiores de 25 °C se mostraram ineficientes no processo de coagulação-floculação. Visivelmente o efluente apresentou um aspecto de supersaturação (Figura 9), formação de microflocos dispersos no fluido que não

sedimentaram. Esse fenômeno pode estar relacionado a viscosidade do efluente em baixas temperaturas, pois nessas condições têm-se a redução de energia cinética do sistema, de acordo com Teh et al. (2016) a taxa de colisões entre as partículas coloidais é reduzida e a hidrólise do coagulante não ocorre formando flocos maiores impossibilitando a clarificação.

Figura 9 - Efluente após processo de coagulação-floculação em temperatura de 25°C

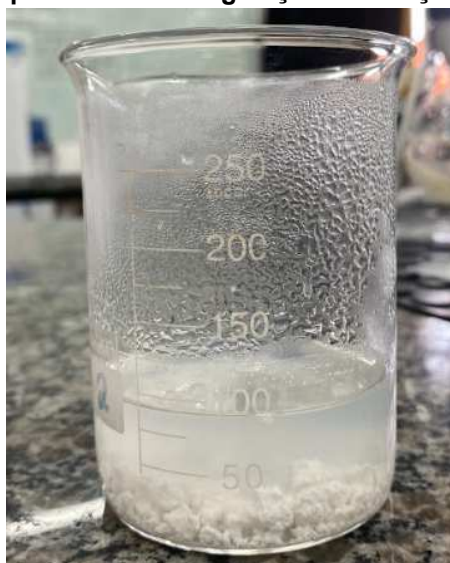


Fonte: Autoria própria (2026)

Para temperaturas superiores a 30 °C, observou-se a liberação visível de vapores. Embora não tenham sido realizadas análises cromatográficas para a identificação qualitativa dos gases liberados, com base na caracterização fornecida pela indústria de resinas, é provável que esse fenômeno esteja associado à volatilização de frações orgânicas (VOCs). Apesar das liberações gasosas, ainda assim o processo de formação de flocos obteve sucesso e provocou maior clarificação do efluente (Figura 10), contudo, caso fosse mantido, ofereceria riscos à saúde, como publicado por Magalhães Moreira e do Carmo Furtado (2022).

A análise visual das amostras contribui para a avaliação da influência da temperatura no desempenho do tratamento.

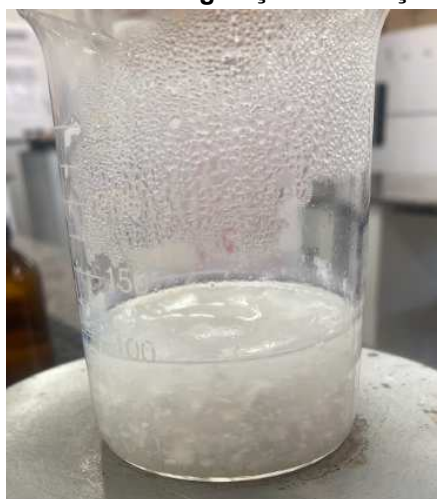
Figura 10 - Efluente após processo de coagulação-floculação em temperatura de 45°C



Fonte: Autoria própria (2026)

A temperatura de 30 °C (Figura 11) estabeleceu-se como o ponto ótimo de operação. Nesta condição, a redução da viscosidade cinemática foi suficiente para permitir a rápida desestabilização de cargas pelo PAC e a posterior agregação eficiente pelo NPAM, gerando flocos densos sem provocar a volatilização acentuada dos solventes orgânicos.

Figura 11 - Efluente no processo de coagulação-floculação em temperatura de 30°C



Fonte: Autoria própria (2026)

5.2.2 As dosagens de coagulantes

As dosagens de PAC foram definidas a partir de ensaios preliminares exploratórios, sendo 3000 mg L⁻¹, 4000 mg L⁻¹, 6000 mg L⁻¹ e 8000 mg L⁻¹. Quantidades superiores a 8000 mg L⁻¹, nos testes em 100 mL de efluente, nas mesmas condições operacionais apresentaram supersaturação do meio. Também observou-se que o

aumento da concentração de PAC exigiu ajustes das dosagens de polímero para promover a formação de flocos densos e estáveis. Quando utilizado em excesso sem proporção adequada de NPAM, o coagulante favoreceu a formação de partículas menores e dispersas, elevando a turbidez do sobrenadante e interferindo na leitura da DQO.

Devido a ampla faixa de atuação do coagulante também não foi necessária a correção do pH do efluente de valor $6,49 \pm 0,61$, porém após o tratamento, obteve-se uma queda de pH considerável em todos os ensaios (Tabela 6).

Tabela 6 - Quedas de pH após coagulação-floculação

Ensaio	pH
1	3,25
2	3,36
3	2,98
4	3,31
5	3,42
6	3,48
7	3,94
8	3,99
9	3,99
10	4,32
11	2,2
12	4,13

Fonte: Autoria própria (2026)

A redução acentuada do pH após a coagulação foi atribuída principalmente à hidrólise das espécies de alumínio presentes no policloreto de alumínio (PAC). Durante esse processo ocorre a formação de hidróxido de alumínio, responsável pela desestabilização das partículas coloidais, concomitantemente à liberação de íons H^+ e ao consumo da alcalinidade do meio. Segundo Wei et al. (2015), quando o pH final não é controlado, a adição de PAC provoca uma redução progressiva do pH devido à hidrólise do coagulante, influenciando diretamente o mecanismo de coagulação. Como consequência, observou-se uma acidificação significativa do efluente. Já a poliacrilamida não iônica (NPAM), utilizada apenas como auxiliar de floculação, não contribui de forma relevante para alterações no pH.

A abordagem dos testes preliminares foi necessária dada à complexidade do efluente industrial e a escassez de informações na literatura sobre efluentes com composição semelhante.

5.3 Avaliação dos ensaios sobre a DQO

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos pelo método de coagulação e floculação referente a DQO.

Tabela 7 - Resultados da DQO

Ensaio	DQO (mg L ⁻¹)	% de Redução
1	215.322	48,83
2	301.614	28,33
3	282.846	32,79
4	283.866	32,54
5	388.059	7,8
6	233.427	44,53
7	165.331	60,71
8	322.218	23,43
9	167.331	60,24
10	468.333	-11,28%
11	668.865	-58,93%
12	638.367	-51,68%

Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados obtidos no tratamento físico-químico por coagulação-floculação revelaram que o processo apresenta potencial promissor, porém seletivo, na remoção de carga orgânica. Dos 12 ensaios realizados, 9 apresentaram conclusões favoráveis à redução da DQO.

Os desempenhos mais expressivos foram alcançados nos ensaios 7 e 9, que registraram as maiores taxas de eficiência, com 60,71% e 60,24% de redução de DQO, respectivamente. Por outro lado, as condições testadas nos ensaios 10, 11 e 12 foram completamente ineficazes, resultando em carga orgânica residual superior à inicial.

A persistência de valores elevados de DQO e o limite máximo de remoção de aproximadamente 60% evidenciam uma característica intrínseca de matrizes complexas da indústria de resinas. Esse comportamento indica que uma parcela significativa da carga orgânica permanece na forma solúvel após o tratamento. Demonstrando que o PAC e NPAM atuam com alta eficiência na remoção da DQO particulada e coloidal, mas possivelmente possui ação limitada sobre os compostos orgânicos dissolvidos. Resultado semelhante ao observado por Haydar e Aziz (2009), que verificaram redução mais acentuada da matéria orgânica associada aos sólidos suspensos em comparação à fração solúvel.

Na tabela 8 encontram-se os resultados referentes à turbidez e clarificação, logo após o método, do efluente que estava inicialmente completamente turvo.

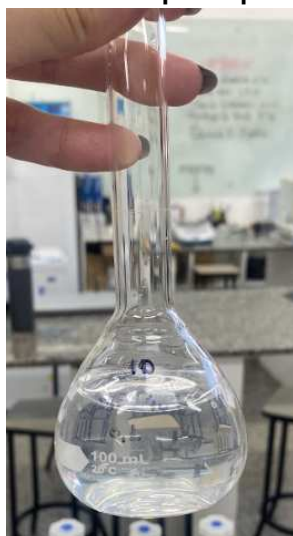
Tabela 8 - Resultados da turbidez

Ensaio	Turbidez (NTU)	% de Redução
1	>1000	0
2	1000	0
3	812	18,8
4	735	26,5
5	620	38
6	515	48,5
7	350	65
8	202	79,8
9	259	74,1
10	21,1	97,89
11	82,5	91,75
12	446	55,4

Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados mais expressivos de clarificação logo após o processo de filtração foram observados justamente nos ensaios que falharam na redução da carga orgânica. O ensaio 10 (Figura 12) obteve a maior eficiência de clarificação do estudo, atingindo uma turbidez residual de 21,1 NTU (97,89% de redução), seguido pelo ensaio 11, com 82,5 NTU (91,75% de redução). Em contrapartida, os ensaios 1 e 2 apresentaram a turbidez acima do limite de leitura do equipamento (>1000 NTU). Já os ensaios 7 e 9, que foram os melhores em remoção de DQO, alcançaram reduções intermediárias de turbidez, na ordem de 65% (350 NTU) e 74,1% (259 NTU), respectivamente.

Figura 12 - Amostra 10 após o processo de de filtração



Fonte: Autoria própria (2026)

No caso específico de efluentes de indústrias de resinas, a persistência de valores elevados de DQO após o tratamento pode ser atribuída à presença dos compostos orgânicos.

Apesar da baixa solubilidade em água, devido à mistura dos solventes orgânicos e alta complexibilidade, conforme Korzeniowska-Rejmer e Filipek (2013), o tolueno e o dimetilbenzeno são hidrocarbonetos aromáticos predominantemente apolares, exibindo baixa afinidade hidrofílica em sistemas puros, contudo, a complexidade da matriz real pode alterar esse comportamento de fase. Reetz e König (2021) reportam que o n-butanol, devido às suas propriedades químicas, atua como um co-solvente em misturas aquosas, modificando as propriedades termodinâmicas do meio e facilitando a transferência de massa e a solubilização de compostos com diferentes afinidades químicas. Essa propriedade justifica a manutenção do dimetilbenzeno (xileno) e do tolueno em escala molecular, efetivamente dissolvidos no meio aquoso. Essa interação mútua converge com as observações de Keeley, Hoffpauir e Meriwether (1988), os quais constataram que, embora o tolueno e o dimetilbenzeno isolados possuam baixa solubilidade em água, a dispersão e permanência na fase líquida dependem criticamente de co-solventes orgânicos no meio, cuja presença promove a estabilização termodinâmica do efluente.

Essa específica composição química também fundamenta a hipótese levantada sobre o comportamento térmico do efluente experimentalmente. O tolueno, o dimetilbenzeno e o n-butanol são solventes orgânicos voláteis e mesmo que os esses compostos presentes no efluente possuam pontos de ebulição acima de 100 °C, sua mistura química pode ser considerada uma solução real. Desse modo, termodinamicamente não se pode afirmar que suas interações moleculares em mistura são as mesmas dos compostos em sua forma pura. Portanto, provavelmente a volatilização e a instabilidade observados nos ensaios conduzidos a temperaturas superiores a 30 °C decorrem diretamente do aumento da pressão de vapor dessas substâncias, promovendo sua volatilização favorecida pelas ligações fracas de dipolo induzido entre os compostos.

Ainda, Haydar e Aziz (2009) observaram que a associação de coagulantes e polímeros em efluentes industriais favoreceu a formação de flocos maiores e com melhor capacidade de sedimentação, resultando em elevadas remoções de turbidez e sólidos suspensos. No entanto, a redução da DQO foi mais limitada, pois o processo

removeu principalmente a fração particulada da matéria orgânica, enquanto os compostos dissolvidos permaneceram na fase líquida. Tal comportamento apresenta concordância com os resultados obtidos neste trabalho, nos quais a formação visual dos flocos e a clarificação do efluente indicaram a remoção eficiente de material suspenso, porém sem redução proporcional da DQO, sugerindo a permanência de compostos orgânicos dissolvidos no sobrenadante após o tratamento.

Além disso, a literatura relata que efluentes oriundos da produção de resinas frequentemente requerem tratamentos complementares para remoção de compostos orgânicos dissolvidos. Tünay, Çakır e Kabdaşlı (2018) verificaram que processos físicos destinados à remoção prévia de solventes apresentaram contribuição mais significativa para a redução da DQO do que a própria etapa de coagulação-floculação. Tal observação sugere que, para o efluente estudado, o tratamento físico-químico pode atuar de forma mais eficiente como pré-tratamento, reduzindo turbidez, sólidos e materiais emulsificados. Em contrapartida, a remoção efetiva da carga orgânica dissolvida demandaria a inclusão de uma etapa posterior de polimento. Essa operação final seria responsável por atingir os limites regulamentares de descarte e mitigar a DQO solúvel remanescente por meio de tecnologias complementares, como a adsorção em carvão ativado, processos oxidativos avançados (POAs) ou tratamento biológico especializado.

5.4 Avaliação do comportamento visual e estabilidade coloidal

Após a finalização dos testes, as amostras foram armazenadas em balões volumétricos de 100 mL e sob refrigeração observou-se uma alteração visual no comportamento do filtrado armazenado, como exposto na Figura 13.

Figura 13 - Comparativo das amostras com o efluente puro após refrigeração



Fonte: Autoria própria (2026)

Ao transferir alíquotas para tubos de ensaio em repouso (Figura 14), constatou-se a formação de um precipitado esbranquiçado, de aspecto turvo, semelhante ao efluente bruto.

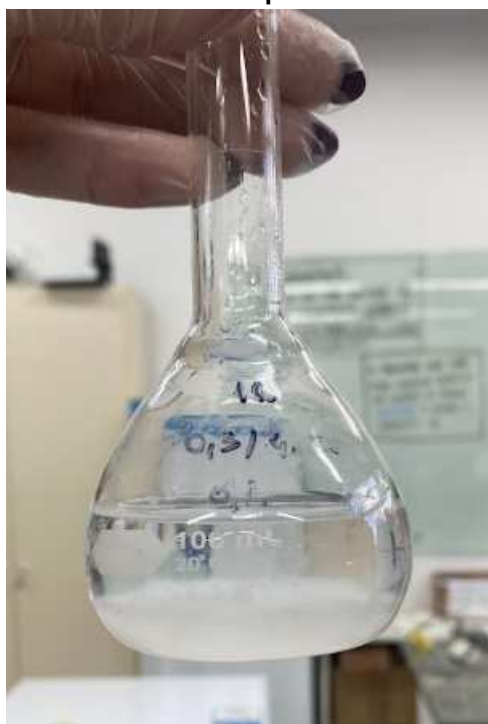
Figura 14 - Efluente puro em comparação com as amostras 7,8 e 9 logo após refrigeração



Fonte: Autoria própria (2026)

O mesmo fenômeno ocorreu nos balões volumétricos quando mantidos a temperatura ambiente, como por exemplo a Figura 15.

Figura 15 - Amostra 10 mantida à temperatura ambiente após refrigerada



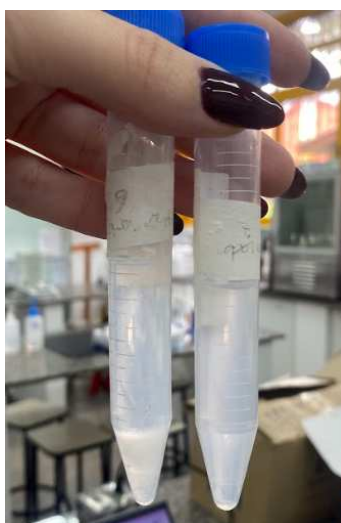
Fonte: Autoria própria (2026)

Essa precipitação pós tratamento indica que o processo de coagulação-floculação primário não removeu integralmente a carga coloidal. De acordo com Tzoupanos e Zouboulis (2008), quando a desestabilização não ocorre de forma completa, parte dos coloides permanece dispersa no meio líquido. No presente caso, a redução acentuada de temperatura no refrigerador pode ter atuado diminuindo a solubilidade de compostos orgânicos e alterando a energia cinética do sistema dado a característica química da matriz, como por exemplo, a presença do composto orgânico n-butanol, que em temperaturas baixas obtém um drástico aumento de viscosidade diminuindo a energia cinética do sistema aumentando suas forças moleculares de dipolo induzido e pontes de hidrogênio. Isso implica que superou a barreira de estabilidade coloidal, favorecendo a aglutinação lenta dessas partículas remanescentes.

Durante as etapas preliminares também foi observado que o aumento da dosagem de PAC não favoreceu a formação dos flocos, comportamento compatível com o fenômeno de sobredosagem descrito na literatura. Segundo Ghafari et al. (2009) e Haydar e Aziz (2009), concentrações excessivas de coagulante promovem a inversão de carga e a consequente reestabilização coloidal. Essa característica evidencia que o sistema opera em uma faixa estreita de dosagem ótima, de modo que variações na eficiência da mistura rápida ou uma diluição sutilmente insuficiente do coagulante podem ter deixado coloides residuais dispersos, os quais precipitaram sob o estímulo térmico.

Na tentativa de separar as fases e isolar o precipitado formado, alíquotas das amostras 7 e 9 (que apresentavam os melhores resultados de DQO) foram submetidas à centrifugação (Figuras 16, 17 e 18).

Figura 16 - Amostras 9 e 7 antes centrifugação



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 17 - Amostra 9 após centrifugação



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 18 - Amostra 7 após centrifugação



Fonte: Autoria própria (2026)

Apesar da visível clarificação do efluente e da formação de um precipitado no fundo dos tubos após a centrifugação, os resultados analíticos indicaram aumento dos valores de DQO nas amostras avaliadas. A etapa de centrifugação pode ter promovido alterações na estrutura dos flocos formados durante a coagulação-floculação. Duan e Gregory (2004) demonstraram que agregados formados por coagulantes podem sofrer fragmentação quando submetidos a elevados esforços mecânicos, originando partículas menores e modificando a estrutura dos flocos.

Dessa forma, sugere-se que a aplicação da força centrífuga possa ter sido suficiente para sedimentar as partículas maiores (explicando a clarificação visual), no

entanto promoveu a fragmentação dos flocos menores e possivelmente a dissociação dos complexos formados entre o PAC e a matéria orgânica dissolvida, contribuindo para os elevados valores de DQO observados após essa etapa.

5.5 Avaliação dos ensaios sobre o formol

Na Tabela 9 encontram-se os resultados referentes ao percentual de formol logo após a aplicação do método.

Tabela 9 - Resultados da Concentração de Formaldeído

Ensaio	Formol (%)	% de Redução
1	6,19	1,12
2	5,59	10,70
3	5,31	15,18
4	5,45	12,94
5	5,44	13,10
6	5,54	11,50
7	5,42	13,42
8	5,84	6,71
9	6,41	-2,40
10	6,49	-3,67
11	6,39	-2,08
12	6,23	0,48

Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados apresentados demonstram que o processo de coagulação-floculação promoveu uma redução limitada do teor de formol presente no efluente. A maior redução foi observada no ensaio 3, de 15,18%, enquanto os demais ensaios apresentaram remoções inferiores a 14%. Esse comportamento pode ser atribuído à elevada solubilidade do formaldeído em meio aquoso, permanecendo predominantemente na fase dissolvida. Segundo Haydar e Aziz (2009), processos de coagulação-floculação apresentam maior eficiência na remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica particulada, enquanto compostos dissolvidos tendem a permanecer no efluente tratado. Dessa forma, embora tenha sido observada redução parcial do teor de formol, os resultados indicam que o processo apresenta limitações para a remoção desse composto quando presente predominantemente na forma dissolvida.

A Tabela 10 apresenta uma síntese dos ensaios com melhor desempenho no processo de coagulação-floculação, destacando as condições que proporcionaram os

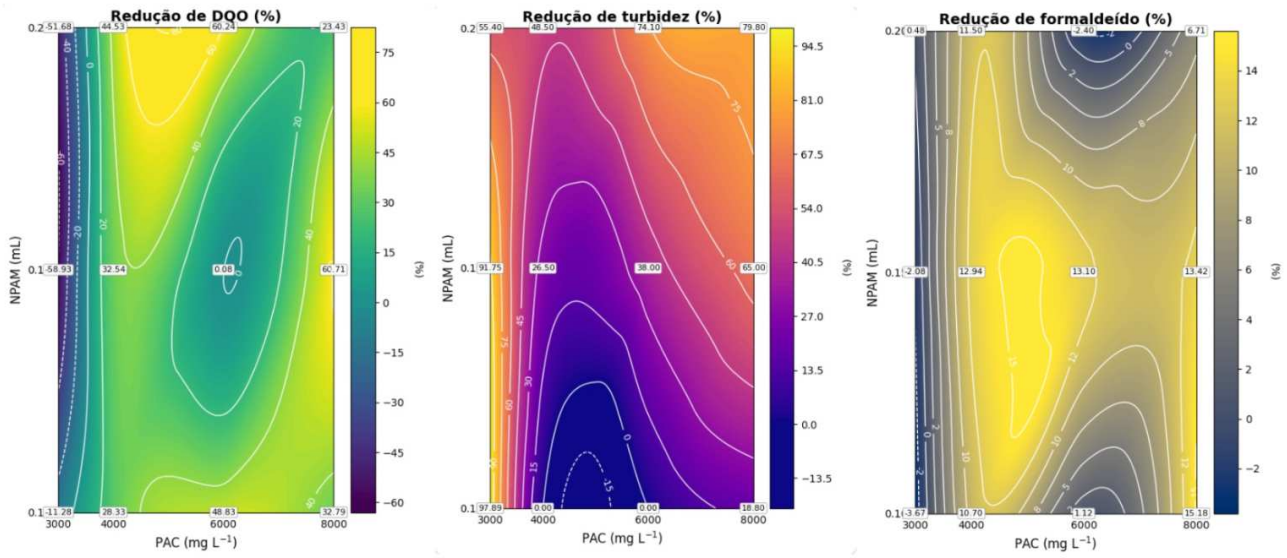
melhores resultados para as respostas avaliadas. Complementarmente, a Figura 19 apresenta os mapas de contorno, que permitem visualizar a influência das variáveis operacionais e identificar as regiões de maior eficiência do processo.

Tabela 10 - Melhores resultados obtidos no processo de coagulação-floculação.

Ensaio	Condição Experimental	Redução de DQO (%)	Redução de Turbidez (%)	Redução de Formol (%)	Avaliação
3	8.000 mg L ⁻¹ PAC + 0,10 mL NPAM	32,79	18,80	15,18	Maior remoção de formol, porém com desempenho limitado na remoção de turbidez e moderado para DQO.
6	4.000 mg L ⁻¹ PAC + 0,20 mL NPAM	44,53	48,50	11,50	Condição equilibrada, apresentando bons resultados globais com menor consumo de coagulante.
7	8.000 mg L ⁻¹ PAC + 0,15 mL NPAM	60,71	65,00	13,42	Melhor desempenho global, com elevada remoção de DQO, boa clarificação e remoção significativa de formol.
8	8.000 mg L ⁻¹ PAC + 0,20 mL NPAM	23,43	79,80	6,71	Boa clarificação, porém com baixa remoção de DQO e remoção moderada de formol.
9	6.000 mg L ⁻¹ PAC + 0,20 mL NPAM	60,24	74,10	-2,40	Excelente desempenho para remoção de DQO e turbidez, porém inadequado para remoção de formol.
10	3.000 mg L ⁻¹ PAC + 0,10 mL NPAM	-11,28	97,89	-3,67	Maior remoção de turbidez, porém inadequado para redução de DQO e do formol.

Fonte: Autoria Própria (2026)

Figura 19 - Mapas de contorno das respostas do processo de coagulação-floculação



Fonte: Autoria própria (2026)

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação do processo de coagulação-floculação utilizando policloreto de alumínio (PAC) associado à poliacrilamida não-catiônica (NPAM) apresenta potencial como etapa de pré-tratamento para efluentes oriundos da indústria de resinas. O método foi capaz de promover significativa redução da carga orgânica em parte das condições avaliadas, alcançando remoções de DQO superiores a 60% nos ensaios mais eficientes, além de expressiva redução da turbidez e melhoria visual do efluente.

Entretanto, o comportamento observado evidenciou que a eficiência do tratamento está fortemente relacionada à natureza da matéria orgânica presente no efluente. Embora algumas condições tenham promovido elevada clarificação, os resultados de DQO indicaram a permanência de uma parcela significativa de compostos orgânicos dissolvidos, sugerindo limitações do processo na remoção de solventes orgânicos e outras substâncias solúveis presentes na matriz estudada, dado as características químicas dos compostos, como ligações fracas de dipolo induzido dos compostos tolueno e dimetilbenzeno, o caráter anfipático do solvente n-butanol, e o comportamento termodinâmico da mistura.

A avaliação do percentual de formol reforçou essa interpretação. Embora tenham sido observadas reduções parciais do composto, a maior remoção obtida foi de 15,18%, indicando que o processo de coagulação-floculação apresenta limitações para a remoção de formaldeído quando este se encontra predominantemente dissolvido no meio líquido. Os resultados sugerem que a redução da carga orgânica observada por DQO não esteve diretamente relacionada à remoção do formol, mas principalmente à remoção de matéria orgânica particulada e coloidal presente no efluente.

Cabe ressaltar que, embora o tolueno seja um dos principais solventes orgânicos característicos do efluente de indústrias de resinas alcalinas (conforme discutido na revisão de literatura), o composto não foi monitorado isoladamente nas etapas experimentais. Devido à sua natureza altamente volátil e baixa solubilidade em água quando comparado ao formaldeído, estima-se que parte do tolueno residual possa sofrer arraste ou volatilização durante a agitação mecânica nos ensaios experimentais. Assim, a dinâmica de sua remoção analítica foi incorporada de maneira indireta nos parâmetros globais de DQO.

Os ensaios também demonstraram a necessidade de ajuste adequado entre as dosagens de PAC e NPAM, uma vez que o aumento da concentração de coagulante não resultou, necessariamente, em melhor desempenho do processo.

Dessa forma, conclui-se que o sistema PAC-NPAM pode ser empregado de forma eficiente para a redução da fração particulada da matéria orgânica e da turbidez do efluente, atuando como uma etapa de condicionamento para tratamentos subsequentes. Contudo, para alcançar reduções mais expressivas da carga orgânica global, recomenda-se a associação do processo com tecnologias complementares voltadas à remoção de compostos dissolvidos, como adsorção, processos oxidativos avançados ou tratamentos biológicos especializados.

Para estudos futuros, recomenda-se a caracterização quantitativa dos compostos orgânicos no efluente, o desenvolvimento do método coagulação-floculação associado a etapas de adsorção, visando maior remoção da matéria orgânica e contribuição para a redução da DQO e o aprofundamento de estudos a respeito do controle de compostos orgânicos voláteis (VOCs).

A identificação da composição química da fração orgânica residual possibilitará ainda correlacionar os compostos presentes com dados toxicológicos disponíveis na literatura, contribuindo para uma avaliação mais abrangente do tratamento empregado. Dessa forma, será possível direcionar futuras pesquisas para a aplicação de tecnologias complementares, visando não apenas a redução da carga orgânica, mas também a mitigação dos potenciais efeitos tóxicos do efluente para o meio ambiente e a população.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 15705:2007**: Determinação da demanda química de oxigênio (DQO) - Método de tubo de digestão de pequena escala com dicromato. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASHOURI, A.; KHORASANI, M. **Evaluation of polyacrylamide synthesis and its performance as a flocculant using a response surface methodology (RSM) approach**. *Desalination*, v. 616, p. 119348, 2025. DOI: 10.1016/j.desal.2025.119348.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22. ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 2012.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF, 1998.

BASF S.A. **Ficha com Dados de Segurança (FDS) - n-Butanol**. Versão 12.2. Revisão: 09 abr. 2025. Disponível em: https://download.basf.com/p1/000000000030034729_SDS_GEN_BR/pt_BR/n-BUTANOL_30034729_SDS_GEN_BR_pt_12-1.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

BORSCHIVER, S.; ANTUNES, A.; WONGTSCHOWSKI, P. **A importância estratégica da cadeia produtiva das resinas para a indústria nacional**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 12, n. 1, p. 56–65, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/fwc9ySyfVQxk7PZzwnLQKxy>. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRAILE, Pedro Márcio; CAVALCANTI, José Eduardo W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 1. ed. São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: Planalto. Acesso em: 15 jun. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. *Diário Oficial da União*, 16 maio 2011.

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

BRASKEM S.A. **Ficha com Dados de Segurança (FDS) - Tolueno**. Versão 16.0. Revisão: 12 maio 2025. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/cms/europe/ModuloProduto/DownloadSds?idSds=0VelePEqDkU=>. Acesso em: 20 jun. 2025.

BRISCO DO BRASIL INDÚSTRIA QUÍMICA E COMÉRCIO LTDA. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – Anidrido Ftálico**. FISPQ nº 017/BR, revisão 18. Guarulhos, 01 fev. 2021. Disponível em: <https://www.brisco.com.br/fispq/anidrido-ftalico.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

CAN-GÜVEN, E.; BAYAT, M. E.; YAZICI GUVENC, S.; VARANK, G. **Refractory pollutants removal from industrial wastewater by a coupled process of coagulation-flocculation and alternative electrochemical advanced oxidation processes**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 707, p. 135916, 2025. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135916.

CETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. Formaldeído: ficha de informação toxicológica. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/24/2022/10/Formaldeido.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**. Guia Técnico Ambiental: Indústria de Tintas e Vernizes. São Paulo: CETESB/SITIVESP, 2006. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/.../tintas.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2025.

CHEDID, Natacha Abi. **Tratamento de efluente residual oriundo da reação de síntese de resina fenol-formaldeído por meio de processos oxidativos avançados**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2015.

CHEN, B.-Y. et al. **Deciphering butanol inhibition to Clostridial species in acclimatized sludge for improving biobutanol production**. *Biochemical Engineering Journal*, v. 69, p. 100–105, dez. 2012. DOI: 10.1016/j.bej.2012.09.005.

CHOE, Y.; CHO, S.; KIM, C.; WON, J.; BURNS, S. E. **Nonionic polyacrylamide-clay interaction: Insight from sedimentation experiments and viscosity**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 13, n. 5, art. 118597, 2025. DOI: 10.1016/j.jece.2025.118597.

CNI. **CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA**. Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2018.

DÖRR, Fabiane. **Estudo da coagulação-floculação-sedimentação de água com turbidez ou cor elevada, utilizando polímero sintético como auxiliar de floculação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Lorena, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/87/87131/tde-11042012-152743/>. Acesso em: 4 jun. 2026

DUAN, J.; GREGORY, J. **The reversibility of floc breakage**. *International Journal of Mineral Processing*, Amsterdam, v. 73, n. 2-4, p. 251-259, 2004.

DUAN, J.; GREGORY, J. **Coagulation by hydrolysing metal salts**. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 100–102, p. 475–502, 2003. DOI: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2.

EL BIED, O.; EL GHARMALI, A.; CHAFI, M.; MOKHLISSE, A.; BOURAQQADI, A.; BELGHYTI, D. **Turbidity and chemical oxygen demand reduction from pig slurry through a coagulation–flocculation process.** *Agronomy*, v. 11, n. 11, p. 2268, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11112268.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: uma exploratória inicial.** 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas:** Ciência e tecnologia. 4th ed. [s.l.]: Editora Blucher, 2009.

GHAFAARI, S.; AZIZ, H. A.; ISA, M. H.; ZINATIZADEH, A. A. **Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum.** *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 163, n. 2-3, p. 650–656, 2009.

GPC QUÍMICA S.A. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – Formaldeído.** ARA-2723-FIP, rev. 19. Araucária, 23 maio 2016. Disponível em: <https://gpcquimica.com.br/produtos/formol>. Acesso em: 20 jun. 2025.

HAYDAR, S.; AZIZ, J. A. **Coagulation-flocculation studies of tannery wastewater using cationic polymers as a replacement of metal salts.** *Water Science and Technology*, v. 59, n. 2, p. 381–390, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.864.

IAT. **INSTITUTO ÁGUA E TERRA.** Instrução Normativa nº 45, de 30 de abril de 2025. Curitiba, PR, 30 abr. 2025. Disponível em: IAT/PR.

KAMIWADA, W. Y.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. dos. **Emprego do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 5, p. 667–676, 2020. DOI: 10.1590/S1413-4152202020180005.

KEELEY, D. F.; HOFFPAUIR, M. A.; MERIWETHER, J. R. **Solubility of aromatic hydrocarbons in water and sodium chloride solutions of different ionic strengths: benzene and toluene.** *Journal of Chemical and Engineering Data*, v. 33, n. 2, p. 87–89, 1988. DOI: 10.1021/je00052a030.

KORZENIOWSKA-REJMER, E.; FILIPEK, K. **Removal of aromatic hydrocarbons (BTX) in anoxic and anaerobic wastewater treatment processes.** *Desalination and Water Treatment*, v. 51, n. 7–9, p. 1577–1583, 2013. DOI: 10.1080/19443994.2012.715075.

LIU, Mei-Ling et al. **Multi-component separation of small molecular/ionic pollutants with smart pH-gating membranes.** *Chemical Engineering Science*, v. 245, p. 116854, 2021. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116854.

LOFRANO, G.; MERIC, S. **A comprehensive approach to winery wastewater treatment: a review of the state-of-art.** *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 7, p. 3011–3028, Feb. 2016.

METROHM AG. Manual 906 Titrandos. Herisau: Metrohm AG, 2022.

MORAIS, L. C. de; GUANDIQUE, M. E. G. **Reservatórios em metrópoles e tratamentos de seus efluentes**. In: POMPILHO, C. et al. (org.). *Ecologia de reservatórios e interfaces*. São Paulo: IB-USP, 2015. cap. 28, p. 421.

MOREIRA, F. S. M.; FURTADO, C. F. do C. **Compostos orgânicos voláteis no contexto de doenças respiratórias**: protocolo de revisão do âmbito de aplicação. *RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar*, v. 3, n. 11, e3112056, 2022. DOI: 10.47820/recima21.v3i11.2056. Disponível em: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/2056>. Acesso em 4 jun. 2026.

NAHAR, N.; ALAUDDIN, M.; QUILTY, B. **Toxic effects of toluene on the growth of activated sludge bacteria**. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 16, n. 3, p. 307–311, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008986823590>. Acesso em: 20 jun. 2025.

NOLASCO, F. R. **Desenvolvimento de um sistema para avaliação do efeito da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes líquidos contendo fenol ou cianeto**. 2009. Dissertação (Mestrado) - CENA/USP, Piracicaba, 2009.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION (NCBI). **Formaldehyde**. PubChem Compound Summary. Bethesda, MD: National Library of Medicine, 2026. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Formaldehyde>. Acesso em: 8 jul. 2026.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION (NCBI). **Toluene**. Bethesda, MD: National Library of Medicine, 2026. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1140>. Acesso em: 8 jul. 2026.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION (NCBI). **Butanol**. Bethesda, MD: National Library of Medicine, 2026. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/263>. Acesso em: 8 jul. 2026.

PARENTE, A. H.; SILVA, E. A. B. **Redução de efluentes líquidos na indústria alimentícia**. *Maxwell PUC-Rio*, v. 1, n. 1, jul./dez. 2002. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4205/4205.PDF>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PERNITSKY, D. J.; EDZWALD, J. K. **Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications**. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, v. 55, n. 2, p. 121–141, 2006. DOI: 10.2166/aqua.2006.013.

REETZ, M. T.; KÖNIG, G. **n-Butanol**: an ecologically and economically viable extraction solvent for isolating polar products from aqueous solutions. *European Journal of Organic Chemistry*, v. 2021, n. 46, p. 6228–6234, 2021. DOI: 10.1002/ejoc.202100829.

SHAH, Maulin P. (ed.). **Biological treatment of industrial wastewater**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2021. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=lq1QEAAQBAJ>. Acesso em: 18 fev. 2026.

SILVA, J. P. dos S. F. **Optimização das condições de produção de resinas de poliéster insaturado**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado) - IST, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. 4. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

RATOLA, N.; CINCINELLI, A.; ALVES, A.; KATSOYIANNIS, A. Occurrence of organic microcontaminants in the wastewater treatment process: A mini review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 239-240, p. 1-18, 2012.

SUHARDI; ARAFAH, K.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, N. A.; ALI, N. M. **Enhancing water-wastewater treatment efficiency: synergistic approach using polyaluminum chloride, sodium alginate, and magnetite for Congo red removal**. *Chemical Papers*, v. 78, p. 3971–3981, 2024. DOI: 10.1007/s11696-024-03581-7.

TRIPATHY, T.; DE, B. R. **Flocculation: a new way to treat the waste water**. *Journal of Physical Sciences*, v. 10, p. 93–127, 2006.

TÜNAY, O.; ÇAKIR, D.; KABDAŞLI, I. **Characterization and treatability of alkyd resin production wastewater**. *Desalination and Water Treatment*, v. 101, p. 151–156, jan. 2018. DOI: 10.5004/dwt.2018.21761.

TZOUPANOS, N. D.; ZOUBOULIS, A. I. **Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: the application of new generation of chemical reagents**. In: 6th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'08), Rhodes, Greece, 2008. p. 309–317.

ZHAO, Xin; WANG, Yizhou; YE, Zhenzhen; BIAN, Yuxin; LIU, Mei; LIU, Zheng; XING, Baoshan. **Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review**. *Science of The Total Environment*, v. 765, p. 142795, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142795.

WEI, Ning; ZHANG, Zhongguo; LIU, Dan; WU, Yue; WANG, Jun; WANG, Qunhui. **Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage**. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 23, n. 6, p. 1041–1046, 2015. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.02.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.02.003>