

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

NILMALICE COELHO ROCHA DE SOUZA

Tratamento de Águas Cinzas por Processos Alternativos: Estudo Comparativo entre Adsorção e Processos Oxidativos Avançados

Goiânia, 2026.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☒ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☐ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Nilmalice Coelho Rocha de Souza

Matrícula: 20232011280158

Título do Trabalho: Tratamento de Águas Cinzas por Processos alternativos:
Estudo Comparativo entre Adsorção e Processos Oxidativos Avançados.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Documento assinado digitalmente
NILMALICE COELHO ROCHA DE SOUZA
Data: 16/06/2026 20:14:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Goiânia, 16/06/2026
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE

NILMALICE COELHO ROCHA DE SOUZA

Tratamento de Águas Cinzas por Processos Alternativos: Estudo Comparativo entre Adsorção e Processos Oxidativos Avançados

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia e Gerenciamento de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá

Coorientadora: Profa. Dra. Elisangela Cardoso de Lima Borges

Coorientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos

Goiânia, 2026.

S729t	Souza, Nilmalice Coelho Rocha de. Tratamento de águas cinzas por processos alternativos: estudo comparativo entre adsorção e processos oxidativos avançados / Nilmalice Coelho Rocha de Souza – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2026. 80 f.: il. Orientador: Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá. Coorientadora: Profa. Dra. Elisangela Cardoso de Lima Borges. Coorientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Programa de Pós-Graduação <i>Stricto Sensu</i> em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. 1. Águas cinzas - tratamento. 2. Adsorção. 3. Processos oxidativos avançados. 4. Carvão ativado. I. Sá, Fernando Pereira de (orientador). II. Borges, Elisangela Cardoso de Lima (coorientadora). III. Santos, Lidiaine Maria dos (coorientadora). IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. V. Título. CDD 628.35
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
 Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 54/2026 - GYN-CMTGS/GYN-GPPEX/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA, GESTÃO E SUSTENTABILIDADE**

NILMALICE COELHO ROCHA DE SOUZA

**TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS POR PROCESSOS ALTERNATIVOS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE
ADSORÇÃO E PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia,
Gestão e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás como requisito para a obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa.
Linha de Pesquisa: Tecnologia e Gerenciamento de Resíduos.

Aprovação em: 30 de março de 2026.

Banca examinadora:

Presidente e orientador: Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá - PPGTGS IFG
Coorientadora: Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos - PPGTGS IFG
Coorientadora: Profa. Dra. Elisângela Cardoso de Lima Borges - IFG CAMPUS INHUMAS
Avaliador: Prof. Dr. Fernando Schmidt - PPGTGS IFG
Avaliadora: Profa. Dra. Tatianne Ferreira de Oliveira - UFG

Documento assinado eletronicamente por:

- Tatianne Ferreira de Oliveira, Tatianne Ferreira de Oliveira - Docente - Ufg (01567601000143), em 14/06/2026 15:25:17.
- Fernando Schmidt, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/04/2026 14:57:13.
- Elisângela Cardoso de Lima Borges, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/04/2026 19:40:47.
- Lidiaine Maria dos Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/04/2026 11:24:55.
- Fernando Pereira de Sa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/04/2026 16:44:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 761406
Código de Autenticação: 2a6b587abd



Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e pelo incentivo constante em cada etapa da minha vida.

À minha família, que compreendeu minhas ausências, apoiou meus sonhos e esteve ao meu lado nos momentos de desafios e conquistas.

A todos que acreditaram no meu potencial e contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste mestrado.

Esta conquista também é de vocês.

Agradecimentos

A Deus, por sua infinita bondade, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta caminhada. Sua presença foi meu amparo nos momentos de dificuldade e minha inspiração para seguir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Pereira de Sá, pela orientação segura, pelos ensinamentos compartilhados, pela confiança depositada em meu trabalho e pela contribuição essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Às minhas coorientadoras, Profa. Dra. Elisangela Cardoso de Lima Borges e Profa. Dra. Lidiaine Maria dos Santos, pela disponibilidade, apoio, sugestões e valiosas contribuições que enriqueceram este estudo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia, pela oportunidade de realização deste mestrado, pela estrutura oferecida e pelo ambiente acadêmico que possibilitou meu crescimento profissional e científico.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Inhumas, pelo apoio institucional e incentivo à qualificação profissional.

À minha mãe, Natalie, e ao meu pai, Luiz, por todo amor, dedicação, apoio e pelos valores que me ensinaram ao longo da vida. Esta conquista também é de vocês.

Ao meu esposo, Fernando, pelo companheirismo, incentivo, compreensão e apoio incondicional durante toda esta jornada. Obrigada por acreditar em mim e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amados filhos, Rafael e Miguel, que são minha maior motivação e fonte de alegria. Cada esforço realizado teve como inspiração o amor que sinto por vocês.

Aos meus irmãos, Luiz Júnior e Flávio, pelo carinho, amizade e incentivo constante, que foram fundamentais para a realização deste sonho.

A todos os professores, colegas, amigos e familiares que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, meu sincero agradecimento.

Muito obrigada!

"A água é o princípio de todas as coisas."

Tales de Mileto,
624 a.C - 558 a.C.

Resumo

Título: Tratamento de Águas Cinzas por Processos Alternativos: Estudo Comparativo entre Adsorção e Processos Oxidativos Avançados

Autor: Nilmalice Coelho Rocha de Souza

Orientador: Dr. Fernando Pereira de Sá

A crescente pressão sobre os recursos hídricos tem incentivado o desenvolvimento de tecnologias alternativas para o tratamento e reúso de águas residuárias domésticas, incluindo águas cinzas. Neste contexto, o presente estudo avaliou o desempenho de processos de adsorção e processos oxidativos fotoassistidos aplicados ao tratamento da fração dissolvida de água cinza.

Inicialmente, foi sintetizado por coprecipitação e caracterizado um hidróxido duplo lamelar do tipo hidrocalumita (Ca–Al HDL), empregando-se difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica simultânea (TG/DTA). Os resultados confirmaram a formação da estrutura lamelar característica do material, com espaçamento basal d_{003} de aproximadamente 0,87 nm e comportamento térmico típico de hidróxidos duplos lamelares.

Ensaio de adsorção foram conduzidos utilizando 20 mL de água cinza e diferentes massas de adsorventes (0 - 200 mg) de hidrocalumita e carvão ativado, com tempo de contato fixo de 60 min., avaliando-se a remoção da matéria orgânica dissolvida por espectroscopia UV-Vis. A hidrocalumita apresentou redução de aproximadamente 60% da absorbância em 254 nm, além de significativa redução da absorbância na região visível do espectro, indicando contribuição para a clarificação do efluente. O carvão ativado apresentou desempenho superior, com remoções superiores a 90% da absorbância em 254 nm nas maiores dosagens avaliadas.

Também foram investigados processos oxidativos envolvendo radiação UV, peróxido de hidrogênio H_2O_2 isolado e o sistema combinado UV/ H_2O_2 . A radiação UV isolada promoveu alterações no perfil espectral da matéria orgânica dissolvida, sugerindo transformação estrutural dos compostos presentes. O peróxido de hidrogênio isolado a 9,8 mol/L com diferentes volumes (0,1 mL, 0,5 mL, 1,0 mL, 1,5 mL, 2,0

mL e 2,5 mL), apresentou baixa reatividade nas condições avaliadas. Já o sistema UV/H₂O₂, foram avaliadas duas condições de dosagem do oxidante (1 mL e 10 mL) em 200 mL do efluente, promovendo modificações espectrais mais pronunciadas, indicando degradação parcial de cromóforos e formação de intermediários detectáveis na região do ultravioleta.

Os resultados demonstram que o carvão ativado apresenta elevada eficiência na remoção da matéria orgânica dissolvida, enquanto a hidrocalumita apresenta desempenho moderado com potencial aplicação como material adsorvente complementar. Os processos oxidativos fotoassistidos mostraram-se capazes de promover transformações químicas na matéria orgânica presente no efluente, destacando o potencial do sistema UV/H₂O₂ como etapa de transformação em processos de tratamento de águas cinzas.

Palavras-chave

Águas cinzas; adsorção; carvão ativado; hidróxidos duplos lamelares; processos oxidativos avançados.

Abstract

Title: Greywater Treatment by Alternative Processes: A Comparative Assessment of Adsorption and Advanced Oxidation

Author: Nilmalice Coelho Rocha de Souza

Advisor: Dr. Fernando Pereira de Sá

The growing pressure on water resources has encouraged the development of alternative technologies for the treatment and reuse of domestic wastewater, including greywater. In this context, the present study evaluated the performance of adsorption processes and photo-assisted oxidative processes applied to the treatment of the dissolved fraction of greywater.

Initially, a hydrocalumite - type layered double hydroxide (Ca–Al LDH) was synthesized by coprecipitation and characterized by X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and simultaneous thermal analysis (TG/DTA). The results confirmed the formation of the characteristic lamellar structure of the material, with a basal spacing d_{003} of approximately 0.87 nm and thermal behavior typical of layered double hydroxides.

Adsorption tests were conducted using 20 mL of greywater and different masses of adsorbents (0–200 mg) of hydrocalumite and activated carbon, with a fixed contact time of 60 min., evaluating the removal of dissolved organic matter by UV-Vis spectroscopy. Hydrocalumite showed a reduction of approximately 60% in absorbance at 254 nm, as well as a significant decrease in absorbance in the visible region of the spectrum, indicating contribution to effluent clarification. Activated carbon showed superior performance, with removals greater than 90% of absorbance at 254 nm at the highest dosages evaluated.

Oxidative processes involving UV radiation, hydrogen peroxide H_2O_2 , and the combined UV/ H_2O_2 system were also investigated. UV radiation alone promoted changes in the spectral profile of dissolved organic matter, suggesting structural transformation of the compounds present. Isolated hydrogen peroxide at 9.8 mol/L with different volumes (0.1 mL, 0.5 mL, 1.0 mL, 1.5 mL, 2.0 mL, and 2.5 mL) showed low reactivity under the evaluated conditions. The UV/ H_2O_2 system, however, was

evaluated under two oxidant dosage conditions (1 mL and 10 mL) in 200 mL of effluent, promoting more pronounced spectral modifications, indicating partial degradation of chromophores and the formation of detectable intermediates in the ultraviolet region.

The results demonstrate that activated carbon has high efficiency in removing dissolved organic matter, whereas hydrocalumite shows moderate performance with potential application as a complementary adsorbent material. The photo-assisted oxidative processes proved capable of promoting chemical transformations in the organic matter present in the effluent, highlighting the potential of the UV/H₂O₂ system as a transformation step in greywater treatment processes.

Keywords

Greywater; adsorption; activated carbon; layered double hydroxides; advanced oxidation processes.

Lista de Figuras

1	Representação esquemática de uma molécula de tensoativo com suas partes apolar e polar.	24
2	Representação de uma molécula de tensoativo.	24
3	Representação dos tipos de tensoativos.	25
4	Representação de uma molécula de sal de amônio quaternário.	25
5	Representação da molécula do dodecanoato de sódio.	26
6	Representação de uma molécula de tensoativo formada por álcool dodecílico etoxilado.	26
7	Representação de uma molécula do cocamidopropil betaína.	27
8	Estrutura molecular do alquilbenzeno sulfonato linear.	28
9	Escoamento da água durante o processo de filtragem no filtro de areia.	29
10	Tratamento químico por coagulação e floculação.	29
11	Tratamento químico por coagulação e floculação.	30
12	Sistema experimental para síntese com adição de reagentes sob agitação magnética.	37
13	Precipitado coloidal branco.	38
14	Hidrocalumita	38
15	Fotoreator: equipamento empregado nos testes de fotodegradação utilizando radiação UV.	42
16	Difratograma da hidrocalumita.	47
17	Espectro de FTIR para a hidrocalumita (HDL).	48
18	Curvas de TG e DTA para a hidrocalumita (HDL).	49
19	Espectro de absorbância em função da quantidade de hidrocalumita.	51
20	Absorbância em função da quantidade de hidrocalumita para comprimento de onda de 254 nm.	53
21	Espectro de absorbância em função da quantidade de carvão ativado.	54
22	Absorbância em função da quantidade de adsorvente para comprimento de onda de 254 nm.	55
23	Absorbância em função do tempo de irradiação ultravioleta.	58
24	Absorbância em função da quantidade de H ₂ O ₂	59
25	Absorbância em função do tempo de irradiação ultravioleta para 1 mL de H ₂ O ₂ em 200 mL de efluente.	61
26	Absorbância em função do tempo de irradiação ultravioleta para 10 mL de H ₂ O ₂ em 200 mL de efluente.	62
27	Absorbância em função do tempo de irradiação para 254 nm, utilizando 1 mL de H ₂ O ₂ em 200 mL de efluente.	63

28	Absorbância em função do tempo de irradiação para 254 nm, utilizando 10 mL de H ₂ O ₂ em 200 mL de efluente.	64
----	--	----

Sumário

1	Introdução	16
2	Objetivos	19
2.1	Geral	19
2.2	Específicos	19
3	Referencial Teórico	20
3.1	A água e os desafios da escassez	20
3.2	Águas cinzas e reúso não potável	21
3.3	Contaminantes típicos em águas cinzas	22
3.3.1	Componentes presentes na água da máquina de lavar roupas	23
3.4	Tecnologias aplicadas ao tratamento de águas cinzas	28
3.5	Adsorção aplicada a efluentes domésticos	31
3.5.1	Hidróxidos duplos lamelares (HDLs)	31
3.5.2	A hidrocalumita como adsorvente	32
3.5.3	Carvão ativado	33
3.6	Processos Oxidativos Avançados (POAs)	34
3.6.1	Fotodegradação com H_2O_2	35
4	Materiais e Métodos	37
4.1	Síntese do Hidróxido Duplo Lamelar (HDL)	37
4.2	Caracterização do HDL	38
4.2.1	Difração de raios X (DRX)	38
4.2.2	Espectroscopia no infravermelho (FTIR)	39
4.2.3	Análise térmica (TG/DTA)	39
4.3	Carvão Ativado	39
4.4	Amostras de Água Cinza	40
4.5	Ensaio de Adsorção	40
4.6	Sistema Fotoreator	40
4.7	Ensaio de Processos Oxidativos	41
4.7.1	Radiação UV isolada	41
4.7.2	Oxidação por H_2O_2 isolado	41
4.7.3	Sistema UV/ H_2O_2	41
4.8	Monitoramento Espectrofotométrico	42
4.9	Cálculo da Eficiência de Remoção	43
4.10	Ajustes Metodológicos Após a Qualificação	44

5	Resultados	46
5.1	Caracterização do HDL	46
5.1.1	Difração de raios X	46
5.1.2	Espectroscopia no infravermelho (FTIR)	47
5.1.3	Análise térmica (TG/DTA)	48
5.2	Adsorção em Hidrocalumita	50
5.3	Adsorção em Carvão Ativado	53
5.3.1	Cálculo da eficiência específica aparente (254 nm)	56
5.3.2	Interpretação da eficiência específica aparente	56
5.4	Fotodegradação por Radiação UV	57
5.5	Oxidação por H ₂ O ₂ Isolado	59
5.6	Considerações Comparativas para o Sistema UV × H ₂ O ₂	60
5.7	Fotodegradação por Radiação UV/H ₂ O ₂	61
5.8	Discussão Comparativa entre Adsorção e Processos Oxidativos Avançados	65
6	Perspectivas e Sugestões para Trabalhos Futuros	67
7	Considerações Finais	69
	Referências Bibliográficas	71

Introdução

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida, sendo indispensável ao funcionamento de todos os organismos vivos. A escassez de água, causada por fatores como poluição, exploração excessiva e mudanças climáticas, compromete a saúde pública, a produção de alimentos e o desenvolvimento econômico sustentável (Cardoso, 2020).

Além disso, o acesso à água potável é um direito humano fundamental, cuja limitação, em termos de qualidade e quantidade, afeta diretamente o bem-estar da sociedade. Nesse sentido, o tratamento e o reaproveitamento de águas cinzas representam alternativas promissoras e urgentes (Pes, Irigaray e Souza, 2023).

Água cinza é definida como a água gerada no dia a dia das residências, como aquela proveniente da lavagem de roupas, louças, pias de banheiro e banhos (EMBRAPA, 2023). Após tratamento adequado, pode ser reutilizada em diversas atividades não potáveis, como descarga de vasos sanitários, irrigação de jardins, limpeza de calçadas e lavagem de veículos (Soethe *et al.*, 2013).

No Brasil, a Lei nº 14.546, de 04 de abril de 2023, estabeleceu novas medidas para prevenção do desperdício de água ao alterar a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Lei de Saneamento Básico). A legislação atual incentiva o reúso tanto da água da chuva quanto da água cinza em novas construções e nas atividades paisagísticas, agrícolas, florestais e industriais (Brasil, 2023). Além disso, propostas recentes de regulamentação vêm sendo desenvolvidas para estabelecer diretrizes nacionais sobre o reúso de água, ampliando sua aplicação e contribuindo para a segurança hídrica no país (BRASIL, 2026).

Entretanto, o reaproveitamento da água não é uma prática recente. Já em 1850 a.C., povos nômades ao leste do mar Morto captavam água da chuva, como relatado na Pedra Moabita. Na Grécia Antiga, a água utilizada nas residências era direcionada para sistemas de irrigação (CETESB, 2023).

Apesar disso, ainda existem desafios para o desenvolvimento de tecnologias de tratamento que sejam eficientes, acessíveis e compactas. Por exemplo, a patente BR 10 2012 001439-4 A2 descreve um equipamento automatizado para o reapro-

veitamento de água cinza, mas que não contempla processos de descontaminação (Trentin, 2022).

Diante desse cenário, surgem questões relevantes: (1) É possível desenvolver um sistema compacto e econômico de tratamento que incorpore a descontaminação da água cinza? (2) Técnicas como adsorção e fotocatalise podem efetivamente remover cor, matéria orgânica e compostos cromóforos dessas águas?

Com o objetivo de propor soluções viáveis para o tratamento e reaproveitamento de águas cinzas oriundas da máquina de lavar de um Centro Municipal de Educação Infantil Hortência Moreira de Paula (CMEI Vó Fia), este estudo investigou a eficácia dos processos de adsorção e fotocatalise homogênea. Os experimentos utilizados como adsorvente o hidróxido duplo lamelar (HDL) do tipo hidrocalumita, associado ao uso de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radiação UV.

A pesquisa buscou compreender como essas técnicas influenciam a eliminação de cor e remoção de matéria orgânica. O objetivo foi criar um sistema de tratamento que permita a reutilização segura da água cinza em atividades não potáveis, promovendo a conservação dos recursos hídricos.

O reaproveitamento de águas cinzas pode reduzir significativamente o volume de efluentes enviados para fossas sépticas e estações de tratamento, diminuindo o uso de energia e de insumos químicos no processo de purificação. Isso implica menor geração de resíduos e subprodutos nos sistemas convencionais de saneamento (Mendonça, 2019).

Contudo, a reutilização segura dessas águas exige a remoção de microrganismos e contaminantes que representem riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A aplicação direta de água cinza não tratada em jardins pode causar acúmulo de sais e contaminantes no solo, afetando também os lençóis freáticos (Teodoro *et al.*, 2017).

Além disso, patógenos presentes nessas águas podem ser transferidos por meio de alimentos irrigados, representando riscos à saúde pública. Assim, é fundamental que políticas públicas incentivem o desenvolvimento de tecnologias e promovam a educação ambiental (Soethe *et al.*, 2013).

Apesar de seus benefícios, a água cinza é frequentemente descartada por falta de conhecimento sobre seu potencial de reúso. Isso reflete uma cultura de desperdício, que pode ser revertida com práticas sustentáveis (Gordeziani, Tsinadze e Kavelashvili, 2024).

Métodos como a adsorção com HDLs, aliados a processos oxidativos avançados (POAs), demonstram grande potencial para remover contaminantes com baixo impacto ambiental. Quando essas tecnologias são simples e viáveis economicamente, há maior aceitação pela população.

Neste contexto, a pesquisa propõe o desenvolvimento de técnicas de tratamento acessíveis e eficazes que assegurem a descontaminação da água cinza e possibilitem seu reúso sem comprometer a saúde pública. O estudo concentra-se em águas oriundas da máquina de lavar roupas de um CEMEI em Inhumas–GO, com potencial aplicação futura em lavanderias de maior escala, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade ambiental. Embora existam muitos estudos sobre reúso de água cinza, a aplicação de HDLs como adsorventes ainda é pouco explorada. Essa lacuna representa uma oportunidade científica, já que o HDL alia eficiência, simplicidade de síntese e baixo custo. O desenvolvimento de métodos que incorporem o uso do HDL pode não apenas preencher essa lacuna, mas também impulsionar novas tecnologias de conservação e gestão hídrica em um cenário de crescente demanda e escassez.

Objetivos

2.1 Geral

Avaliar o desempenho de diferentes estratégias de tratamento aplicadas à fração dissolvida de águas cinzas, com ênfase em processos de adsorção utilizando hidróxido duplo lamelar do tipo hidrocalumita e carvão ativado, bem como em processos oxidativos baseados em radiação UV, H_2O_2 e no sistema combinado UV/ H_2O_2 , visando compreender o potencial dessas tecnologias para a redução de matéria orgânica dissolvida e melhoria das propriedades ópticas do efluente.

2.2 Específicos

- Sintetizar e caracterizar o hidróxido duplo lamelar do tipo hidrocalumita por meio de difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica (TG/DTA);
- Avaliar a capacidade adsortiva da hidrocalumita na remoção de matéria orgânica dissolvida presente em água cinza por meio de análises espectroscópicas UV-Vis;
- Comparar o desempenho da hidrocalumita com o de carvão ativado em pó na remoção da matéria orgânica dissolvida;
- Investigar o efeito da radiação UV na transformação da matéria orgânica dissolvida presente na água cinza;
- Avaliar o efeito do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) isolado no comportamento espectral da fração orgânica dissolvida;
- Analisar o desempenho do sistema combinado UV/ H_2O_2 na modificação estrutural da matéria orgânica dissolvida;
- Interpretar as alterações espectrais observadas no intervalo de 190–800nm como indicadores indiretos da transformação ou remoção da matéria orgânica dissolvida.

Referencial Teórico

3.1 A água e os desafios da escassez

A água é um recurso natural fundamental à sobrevivência humana, ao desenvolvimento socioeconômico e à preservação dos ecossistemas. No entanto, o mundo vive uma crescente crise hídrica que exige soluções estruturais, tecnológicas e comportamentais. Essa crise é impulsionada por diversos fatores interligados, como o crescimento populacional, a poluição dos mananciais, a urbanização desordenada, a ineficiência da infraestrutura hídrica e, principalmente, os efeitos das mudanças climáticas globais (Oliveira e Alves, 2020).

A Agência Nacional de Águas (ANA) alerta para a urgência da adoção de estratégias que garantam o acesso à água em padrões adequados de qualidade e quantidade, principalmente nas regiões urbanas mais densamente povoadas e nas áreas semiáridas do país (Oliveira e Alves, 2020).

No Brasil, embora exista uma das maiores reservas de água doce do planeta, a distribuição desse recurso é extremamente desigual. Regiões como o Norte possuem ampla disponibilidade hídrica, mas carecem de infraestrutura, enquanto áreas como o Semiárido Nordeste e grandes centros urbanos do Sudeste enfrentam déficit hídrico associado à demanda elevada e ao comprometimento dos mananciais (Mata *et al.*, 2024).

Além da desigualdade espacial, fatores climáticos como o aumento das temperaturas e a irregularidade no regime de chuvas afetam diretamente a renovação dos corpos hídricos. Paralelamente, o aumento do consumo doméstico, agrícola e industrial pressiona os sistemas de abastecimento, tornando-os mais vulneráveis ao colapso em períodos de seca (Reboso *et al.*, 2020).

O conceito de “substituição de fontes” tem sido defendido por organismos internacionais como alternativa para racionalizar o uso da água. Segundo essa diretriz, águas de melhor qualidade não devem ser utilizadas quando o uso permitir fontes de qualidade inferior, como águas residuais tratadas e águas pluviais. Essa abordagem está alinhada com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6,

que visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos (Oliveira e Alves, 2020).

Frente a esse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento e a disseminação de tecnologias de reúso e reaproveitamento da água, tanto em ambientes urbanos quanto rurais.

A utilização planejada de águas cinzas tratadas para fins não potáveis (como irrigação, descarga de vasos sanitários, lavagem de pisos e veículos) apresenta-se como uma estratégia tecnicamente viável, economicamente acessível e ambientalmente sustentável (Oliveira e Alves, 2020; Gomes, 2020).

Além disso, práticas de conservação da água, gestão da demanda, captação de águas pluviais, redução de perdas e incentivo a hábitos conscientes devem ser incorporadas à política pública e à cultura das populações. Países como o Japão, Alemanha e Reino Unido já demonstraram que a implantação de políticas robustas de reúso é capaz de reduzir significativamente a dependência de fontes convencionais e minimizar os impactos da escassez hídrica (Oliveira e Alves, 2020).

Assim, o enfrentamento da escassez de água depende de uma abordagem integrada que envolva inovação tecnológica, educação ambiental, regulação eficaz e participação social, visando a resiliência hídrica e o uso racional dos recursos disponíveis para as presentes e futuras gerações.

3.2 Águas cinzas e reúso não potável

As águas cinzas correspondem às águas residuárias provenientes de lavatórios, chuveiros, tanques e máquinas de lavar roupas e louças, distinguindo-se das águas negras, que contêm efluentes provenientes de vasos sanitários (Tabalipa e Fiori, 2006; CETESB, 2023). Essas águas são consideradas fontes alternativas para o reúso não potável, tendo potencial de aplicação em descargas sanitárias, irrigação paisagística e limpeza urbana (Moura *et al.*, 2020).

O reúso dessas águas oferece vantagens ambientais e econômicas, como a redução do consumo de água potável, a minimização da descarga de efluentes nos corpos hídricos e a possível redução do uso de fertilizantes, quando aplicadas na agricultura (Santos *et al.*, 2020). Contudo, seu uso exige atenção quanto à presença de contaminantes e à segurança sanitária, especialmente em ambientes urbanos, nos quais o contato humano direto pode ocorrer.

A classificação do reúso no Brasil pode seguir a ABNT NBR 13.969/1997, que define três modalidades principais: reúso local, reúso direto planejado e reúso indireto. Estados como o Ceará também já estabeleceram legislações específicas

(Moura *et al.*, 2020). Internamente, as águas cinzas representam uma forma de reúso local de menor risco sanitário, desde que adequadamente tratadas.

Normas internacionais como as da Organização Mundial da Saúde (OMS) também oferecem diretrizes quanto ao reúso planejado, não planejado e à reciclagem interna, enfatizando a necessidade de padrões rigorosos de qualidade da água para cada tipo de aplicação (World Health Organization. Meeting of Experts on the Reuse of Effluents and Methods of Wastewater and Health Safeguards, 1973; Moura *et al.*, 2020).

Ainda que o Brasil detenha grandes reservas hídricas, a distribuição desigual e as crises hídricas regionais tornam fundamental a adoção de tecnologias de reúso como estratégia para a segurança hídrica, sobretudo em regiões semiáridas (Santos *et al.*, 2020).

3.3 Contaminantes típicos em águas cinzas

As águas cinzas, oriundas de atividades domésticas como banho, lavagem de roupas e utensílios, apresentam composição variável, com predominância de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Os principais componentes presentes nas águas cinzas residuais variam em função da localização e do estilo de vida dos habitantes. Essa variação decorre do fato de que, de uma residência para outra, as concentrações dos diferentes componentes podem apresentar discrepâncias significativas. Entre os principais poluentes presentes estão os tensoativos, corantes, óleos, gorduras, matéria orgânica biodegradável, resíduos de sabões, detergentes, alvejantes e amaciantes, como descrito no Quadro 1 (Monteiro *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2020; Shaikh e Ahammed, 2020).

Os tensoativos são compostos amplamente utilizados em produtos de limpeza e higiene pessoal, e representam uma das maiores preocupações ambientais quando presentes em corpos hídricos. Sua presença em águas cinzas pode prejudicar processos biológicos convencionais de tratamento e impactar negativamente organismos aquáticos (Cardoso, 2020). Outro contaminante relevante é a matéria orgânica dissolvida e particulada, medida principalmente por parâmetros como Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Altos valores de DQO em águas cinzas indicam carga poluidora significativa, capaz de comprometer a qualidade do efluente tratado (Gomes, 2020).

Além disso, corantes provenientes do enxágue de roupas coloridas, embora em menor concentração, podem conferir coloração residual ao efluente e dificultar seu reúso estético, especialmente em aplicações como irrigação ou lavagem de pisos (Caetano *et al.*, 2022).

Quadro 1 – *Componentes e suas fontes.*

Componentes	Fonte
Fósforo	Detergentes e sabões contendo fosfato
Matéria orgânica	Resíduos de alimentos, óleos e gorduras, resíduos corporais
Matéria inorgânica	Produtos químicos e detergentes utilizados na limpeza
Cloretos	Dissolução de sais como cloreto de sódio
Óleos e graxas	Óleos e gorduras utilizados, resíduos presentes no corpo e nas roupas oriundas da transpiração humana
Enxofre	Sabões, detergentes e decomposição da matéria orgânica

Fonte: Shaikh e Ahammed (2020).

Esses contaminantes, além dos riscos sanitários, afetam parâmetros como turbidez, cor, pH e condutividade elétrica da água. Portanto, o controle e monitoramento de indicadores como DQO e cor são essenciais para avaliar a eficiência dos processos de tratamento aplicados às águas cinzas (Monteiro *et al.*, 2023).

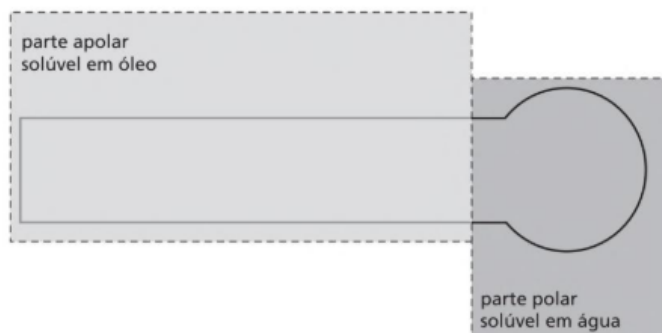
3.3.1 Componentes presentes na água da máquina de lavar roupas

Como já foi mencionado, os componentes presentes nas águas cinzas vão depender do estilo de vida e da localização da residência, não sendo diferente no caso das águas da máquina de lavar roupas. Assim, os principais componentes das águas geradas por essa máquina são: os componentes de detergentes e produtos de limpeza, a sujeira da roupa e os compostos inorgânicos.

Componentes de detergentes e produtos de limpeza

Tensoativos são compostos que podem diminuir as tensões entre diferentes fases, como líquido-líquido, líquido-gás e sólido-líquido, ao se fixarem nessas interfaces. São moléculas anfifílicas que apresentam uma estrutura bifásica, compostas por cabeças polares e caudas apolares, ou seja, uma parte hidrofílica e outra parte hidrofóbica. A parte apolar, geralmente representada na Figura 1 por uma barra é hidrofóbica, conferindo solubilidade em meios orgânicos, como hidrocarbonetos, óleos e gorduras. Em contraste, a parte polar, simbolizada por um círculo, possui características hidrofílicas. Essa dualidade estrutural é fundamental para a funcionalidade dos tensoativos em diversas aplicações, incluindo emulsificação, detergentência e estabilização de sistemas coloidais (Daltin, 2011).

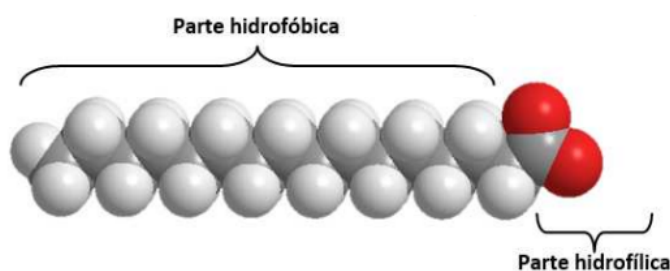
Figura 1 – *Representação esquemática de uma molécula de tensoativo com suas partes apolar e polar.*



Fonte: (Daltin, 2011).

Portanto, nas moléculas de sabões, detergentes e sabonetes, a parte hidrofóbica é formada por uma longa cadeia carbônica que não reage com a água por ser apolar. Essa característica a torna incapaz de interagir com moléculas de água, o que é crucial para sua função. Já em uma das extremidades, encontra-se a parte solúvel, que é a cabeça hidrofílica, atraída pela água e capaz de formar ligações com as moléculas hídras. Detalhes dessa estrutura molecular podem ser vistos na Figura 2. As moléculas com essas características são tensoativos e, exatamente por possuírem essas duas partes tão diferentes, conseguem interagir com tanto a água quanto com a gordura, possibilitando a remoção eficaz das sujeiras. Assim, enquanto a cauda hidrofóbica se liga às partículas de óleo ou sujeira, a cabeça hidrofílica se mantém em contato com a água, criando uma emulsão que facilita a limpeza. Essa propriedade única é o que torna esses produtos tão eficazes na limpeza de superfícies e na remoção de resíduos oleosos (Oliveira, Silva e Souza, 2021).

Figura 2 – *Representação de uma molécula de tensoativo.*

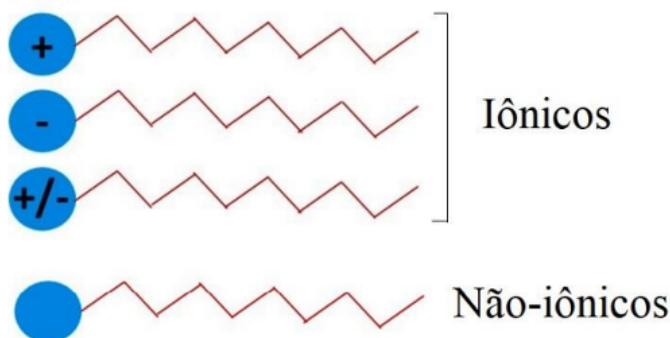


Fonte: (Oliveira, Silva e Souza, 2021).

Os tensoativos podem ser classificados com base na sua habilidade de se dissociar em água ou segundo a carga da superfície ativa. Essa classificação resulta em grupos iônicos, que se dividem em catiônicos, aniônicos e anfóteros, além dos não iônicos, conforme ilustrado na Figura 3. Cada um desses grupos apresenta propriedades específicas que influenciam seu comportamento em diferentes

aplicações, como em produtos de limpeza, cosméticos e processos industriais. A escolha do tipo de tensoativo adequado é fundamental para otimizar a eficiência e a eficácia das formulações (Souza *et al.*, 2023).

Figura 3 – Representação dos tipos de tensoativos.

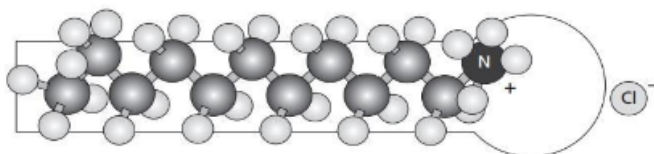


Fonte: (Souza *et al.*, 2023).

Tensoativos catiônicos

Trata-se de tensoativos que geram íons com carga positiva na superfície ativa ao se dissociarem em água. Dentro dessa categoria, encontram-se os sais de amônio quaternário com cadeias longas (Figura 4). Esses compostos são amplamente utilizados em produtos de limpeza e desinfetantes devido à sua eficácia na eliminação de microrganismos e sujeira. Além disso, sua capacidade de formar micelas os torna indispensáveis na formulação de shampoos e condicionadores, proporcionando propriedades condicionantes e emolientes (Garcia *et al.*, 2024).

Figura 4 – Representação de uma molécula de sal de amônio quaternário.



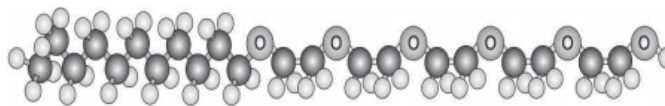
Fonte: (Garcia *et al.*, 2024).

Tensoativos aniônicos

Os tensoativos aniônicos são substâncias que apresentam uma carga negativa em sua parte polar e se separam em íons negativos quando dissolvidos em água (Figura 5) (Garcia *et al.*, 2024). Eles desempenham um papel crucial na otimização da capacidade de molhagem da água, o que os torna especialmente eficazes na remoção de sujeiras, argilas e manchas oleosas. Ao facilitar a interação entre a água e as superfícies, esses agentes permitem que a água penetre e desloque partículas indesejadas de maneira mais eficiente. Essa propriedade é fundamental em diversas aplicações, desde produtos de limpeza doméstica até processos industriais, onde a

eficácia na limpeza é indispensável. Além disso, a utilização de tensoativos aniônicos contribui para a formação de emulsões estáveis, potencializando ainda mais a ação detergente nas formulações (Singh *et al.*, 2022).

Figura 5 – *Representação da molécula do dodecanoato de sódio.*

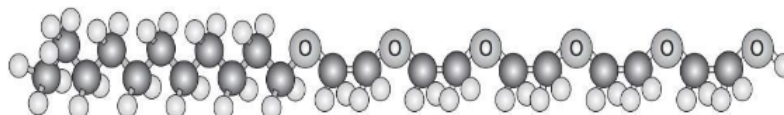


Fonte: (Garcia *et al.*, 2024).

Tensoativos não iônicos

Os tensoativos não iônicos se destacam pela ausência de cargas elétricas em seus grupos hidrofílicos, o que significa que, ao serem dissolvidos em água, não produzem íons. Essa característica resulta em uma solubilidade em água que se deve à presença de grupos funcionais que interagem favoravelmente com o solvente. O fenômeno da emulsificação ocorre nas regiões polares, que contêm grupos químicos capazes de formar ligações de hidrogênio, facilitando a mistura de diferentes fases. Assim, a elevada solubilidade em água dessas áreas polares está intimamente ligada a regiões apolares, que são atraentes para substâncias apolares. A ausência de carga elétrica nos tensoativos não iônicos implica que as gotículas formadas carecem de uma dupla camada de carga, o que as diferencia de outros tipos de tensoativos. A estabilidade das emulsões e dispersões geradas com esses tensoativos é garantida pelo efeito de impedimento estérico, que resulta das longas cadeias polares presentes em suas moléculas, como pode ser visto na Figura 6. Essa característica é essencial para manter a homogeneidade das misturas, evitando a separação de fases e garantindo que as emulsões permaneçam estáveis ao longo do tempo (Garcia *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2023).

Figura 6 – *Representação de uma molécula de tensoativo formada por álcool dodecílico etoxilado.*



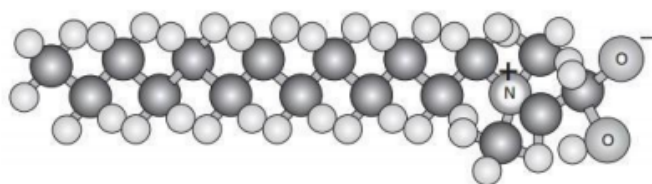
Fonte: (Garcia *et al.*, 2024).

Tensoativos anfóteros

Os tensoativos anfóteros possuem, simultaneamente, cargas aniônicas e catiônicas, podendo ser visualizados na Figura 7. O seu comportamento varia de acordo com o pH do ambiente em que são utilizados. Em condições alcalinas, agem como tensoativos aniônicos, enquanto em condições ácidas se comportam

como tensoativos catiônicos. Essa capacidade de adaptação torna os tensoativos anfóteros extremamente versáteis, permitindo sua aplicação em uma variedade de produtos, desde detergentes e cosméticos até formulações farmacêuticas. Além disso, a alteração de suas propriedades conforme o pH pode ser utilizada para otimizar a eficácia de formulações em diferentes condições de uso, proporcionando flexibilidade e melhor desempenho em diversos contextos (Souza *et al.*, 2023; Garcia *et al.*, 2024).

Figura 7 – Representação de uma molécula do cocamidopropil betaína.



Fonte: (Garcia *et al.*, 2024).

Dessa forma, entre as diferentes categorias de tensoativos, os tensoativos aniônicos se destacam pela sua vasta utilização em produtos como sabões em pó e líquidos para roupas, detergentes para lava-louças, xampus e sabonetes. Isso se deve às suas excelentes características de limpeza, capacidade de gerar espuma, eficácia na remoção de sujeira e alta umectação. Além disso, os tensoativos aniônicos são geralmente compatíveis com a maioria dos ingredientes ativos em formulações, o que os torna versáteis e eficazes em diversas aplicações. Sua popularidade se reflete também em sua capacidade de atuar em diferentes condições de água, garantindo resultados satisfatórios mesmo em ambientes desafiadores (Dini *et al.*, 2024; Makarov, Kumar e Mishra, 2024).

Atualmente, o tensoativo mais utilizado em detergentes e produtos de higiene pessoal é o aniônico sulfonato de alquilbenzeno linear, devido à sua excelente propriedade detergente e ao seu baixo custo. Sua estrutura molecular é formada por uma cabeça sulfonato hidrofílica e uma cauda alquilbenzeno hidrofóbica (Figura 8). Esse composto é altamente eficaz na remoção de sujeira e manchas, tornando-o uma escolha popular na formulação de detergentes, sendo frequentemente encontrado em águas residuárias domésticas, como em efluentes de lavanderias (Mourão *et al.*, 2026).

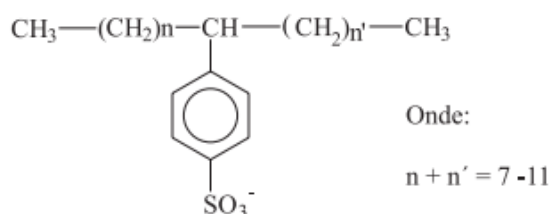
Sabão em pó

Embora seu nome sugira o contrário, o sabão em pó não deve ser classificado como um tipo de sabão, pois sua composição química e o processo de fabricação são distintos do sabão. Assim, a denominação mais adequada seria detergente em pó. Ele é elaborado a partir de uma combinação de ingredientes que formam cadeias moleculares mais longas e complexas do que as presentes no sabão. Isso ocorre porque

o sabão é basicamente produzido pela mistura de soda cáustica e gordura. Por outro lado, o sabão em pó é uma composição mais sofisticada, que utiliza produtos com funções específicas. Quando entra em contato com água e a sujeira das roupas, ocorre uma reação química que quebra as moléculas das manchas, facilitando sua remoção. Dessa forma, o sabão em pó foi desenvolvido especificamente para eliminar a sujeira dos tecidos (YPE, 2026).

Além dos tensoativos, o sabão em pó contém substâncias sequestrantes e quelantes, que têm como objetivo criar quelatos. Esses quelatos são compostos solúveis em água, onde o íon metálico se conecta por meio de ligações covalentes ao agente quelante, eliminando os íons de cálcio e magnésio presentes na água e, assim, potencializando a eficácia do detergente.

Figura 8 – *Estrutura molecular do alquilbenzeno sulfonato linear.*



Fonte: (Penteado, Seoud e Carvalho, 2006).

3.4 Tecnologias aplicadas ao tratamento de águas cinzas

O tratamento de águas cinzas tem como objetivo reduzir a carga poluidora e possibilitar seu reúso seguro para fins não potáveis. Diversas tecnologias podem ser aplicadas, englobando processos físicos, químicos e biológicos, com diferentes níveis de complexidade e eficiência (Resende, 2022).

Entre os processos físicos, destacam-se a filtração em areia, peneiramento e decantação, que promovem a remoção de sólidos suspensos. Já os tratamentos químicos incluem a coagulação-floculação e processos oxidativos, como a aplicação de cloro, ozônio ou peróxido de hidrogênio. Os métodos biológicos mais utilizados são os filtros plantados e os sistemas de zona de raízes, que exploram a ação de microrganismos associados a plantas (Souza *et al.*, 2025; Yadav e Nair, 2024).

No que se refere aos processos físicos, especialmente no que tange ao uso do filtro de areia na irrigação, é possível notar que a água se movimenta de maneira vertical e para baixo durante a filtragem. Ao ingressar no filtro, a água é inicialmente barrada por uma placa difusora, a qual captura as impurezas contidas no líquido ao

longo do processo de purificação. A Figura 9 ilustra um diagrama que representa o fluxo de água que acontece dentro desse tipo de filtro (Mesquita *et al.*, 2014).

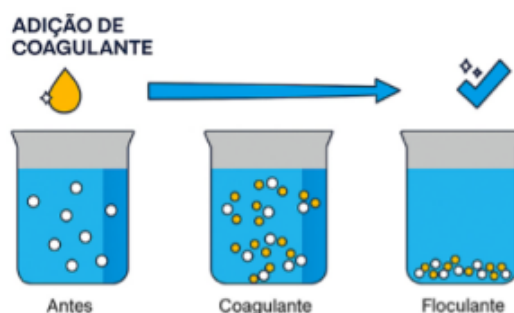
Figura 9 – *Escoamento da água durante o processo de filtração no filtro de areia.*



Fonte:(Mesquita *et al.*, 2014).

Em relação aos tratamentos químicos de coagulação e floculação, conforme ilustrado na Figura 10. A coagulação provoca a desestabilização de colóides e outras partículas, permitindo que elas se aproximem e se agrupem. Um dos coagulantes mais amplamente utilizados é o sulfato de alumínio, cuja fórmula química é $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14-18\text{H}_2\text{O}$. Em seguida, ocorre a floculação, que é o processo que aumenta a frequência de colisões entre as partículas desestabilizadas, resultando na formação de aglomerados maiores. Esses aglomerados são então removidos por meio de sedimentação, flotação ou filtração (Pessoa, Feitosa e Pereira, 2023).

Figura 10 – *Tratamento químico por coagulação e floculação.*

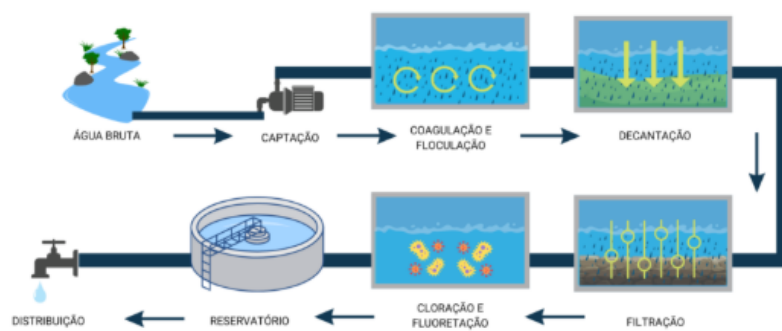


Fonte:(VALLAIR, 2025).

Quando há a necessidade de obter água potável, o tratamento deve incluir etapas além da coagulação e floculação, conforme ilustrado na Figura 11. Após a

floculação, ocorre a decantação, onde os flocos se depositam no fundo do tanque, eliminando uma grande quantidade de impurezas. Em seguida, realiza-se a filtração, que passa a água por camadas de areia, carvão ativado e outros materiais, removendo partículas menores e microrganismos. Contudo, nesta fase, nem todos os microrganismos são eliminados de forma eficaz. Por isso, é fundamental realizar a desinfecção, que envolve a adição de cloro ou outro desinfetante para eliminar bactérias e outros patógenos. Depois disso, realiza-se a fluoretação, que consiste na adição de flúor para prevenir cáries dentárias na população. Por último, faz-se o ajuste do pH, utilizando cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou soda cáustica (NaOH), com o objetivo de evitar a corrosão das tubulações (MICROAMBIENTAL, 2026).

Figura 11 – Tratamento químico por coagulação e floculação.



Fonte:(MICROAMBIENTAL, 2026).

Apesar da ampla variedade de métodos disponíveis, muitas dessas tecnologias convencionais apresentam limitações na remoção de poluentes específicos, como tensoativos e corantes. Em especial, a coloração residual e a DQO elevada são difíceis de serem reduzidas apenas por métodos físicos ou biológicos (Monteiro *et al.*, 2023; Caetano *et al.*, 2022).

Nesse sentido, o uso de tecnologias avançadas, como a adsorção e os Processos Oxidativos Avançados (POAs), tem se mostrado promissor. A adsorção permite a remoção de compostos dissolvidos por meio de materiais porosos, como carvões ativados, zeólitas, argilas e hidróxidos duplos lamelares (HDLs), sendo eficiente para tensoativos e corantes. Os POAs utilizam radicais hidroxila para oxidar e mineralizar compostos orgânicos, sendo eficazes na redução de DQO (Sá, Nunes e Borges, 2016; Tomaso *et al.*, 2024).

A escolha do tratamento ideal depende das características da água cinza gerada, dos objetivos de reúso e da viabilidade técnica e econômica. Em sistemas descentralizados e de pequeno porte, a combinação de processos simples com etapas de polimento avançado pode garantir a eficiência necessária para aplicações não potáveis.

3.5 Adsorção aplicada a efluentes domésticos

A adsorção é um dos métodos mais utilizados no tratamento de efluentes líquidos devido à sua simplicidade operacional, baixo custo relativo e elevada eficiência na remoção de compostos orgânicos e inorgânicos. No contexto dos efluentes domésticos, a adsorção tem se mostrado eficiente na remoção de corantes, tensoativos, metais pesados e matéria orgânica dissolvida (Monteiro *et al.*, 2023; Sá, Nunes e Borges, 2016).

O processo de adsorção baseia-se na interação entre o adsorvato (solute a ser removido) e a superfície do adsorvente. Essas interações podem ser de natureza física (forças de van der Waals e ligações de hidrogênio) ou química (ligações covalentes e iônicas), dependendo do material e do contaminante envolvido (Tomaso *et al.*, 2024).

Dentre os fatores que influenciam a eficiência do processo de adsorção, destacam-se: o pH da solução, o tempo de contato, a concentração do contaminante, a granulometria e a dosagem do adsorvente. Cada um desses parâmetros pode interferir diretamente na capacidade de adsorção, tornando essencial sua otimização em aplicações práticas (Sá, Nunes e Borges, 2016; Vargas *et al.*, 2024).

Os materiais utilizados para adsorção podem ser divididos em duas categorias: os convencionais, que incluem carvão ativado e zeólitas, e os alternativos, compostos por resíduos agroindustriais e argilas modificadas. O carvão ativado, em particular, destaca-se como um eficiente adsorvente na eliminação de contaminantes, pois possui uma elevada capacidade de adsorção, facilitando a remoção de poluentes das águas cinzas (Raasch *et al.*, 2024).

3.5.1 Hidróxidos duplos lamelares (HDLs)

Os Hidróxidos duplos lamelares (HDLs), também conhecidos como argilas aniônicas ou compostos tipo hidrotalcita, são materiais com estrutura lamelar caracterizada pela presença de camadas de hidróxidos metálicos divalentes e trivalentes, entre as quais se encontram ânions intercalares e moléculas de água (Altalhi, Mohamed e Negm, 2024).

A fórmula geral dos HDLs é representada por $[M_{1-x}^{2+} M_x^{3+} (OH)_2]^{x+} (A^{n-})^{x/n} \cdot zH_2O$, onde M^{2+} e M^{3+} são cátions metálicos divalentes (como Mg^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+}) e trivalentes (como Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}), A^{n-} é o ânion intercalado, e z representa o número de moléculas de água associadas à estrutura (Tomaso *et al.*, 2024).

As propriedades estruturais dos HDLs conferem a esses materiais uma elevada área superficial, alta capacidade de troca aniônica e estabilidade térmica moderada. Tais características tornam os HDLs adequados para aplicações ambientais,

especialmente no tratamento de águas contaminadas com ânions orgânicos e inorgânicos (Sá, Nunes e Borges, 2016).

O mecanismo de adsorção dos HDLs ocorre predominantemente por troca aniônica entre os ânions presentes na água e os ânions intercalados nas lamelas do material. Também podem ocorrer interações físico-químicas adicionais, como ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas (Tomaso *et al.*, 2024).

Além da aplicação na adsorção de contaminantes em efluentes domésticos e industriais, os HDLs têm sido explorados em processos catalíticos, remediação ambiental, liberação controlada de fármacos e como precursores de óxidos mistos para usos diversos (Vargas *et al.*, 2024).

3.5.2 A hidrocalumita como adsorvente

A hidrocalumita, também conhecida como CaAl-LDH (hidróxido duplo lamelar de cálcio e alumínio), é um tipo específico de HDL com ampla aplicabilidade na adsorção de poluentes devido à sua elevada capacidade de troca aniônica e estrutura lamelar estável (Sá, Nunes e Borges, 2016).

Esse material é geralmente sintetizado pela técnica de coprecipitação, envolvendo sais de cálcio e alumínio, ajustando-se o pH da solução para favorecer a formação da estrutura lamelar. A fórmula idealizada da hidrocalumita é $[\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6]^+ (\text{A}^{n-}) \cdot z\text{H}_2\text{O}$, sendo o ânion A^{n-} comumente o nitrato, carbonato ou outro ânion intercambiável (Sá, Nunes e Borges, 2016).

Dentre suas características físico-químicas, destacam-se: alta área superficial, porosidade moderada, presença de sítios básicos na superfície e capacidade de regeneração após processos de adsorção (Sá, Nunes e Borges, 2016; Tomaso *et al.*, 2024). Essas propriedades a tornam especialmente adequada para a remoção de ânions orgânicos e inorgânicos, corantes aniônicos e alguns tensoativos presentes em águas residuais.

Estudos recentes demonstram a eficiência da hidrocalumita na remoção de contaminantes de efluentes domésticos e industriais, inclusive em sistemas de batelada e de fluxo contínuo. Além disso, sua síntese simples e baixo custo de produção favorecem sua utilização em contextos descentralizados ou de baixa renda (Sá, Nunes e Borges, 2016; Vargas *et al.*, 2024). Comparada a outros adsorventes convencionais, como carvão ativado ou zeólitas, a hidrocalumita apresenta vantagens como seletividade aniônica, menor custo e possibilidade de regeneração com manutenção de desempenho. Por esses motivos, foi escolhida neste estudo como material adsorvente para o tratamento de águas cinzas.

3.5.3 Carvão ativado

O carvão ativado (CA) é um material adsorvente de carbono caracterizado por uma estrutura altamente porosa e por uma área de superfície interna extremamente elevada, sendo amplamente utilizado em processos de tratamento de água e efluentes (United States Environmental Protection Agency, 2023; Rodrigues e Iemma, 2014).

Industrialmente, o carvão ativado é produzido a partir de materiais precursores ricos em carbono, como carvão mineral, turfa, madeira e cascas de coco. O processo de obtenção geralmente envolve duas etapas principais: carbonização do precursor e posterior ativação do material. A ativação pode ocorrer por vias físicas, utilizando vapor d'água ou dióxido de carbono em altas temperaturas, ou por vias químicas, mediante impregnação do precursor com agentes ativadores como ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de potássio (KOH) ou cloreto de zinco (ZnCl_2), seguida de aquecimento controlado (United States Environmental Protection Agency, 2023; Rodrigues e Iemma, 2014).

Esses processos promovem a formação e o desenvolvimento de uma extensa rede de poros internos, resultando em um material predominantemente microporoso. Em processos de ativação química, por exemplo, é comum utilizar uma razão aproximada de 1:1 (massa/massa) entre o agente ativador e o precursor, com aquecimento em torno de 500°C , o que favorece a formação de carvões ativados com elevada área superficial e estrutura porosa bem desenvolvida (Rodrigues e Iemma, 2014).

Do ponto de vista físico-químico, o carvão ativado apresenta área superficial específica tipicamente na ordem de centenas a milhares de metros quadrados por grama, característica que lhe confere elevada capacidade de adsorção (United States Environmental Protection Agency, 2023). Sua porosidade é composta predominantemente por microporos (diâmetro inferior a aproximadamente 2nm) e mesoporos (até algumas dezenas de nanômetros), os quais são responsáveis pela adsorção de moléculas de diferentes tamanhos presentes em soluções aquosas (Coldeira, García-Matamoros *et al.*, 2024).

Estruturalmente, o material é constituído majoritariamente por carbono organizado de forma semelhante à grafita, porém com elevado grau de defeitos estruturais. Além disso, a superfície do carvão ativado apresenta diversos grupos funcionais oxigenados, tais como hidroxilas, carbonilas e carboxilas, que conferem caráter levemente ácido ao material e possibilitam interações químicas fracas com espécies polares presentes na solução. Outro aspecto relevante é a possibilidade de regeneração do carvão ativado após a saturação, por meio de tratamentos térmicos ou químicos capazes de remover as espécies adsorvidas e restaurar parcialmente sua

capacidade adsorvente (United States Environmental Protection Agency, 2023).

No tratamento de efluentes, o carvão ativado é amplamente empregado na remoção de compostos orgânicos, corantes e outros contaminantes dissolvidos. Em particular, destaca-se como um dos adsorventes mais utilizados na remoção de cor em efluentes industriais, especialmente aqueles provenientes da indústria têxtil (Coldeira, García-Matamoros *et al.*, 2024; Gupta *et al.*, 2024). Estudos recentes relatam capacidades de adsorção bastante elevadas para diferentes tipos de corantes. Por exemplo, carvões ativados obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos apresentaram capacidade máxima de adsorção de aproximadamente 769 mg g^{-1} para azul de metileno e cerca de 458 mg g^{-1} para o corante Congo Red, demonstrando elevada eficiência tanto para corantes catiônicos quanto aniônicos (Li *et al.*, 2021).

Além da remoção de corantes, o carvão ativado também apresenta desempenho significativo na remoção de poluentes presentes em águas cinzas. Estudos comparativos indicam que sistemas de tratamento utilizando carvão ativado são capazes de reduzir de forma eficiente a demanda química de oxigênio (DQO) e remover surfactantes aniônicos presentes nesse tipo de efluente doméstico (Gomes *et al.*, 2024).

Outras investigações demonstram que o carvão ativado pode ser aplicado também na remoção de espécies inorgânicas dissolvidas. Por exemplo, carvão ativado produzido a partir de palha de arroz apresentou eficiência significativa na adsorção de nitratos e nitritos em águas residuárias, evidenciando seu potencial como adsorvente de baixo custo para a remoção de ânions simples em soluções aquosas (Thakur e Kumar, 2024; Coldeira, García-Matamoros *et al.*, 2024).

De modo geral, o carvão ativado destaca-se por sua elevada área superficial, grande diversidade de poros e ampla aplicabilidade na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos (United States Environmental Protection Agency, 2023). Entretanto, diferentemente de materiais como zeólitas ou hidróxidos duplos lamelares (HDL), o carvão ativado não apresenta mecanismo intrínseco de troca aniônica, atuando predominantemente por processos de adsorção físico-química. Além disso, apesar da possibilidade de regeneração do material, seu custo de produção pode ser relativamente elevado, o que pode limitar sua aplicação em larga escala em determinados sistemas de tratamento (Cordeiro, Santos e Lima, 2011).

3.6 Processos Oxidativos Avançados (POAs)

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) constituem um conjunto de tecnologias aplicadas ao tratamento de águas e efluentes que visam à completa

degradação de compostos orgânicos por meio da geração de espécies altamente reativas, principalmente os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) (Tomaso *et al.*, 2024).

Esses radicais são agentes oxidantes extremamente potentes, capazes de atacar e oxidar diversas classes de contaminantes orgânicos, incluindo corantes, pesticidas, fármacos e surfactantes. Os POAs são especialmente indicados para a degradação de poluentes refratários que não são eficientemente removidos por métodos convencionais (Tomaso *et al.*, 2024).

Entre os principais tipos de POAs destacam-se os homogêneos, como os processos UV/ H_2O_2 e Fenton, e os heterogêneos, como a fotocatalise com TiO_2 . Os processos homogêneos envolvem reagentes solúveis, enquanto os heterogêneos utilizam catalisadores sólidos em suspensão ou imobilizados (Moraes *et al.*, 2020).

A aplicação dos POAs em águas cinzas é vantajosa devido à sua capacidade de remover cor, reduzir a DQO e eliminar compostos biologicamente ativos. No entanto, esses processos também apresentam limitações, como a necessidade de controle de pH, custo dos reagentes e energia, além da formação de subprodutos que devem ser monitorados (Busico, 2019).

Dentre os diversos processos, o sistema UV/ H_2O_2 destaca-se por sua eficiência na geração de radicais hidroxila por fotólise do peróxido de hidrogênio, sendo uma opção viável para o tratamento avançado de águas cinzas com baixo teor de sólidos (Moraes *et al.*, 2020).

3.6.1 Fotodegradação com H_2O_2

A fotodegradação com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) sob radiação ultravioleta (UV) é uma das formas mais estudadas entre os Processos Oxidativos Avançados (POAs) para o tratamento de efluentes. Nesse processo, o H_2O_2 é ativado pela radiação UV, promovendo a geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), altamente reativos e não seletivos, capazes de mineralizar compostos orgânicos recalcitrantes.

A reação principal envolvida pode ser representada por:



Esses radicais atacam contaminantes por mecanismos de abstração de hidrogênio, adição eletrofílica e oxidação direta, convertendo substâncias complexas em CO_2 , H_2O e sais inorgânicos (Moraes *et al.*, 2020).

Diversos fatores influenciam a eficiência do processo, entre eles o pH da solução, a concentração de H_2O_2 , a intensidade e o comprimento de onda da radiação UV, bem como o tempo de irradiação. Valores de pH ligeiramente ácidos (entre 3 e 6) favorecem a decomposição do H_2O_2 em radicais livres (Busico, 2019).

A concentração ideal de H_2O_2 é crucial: concentrações insuficientes reduzem a geração de radicais, enquanto concentrações excessivas podem promover reações secundárias, como a recombinação de radicais ou o consumo dos próprios radicais hidroxila. Assim, é necessário um ajuste cuidadoso da dosagem para otimizar o processo (Morais *et al.*, 2020).

A aplicação da fotodegradação com H_2O_2 tem se mostrado promissora no tratamento de águas cinzas, principalmente para a remoção de corantes e compostos orgânicos não biodegradáveis. Trata-se de uma tecnologia limpa e eficiente, que não gera resíduos tóxicos adicionais quando bem controlada (Busico, 2019; Moraes *et al.*, 2020).

Materiais e Métodos

4.1 Síntese do Hidróxido Duplo Lamelar (HDL)

A hidrocalumita (HDL) foi sintetizada por coprecipitação a pH variável, conforme metodologia descrita por De Sá et al.(2013). Foram utilizados nitrato de cálcio tetrahidratado ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Neon[®], 99,0–103,0%, massa molar $236,15 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) e nitrato de alumínio nonahidratado ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Neon[®], 98,17%, massa molar $375,13 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Primeiramente foi preparado uma solução contendo 0,1 mol de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ e 0,05 mol de $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ em 70 mL de água destilada, denominada de solução A. Posteriormente foi preparado 150 mL de uma outra solução de NaOH ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), a qual foi denominada solução B.

Sob agitação magnética leve, a solução B foi transferida para um béquer e, em seguida, a solução A foi adicionada lentamente, conforme ilustrado na Figura 12. Esse procedimento promoveu a formação de um precipitado coloidal branco (Figura 13), que foi seco em estufa a 85°C por 18h. Posteriormente, o sólido foi lavado com água destilada até atingir pH neutro, por meio de filtração a vácuo utilizando papel-filtro faixa azul (Unifil[®]). Em seguida, o material foi novamente seco em estufa a 35°C por 24h (Figura 14) e macerado em almofariz, obtendo-se o HDL do tipo hidrocalumita.

Figura 12 – *Sistema experimental para síntese com adição de reagentes sob agitação magnética.*



Fonte: Própria

Figura 13 – *Precipitado coloidal branco.*

Fonte: Própria

Figura 14 – *Hidrocalumita*

Fonte: Própria

4.2 Caracterização do HDL

A caracterização físico-química do HDL foi realizada por difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica (TG/DTA).

4.2.1 Difração de raios X (DRX)

As análises de difração de raios X (DRX) foram realizadas em difratômetro Bruker D8 Discover, equipado com tubo de raios de ânodo de cobre e monocromador Johansson para seleção da radiação $\text{Cu K}\alpha_1$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). O equipamento operou com tensão de 40 kV e corrente de 40 mA. As medidas foram realizadas na geometria Bragg–Brentano ($\theta - 2\theta$), utilizando detector unidimensional LynxEye®.

Os difratogramas foram obtidos no intervalo de 2° a 80° (2θ), com passo angular de $0,01^\circ$, mantendo-se as amostras sob rotação contínua de 15 rpm durante a aquisição dos dados. Para cada amostra, o difratograma final correspondeu à média de seis varreduras consecutivas, visando melhorar a qualidade estatística dos dados e a relação sinal/ruído.

4.2.2 Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

Os espectros de infravermelho foram obtidos por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando um espectrômetro Bruker Vertex 70 equipado com acessório de reflectância total atenuada (ATR) PLATINUM ATR UNIT A225. As amostras foram analisadas diretamente sobre cristal de diamante (2×2 mm), operando no modo de reflexão simples com ângulo de interação de 45° . Os espectros foram registrados na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 64 varreduras por espectro.

4.2.3 Análise térmica (TG/DTA)

As análises térmicas simultâneas (TG/DTA) foram realizadas em um analisador termogravimétrico Shimadzu DTG-60H. As amostras foram aquecidas de 20 a 1000°C sob taxa de aquecimento de 10°Cmin^{-1} , utilizando cadinho de platina com capacidade de $70\mu\text{L}$. As medidas foram conduzidas sob atmosfera controlada, empregando fluxos de oxigênio e nitrogênio de $100\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ cada. As curvas termogravimétricas (TG) e de análise térmica diferencial (DTA) foram utilizadas para avaliar a estabilidade térmica do material, bem como identificar os eventos de desidratação, desidroxilação e decomposição estrutural característicos da hidrocalumita.

4.3 Carvão Ativado

Como adsorvente comparativo foi utilizado carvão ativado em pó (Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda., Brasil; CAS 7440-44-0), empregado conforme fornecido pelo fabricante, sem lavagem prévia.

De acordo com a especificação técnica do fabricante, o material apresenta:

- pH entre 5,0 e 7,0 (solução 5% a 25°C);
- teor de cinzas totais $\leq 10\%$;
- perda por secagem a $120^\circ\text{C} \leq 15\%$;
- granulometria predominante inferior a 325 mesh (50–80%).

Os teores máximos de cloreto ($\leq 0,10\%$) e sulfato ($\leq 0,01\%$) indicam baixo potencial de interferência inorgânica nas análises espectrofotométricas.

4.4 Amostras de Água Cinza

As amostras de águas cinzas foram coletadas no Centro Municipal de Educação Infantil Hortência Moreira de Paula (Vó Fia), provenientes do efluente de máquina de lavar roupas com capacidade de 15 kg.

4.5 Ensaios de Adsorção

Os ensaios de adsorção foram conduzidos utilizando 20 mL de água cinza e diferentes massas de adsorvente (0–200 mg).

O tempo de contato foi fixado em 60 min, considerado suficiente para estabilização da resposta espectral nas maiores dosagens avaliadas.

A mistura foi realizada por agitação em sistema de tombamento, utilizando agitador mecânico Gehaka AM-20 a 100 rpm, assegurando homogeneização da suspensão e minimização de resistências externas à transferência de massa.

Após o período de contato, as amostras foram filtradas em papel filtro qualitativo antes da análise espectrofotométrica.

4.6 Sistema Fotoreator

O fotoreator (Figura 15) foi projetado em escala laboratorial para os experimentos de fotodegradação desenvolvidos pelo Grupo de Estudos em Energias Renováveis e Ambiente (GEERA).

O sistema consiste em um reator metálico cilíndrico equipado com lâmpada de vapor de mercúrio de 125 W (Osram, soquete E-27), instalada lateralmente. O sistema é alocado em uma caixa de madeira ($60 \times 60 \times 60$ cm), com agitador magnético posicionado na base para homogeneização da solução.

Durante os experimentos, 200 mL do efluente foram adicionados a uma célula parabólica de vidro posicionada no interior do reator. A homogeneização da solução foi realizada por meio de agitador magnético.

A lâmpada apresenta tempo de estabilização luminoso de aproximadamente 1 a 2 minutos, período necessário para que a emissão de radiação ultravioleta atinja regime estacionário, predominantemente em 254 nm.

4.7 Ensaios de Processos Oxidativos

Os experimentos de oxidação foram conduzidos utilizando radiação ultravioleta (UV), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o sistema combinado UV/ H_2O_2 , com o objetivo de avaliar a transformação da matéria orgânica dissolvida presente na água cinza.

Os ensaios foram realizados no fotoreator descrito na Seção 4.6. Em cada experimento foram utilizados 200 mL de água cinza, adicionados a uma célula cilíndrica de vidro posicionada no interior do reator. A solução permaneceu sob agitação magnética contínua, garantindo homogeneização do sistema durante todo o período de reação.

A lâmpada de vapor de mercúrio de 125 W foi previamente estabilizada por aproximadamente 1 a 2 minutos, até atingir regime estacionário de emissão luminosa.

Foram avaliadas três condições experimentais.

4.7.1 Radiação UV isolada

Nos experimentos de radiação UV isolada, o efluente foi submetido exclusivamente à irradiação ultravioleta, sem adição de agentes oxidantes. O objetivo desses ensaios foi avaliar o efeito da fotólise direta sobre a matéria orgânica dissolvida presente na água cinza.

4.7.2 Oxidação por H_2O_2 isolado

Nos experimentos utilizando peróxido de hidrogênio isolado, diferentes volumes de solução de H_2O_2 a 30% foram adicionados ao efluente, sem aplicação de radiação UV. Essa condição permitiu avaliar a reatividade do oxidante em ausência de ativação fotoquímica.

4.7.3 Sistema UV/ H_2O_2

Nos experimentos combinados UV/ H_2O_2 , o peróxido de hidrogênio foi adicionado ao efluente e a solução foi submetida simultaneamente à irradiação UV. Nessa condição, ocorre a fotólise do H_2O_2 , com geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas capazes de promover a oxidação não seletiva de compostos orgânicos.

Foram avaliadas duas condições de dosagem do oxidante, correspondentes à adição de 1 mL e 10 mL de H_2O_2 (30%) em 200 mL de efluente, permitindo analisar o efeito da concentração de oxidante sobre o comportamento espectral da solução.

Figura 15 – *Fotoreator: equipamento empregado nos testes de fotodegradação utilizando radiação UV.*



Fonte: Própria.

Durante os experimentos, alíquotas foram coletadas em intervalos de tempo previamente definidos para posterior análise espectrofotométrica.

4.8 Monitoramento Espectrofotométrico

As análises espectrofotométricas foram realizadas em espectrofotômetro Bel UV-M51, operando na faixa de 190 a 800 nm.

A espectrofotometria UV/Vis é amplamente utilizada como ferramenta rápida e operacional para monitorar, de forma indireta, frações da matéria orgânica dissolvida (MOD) em águas naturais e residuárias, explorando a absorção na região UV, tipicamente entre 190 e 400 nm, onde diversos compostos orgânicos (em especial cromóforos com sistemas conjugados e estruturas aromáticas) apresentam absorção relevante (Correa *et al.*, 2020; Korak e McKay, 2024).

A matéria orgânica dissolvida foi monitorada principalmente no comprimento de onda de 254 nm, amplamente utilizado como indicador da fração aromática da matéria orgânica dissolvida.

No contexto de qualidade de água, o sinal em torno de 254 nm (frequentemente reportado como UV254) é um dos indicadores mais empregados para MOD, com forte associação a frações aromáticas/cromóforas e ampla aplicação como parâmetro operacional em estudos de águas naturais e tratamento (Korak e McKay, 2024; Weishaar *et al.*, 2003). Como refinamento, a SUVA 254 (absorbância em 254 nm normalizada pela concentração de carbono orgânico dissolvido, COD) tem sido usada como aproximação de aromaticidade do COD, apresentando correlação com percentuais de aromaticidade determinados por técnicas estruturais (como ^{13}C NMR) em extratos/isolados de matéria orgânica (Weishaar *et al.*, 2003).

4.9 Cálculo da Eficiência de Remoção

A eficiência de remoção foi calculada a partir da variação da absorbância utilizando a expressão:

$$\text{Eficiência (\%)} = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad (4-1)$$

onde:

A_0 = absorbância inicial

A_t = absorbância após o tratamento

Quando necessário, a capacidade de adsorção foi estimada pela expressão:

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (4-2)$$

onde:

q = capacidade de adsorção ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

C_0 = concentração inicial ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

C_e = concentração no equilíbrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

V = volume da solução (L)

m = massa de adsorvente (g)

4.10 Ajustes Metodológicos Após a Qualificação

Durante a etapa de qualificação do presente trabalho, foi proposto inicialmente um delineamento experimental baseado em planejamento fatorial 2^3 , envolvendo as variáveis massa de adsorvente, volume de H_2O_2 e presença ou ausência de radiação UV. Entretanto, após a qualificação, algumas limitações experimentais levaram à necessidade de ajustes na condução da pesquisa.

Inicialmente, houve restrição na disponibilidade de reagentes para a síntese de novas quantidades do hidróxido duplo lamelar do tipo hidrocalumita (HDL). Como a quantidade de material previamente sintetizada era limitada, tornou-se inviável a execução completa do planejamento experimental originalmente proposto, que demandaria maior número de ensaios e replicações. Diante dessa limitação, optou-se por reorganizar os experimentos de forma exploratória, priorizando a avaliação comparativa do desempenho do HDL nas condições viáveis de teste.

Posteriormente, visando ampliar a análise comparativa entre materiais adsorventes, decidiu-se incorporar ao estudo o uso de carvão ativado em pó como material de referência amplamente utilizado em processos de tratamento de água e efluentes. Essa inclusão permitiu avaliar o desempenho relativo da hidrocalumita em relação a um adsorvente consolidado na literatura, contribuindo para fortalecer a discussão comparativa proposta no objetivo geral do trabalho.

Durante o desenvolvimento experimental, foi também possível recuperar uma quantidade adicional de hidrocalumita previamente sintetizada, o que permitiu realizar os ensaios de adsorção apresentados neste trabalho. Dessa forma, ainda que o planejamento fatorial inicialmente proposto não tenha sido executado integralmente, foi possível conduzir experimentos suficientes para avaliar o comportamento do material adsorvente e compará-lo com outras abordagens de tratamento.

Outro ajuste metodológico relevante refere-se à não inclusão dos resultados de Demanda Química de Oxigênio (DQO) na análise final dos dados. Embora tenham sido adquiridos kits comerciais para determinação de DQO, verificaram-se inconsistências nas leituras obtidas. Essas discrepâncias foram atribuídas principalmente à incompatibilidade entre as cubetas específicas dos kits comerciais utilizados e o espectrofotômetro disponível no laboratório, que não foi originalmente projetado para esse sistema de leitura.

Diante dessas limitações instrumentais, optou-se por não utilizar os resultados de DQO na análise comparativa apresentada neste trabalho, evitando a interpretação de dados potencialmente comprometidos. Assim, a avaliação da eficiência dos tratamentos foi conduzida predominantemente por meio de análises espectroscópicas UV-Vis, método amplamente empregado na literatura como indicador indireto

da presença e transformação da matéria orgânica dissolvida em matrizes aquosas.

Esses ajustes metodológicos não comprometem os objetivos centrais da pesquisa, uma vez que o estudo manteve seu foco na análise comparativa entre processos de adsorção e processos oxidativos aplicados ao tratamento de águas cinzas. Ao contrário, as adaptações realizadas permitiram explorar de forma mais consistente o desempenho relativo das tecnologias avaliadas dentro das condições experimentais disponíveis.

Resultados

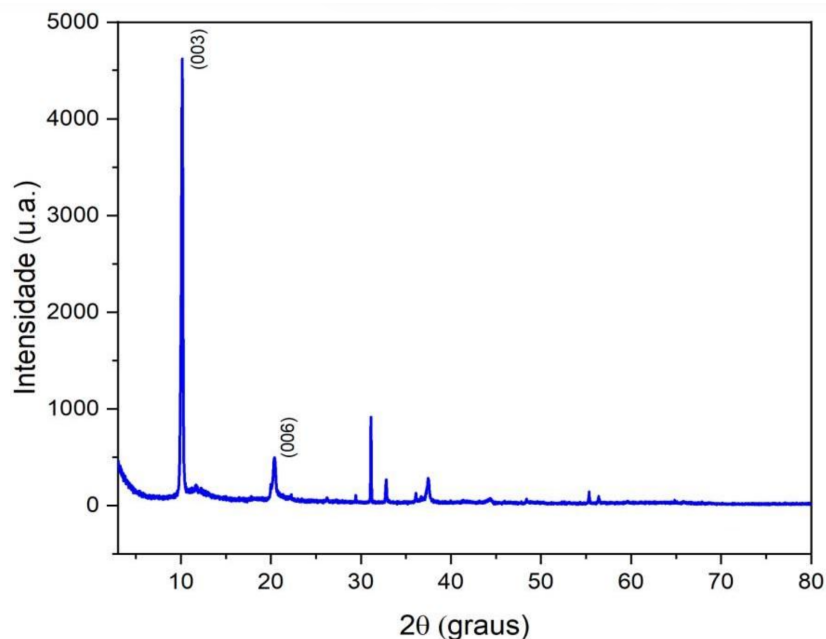
5.1 Caracterização do HDL

A caracterização do adsorvente — hidrocalumita (HDL) — foi conduzida por meio de difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica simultânea (TG/DTA). Esses ensaios permitiram confirmar a formação da estrutura lamelar característica dos hidróxidos duplos (HDL), bem como identificar grupos funcionais e avaliar a estabilidade térmica do material, aspectos essenciais para discutir sua aplicabilidade como adsorvente.

5.1.1 Difração de raios X

A difração de raios X permitiu identificar picos característicos do politipo 3R da hidrocalumita, com destaque para as reflexões basais (003) e (006), Figura 16. O primeiro pico foi observado em $2\theta = 10,15^\circ$, correspondendo a um espaçamento interplanar de $d_{003} = 0,870$ nm. A partir desse valor, foi possível estimar o parâmetro de cela unitária $c = 3 \cdot d_{003} = 2,610$ nm. O segundo pico ocorreu em $2\theta = 20,42^\circ$, associado à reflexão (006), com $d_{006} = 0,435$ nm e valor de $c = 6 \cdot d_{006} = 2,607$ nm. A concordância entre os valores de c obtidos por diferentes reflexões (diferença relativa inferior a 0,1%) confirma a boa regularidade da estrutura e a presença do politipo 3R, em que as camadas se repetem a cada três empilhamentos.

Essa ordenação basal evidencia a intercalação de ânions e moléculas de água no espaço interlamelar, garantindo estabilidade estrutural e propriedades de troca aniônica. Conforme relatado em estudos anteriores, o espaçamento basal próximo a 0,87 nm é típico de hidrocalumitas com ânions nitrato ou carbonato intercalados (Sá, Cunha e Nunes, 2013). Além disso, trabalhos recentes reforçam a importância da determinação precisa dos parâmetros de rede para avaliar modificações estruturais decorrentes da síntese ou do processo de adsorção (Almeida, 2018; Freitas *et al.*, 2017).

Figura 16 – Difrátograma da hidrocalumita.

Fonte: Própria.

A análise comparativa dos picos (003) e (006) mostra que o material sintetizado apresenta boa cristalinidade, condição fundamental para garantir desempenho reproduzível em processos de adsorção. O parâmetro de cela unitária obtido ($c \approx 2,61$ nm) encontra-se em conformidade com valores reportados na literatura para hidrocalumitas sintéticas de composição CaAl-LDH (Costa *et al.*, 2022; Tomaso *et al.*, 2024), reforçando a consistência dos resultados experimentais obtidos.

5.1.2 Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

O espectro de FTIR da hidrocalumita evidencia características típicas de hidroxilas estruturais, moléculas de água interlamelar e ânions nitrato intercalados, confirmando a estrutura tipo HDL, Figura 17. A banda em 3663 cm^{-1} é atribuída às hidroxilas das camadas metálicas, enquanto a banda larga em 3466 cm^{-1} corresponde ao estiramento O-H das moléculas de água interlamelar, comum em hidróxidos duplos laminados (Shao *et al.*, 2025; Radji *et al.*, 2025). A banda em 1649 cm^{-1} relaciona-se à deformação angular da água adsorvida, revelando a presença significativa da fase aquosa intercalada (Sá, Cunha e Nunes, 2013; Shao *et al.*, 2025).

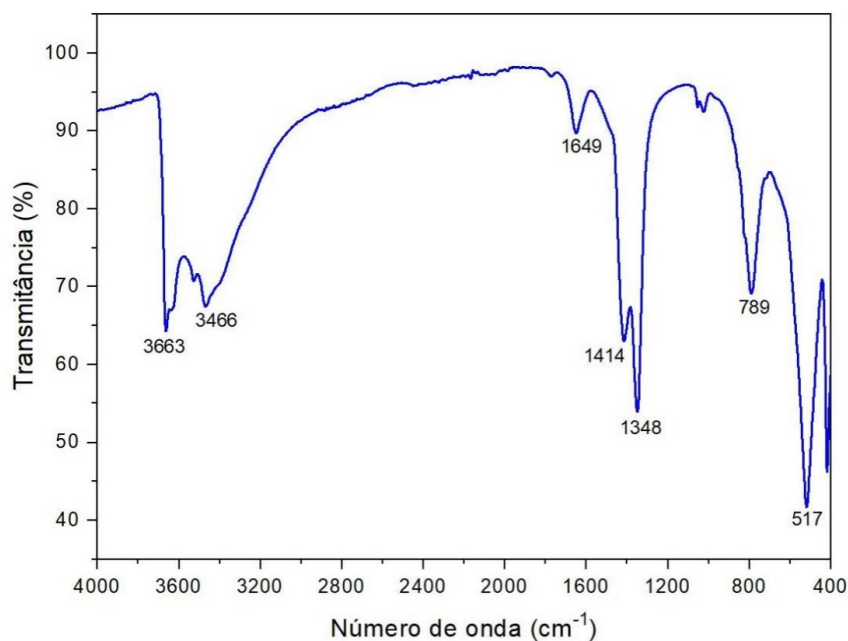
As bandas em 1414 e 1348 cm^{-1} confirmam a presença do ânion nitrato na galeria interlamelar, atribuídas às vibrações de estiramento do NO_3^- , posição que está alinhada com dados de HDLs sintetizados em meio nitrato (Radji *et al.*,

2025; Sá, Cunha e Nunes, 2013). Outras vibrações entre 1030 e 800 cm^{-1} indicam distorções características do nitrato intercalado (Shao *et al.*, 2025).

As bandas em 789 e 517 cm^{-1} correspondem às vibrações da rede metal-oxigênio, próprias das ligações Al–O e Ca–O presentes no arranjo octaédrico da lamela metálica, o que indica estabilidade estrutural do material (Sá, Cunha e Nunes, 2013; Radji *et al.*, 2025).

A coexistência das hidroxilas, água interlamelar e ânions nitrato, evidenciada pelas bandas destacadas, sugere o potencial do HDL para processos de troca iônica e adsorção de poluentes orgânicos aniônicos, como corantes, por meio de interação eletrostática e intercalação (Shao *et al.*, 2025; Radji *et al.*, 2025; Sá, Cunha e Nunes, 2013).

Figura 17 – Espectro de FTIR para a hidrocalumita (HDL).

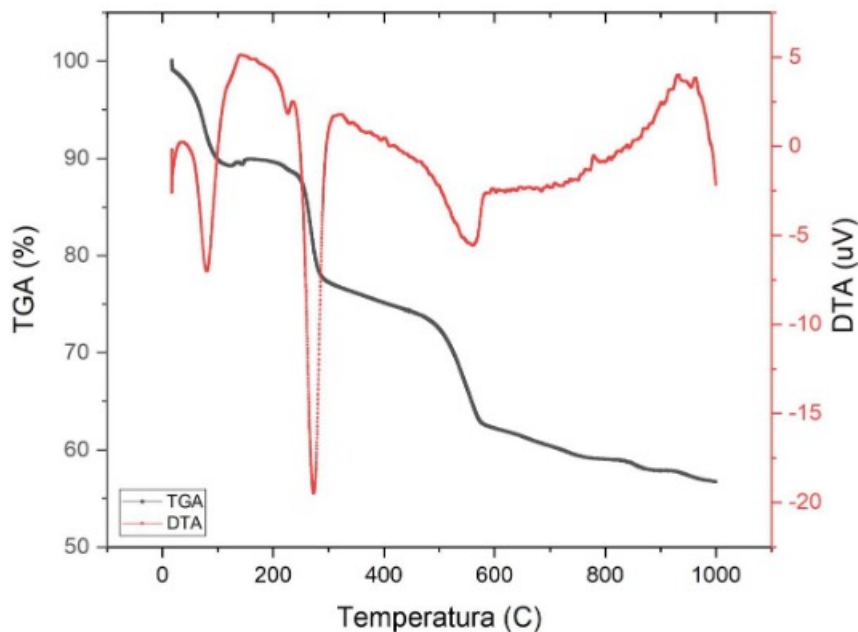


Fonte: Própria.

5.1.3 Análise térmica (TG/DTA)

A análise térmica evidencia três etapas principais de perda de massa no HDL avaliado (Figura 18). A primeira, entre 30 – 150 °C , corresponde a aproximadamente $8,9\%$, atribuída à eliminação de água adsorvida na superfície do material. Esse comportamento é típico dos HDLs, uma vez que a presença de moléculas de água associadas aos poros e à superfície externa tende a ser removida em baixas temperaturas, como já observado em materiais lamelares análogos sintetizados e aplicados para adsorção de corantes (Sá, Nunes e Borges, 2016).

Figura 18 – Curvas de TG e DTA para a hidrocalumita (HDL).



Fonte: Própria.

A segunda etapa, entre 200–350 °C, representa cerca de 13,7% da perda, associada à desidratação interlamelar e início da desidroxilação. Nesta faixa, observa-se no DTA um evento endotérmico pronunciado em ~ 273 °C, compatível com a liberação de água interestrutural e reordenação lamelar. Estudos anteriores confirmam que o HDL apresenta estabilidade até aproximadamente 250 °C, limite superior às condições usuais de operação em processos de adsorção em meio aquoso (Radji *et al.*, 2025).

A terceira etapa, entre 400–550 °C, responde por $\sim 8,9\%$ adicionais, relacionada à decomposição progressiva da matriz lamelar e à liberação de ânions intercalados. O sinal endotérmico observado nessa faixa é menos intenso, evidenciando uma desestruturação gradual. Esse comportamento corrobora a literatura, na qual se descreve o colapso da estrutura típica dos HDLs nesse intervalo, levando à formação de óxidos mistos termicamente estáveis (Shao *et al.*, 2025).

Acima de 550 °C, ocorre uma perda lenta e contínua ($\sim 9,8\%$), que se estende até 1000 °C, totalizando cerca de 42,5% de perda de massa e resultando em um resíduo inorgânico final de $\sim 57,6\%$. Esse resíduo está associado à formação de fases óxidas estáveis, como já reportado em investigações recentes sobre HDLs aplicados em catálise e processos oxidativos (Shao *et al.*, 2025).

Comparando-se com estudos de outros adsorventes, como carvões ativados modificados de origem vegetal, nota-se que os HDLs apresentam um perfil de estabilidade distinto, marcado pela presença clara das etapas de desidratação e

liberação de ânions intercalados, o que reforça sua versatilidade em aplicações ambientais (Yusop *et al.*, 2025).

Em síntese, os resultados confirmam que o HDL estudado mantém estabilidade térmica até ~ 250 °C, comportamento consistente com os achados de De Sá (Sá, Nunes e Borges, 2016) e Radji *et al.* (Radji *et al.*, 2025). A sequência de eventos térmicos posteriores está em linha com a decomposição característica dos HDLs, culminando na formação de óxidos mistos, com estabilidade e potencial aplicação em processos de catálise ambiental (Shao *et al.*, 2025).

5.2 Adsorção em Hidrocalumita

A aplicação da hidrocalumita como adsorvente foi avaliada por meio de espectroscopia UV-Vis, analisando-se o espectro completo da água cinza tratada em função da massa de adsorvente adicionada. Os resultados evidenciaram redução progressiva da absorbância em diferentes regiões do espectro, indicando interação efetiva entre o HDL e os constituintes orgânicos presentes no efluente (Figura 19).

A interpretação desses resultados deve ser realizada considerando as propriedades estruturais do material previamente caracterizadas por DRX, FTIR e análise térmica.

A difração de raios X confirmou a formação da estrutura lamelar típica dos hidróxidos duplos (HDL), com reflexões basais bem definidas em $2\theta = 10,15^\circ$ e $20,42^\circ$, correspondentes aos planos (003) e (006). O espaçamento basal obtido ($d_{003} = 0,870$ nm) indica a presença de ânions e moléculas de água no espaço interlamelar. Padrões de DRX de hidrocalumita CaAl-NO_3 apresentam reflexões basais na faixa de ~ 10 – 11° e ~ 20 – 21° (2θ), com espaçamentos basais tipicamente próximos de 0,86–0,88 nm, consistentes com estrutura lamelar hidratada contendo ânions nitrato nas galerias (Zhang *et al.*, 2020).

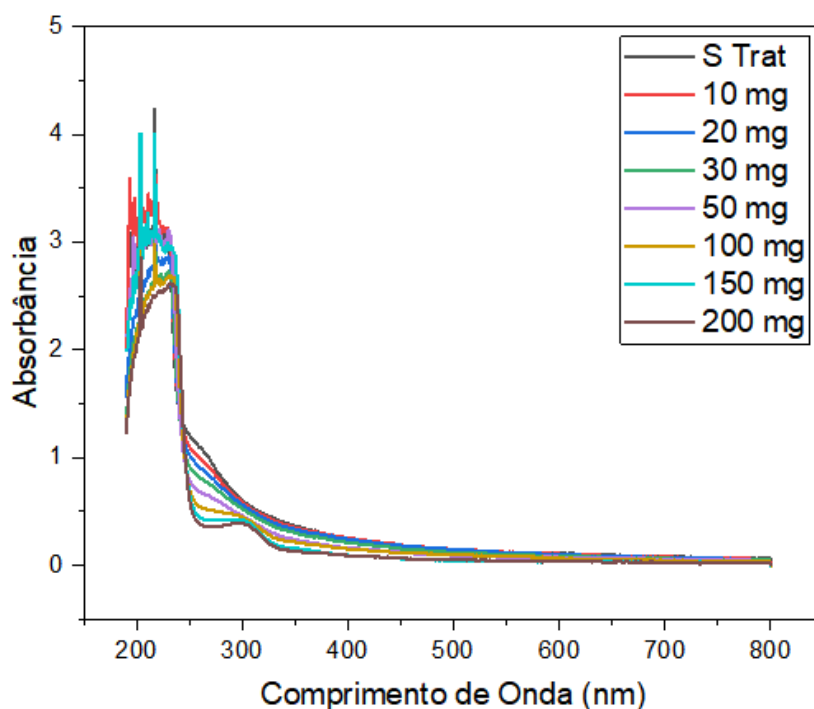
Essa configuração estrutural é fundamental para a capacidade adsortiva do material, pois permite a ocorrência de troca aniônica, intercalação e interação eletrostática com espécies presentes em solução (Altalhi, Mohamed e Negm, 2024)

Essa relação entre estrutura lamelar positivamente carregada e capacidade de troca/intercalação aniônica é amplamente reconhecida para HDLs, sobretudo quando o ânion interlamelar inicial é NO_3^- ou Cl^- , por serem relativamente mais trocáveis em meio aquoso (Kameliya e Gupta, 2023; Gevers e Labuschagné, 2020).

Essa característica estrutural contribui para explicar a remoção observada no espectro UV-Vis, uma vez que compostos orgânicos presentes na água cinza — particularmente surfactantes aniônicos, fragmentos de detergentes e espécies

orgânicas parcialmente ionizadas — podem interagir com as lamelas do HDL por meio de processos de adsorção superficial e troca aniônica.

Figura 19 – *Espectro de absorbância em função da quantidade de hidrocalumita.*



Fonte: Própria.

Em água cinza, surfactantes são frequentemente apontados como poluentes relevantes (com predominância de classes aniônicas em termos de uso/produção), e estudos com hidrocalumita demonstram remoção eficiente de surfactantes aniônicos, por mecanismos envolvendo sorção elevada e alterações/interações compatíveis com processos de intercalação e/ou precipitação associada (Zhang *et al.*, 2012; González e Vidal, 2025).

A análise do espectro de FTIR reforça essa interpretação. A presença de bandas associadas às hidroxilas estruturais (3663 cm^{-1}) e à água interlamelar (3466 e 1649 cm^{-1}) indica que o material apresenta uma superfície rica em grupos hidroxila e regiões hidratadas, capazes de estabelecer interações por ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas com espécies orgânicas polares. A atribuição de bandas de FTIR a hidroxilas estruturais/água interlamelar e a identificação de NO_3^- intercalado em CaAl-HDL são compatíveis com caracterizações reportadas para hidrocalumita (CaAl- NO_3) e reforçam a interpretação de uma superfície hidratada e de galerias aniônicas com potencial de substituição por espécies aniônicas em solução (Zhang *et al.*, 2020).

Além disso, a identificação de ânions nitrato intercalados (bandas em 1414

e 1348 cm^{-1}) confirma a natureza aniônica da galeria interlamelar, o que favorece processos de substituição ou adsorção de espécies aniônicas presentes no efluente.

Essas características estruturais e químicas são consistentes com a resposta observada nos espectros de absorção obtidos após o tratamento com HDL. Observou-se redução da absorbância ao longo de praticamente toda a faixa espectral analisada, evidenciando que o material foi capaz de interagir com diferentes frações da matéria orgânica dissolvida.

Particularmente na região de 254 nm, amplamente utilizada como indicador da fração aromática da matéria orgânica dissolvida, observou-se redução progressiva da absorbância com o aumento da massa de adsorvente (Figura 20). A absorbância diminuiu de aproximadamente 1,16 na amostra sem tratamento para cerca de 0,46 na dosagem de 200 mg, correspondendo a uma remoção aparente de aproximadamente 60%. Esse comportamento indica que o HDL apresenta capacidade de remover parte da matéria orgânica aromática presente na água cinza, possivelmente por adsorção superficial e interações eletrostáticas com grupos funcionais presentes nessas moléculas.

A absorbância em $\sim 254\text{ nm}$ e, especialmente, índices que normalizam essa absorbância são amplamente utilizados como descritores de matéria orgânica dissolvida com contribuição aromática, com correlações reportadas entre SUVA 254 e aromaticidade (Weishaar *et al.*, 2003; Haaland, 2024).

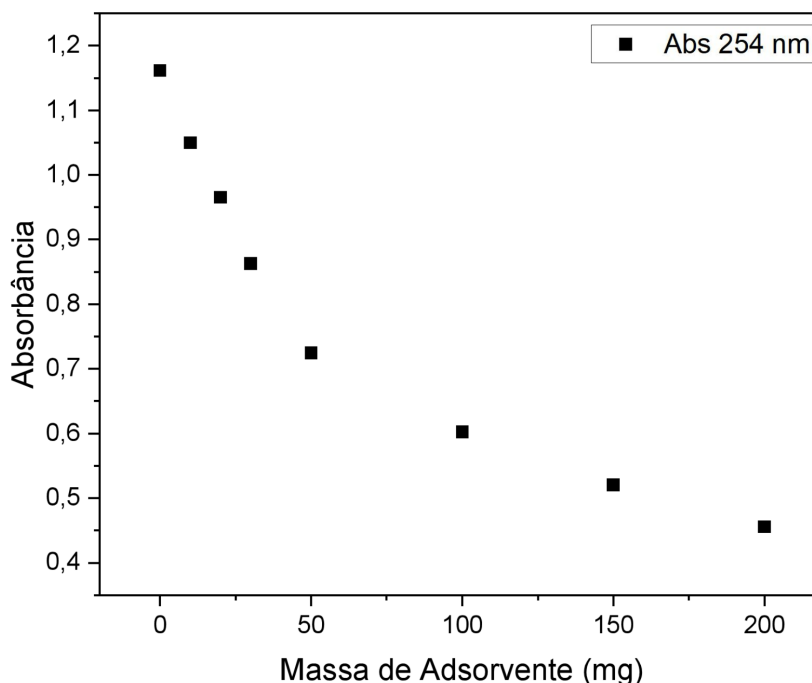
Um aspecto particularmente relevante observado nos espectros foi o comportamento na região visível (400–700 nm). Nessa faixa espectral, as curvas correspondentes às amostras tratadas aproximam-se da linha de base, evidenciando redução significativa da absorbância em relação à amostra sem tratamento. Esse comportamento sugere remoção de espécies responsáveis por cor aparente, turbidez residual e espalhamento de luz, indicando que o HDL contribui para a clarificação do efluente (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 1992; Government of British Columbia, 2014).

Esse efeito pode estar associado à capacidade do material de promover adsorção de partículas coloidais, agregação de espécies orgânicas e retenção de compostos cromóforos, fenômenos favorecidos pela presença de grupos hidroxila superficiais e pela estrutura lamelar hidratada do HDL.

A análise térmica (TG/DTA) também fornece elementos importantes para compreender o comportamento do material durante os ensaios de adsorção. A presença de água adsorvida e interlamelar, evidenciada pelas perdas de massa observadas nas primeiras etapas térmicas (30–150 °C e 200–350 °C), indica que o HDL possui regiões estruturais hidratadas que podem atuar como sítios de interação com espécies dissolvidas. Essa característica contribui para a capacidade do material

de interagir com compostos orgânicos em meio aquoso, favorecendo processos de adsorção e retenção.

Figura 20 – Absorbância em função da quantidade de hidrocalumita para comprimento de onda de 254 nm.



Fonte: Própria.

Perfis TG/DTA de fases do tipo hidrocalumita frequentemente exibem estágios de desidratação (água interlamelar) em temperaturas próximas de 25–200 °C e desidroxilação em ~ 200–400 °C, o que dá suporte à interpretação de regiões estruturais hidratadas e ricas em OH como sítios de interação em meio aquoso (Yue e Basheer, 2018).

Em conjunto, os resultados indicam que o HDL apresenta desempenho moderado na remoção da fração aromática da matéria orgânica dissolvida (avaliada em 254 nm), mas demonstra comportamento particularmente favorável na redução da absorbância na região visível do espectro. Esse resultado sugere que o material pode atuar não apenas como adsorvente de compostos orgânicos, mas também como agente de polimento físico-químico do efluente, contribuindo para a melhoria do aspecto visual e da qualidade óptica da água tratada.

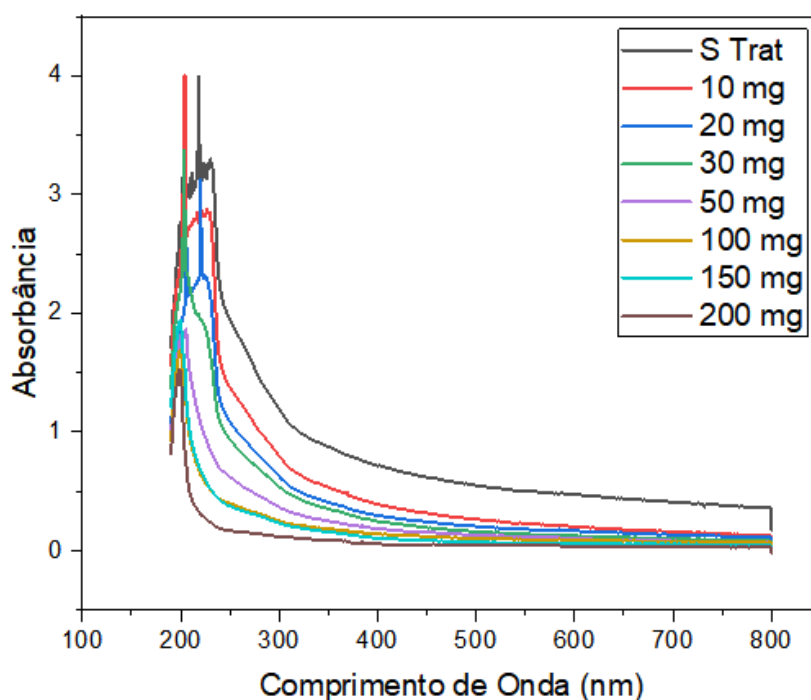
5.3 Adsorção em Carvão Ativado

O carvão ativado em pó (NEON), utilizado conforme fornecido pelo fabricante, apresenta pH entre 5,0 e 7,0, teor de cinzas $\leq 10\%$ e granulometria predomi-

nantemente inferior a 325 mesh, conforme certificado de análise do fabricante (Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda., 2023).

A Figura 21 apresenta os espectros de absorvância obtidos entre 190 e 800 nm em função da massa de carvão ativado adicionada ao sistema. Observa-se redução progressiva da absorvância ao longo de todo o espectro à medida que aumenta a quantidade de adsorvente. Esse comportamento é consistente com o uso de espectros UV/Vis como indicadores indiretos da presença de matéria orgânica em matrizes aquosas, incluindo frações cromóforas, nas quais a diminuição da absorvância reflete a remoção de espécies absorventes pelo processo de tratamento (Correa *et al.*, 2020; Cascone *et al.*, 2022).

Figura 21 – *Espectro de absorvância em função da quantidade de carvão ativado.*



Fonte: Própria.

A redução da absorvância na região do ultravioleta com o aumento da dosagem de carvão ativado indica adsorção eficiente da matéria orgânica dissolvida presente na água cinza. Observou-se que, para dosagens de aproximadamente 200 mg em 20 mL de amostra, ocorre tendência de estabilização da remoção, sugerindo aproximação do equilíbrio de adsorção nas condições experimentais adotadas (60 min de contato e agitação por tombamento). Esse comportamento é compatível com a redução da força motriz de adsorção à medida que a concentração do adsorvato se aproxima da condição de equilíbrio, ou seja, quando diminui a diferença entre a concentração no meio líquido e a concentração de equilíbrio (Bielski e Ozóg, 2024;

Tanko *et al.*, 2026).

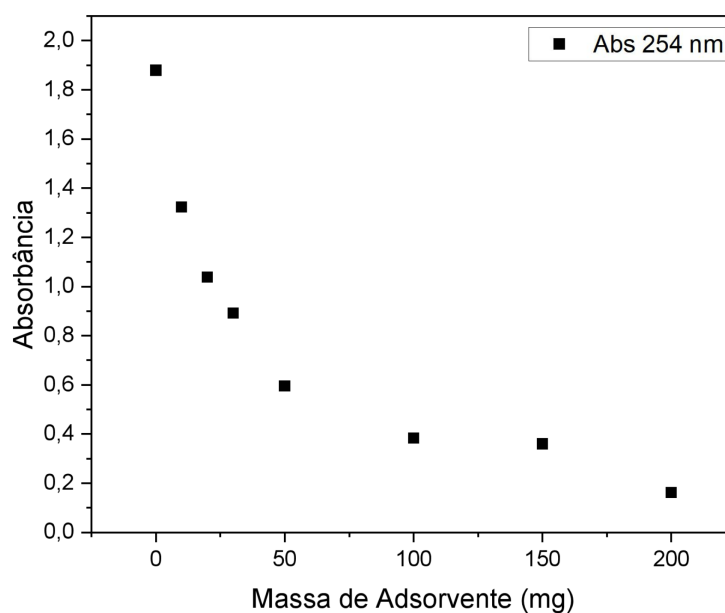
Para quantificação comparável e metodologicamente mais robusta da remoção da matéria orgânica dissolvida, adotou-se o comprimento de onda de 254 nm como indicador principal. Esse comprimento de onda é amplamente utilizado na literatura como parâmetro operacional associado à presença de compostos orgânicos aromáticos e cromóforos em águas naturais e efluentes. Quando normalizado pela concentração de carbono orgânico dissolvido (COD), o sinal em 254 nm origina o parâmetro SUVA 254, frequentemente empregado como indicador da aromaticidade da matéria orgânica dissolvida (Weishaar *et al.*, 2003).

A eficiência de remoção da matéria orgânica dissolvida foi avaliada por espectrofotometria UV/Vis em 254 nm, permitindo acompanhar a variação da absorbância em função da massa de adsorvente adicionada.

Observou-se redução da absorbância com o aumento da massa de carvão ativado, evidenciando comportamento típico de processo adsortivo caracterizado por elevada eficiência inicial e aproximação de equilíbrio em maiores dosagens.

Em 254 nm, a absorbância reduziu de aproximadamente 1,87 na amostra sem tratamento para o valor 0,16 na maior dosagem (200 mg/20 mL), correspondendo a remoções superiores a 90% (Figura 22). A maior variação ocorreu nas menores dosagens, especialmente até 50 mg de adsorvente, indicando elevada afinidade inicial entre o adsorvente e as espécies orgânicas presentes no efluente, bem como grande disponibilidade inicial de sítios ativos na superfície do material.

Figura 22 – Absorbância em função da quantidade de adsorvente para comprimento de onda de 254 nm.



Fonte: Própria.

Esse comportamento, caracterizado por elevada remoção inicial seguida de ganhos marginais progressivamente menores, é típico de sistemas de adsorção em que a taxa de remoção tende a diminuir à medida que a concentração do adsorvato se aproxima da condição de equilíbrio (Bielski e Ozóg, 2024).

5.3.1 Cálculo da eficiência específica aparente (254 nm)

A eficiência específica aparente foi estimada pela razão entre a variação da absorbância e a massa de adsorvente utilizada, conforme a expressão:

$$E_{\text{esp}} = \frac{A_0 - A}{m}$$

(5-1)

onde A_0 corresponde à absorbância inicial e A é a absorbância após adsorção, sendo m a massa de adsorvente (g). Trata-se de um indicador operacional útil para comparar a eficiência marginal por unidade de massa nas condições do ensaio (Tabela 2).

Tabela 2 – *Eficiência específica aparente (254 nm) em função da massa de carvão ativado.*

Massa (mg)	Massa (g)	Abs (254 nm)	ΔA	$\Delta A/m$ (UA · g ⁻¹)
50	0.05	0.59	1.28	25.6
100	0.10	0.39	1.48	14.8
150	0.15	0.35	1.52	10.1
200	0.20	0.16	1.71	8.55

Fonte: Própria.

Na literatura, a interpretação de medidas adsortivas deve considerar que a relação massa–remoção é governada por equilíbrio e por características do sistema (matriz, sítios ativos e condições operacionais), não sendo, portanto, uma “constante” intrínseca universal do material em qualquer condição (National Research Council, 1980; Tanko *et al.*, 2026).

5.3.2 Interpretação da eficiência específica aparente

A eficiência específica aparente apresentou comportamento decrescente com o aumento da dosagem de carvão ativado, indicando redução da eficiência marginal por unidade de massa à medida que o sistema se aproxima do equilíbrio adsortivo.

Esse comportamento é característico de sistemas de adsorção em superfícies heterogêneas, nos quais sítios ativos de maior energia são ocupados preferencialmente

nas menores dosagens. À medida que a quantidade de adsorvente aumenta e o sistema se aproxima da saturação parcial desses sítios, ocorre redução progressiva da eficiência incremental de remoção (Coldeira, García-Matamoros *et al.*, 2024; Al-Ghouti e Da'ana, 2025).

Além disso, a estabilização do desempenho em maiores dosagens é coerente com a diminuição da força motriz de adsorção, ou seja, com a redução do gradiente entre a concentração do adsorvato no meio líquido e a concentração de equilíbrio na superfície do adsorvente (Bielski e Ozóg, 2024; Tanko *et al.*, 2026).

Em conjunto, os resultados evidenciam elevada eficiência do carvão ativado na remoção de matéria orgânica dissolvida presente na água cinza, particularmente das frações associadas a compostos aromáticos detectados em 254 nm.

5.4 Fotodegradação por Radiação UV

A aplicação de radiação UV proveniente de lâmpada de vapor de mercúrio (125 W), com emissão predominante em 254 nm, promoveu alterações no perfil espectral da fração dissolvida do efluente de água cinza (Figura 23). Esse comportamento é compatível com sistemas de mercúrio de baixa pressão, cuja emissão praticamente monocromática em 253,7 nm confere seletividade espectral ao processo, favorecendo reações fotoquímicas direcionadas a espécies que absorvem nessa região (United States Environmental Protection Agency, 2006).

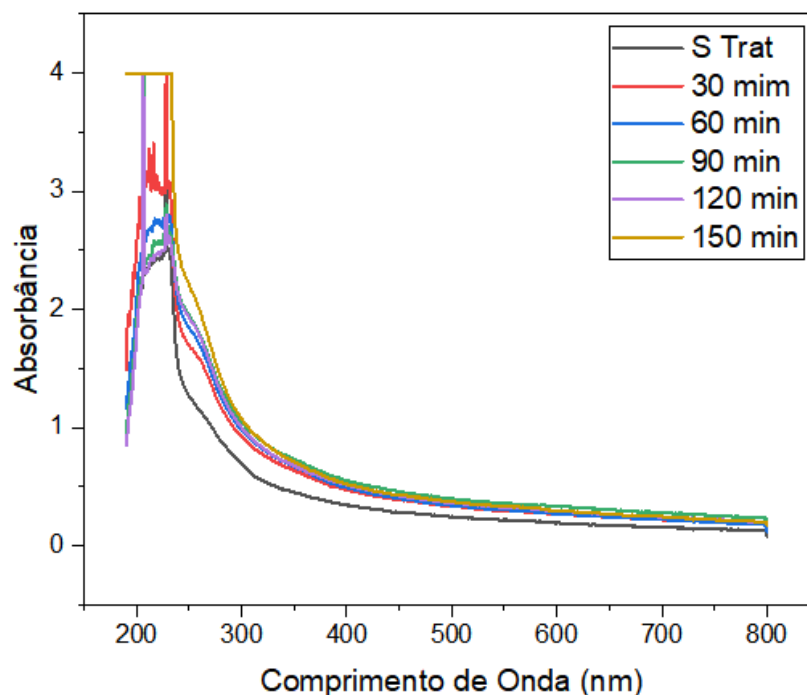
Como todas as amostras irradiadas foram previamente filtradas, a interpretação espectral na faixa de 200–400 nm pode ser atribuída predominantemente à matéria orgânica dissolvida (MOD), minimizando interferências por espalhamento particulado. Ainda assim, a literatura destaca que a própria fração dissolvida contribui para a atenuação da radiação incidente, influenciando a dose efetiva no volume irradiado (United States Environmental Protection Agency, 2006).

Observou-se incremento relativo da absorbância na região de 200–280 nm após 30–150 minutos de irradiação. Esse comportamento sugere transformação estrutural parcial da matéria orgânica dissolvida, com possível geração de intermediários de menor massa molecular e maior coeficiente de absorção no UV profundo. Revisões sobre matéria orgânica dissolvida indicam que a exposição à radiação UV altera propriedades ópticas e composição química, com dependência do comprimento de onda e da matriz inicial (Sulzberger e Durisch-Kaiser, 2009).

Estudos específicos sob UVC (254 nm) demonstram formação de compostos mono-, di- e tricarbonílicos após irradiação, representando fração significativa do carbono orgânico remanescente (Palma *et al.*, 2021). De modo semelhante, a irradiação de substâncias húmicas a 254 nm foi associada à redução de massa molar

média, formação de ácidos orgânicos de baixa massa molecular (fórmico, acético, succínico e oxálico) e mudanças concomitantes em COT e absorbância UV (Allard *et al.*, 1994).

Figura 23 – Absorbância em função do tempo de irradiação ultravioleta.



Fonte: Própria.

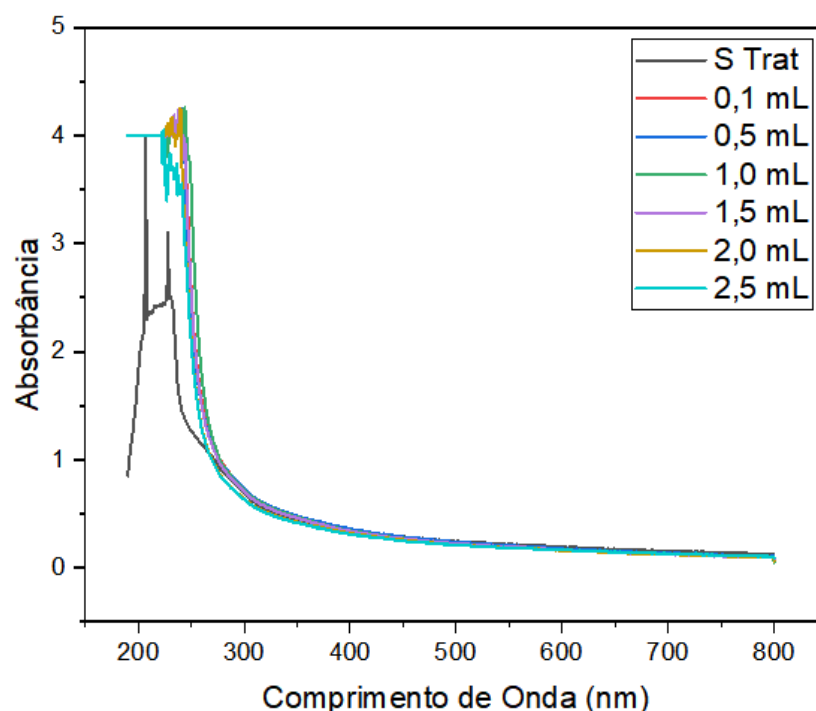
Assim, o incremento localizado em 200–280 nm é coerente com maior contribuição de cromóforos curtos, especialmente estruturas carbonílicas e sistemas oxidado-conjugados. Contudo, na ausência de evidências concomitantes de redução de carbono (COT/COD), não é possível inferir mineralização extensiva, mas sim transformação estrutural (Sulzberger e Durisch-Kaiser, 2009; Palma *et al.*, 2021).

Do ponto de vista de engenharia de processos, UV isolado atua predominantemente por fotólise direta, sem geração intensiva de espécies radicalares. Revisões de processos oxidativos avançados ressaltam que UV isolado apresenta eficiência limitada para matrizes complexas, sendo mais eficaz quando combinado a oxidantes (Cuerda-Correa, Alexandre-Franco e Fernández-González, 2020). Esse comportamento é confirmado em efluentes de lavanderia, nos quais UV-C isolado apresentou remoção inferior à combinação UV-C/H₂O₂ (Kılıç *et al.*, 2026).

5.5 Oxidação por H₂O₂ Isolado

A aplicação de H₂O₂ (30%), em dosagens até aproximadamente 437 mg L⁻¹, não promoveu alterações significativas no perfil espectral após 60 min de contato (Figura 24). Esse resultado é consistente com o entendimento de que o peróxido de hidrogênio, quando utilizado sem ativação fotoquímica ou catalítica, apresenta capacidade oxidante limitada para compostos orgânicos recalcitrantes (Shi *et al.*, 2022).

Figura 24 – Absorbância em função da quantidade de H₂O₂.



Fonte: Própria.

Revisões de POAs destacam que H₂O₂ isolado não apresenta desempenho expressivo na degradação de muitos poluentes, sendo usualmente combinado com UV, ozônio ou catalisadores para gerar radicais hidroxila (•OH), espécies altamente reativas e não seletivas (Cuerda-Correa, Alexandre-Franco e Fernández-González, 2020). Em estudo aplicado a águas de lavanderia, H₂O₂ isolado apresentou remoção de DQO inferior às combinações UV-assistidas (Kılıç *et al.*, 2026).

É relevante observar que o H₂O₂ absorve radiação na região UV e sua fotólise é dependente da absorção em 254 nm, com coeficiente de absorção molar reportado em literatura para essa região (Garcia *et al.*, 2024). Entretanto, na ausência de radiação, a decomposição é lenta, limitando a geração de espécies radicalares.

A ausência de variações espectrais relevantes pode indicar que: (i) não houve formação significativa de produtos cromóforos detectáveis na faixa 200–400 nm; (ii)

eventuais reações ocorreram em frações pouco cromóforas; ou (iii) o tempo de contato e a dose efetiva foram insuficientes para promover transformações mensuráveis na janela espectral analisada (Shi *et al.*, 2022; Cuerda-Correa, Alexandre-Franco e Fernández-González, 2020).

5.6 Considerações Comparativas para o Sistema UV $\times$ H₂O₂

Os resultados indicam que a radiação UV isolada promove transformação estrutural da matéria orgânica dissolvida, enquanto o H₂O₂ isolado apresenta reatividade limitada nas condições avaliadas. Esse comportamento é coerente com a literatura de POAs, na qual a eficiência do sistema UV/H₂O₂ está associada à fotólise do peróxido e consequente formação de radicais hidroxila:



A formação estequiométrica de $\bullet\text{OH}$ é descrita como etapa central do processo UV/H₂O₂, desencadeando reações em cadeia responsáveis por degradação mais profunda da matéria orgânica (Cuerda-Correa, Alexandre-Franco e Fernández-González, 2020; Einschlag *et al.*, 2002).

Em matrizes tipo água cinza, evidências experimentais demonstram que UVC/H₂O₂ promove reduções expressivas de DQO e aumento da biodegradabilidade relativa (Chin, Roddick e Harris, 2009), além de desempenho superior ao de processos isolados em efluentes de lavanderia (Zotesso *et al.*, 2017; Kılıç *et al.*, 2026).

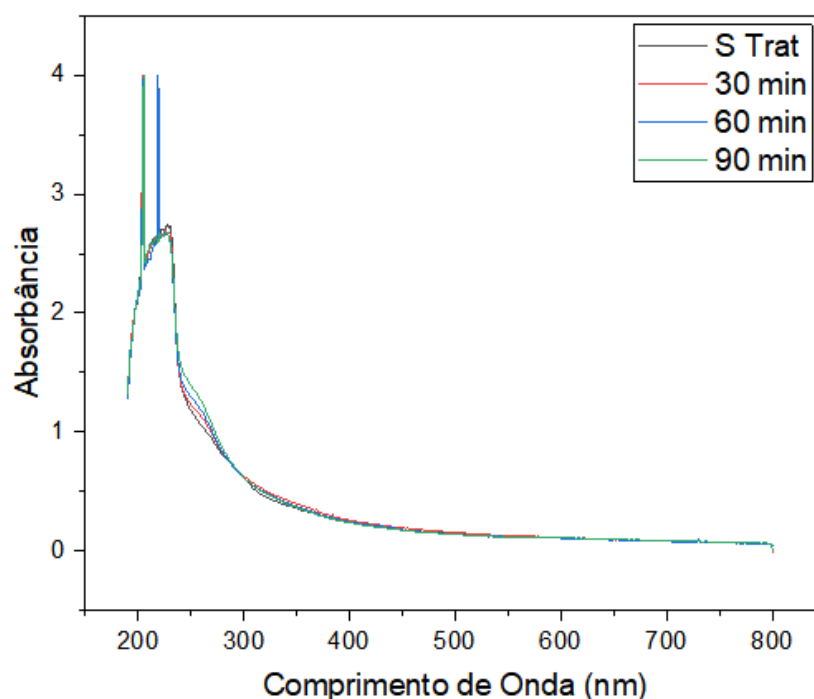
Importante destacar que o desempenho do sistema depende de dosagem ótima de H₂O₂, uma vez que excesso pode atuar como sequestrante de radicais, reduzindo a eficiência global (Cuerda-Correa, Alexandre-Franco e Fernández-González, 2020; Kılıç *et al.*, 2026).

Conectando às Figuras 23 e 24, o aumento de absorbância em 200–280 nm sob UV isolado pode ser interpretado como etapa de transformação e formação de intermediários, enquanto a ausência de mudança sob H₂O₂ isolado indica baixa geração de espécies reativas sem ativação. No sistema combinado UV/H₂O₂, espera-se inicialmente formação transitória de intermediários, seguida por sua oxidação progressiva via $\bullet\text{OH}$, refletindo-se em reduções mais claras de DQO e, possivelmente, alterações nos parâmetros ópticos.

5.7 Fotodegradação por Radiação UV/H₂O₂

A variação espectral da fração dissolvida do efluente ao longo do tempo de irradiação UV foi avaliada por meio de espectroscopia UV-Vis, considerando duas condições experimentais distintas: adição de 1 mL e 10 mL de H₂O₂ em 200 mL de efluente. As Figuras 25 e 26 apresentam os espectros completos de absorbância em função do comprimento de onda para diferentes tempos de exposição, enquanto as Figuras 27 e 28 mostram a evolução temporal da absorbância em comprimentos de onda representativos da região do ultravioleta.

Figura 25 – Absorbância em função do tempo de irradiação ultravioleta para 1 mL de H₂O₂ em 200 mL de efluente.

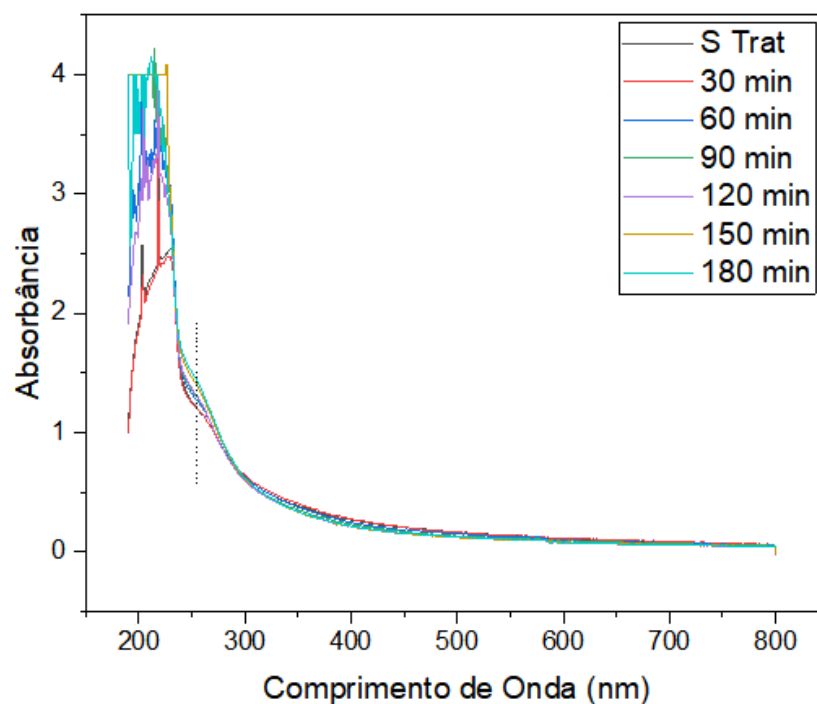


Fonte: Própria.

Os espectros UV-Vis (Figuras 25 e 26) apresentam comportamento característico de soluções contendo matéria orgânica dissolvida, com elevada absorbância na região do ultravioleta profundo (aproximadamente 200–250 nm) e redução progressiva da intensidade com o aumento do comprimento de onda. Essa região espectral está associada principalmente a transições eletrônicas $\pi \rightarrow \pi^*$ de sistemas conjugados e compostos orgânicos contendo estruturas aromáticas ou insaturadas, frequentemente presentes em matrizes aquosas contendo matéria orgânica dissolvida (Hillebrand e Benetti, 2020). A absorbância em determinados comprimentos de onda na região UV, especialmente próxima de 254 nm, tem sido amplamente uti-

lizada como parâmetro indireto para estimar a presença e a concentração de matéria orgânica dissolvida em águas naturais e efluentes (Correa *et al.*, 2020).

Figura 26 – Absorbância em função do tempo de irradiação ultravioleta para 10 mL de H₂O₂ em 200 mL de efluente.



Fonte: Própria.

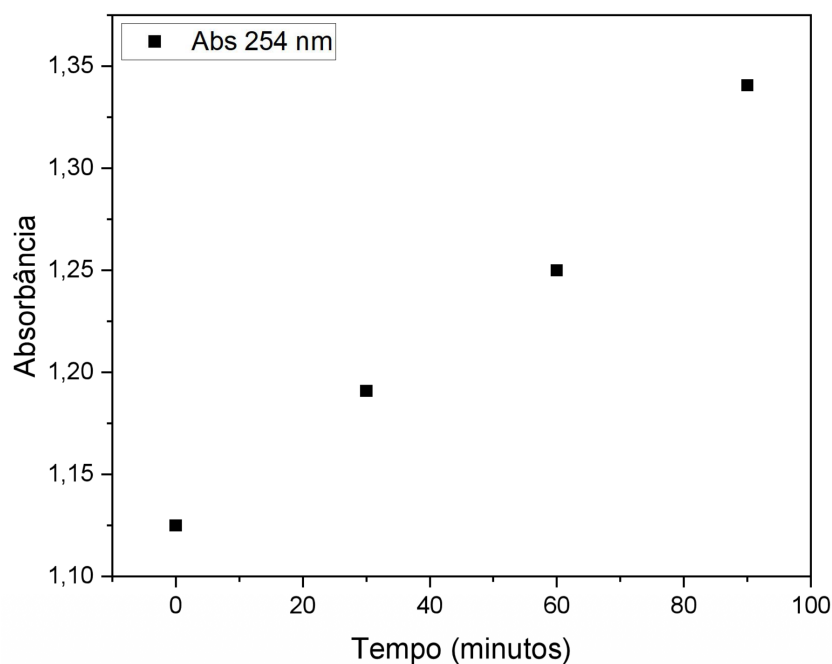
Na condição com 1 mL de H₂O₂, observam-se alterações relativamente discretas no perfil espectral ao longo do tempo de irradiação (Figura 25). A análise da evolução temporal da absorbância na região do UV profundo evidencia uma redução gradual da intensidade espectral ao longo do período experimental. Esse comportamento sugere consumo parcial de cromóforos absorventes, possivelmente associado à oxidação de compostos orgânicos inicialmente presentes no efluente.

Por outro lado, a evolução da absorbância em 254 nm (Figura 27) apresenta tendência de aumento ao longo do tempo de irradiação. Esse comprimento de onda é frequentemente utilizado como indicador indireto da presença de estruturas aromáticas ou sistemas conjugados na matéria orgânica dissolvida (Correa *et al.*, 2020; Hillebrand e Benetti, 2020). Assim, o aumento observado pode indicar que, durante o processo oxidativo, são formadas espécies intermediárias contendo estruturas aromáticas ou parcialmente oxidadas, que apresentam maior absorção nessa faixa espectral.

Resultados semelhantes foram observados quando a concentração de oxidante foi aumentada para 10 mL de H₂O₂. Os espectros apresentados na Figura 26

indicam maior variação espectral ao longo do tempo de irradiação, evidenciando intensificação das transformações químicas promovidas pelo processo UV/H₂O₂.

Figura 27 – Absorbância em função do tempo de irradiação para 254 nm, utilizando 1 mL de H₂O₂ em 200 mL de efluente.



Fonte: Própria.

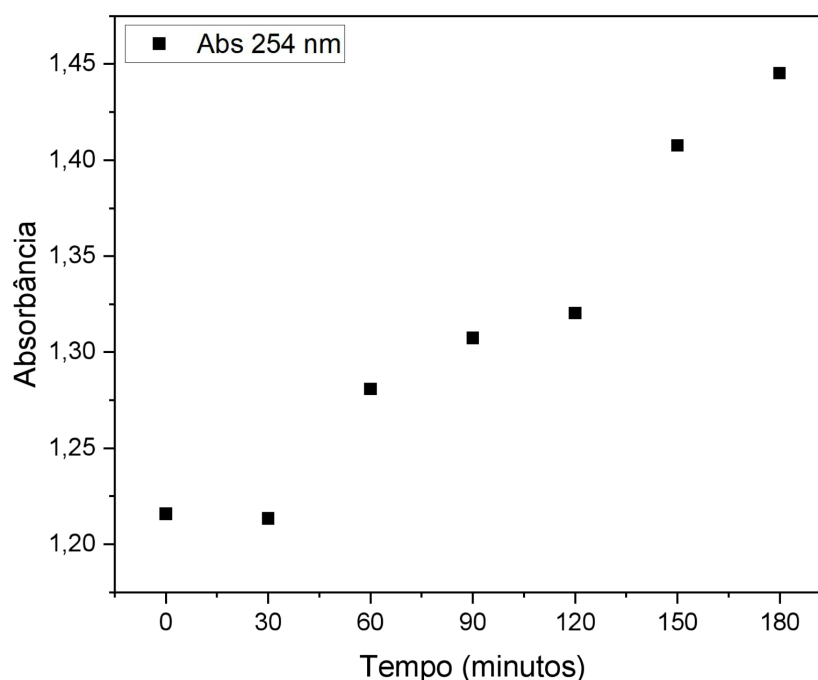
A análise da evolução temporal da absorbância na região do UV profundo revela comportamento não monotônico. Inicialmente ocorre uma redução da intensidade espectral nos primeiros tempos de irradiação, seguida de aumento em tempos intermediários e posterior oscilação nos períodos mais longos de exposição. Esse comportamento sugere que a oxidação promovida pelos radicais gerados no sistema pode inicialmente degradar parte dos cromóforos originais, enquanto etapas subsequentes conduzem à formação de compostos intermediários que também apresentam absorção significativa nessa região espectral.

Em 254 nm (Figura 28), observa-se aumento progressivo da absorbância ao longo de todo o período experimental. Esse comportamento reforça a hipótese de formação ou acúmulo de intermediários contendo estruturas aromáticas ou sistemas conjugados, resultantes da transformação da matéria orgânica dissolvida durante o processo oxidativo.

A geração dessas espécies intermediárias está associada à fotólise do peróxido de hidrogênio sob radiação UV, conforme representado pela reação:



Figura 28 – Absorbância em função do tempo de irradiação para 254 nm, utilizando 10 mL de H₂O₂ em 200 mL de efluente.



Fonte: Própria.

Os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) produzidos apresentam elevado potencial oxidante e podem reagir de forma pouco seletiva com diferentes compostos orgânicos presentes no meio, promovendo uma série de reações de oxidação (Souza *et al.*, 2019; Kılıç *et al.*, 2026). Em sistemas contendo mistura de compostos orgânicos, é comum que o processo ocorra em múltiplas etapas, envolvendo a transformação de moléculas originais em intermediários que podem apresentar propriedades espectrais distintas das espécies precursoras (Palma *et al.*, 2021).

Nesse contexto, os resultados obtidos indicam que o processo UV/H₂O₂ promove transformações estruturais na fração orgânica dissolvida do efluente, evidenciadas pelas alterações observadas nos espectros UV-Vis e na evolução temporal da absorbância. Entretanto, os dados espectrais isoladamente não permitem inferir diretamente a magnitude da remoção global da matéria orgânica ou o grau de mineralização do sistema, sendo necessários parâmetros complementares, como demanda química de oxigênio (DQO) ou carbono orgânico total, para avaliação mais abrangente da eficiência do processo (Correa *et al.*, 2020).

Em síntese, a análise integrada das Figuras 25 a 28 indica que a irradiação UV na presença de H₂O₂ promove modificação química dos cromóforos presentes no efluente, com degradação parcial de compostos orgânicos iniciais e formação de espécies intermediárias detectáveis por espectroscopia UV-Vis. Esses resultados evi-

denciam a capacidade do processo em alterar a estrutura da matéria orgânica dissolvida, destacando o potencial do sistema UV/H₂O₂ como etapa de transformação química em processos de tratamento de efluentes.

5.8 Discussão Comparativa entre Adsorção e Processos Oxidativos Avançados

A análise integrada dos resultados obtidos neste estudo permite discutir, de forma comparativa, o desempenho de diferentes abordagens aplicadas ao tratamento da fração dissolvida de águas cinzas. Foram avaliadas duas estratégias principais: processos de adsorção (hidrocalumita e carvão ativado) e processos oxidativos baseados em radiação UV, H₂O₂ e no sistema combinado UV/H₂O₂.

Os ensaios de adsorção evidenciaram comportamentos distintos entre os materiais avaliados. A hidrocalumita apresentou capacidade moderada de remoção da matéria orgânica dissolvida, observando-se redução de aproximadamente 60% da absorbância em 254 nm nas maiores dosagens analisadas. Além disso, foi observada redução significativa da absorbância na região visível do espectro, indicando contribuição para a clarificação do efluente. Esse comportamento pode ser explicado pelas características estruturais dos hidróxidos duplos lamelares, que apresentam camadas carregadas positivamente e espaços interlamelares contendo ânions e moléculas de água. Essa estrutura favorece processos de troca aniônica e interações eletrostáticas com espécies orgânicas dissolvidas.

Por outro lado, o carvão ativado apresentou desempenho significativamente superior na remoção da matéria orgânica dissolvida. A absorbância em 254 nm foi reduzida em mais de 90% nas maiores dosagens de adsorvente, indicando elevada eficiência na remoção de compostos aromáticos e cromóforos presentes na água cinza. Esse resultado está associado à elevada área superficial específica e à presença de uma estrutura altamente porosa, características que conferem ao carvão ativado grande capacidade adsorptiva para uma ampla variedade de compostos orgânicos (Bielski e Ozóg, 2024; Tanko *et al.*, 2026).

Enquanto os processos de adsorção atuam predominantemente pela remoção física ou físico-química das espécies presentes na solução, os processos oxidativos apresentam mecanismo distinto, baseado na transformação química da matéria orgânica dissolvida. Nos experimentos realizados, a aplicação de radiação UV isolada promoveu alterações no perfil espectral da solução, especialmente na região do ultravioleta profundo (200–280 nm). Esse comportamento sugere modificação estrutural da matéria orgânica, possivelmente associada à formação de compostos

intermediários de menor massa molecular (Palma *et al.*, 2021).

A aplicação de H_2O_2 isolado não resultou em alterações espectrais relevantes nas condições avaliadas, indicando baixa reatividade do oxidante na ausência de ativação fotoquímica ou catalítica. Esse resultado é consistente com a literatura sobre processos oxidativos avançados, na qual o peróxido de hidrogênio apresenta maior eficiência quando combinado a fontes de radiação ou catalisadores capazes de promover a geração de radicais hidroxila (Souza *et al.*, 2019; Kılıç *et al.*, 2026).

Quando combinados, os processos UV/ H_2O_2 promoveram modificações espectrais mais pronunciadas, indicando ocorrência de transformações químicas na matéria orgânica dissolvida. A formação de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) a partir da fotólise do peróxido de hidrogênio constitui o principal mecanismo responsável pela oxidação não seletiva de compostos orgânicos (Souza *et al.*, 2019; Kılıç *et al.*, 2026). Entretanto, os resultados espectrais indicam que o processo promove principalmente transformação estrutural e formação de intermediários detectáveis na região do ultravioleta, não sendo possível inferir, apenas com base nesses dados, o grau de mineralização da matéria orgânica presente no efluente.

Do ponto de vista comparativo, os resultados indicam que os processos de adsorção, particularmente utilizando carvão ativado, apresentaram maior eficiência na remoção direta da matéria orgânica dissolvida presente na água cinza. Em contrapartida, os processos oxidativos atuaram predominantemente na modificação estrutural dessa matéria orgânica, podendo representar uma etapa complementar de tratamento, especialmente em sistemas integrados de tratamento de efluentes.

Nesse contexto, a combinação de processos adsortivos e oxidativos pode representar uma estratégia promissora para o tratamento de águas cinzas, uma vez que os mecanismos envolvidos são complementares. Enquanto a adsorção promove remoção direta de compostos orgânicos e cromóforos, os processos oxidativos podem atuar na transformação química de espécies recalcitrantes, potencialmente aumentando a eficiência global do sistema de tratamento (Kılıç *et al.*, 2026).

Assim, os resultados obtidos neste estudo reforçam o potencial de tecnologias alternativas baseadas em adsorção e processos oxidativos avançados para o tratamento de águas cinzas, destacando a importância de abordagens comparativas na avaliação de soluções tecnicamente viáveis para o reúso sustentável da água em ambientes urbanos.

Perspectivas e Sugestões para Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos neste estudo tenham permitido avaliar o desempenho de processos de adsorção e processos oxidativos aplicados ao tratamento de águas cinzas, algumas limitações experimentais e possibilidades de aprofundamento indicam direções promissoras para pesquisas futuras.

Uma primeira perspectiva consiste na ampliação da base experimental por meio da realização de novos ensaios e controle estatístico mais rigoroso, permitindo avaliar de forma mais detalhada a influência das variáveis operacionais nos processos de adsorção e fotodegradação.

Outro aspecto relevante refere-se à aplicação de delineamentos experimentais multivariados, como planejamentos fatoriais ou metodologias de superfície de resposta, que possibilitam investigar de forma sistemática a interação entre variáveis como massa de adsorvente, concentração de oxidante, intensidade de radiação UV e tempo de reação.

Também se destaca a necessidade de incorporar parâmetros adicionais de caracterização da matéria orgânica presente na água cinza, como demanda química de oxigênio (DQO), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico dissolvido (COD) e análises microbiológicas para avaliação do potencial de reúso do efluente tratado. A inclusão desses parâmetros permitiria avaliar de forma mais abrangente o grau de degradação ou mineralização da matéria orgânica ao longo dos processos de tratamento.

Outra linha de investigação promissora envolve o estudo da combinação sequencial de processos, como a integração entre adsorção e processos oxidativos avançados. Sistemas híbridos podem explorar a complementaridade entre os mecanismos envolvidos, nos quais a adsorção remove frações orgânicas mais facilmente retidas, enquanto os processos oxidativos promovem a transformação ou degradação de compostos mais recalcitrantes.

Adicionalmente, estudos futuros podem explorar modificações estruturais

na hidrocalumita ou a síntese de hidróxidos duplos lamelares contendo diferentes metais, visando melhorar a capacidade adsortiva e ampliar a seletividade do material para diferentes tipos de contaminantes presentes em águas cinzas.

Por fim, investigações voltadas à avaliação de viabilidade técnica e econômica dos processos estudados, bem como à aplicação em sistemas piloto ou em escala semi-contínua, podem contribuir para aproximar essas tecnologias de contextos reais de reúso doméstico ou descentralizado de água.

Essas perspectivas indicam que o estudo desenvolvido constitui uma etapa inicial na compreensão do potencial de tecnologias alternativas baseadas em adsorção e processos oxidativos para o tratamento de águas cinzas, abrindo caminho para avanços futuros na área de gestão sustentável de recursos hídricos.

Considerações Finais

Os resultados obtidos neste estudo permitiram avaliar o comportamento de diferentes estratégias de tratamento aplicadas à fração dissolvida de água cinza, envolvendo processos de adsorção e processos oxidativos fotoassistidos.

A caracterização do hidróxido duplo lamelar do tipo hidrocalumita confirmou a formação da estrutura típica de HDL do sistema Ca–Al. A difração de raios X evidenciou reflexões basais características do politipo 3R, com espaçamento interlamelar d_{003} de aproximadamente 0,87 nm e parâmetro de cela unitária c próximo de 2,61 nm, indicando boa regularidade estrutural. A espectroscopia FTIR confirmou a presença de hidroxilas estruturais, moléculas de água interlamelar e ânions nitrato intercalados, enquanto a análise térmica revelou comportamento típico de hidróxidos duplos lamelares, com etapas sucessivas de perda de água adsorvida, desidratação interlamelar e decomposição da estrutura lamelar. Esses resultados confirmam a obtenção adequada do material adsorvente e sua estabilidade nas condições usuais de aplicação em processos de tratamento em meio aquoso.

Nos ensaios de adsorção utilizando hidrocalumita, observou-se redução da absorvância ao longo de praticamente toda a faixa espectral analisada (190–800 nm), indicando interação entre o material e os constituintes orgânicos dissolvidos presentes na água cinza. A redução observada em 254 nm atingiu aproximadamente 60% na maior dosagem avaliada, evidenciando capacidade moderada de remoção da fração aromática da matéria orgânica dissolvida. Além disso, verificou-se redução significativa da absorvância na região visível, sugerindo contribuição do material para a clarificação do efluente e remoção de espécies cromóforas ou coloidais.

Em comparação, o carvão ativado apresentou desempenho significativamente superior na remoção da matéria orgânica dissolvida. A absorvância em 254 nm foi reduzida de aproximadamente 1,87 para 0,16 na maior dosagem, correspondendo a remoção superior a 90%. O comportamento observado apresentou padrão típico de sistemas adsortivos, caracterizado por elevada eficiência inicial seguida de aproximação ao equilíbrio em maiores dosagens. A análise da eficiência específica aparente indicou diminuição da eficiência marginal por unidade de massa com o

aumento da dosagem, comportamento consistente com a ocupação progressiva de sítios ativos de maior energia.

Nos experimentos de oxidação, a aplicação de radiação UV isolada promoveu alterações no perfil espectral da matéria orgânica dissolvida, especialmente na região de 200–280 nm. Esse comportamento indica transformação estrutural da matéria orgânica presente no efluente, possivelmente associada à formação de intermediários orgânicos de menor massa molecular e maior coeficiente de absorção no ultravioleta. Entretanto, os resultados sugerem que a radiação UV isolada promove predominantemente transformações químicas, não sendo possível inferir mineralização significativa da matéria orgânica apenas com base nos dados espectrais.

A aplicação de peróxido de hidrogênio isolado não resultou em alterações relevantes no perfil espectral da solução nas condições avaliadas, indicando baixa reatividade do oxidante na ausência de ativação fotoquímica ou catalítica.

Quando combinados, os processos UV/H₂O₂ promoveram alterações mais pronunciadas no comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida. As análises indicaram modificações estruturais progressivas ao longo do tempo de irradiação, com evidências de degradação parcial de cromóforos iniciais e formação de intermediários detectáveis por espectroscopia UV-Vis. O aumento da absorbância em 254 nm ao longo do tempo sugere formação transitória de espécies aromáticas ou parcialmente oxidadas durante o processo.

De forma geral, os resultados indicam que:

- o carvão ativado apresentou maior eficiência na remoção da matéria orgânica dissolvida;
- a hidrocalumita demonstrou desempenho moderado, com contribuição adicional na clarificação do efluente;
- a radiação UV isolada promove principalmente transformação estrutural da matéria orgânica;
- o H₂O₂ isolado apresenta baixa reatividade nas condições avaliadas;
- o sistema UV/H₂O₂ induz transformações químicas mais intensas na matéria orgânica dissolvida.

Por fim, destaca-se que a avaliação da eficiência global dos processos oxidativos requer a análise de parâmetros complementares, como demanda química de oxigênio (DQO) ou carbono orgânico total (COT), os quais permitem determinar o grau efetivo de degradação ou mineralização da matéria orgânica presente na água cinza.

Referências Bibliográficas

AL-GHOUTI, Mohammad A.; DA'ANA, Dana A. Fundamentals and recent advances in adsorption mechanisms for water and wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, Elsevier, v. 65, p. 105804, 2025. 57

ALLARD, B.; BORÉN, H.; PETTERSSON, C.; ZHANG, G. Degradation of humic substances by UV irradiation. **Environment International**, v. 20, n. 1, p. 97–101, 1994. 58

ALMEIDA, Raquel Duarte de. **Síntese e Caracterização de Hidrocalumita para Remoção de Fluoreto de Soluções Aquosas**. [S.l.]: UFRJ, 2018. 46

ALTALHI, Amal A; MOHAMED, Eslam A; NEGM, Nabel A. Recent advances in layered double hydroxide (ldh)-based materials: fabrication, modification strategies, characterization, promising environmental catalytic applications, and prospective aspects. **Energy Advances**, Royal Society of Chemistry, v. 3, n. 9, p. 2136–2151, 2024. 31, 50

American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: Method 2120 – Color**. Washington, DC: [s.n.], 1992. Acesso em: 19 fev. 2026. Disponível em: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/apha.method.2120.1992.html>. 52

BIELSKI, Andrzej; OŽÓG, Jakub. Adsorption on powdered activated carbon (PAC) dosed into an anthracite-sand filter in water treatment—model and criterion equations. **Applied Sciences**, MDPI, v. 14, n. 11, p. 4727, 2024. 54, 55, 56, 57, 65

BRASIL. **Lei de Saneamento Básico Informação e documentação-Referências - Elaboração**. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/L14546.htm. Acesso em: 03 nov. 2023. 16

BRASIL. **Proposta de regulamentação do reúso de água no Brasil**. 2026. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br>. Acesso em: 20 abr. 2026. 16

BUSICO, M. A. Avaliação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis: uma revisão crítica. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 5, p. 1422–1439, 2019. 35, 36

CAETANO, Marcelo Oliveira; SILVA, Isabela da; CARVALHO, Éverton Cardoso de; GOMES, Luciana Paulo. Efficiency of electrocoagulation in the treatment of laundromat greywater. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 91–101, 2022. 22, 30

CARDOSO, A. L. S. Impacto dos tensoativos no tratamento de efluentes domésticos: uma abordagem ambiental. **Revista Engenharia & Sustentabilidade**, v. 7, n. 2, p. 33–45, 2020. 16, 22

CASCONE, Claudia; MURPHY, Kathleen R.; MARKENSTEN, Hampus; KERN, J. Simon; SCHLEICH, C.; KEUCKEN, Alexander; KÖHLER, S. J. Abspectroscopy, a python toolbox for absorbance-based sensor data in water quality monitoring. **Environmental Science: Water Research & Technology**, Royal Society of Chemistry, v. 8, n. 4, p. 836–848, 2022. 54

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Informação e documentação-Referências - Elaboração**. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/tpos-de-agua/reuso-de-agua>. Acesso em: 13 dez. 2023. 16, 21

CHIN, WH; RODDICK, FA; HARRIS, JL. Greywater treatment by uvc/h₂O₂. **Water Research**, Elsevier, v. 43, n. 16, p. 3940–3947, 2009. 60

COLDEIRA, Carolina Belver; GARCÍA-MATAMOROS, Jorge Bedia *et al.* Adsorption on carbon-based materials. **C Journal of Carbon Research**, 2024. 33, 34, 57

CORDEIRO, G. C.; SANTOS, R. C.; LIMA, S. A. Remoção de corantes de efluentes têxteis utilizando carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 235–242, 2011. 34

CORREA, J. S. *et al.* Uso de resposta espectral em comprimentos de onda (230–290 nm) como parâmetro indireto quantitativo de COD e DQO. **Revista DAE**, v. 68, n. 225, p. 51–62, 2020. 42, 54, 62, 64

COSTA, Raul Leite da; TORRES, Dayana Melo; GOMES, Josimar Torres; SILVA, José Edson Martins. Tratamento de água cinza para reúso agrícola no semiárido do rio grande do norte, brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 27, p. 1031–1040, 2022. 47

CUERDA-CORREA, E. M.; ALEXANDRE-FRANCO, M. F.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, C. Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water: an overview. **Water**, v. 12, n. 1, p. 102, 2020. 58, 59, 60

DALTIN, Decio. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. [S.l.]: Editora Blucher, 2011. 23, 24

DINI, Salome; BEKHIT, Alaa El-Din A; ROOHINEJAD, Shahin; VALE, Jim M; AGYEI, Dominic. The physicochemical and functional properties of biosurfactants: a review. **Molecules**, Mdpi, v. 29, n. 11, p. 2544, 2024. 27

EINSCHLAG, F. S. García *et al.* Degradation of nitroaromatic compounds by the UV–H₂O₂ process using polychromatic radiation sources. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 1, p. 520–525, 2002. 60

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Informação e documentação-Referências - Elaboração**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355026/52478941>. Acesso em: 13 dez. 2023. 16

FERREIRA, Patricia Garcia; FUTURO, Débora O.; FOREZI, Luana da Silva Magalhães; SILVA, Fernando de Carvalho da; FERREIRA, V. F. Aqui tem química: Parte VII. tensoativos em produtos comerciais. **Revista Virtual de Química**, v. 15, p. 423, 2023. 26

FREITAS, Leonardo Luis de *et al.* Síntese de hidróxidos duplos lamelares (HDL) para a adsorção de herbicida e obtenção de HDL a partir do material catódico de baterias exauridas para a aplicação como eletrodo. Universidade Federal de Uberlândia, 2017. 46

GARCIA, Paula Souza Prestes; JÚNIOR, José Geraldo Mota; MACEDO, Isabelly da Silva Venancio; TALACIMON, Elisane Antunes. Aplicabilidade dos tensoativos em produtos cosméticos. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 79, p. 51–62, 2024. 25, 26, 27, 59

GEVERS, Bianca R.; LABUSCHAGNÉ, Frederick J. W. J. Green synthesis of hydrocalumite (CaAl(OH)LDH) from Ca(OH)₂ and Al(OH)₃ and the parameters that influence its formation and speciation. **Crystals**, v. 10, n. 8, p. 672, 2020. 50

GOMES, Maurício de Gois. Definição de regra de operação de reservatórios na região semiárida em situações de escassez hídrica e eutrofização. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020. 21, 22

GOMES, R. S. *et al.* Comparative study of greywater treatment using activated carbon and woodchip biochar. **Chemical Engineering Journal Advances**, 2024. 34

GONZÁLEZ, Yenifer; VIDAL, Gladys. A comprehensive review of treatment technologies for greywater contaminants: an emphasis on surfactants. **Journal of Environmental Management**, v. 392, p. 126861, 2025. 51

GORDEZIANI, Ketevan; TSINADZE, Zaal; KAVELASHVILI, Lasha. Reuse of greywastewater in multi-story buildings: a sustainable solution to save water. **Scientific-technical Journal "BUILDING"**, v. 2, n. 70, p. 71–75, 2024. 17

Government of British Columbia. **BC Lab Manual – Colour, true, single wavelength (450–465 nm): method summary e notas sobre interferências**. 2014. 52

GUPTA, V. K.; SHARMA, G.; KUMAR, A. *et al.* Recent advances in activated carbon-based adsorbents for dye removal from wastewater: A review. **Journal of Water Process Engineering**, Elsevier, v. 60, p. 105112, 2024. 34

HAALAND, Ståle. Predicting the dissolved natural organic matter (DNOM) concentration and the specific ultraviolet absorption (SUVA) index in a browning central european stream. **Ecological Indicators**, v. 165, p. 112200, 2024. 52

HILLEBRAND, F. J.; BENETTI, A. D. Caracterização da matéria orgânica dissolvida em processos de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 237–246, 2020. 61, 62

KAMELIYA, J.; GUPTA, Kumar. Layered double hydroxide materials: a review on their preparation, characterization, and applications. **Inorganics**, v. 11, n. 3, p. 121, 2023. 50

KILIÇ, L; DILSIZOĞLU-AKYOL, N; AKARSU, C; ÖLMEZ-HANCI, T. Applicability of advanced oxidation processes for the reuse of laundry wastewater. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Springer, v. 23, n. 3, p. 221, 2026. 58, 59, 60, 64, 66

KORAK, Julie A.; MCKAY, Garrett. Critical review of fluorescence and absorbance measurements as surrogates for the molecular weight and aromaticity of dissolved

organic matter. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 26, p. 1663–1702, 2024. 42, 43

LI, X. *et al.* The removal of anionic and cationic dyes from aqueous solution using biomass-based activated carbon. **Scientific Reports**, v. 11, 2021. 34

MAKAROV, D.; KUMAR, N.; MISHRA, S. Recent advances in surfactants and their applications in environmental remediation: A review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Elsevier, v. 690, p. 133890, 2024. 27

MATA, Mayline Menezes da; SANTANA, André Bento Chaves; MARTINS, Flavio Pinheiro; MEDEIROS, Maria Angélica Tavares de. Qualidade e acesso à água para consumo humano: um olhar sobre o estado do amazonas, brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, SciELO Public Health, v. 29, p. e05442023, 2024. 20

MENDONÇA, Kenia Parente Lopes. Tratamento de águas cinza provenientes de lavanderias visando reúso. Universidade Federal do Tocantins, 2019. 17

MESQUITA, Marcio *et al.* Desenvolvimento tecnológico de um filtro de areia para irrigação localizada. **Unpublished doctoral dissertation, Universidade Estadual de Campinas**, 2014. 29

MICROAMBIENTAL. **Padrão de potabilidade da água: entenda o que torna a água segura para consumo**. 2026. Acesso em: 28 fev. 2026. Disponível em: <https://microambiental.com.br>. 30

MONTEIRO, Paulo Alan Mattos *et al.* Viabilidade do reúso de águas cinzas para fins não potáveis em residências unifamiliares à luz dos parâmetros técnicos e requisitos legais no brasil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2023. 22, 23, 30, 31

MORAIS, D. G. F. *et al.* Uso de radiação UV e peróxido de hidrogênio no tratamento de água residuária doméstica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 317–325, 2020. 35, 36

MOURA, Priscila Gonçalves; ARANHA, Felipe Nicolau; HANDAM, Natasha Berendonk; MARTIN, Luis Eduardo; SALLES, Maria José; CARVAJAL, Elvira; JARDIM, Rodrigo; SOTERO-MARTINS, Adriana. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 791–808, 2020. 21, 22

MOURÃO, José Marcos Marques; COSTA, Antônio Anderson Alves da; CARVALHO, Ivis Eduardo Brito de; SANTOS, André Bezerra dos; FIRMINO, Paulo

Igor Milen. Impact of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) on the performance of an aerobic granular sludge (AGS) reactor. **Process Safety and Environmental Protection**, Elsevier, p. 108465, 2026. 27

National Research Council. **Drinking Water and Health: Volume 2**. Washington, DC: National Academy Press, 1980. Acesso em: 19 fev. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/1904>. 56

Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ): carvão ativado em pó**. 2023. 54

OLIVEIRA, Josielma Jesus dos Santos de; SILVA, Marciana Benevides; SOUZA, Valdinei Santos. Produção de sabão caseiro: uma proposta economicamente viável e ambientalmente amigável. **IFBaiano: Santa Inês**, 2021. 24

OLIVEIRA, Leandro Menezes de; ALVES, Lais Amaral. Estudo sobre modalidades de reaproveitamento de águas pluviais e reuso de águas cinzas para uso residencial. **Boletim do Gerenciamento**, v. 13, n. 13, p. 10–20, 2020. 20, 21

PALMA, Davide; KHALED, Amina; SLEIMAN, Mohamad; VOYARD, Guillaume; RICHARD, Claire. Effect of UVC pre-irradiation on the suwannee river natural organic matter (SRNOM) photooxidant properties. **Water Research**, Elsevier, v. 202, p. 117395, 2021. 57, 58, 64, 66

PENTEADO, José Carlos P.; SEOUD, Omar A. El; CARVALHO, Lilian R. F. Alquilbenzeno sulfonato linear: uma abordagem ambiental e analítica. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 29, n. 5, p. 1038–1046, 2006. 28

PES, João Hélio Ferreira; IRIGARAY, Micheli Capuano; SOUZA, Elany Almeida de. Democratização e sustentabilidade do acesso à água potável como direito humano fundamental social. **Revista de Direito Sociais e Políticas Públicas**, v. 9, n. 2, 2023. 16

PESSOA, Eliomar Gotardi; FEITOSA, Luana Machado; PEREIRA, Adonias Gomes. Efeitos de espécies de Al na eficiência de coagulação, Al-residual e propriedade dos flocos no tratamento de águas superficiais. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 6, n. 5, p. 24814–24826, 2023. 29

RAASCH, Lanna Bonella; SÁ, Ívero Pita de; SANTANA, Gregório Mateus; FERREIRA, Marcio Luis Oliveira; FELÍCIO, Roberto Carlos; SILVA, Allison Gonçalves; BRAGA, Valdeilson de Souza; AMORIM, Fábio Alan Carqueija. Adsorção de

chumbo (II) em solução aquosa usando carvão ativado do caroço da manga (*Mangifera indica* L.). **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 29, n. 4, p. e20240219, 2024. 31

RADJI, Ghania; LAKSACI, Hamza; MOUSSA, Fatah Ben; HIRI, Abderrahmane; BETTAHAR, Nourredine; CONTRERAS, Sandra; MEDINA, Francesc. Trimetallic layered double hydroxides systems as non-noble metal photocatalysts: A comparative study toward enhanced hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 163, p. 150792, 2025. 47, 48, 49, 50

REBOSO, A. R. C. *et al.* Reutilización de aguas residuales regeneradas mediante tratamiento terciario con osmosis inversa. **Agua y Territorio**, n. 15, p. 109–123, 2020. 20

RESENDE, Ingrid Daiane. Avaliação do desempenho do processo de ultrafiltração aplicado a efluentes de lavanderia visando o reúso e sua viabilidade ambiental. 2022. 28

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antonio Francisco. **Experimental Design and Process Optimization**. [S.l.]: CRC Press, 2014. 33

SÁ, Fernando Pereira de; CUNHA, Beatriz Nogueira; NUNES, Liliane Magalhães. Effect of pH on the adsorption of sunset yellow FCF food dye into a layered double hydroxide (CaAl-LDH-NO₃). **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 215, p. 122–127, 2013. 46, 47, 48

SÁ, Fernando Pereira de; NUNES, Liliane Magalhães; BORGES, Elisangela Cardoso de Lima. Tratamento de efluentes de indústria alimentícia com o uso de hidrocalumita como adsorvente. **Revista Tecnica**, v. 1, n. 1, p. 101–118, 2016. 30, 31, 32, 48, 50

SANTOS, Adriana da Silva; RODRIGUES, Marília Hortência Batista Silva; SILVA, Guilherme Veloso da; GOMES, Fernando Antonio Lima; SILVA, Joyce Naiara da; CARTAXO, Paulo Henrique de Almeida. Importância do reúso de água para irrigação no semiárido. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 2, n. 3, 2020. 21, 22

SHAIKH, Irshad N.; AHAMMED, M. Mansoor. Quantity and quality characteristics of greywater: a review. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 261, p. 110266, 2020. 22, 23

SHAO, Hongyun; SHEN, Jia; JIANG, Zili; RUAN, Xiuxiu. In-situ and long-lasting oxidation of SMX by Mg/Al-PDS LDH in soil: Key role of solid-phase activation

and CO₂ effect. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, p. 139319, 2025. 47, 48, 49, 50

SHI, C. *et al.* Review of advanced oxidation processes based on peracetic acid. **Water**, v. 14, n. 15, p. 2309, 2022. 59, 60

SINGH, Nirankar; RANDHAWA, Sonia; DUTT, Ishwar; KUMAR, Ashok. Characterization of laundry wastewater and its potential applications in garden irrigation and lavatory cleaning: a squat review. *In: AIP PUBLISHING LLC. AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2022. v. 2357, n. 1, p. 030014. 26

SOETHE, Gabriella Caroline *et al.* **Desinfecção de águas cinzas pelos métodos de cloração e radiação ultravioleta**. Florianópolis, SC: [s.n.], 2013. 16, 17

SOUZA, Hugo Henrique de Simone; MORANDI, Carlo Gottardo; BONCZ, Marc Árpád; PAULO, Paula Loureiro; STEINMETZ, Heidrun. Life cycle sustainability assessment of greywater treatment and rainwater harvesting for decentralized water reuse in brazil and germany. **Resources**, MDPI, v. 14, n. 6, p. 96, 2025. 28

SOUZA, Jôsy Suyane de Brito *et al.* Tratamento de água produzida utilizando microemulsão formulada a partir de tensoativos de origem vegetal. Universidade Federal da Bahia, 2023. 25, 27

SOUZA, R. C. *et al.* Tratamento de efluentes de lavanderia hospitalar por processo oxidativo avançado: UV/H₂O₂. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 601–611, 2019. 64, 66

SULZBERGER, Barbara; DURISCH-KAISER, Edith. Chemical characterization of dissolved organic matter (DOM): A prerequisite for understanding UV-induced changes of DOM absorption properties and bioavailability. **Aquatic Sciences**, Springer, v. 71, n. 2, p. 104–126, 2009. 57, 58

TABALIPA, Ney Lyzandro; FIORI, Alberto Pio. Caracterização e classificação dos resíduos sólidos urbanos do município de pato branco, pr. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 04, p. 23–33, 2006. 21

TANKO, Danat Bitrus; AHULLE, Wuana Raymond; CHAHUL, Habibat Faith; SAVIOUR, Iorungwa Moses. Review of adsorption isotherms models. **Applied Water Science**, Springer, 2026. 54, 55, 56, 57, 65

TEODORO, Anderson; BONCZ, Marc Árpád; PAULO, Paula Loureiro; MACHULEK, Amilcar. Desinfecção de água cinza por fotocatalise heterogênea. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 22, p. 1017–1026, 2017. 17

THAKUR, Abhinay; KUMAR, Ashish. Unraveling the multifaceted mechanisms and untapped potential of activated carbon in remediation of emerging pollutants: A comprehensive review and critical appraisal of advanced techniques. **Environmental Research**, Elsevier, v. 257, p. 119420, 2024. 34

TOMASO, Luiz Phelipe de Souza; BOMFIM, Joice Florenço; CARVALHO, Nakédia M. F.; SENRA, Jaqueline Dias; MALTA, Luiz Fernando Brum. Hidróxidos duplos lamelares em processos catalíticos para a química fina, degradação de poluentes e geração de energia limpa: uma breve revisão. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 48, n. 1, p. e-20250013, 2024. 30, 31, 32, 35, 47

TRENTIN, Amaral. **Instituto Nacional de Propriedade Industrial - Ministério da Economia Informação e documentação-Referências - Elaboração**. 2022. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/ImagemDocumentoPdfController?CodDiretoria=200&NumeroID=707c973db4910d7ab5b02c51002f367fd9aed9b5e0176c11248b6b4e4045d5e7&certificado=undefined&numeroProcesso=&ipasDoc=undefined&codPedido=902601>. Acesso em: 03 nov. 2023. 17

United States Environmental Protection Agency. **Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule**. Washington, DC: U.S. EPA, Office of Water, 2006. EPA 815-R-06-007. 57

United States Environmental Protection Agency. **Overview of Drinking Water Treatment Technologies**. Washington, DC: EPA, 2023. 33, 34

VALLAIR. **Coagulação e floculação em estação de tratamento de água**. 2025. Acesso em: 1 mar. 2026. Disponível em: <https://vallair.com.br>. 29

VARGAS, L. S. *et al.* Utilização de materiais alternativos na adsorção de contaminantes orgânicos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 54, 2024. Paginação final não informada no material fornecido. 31, 32

WEISHAAR, James L.; AIKEN, George R.; BERGAMASCHI, Brian A.; FRAM, Miranda S.; FUJII, Roger; MOPPER, Kenneth. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 37, n. 20, p. 4702–4708, 2003. 43, 52, 55

World Health Organization. Meeting of Experts on the Reuse of Effluents and Methods of Wastewater and Health Safeguards. **Reuse of Effluents: Methods**

of Wastewater Treatment and Health Safeguards, Report of a WHO Meeting of Experts. [S.l.]: WHO, 1973. 22

YADAV, M. K.; NAIR, S. J. Greywater as a sustainable alternative in water management: A review of practices and technologies. **Journal of Computational Analysis and Applications**, v. 33, n. 7, p. 2103–2114, 2024. 28

YPE. **Sabão em pó: guia completo**. 2026. Acesso em: 17 fev. 2026. Disponível em: <https://www.ype.ind.br>. 28

YUE, Y.; BASHEER, P. A. M. Raman spectroscopic investigation of friedel's salt. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 306–314, 2018. 53

YUSOP, M. F. M.; BAHARUDIN, M. H.; RASHID, M. M.; ALAM, M. M.; AHMAD, M. A. Amoxicillin adsorption onto oil palm trunk-derived activated carbon: synthesis optimization, modelling of mass transfer and ultrasonic regeneration. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 100, p. 1310–1327, 2025. 50

ZHANG, P. *et al.* Effective adsorption of sodium dodecylsulfate (SDS) by hydrocalumite (CaAlLDHCl) induced by self-dissolution and reprecipitation mechanism. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 367, n. 1, p. 264–271, 2012. 51

ZHANG, S. *et al.* Experimental investigation of chloride uptake performances of hydrocalumite-like CaAl LDHs with different microstructures. **Applied Sciences**, v. 10, n. 11, p. 3760, 2020. 50, 51

ZOTESSO, J. P.; COSSICH, E. S.; JANEIRO, V.; TAVARES, C. R. G. Treatment of hospital laundry wastewater by UV/H₂O₂ process. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 7, p. 6278–6287, 2017. 60