TRANSFORMAÇÃO DE ESGOTO SECUNDÁRIO EM RECURSO HÍDRICO ESTRATÉGICO: CARACTERIZAÇÃO E PÓS-TRATAMENTO POR COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO, OXIDAÇÃO E ADSORÇÃO EM ESTAÇÃO DE GRANDE PORTE DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Janaina de Melo Franco [(1)]
Doutora em Ciências Ambientais pela UNESP, em parceria com a UNICAMP. Atua como pós-doutoranda no Laboratório de Saneamento e Tecnologia Ambiental (LabSanTec) da EACH-USP Leste, com apoio da FAPESP.
Isabella Beatriz Guiducci do Nascimento [(2)]
Graduanda em Bacharelado em Gestão Ambiental pela EACH-USP Leste, com iniciação científica financiada pela FAPESP, atuando na área de Ciências Ambientais.
Diego Gouveia Marques [(3)]
Engenheiro Químico (UEM) e Doutor em Ciências Ambientais (UNESP), com período na University of British Columbia. Atuou 7 anos na SABESP (ETA Vargem Grande), pesquisando coagulantes sustentáveis e processos oxidativos avançados.
Valquíria de Campos [(4)]
Docente do Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP (Sorocaba), com especialização em Ciências da Terra e Engenharia Química. Pesquisa remediação in situ e síntese de nanomateriais para remoção de poluentes em água**.**
Marcelo Antunes Nolasco [(5)]
Professor Titular da USP, Livre-Docente em Saneamento e Sustentabilidade (2012), coordena o LabSanTec e Central AQuABio na EACH-USP Leste.

Endereço[(1)]: Rua Arlindo Béttio, 1000 - Ermelino Matarazzo, São Paulo - SP, CEP: 03828-000 - Brasil - Tel: +55 (11) 2648-0062 - e-mail: janaina.domingos@usp.br.

RESUMO

Este estudo avaliou a rota tecnológica de pós-tratamento aplicado a um efluente sanitário de decantador secundário proveniente de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de grande porte da região metropolitana de São Paulo, visando sua transformação em recurso hídrico para reúso não potável. A estratégia combinou coagulação/floculação (C/F) utilizando policloreto de alumínio (PAC), cavitação hidrodinâmica associada à ozonização (CH+O_3) e polimento por adsorção em carvão ativado em pó (CAP). Inicialmente, foram realizados ensaios de tratabilidade para determinar as melhores condições operacionais de pH e dosagem de coagulante, considerando a remoção de demanda química de oxigênio (DQO), cor e turbidez. A condição selecionada apresentou redução significativa da carga orgânica com menor consumo de reagentes e a aplicação sequencial dos processos combinados, promoveu remoção de até 86% de DQO, 79,8% de cor e 55,3% de turbidez. A etapa oxidativa com cavitação hidrodinâmica e ozônio destacou-se na degradação de compostos orgânicos dissolvidos, enquanto o carvão ativado contribuiu para o polimento final do efluente. Os resultados demonstram que a integração dos processos físico-químicos e oxidativos constitui uma alternativa tecnológica para proporcionar a qualidade de efluentes tratados e ampliar o potencial de reúso da água.

PALAVRAS-CHAVE: Pós-tratamento de esgoto, Reúso de água, Processo Oxidativo Avançado.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a expansão urbana têm contribuído significativamente para o aumento da geração de esgoto sanitário, tornando indispensável o desenvolvimento de tecnologias capazes de promover maior eficácia no tratamento dos efluentes e minimizar os impactos ambientais decorrentes de seu lançamento nos corpos hídricos. Embora os sistemas convencionais de tratamento biológico sejam utilizados na remoção de matéria orgânica biodegradável e sólidos suspensos, muitos compostos orgânicos dissolvidos, micropoluentes emergentes e substâncias recalcitrantes podem permanecer nos efluentes tratados (Reungoat et al., 2012). Nesse contexto, o aprimoramento dos sistemas existentes por meio de tecnologias complementares apresenta-se como uma estratégia promissora para elevar a qualidade do efluente tratado, favorecendo aplicações de reúso não potável

em conformidade com critérios estabelecidos pela NBR 13969 (ABNT, 1997) e pela Resolução CNRH nº 54/2005 (BRASIL, 2005).

A crescente preocupação com a presença de poluentes em águas residuárias tem impulsionado a busca por tecnologias de tratamento mais eficientes e sustentáveis. Processos convencionais, como a coagulação-floculação (C/F), têm sido amplamente aplicados devido à sua simplicidade e baixo custo, permitindo a remoção inicial de sólidos suspensos, turbidez e cor aparente; contudo, isoladamente, não garantem eficiência satisfatória na degradação de compostos orgânicos persistentes e altamente solúveis, nem evitam a formação significativa de lodo (Marques et al., 2025; Campos et al., 2024). Nesse contexto, processos oxidativos avançados (POA), como a cavitação hidrodinâmica associada à ozonização (CH+O_3), surgem como rotas alternativas para complementar a C/F, promovendo a geração de radicais hidroxila altamente reativos que degradam poluentes persistentes e aumentam a eficiência global do tratamento (Domingos et al., 2023). Estudos demonstram que a associação de C/F+ CH+O_3 potencializa a remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), podendo permitir o reúso de efluentes tratados (Marques et al., 2025; Campos et al., 2024; Domingos et al., 2023).

Durante a CH, as microbolhas formadas no líquido colapsam devido à inércia e compressibilidade do conteúdo gás-vapor, gerando forças de implosão extremamente elevadas. Esses colapsos produzem “hot spots” locais com temperaturas variando entre 500 e 15.000 K e pressões de 100 a 5.000 atm, que promovem alterações físico-químicas intensas no meio (Song et al., 2022; Wang et al., 2021). Além disso, a força de implosão e os efeitos de cisalhamento quebram ligações moleculares de poluentes orgânicos, promovem decomposição térmica de substâncias de alto peso molecular e podem destruir a parede celular de microrganismos, contribuindo para a degradação de matéria orgânica e desinfecção do efluente, tornando o processo uma alternativa para o tratamento avançado de efluentes industriais e urbanos (Marques et al., 2025; Campos et al., 2024). Dessa forma, a integração de C/F+CH+O_3+CAP configura um sistema híbrido alternativo afim de maximizar a remoção de matéria orgânica e reduzir o uso produtos químicos para o tratamento avançado de efluentes.

2 OBJETIVOS

Caracterizar o efluente proveniente do decantador secundário de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) e avaliar os processos de pós-tratamentos baseados na coagulação/floculação com PAC associada à cavitação hidrodinâmica e ozonização (CH+O_3) e polimento com adsorção em carvão ativado.

Como objetivos específicos, buscou-se: (i) Construir diagramas de coagulação PAC para identificação das condições ótimas de pH e dosagem, considerando turbidez e DQO como parâmetros de resposta; (ii) Aplicar o sistema integrado (C/F+CH+O_3+CAP) como pós-tratamento oxidativo da matriz de esgoto, avaliando sua eficiência na remoção de poluentes resistentes; (iii) Avaliar via espectroscopia UV-Vis, o potencial de remoção de compostos residuais e subprodutos formados durante o pós-tratamento.

3 METODOLOGIA UTILIZADA

3.1 Caracterização e Coleta de Esgoto Sanitário

O esgoto sanitário avaliado neste estudo foi coletado na saída do decantador secundário em uma ETE, localizada na região metropolitana de São Paulo, após tratamento preliminar, primário e secundário (tratamento biológico com clarificação final), em conformidade com os parâmetros básicos de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011). Foram coletados aproximadamente 100 litros de esgoto final, armazenados em frascos de polietileno de alta densidade (PEAD), refrigerados e encaminhados ao Laboratório de Saneamento e Tecnologias Ambientais (LabSanTec) da EACH-USP. Os parâmetros avaliados incluíram: varredura de absorbância de 200 nm a 900nm, turbidez (NTU), cor aparente (mg Pt Co L^{-1}), DQO (mg O_2 L^{-1}) e pH, conforme Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

3.2 Ensaios de Coagulação/Floculação (C/F) em Jar Test

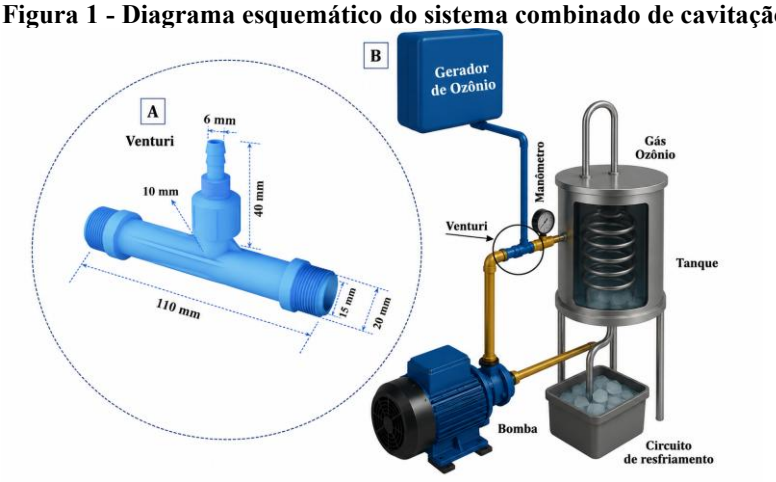
O coagulante utilizado foi o PAC (PAC 12, Bauminas), contendo 12% de Al_2O_3 e 57% de basicidade. Para os ensaios de C/F foi preparada uma solução 1% de PAC. As dosagens avaliadas variaram de 20 a 100 mg L^{-1}, explorando a variação de pH 4 a 9, adaptado de Di Bernardo et al (2011), com fase de mistura rápida de 50 segundos (120 rpm) e mistura lenta de 7 minutos (50 rpm) e sedimentação de 7 minutos. A condição escolhida

a partir do diagrama foi em pH 5 com dosagem de 20 mg L-1 de PAC, ponto de redução expressiva de DQO e com menor gasto de reagente.

3.3 Sistema de Cavitação Hidrodinâmica combinada à Ozonização (CH+O_3)

Conforme a Figura 1, o aparato experimental de CH+O_3 foi constituído por reservatório inox com capacidade nominal de 8 L, bomba centrífuga (Albacete; 0,37 kW), motor de indução WEG W48J (3470 rpm).

Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema combinado de cavitação hidrodinâmica e ozonização.



O sistema opera com vazão aproximada de 150 L min^{-1} e pressão de descarga entre 0,9 e 1,0 kgf cm^{-2}. O elemento indutor de cavitação foi um Venturi com comprimento de 110 mm, garganta de 12 mm e orifício de 10 mm, com velocidade local no estrangulamento de aproximadamente 20,6 m s^{-1}. O ozônio foi gerado por equipamento Oxclean Pleno (capacidade de até 3 g h^{-1}) e injetado no sistema via segundo Venturi, a temperatura do processo foi controlada a 24°C, cada experimento teve duração de 60 min e a configuração seguiu as especificações descritas em Domingos et al. (2023).

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Caracterização e Coleta de Esgoto Sanitário

A Tabela 1 apresenta as características físico-químicas do efluente proveniente do decantador secundário da estação de tratamento de esgoto utilizado nos ensaios de pós-tratamento.

Tabela 1 - Características físico-químicas iniciais do efluente proveniente do decantador secundário da estação de tratamento de esgoto.

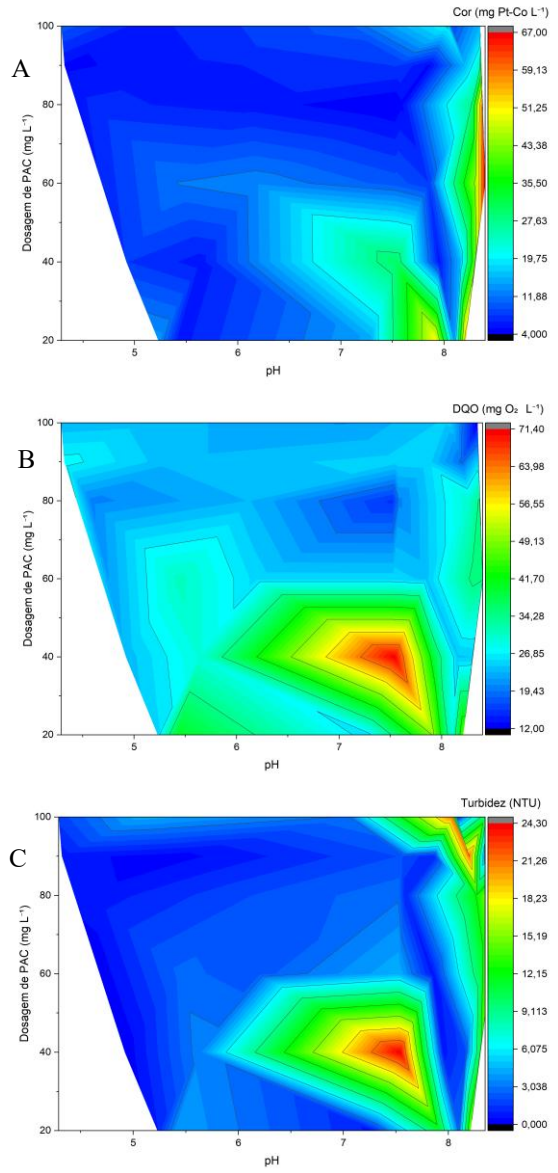
Parâmetros	Efluente secundário
pH	6,70
DQO (mg O_2 L^{-1})	166,0
Cor aparente mg (Pt-Co L^{-1})	28
Turbidez (NTU)	17,24
UV_{254} (u.a.)	0,1688

A caracterização do efluente proveniente do decantador secundário da estação de tratamento de esgoto, conforme apresentado na Tabela 1, evidencia a presença de matéria orgânica residual e compostos aromáticos que não foram totalmente removidos pelo tratamento biológico.

4.2 Diagrama de Coagulação

A Figura 2 (A, B e C) mostram os efeitos combinados do pH e da dosagem de PAC na remoção de DQO, cor e turbidez do efluente bruto.

Figura 2 - Diagramas de coagulação para a variação de PAC em função de pH



A superfície de resposta do parâmetro cor (Figura 2A) indica que a faixa operacional mais adequada para a remoção desse parâmetro situa-se entre pH 5,0 e 7,0, associada a dosagens de PAC entre 40 e 80 mg L^{-1}, condição que proporciona os menores valores residuais de cor aparente no processo. Os resultados demonstram que a remoção da turbidez (Figura 2B) é fortemente dependente da interação entre pH e dosagem de PAC. A região de melhor desempenho encontra-se entre pH 5,5 e 6,5, associada a dosagens entre 60 e 100 mg L^{-1}.

De modo geral, os resultados evidenciam que a remoção de DQO (Figura 2C) é mais dependente da dosagem de PAC do que a remoção de cor e de turbidez, exigindo concentrações mais elevadas de coagulante para atingir níveis residuais mínimos. A região compreendida entre pH 7,2 a 8,0 e dosagens de 70 a100 mg L^{-1} de PAC representa a condição operacional mais favorável para esse parâmetro, concentrando os menores valores residuais e indicando maior desempenho na remoção da matéria orgânica presente na água.

Em análise conjunta das superfícies de resposta, ocorre a interdependência entre pH e dosagem do coagulante (PAC). Embora cada variável apresente uma região específica de máxima remoção, a sobreposição das superfícies de resposta permitiu identificar uma faixa operacional de maior desejabilidade global, situada entre pH 6,8 e 7,5, associada a dosagens de 60 a 80 mg L^{-1} de PAC. Ainda que essa faixa represente o ótimo conjunto, a condição selecionada para as etapas subsequentes do tratamento foi pH 5,0 e dosagem reduzida de PAC (20 mg L^{-1}). O resultado demonstra ser possível equilibrar a eficiência de remoção da matéria orgânica

com uma redução expressiva no consumo de reagente químico, o que representa vantagem operacional e econômica relevante frente ao ganho marginal de desempenho obtido na faixa de maior dosagem.

4.3 Desempenho do Pós-Tratamento Combinado

A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos para DQO, cor aparente e turbidez ao longo das diferentes etapas de tratamento do efluente proveniente do decantador secundário e submetido à combinação de tratamentos.

Tabela 2 – Eficiência de remoção de DQO, cor e turbidez em cada etapa do tratamento

Etapa de tratamento	Parâmetros Globais			Remoção (%)		
	DQO (mg O_2 L^{-1})	Cor (mg Pt-Co L^{-1})	Turbidez (NTU)	DQO (mg O_2 L^{-1})	Cor (mg Pt-Co L^{-1})	Turbidez (NTU)
Esgoto Final (Bruta)	166,0 ± 0,0	28,0 ± 0,0	17,24 ± 0,00	–	–	–
C/F	38,4 ± 13,2	17,0 ± 1,7	2,46 ± 1,48	76,9	39,3	85,7
C/F+CH+O_3	23,4 ± 4,3	8,0 ± 4,4	2,26 ± 1,35	85,9	71,4	86,9
C/F+CH+O_3+ CAP	23,2 ± 2,9	5,7 ± 7,2	7,71 ± 11,03	86,0	79,8	55,3

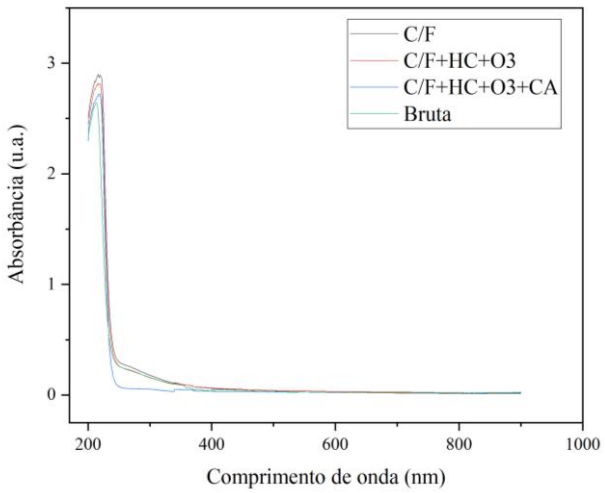
Observa-se que a remoção de turbidez ocorreu predominantemente na etapa de C/F (85,7%), consistente com o mecanismo de neutralização de cargas e varredura característico do PAC sobre a fração particulada e coloidal. A remoção de cor nessa mesma etapa foi comparativamente baixa (39,3%), refletindo a menor afinidade do processo pela fração de matéria orgânica dissolvida.

A incorporação da cavitação hidrodinâmica com ozônio (C/F+CH+O_3) elevou a remoção de cor de 39,3% para 71,4%, com ganho adicional discreto em DQO (76,9% para 85,9%) e sem efeito sobre a turbidez (85,7% para 86,9%). O padrão indica seletividade da etapa oxidativa pela fração dissolvida, sem interferência sobre o material particulado já removido.

O polimento com carvão ativado em pó (C/F+CH+O_3+CAP) resultou na maior remoção de cor entre as etapas avaliadas (79,8%), com incremento marginal em DQO (86,0%). Observou-se, no entanto, redução na eficiência de remoção de turbidez (86,9% para 55,3%), atribuída à liberação de finos de carvão não retidos na etapa de separação sólido-líquido subsequente à adsorção.

A Figura 3 apresenta os espectros UV-Vis obtidos para o esgoto sanitário proveniente do decantador secundário após as diferentes etapas de pós-tratamento.

Figura 3 - Espectros de absorção UV-Vis



Conforme é apresentado pela Figura 3, as varreduras espectrofotométricas (200–900 nm) das amostras bruta e tratadas apresentam perfil qualitativamente semelhante entre si, com banda de absorção pronunciada na região de 200–230 nm e decaimento acentuado entre 230 e 280 nm, seguido de estabilização próxima de zero a partir de ~350 nm até o limite superior da varredura (900 nm).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente estudo, a C/F com carvão ativado em pó (PAC) demonstrou elevada eficiência na remoção inicial da carga poluidora do efluente secundário, reduzindo a demanda química de oxigênio (DQO) média de 166,0 para 38,4 mg O_2 L^{-1} (76,9%) e a turbidez de 17,24 para 2,46 NTU (85,7%). A diminuição da cor aparente de 28 para 17 mg Pt-Co L^{-1} indica que a etapa preliminar removeu parcialmente os compostos cromóforos por mecanismos de adsorção e floculação, corroborando estudos prévios que ressaltam a C/F como etapa essencial antes de processos oxidativos avançados, favorecendo a remoção de sólidos suspensos e partículas coloidais (Guillossou et al., 2020; Reungoat et al., 2012; Wang et al., 2021).

A integração C/F+CH+O_3 promoveu uma degradação adicional da matéria orgânica, reduzindo a DQO para 23,4 mg O_2 L^{-1} e a cor aparente para 8 mg Pt-Co L^{-1}, correspondendo a remoções globais de 85,9% e 71,4%, respectivamente. Esse efeito é atribuído à geração de radicais hidroxila altamente reativos durante a cavitação e à formação de subprodutos oxidativos pela ozonização, que atuam na quebra de ligações químicas complexas e transformam compostos recalcitrantes em moléculas mais biodegradáveis, em concordância com os estudos de Song et al. (2022) e Wang et al. (2021) sobre a sinergia entre CH e processos oxidativos na degradação de contaminantes persistentes (Lebiocka, 2020).

A etapa C/F+CH+O_3+CAP evidenciou redução adicional da cor para 5,7 mg Pt-Co L^{-1}, enquanto a DQO manteve-se praticamente estável (23,2 mg O_2 L^{-1}), indicando que o carvão ativado atua principalmente na remoção de subprodutos oxidativos residuais e ajuste da coloração, sem impacto expressivo sobre DQO ou turbidez. Análises espectroscópicas UV-Vis confirmaram a remoção de compostos aromáticos remanescentes, reforçando a importância da adsorção pós-ozonização para alcançar a qualidade do efluente final não potável (Reungoat et al., 2012; Guillossou et al., 2020; Song et al., 2022).

Os resultados indicam que a combinação C/F+CH+O_3+CA representa uma rota alternativa para a produção de efluentes tratados de qualidade aprimorada, minimizando a presença de compostos orgânicos recalcitrantes e subprodutos tóxicos. Este arranjo combina mecanismos físicos (floculação), químicos (oxidação avançada) e adsorventes (carvão ativado em pó), resultando em maior remoção global, em linha com as tendências de tecnologias híbridas para tratamento de águas residuais apontadas na literatura (Wang et al., 2021; Song et al., 2022; Lebiocka, 2020).

Em síntese, a integração de processos físicos-químicos e avançados permite não apenas a degradação de DQO e compostos cromóforos, oferecendo um modelo alternativo para tratamento de efluentes com potencial de reúso e seguro para remoção de micropoluentes (Reungoat et al., 2012; Guillossou et al., 2020).

6 CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A caracterização do esgoto sanitário (Bruta) mostrou a presença significativa de matéria orgânica residual, compostos aromáticos e sólidos coloidais, indicando que, para o reúso não potável existe necessidade de pós-tratamento. A faixa de pH levemente neutra permite a operação da C/F com PAC com baixa necessidade de correção alcalina, equilibrando eficácia na remoção de DQO, turbidez e cor com consumo reduzido de reagentes químicos. A combinação de C/F+CH+O_3 destacou-se como a etapa eficaz na degradação de matéria orgânica dissolvida e compostos cromóforos, promovendo redução expressiva da cor aparente e da absorbância UV Vis.

Em síntese, a integração de C/F+CH+O_3+CAP constitui um sistema híbrido para o pós-tratamento de efluentes secundários, oferecendo flexibilidade operacional e subprodutos químicos. Estudos em escala piloto estão sendo realizados para otimizar os ajustes de pH, dosagens, tempos de contato e remoção de micropoluentes emergentes, consolidando a viabilidade do reúso de água tanto para os setores públicos e privados em saneamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALTMANN, J.; MASSA, L.; SPERLICH, A.; GNIRSS, R.; JEKEL, M. UV254 absorbance as real-time monitoring and control parameter for micropollutant removal in advanced wastewater treatment with powdered activated carbon. Water Research, v. 94, p. 240-245, 2016.

2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22. ed. Washington, D.C.: American Water Works Association; Water Environment Federation, 2012.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13969: Tanques sépticos Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

4. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2011.

5. BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2005.

6. CAMPOS, V.; DOMINGOS, J.; NOLASCO, M. *Assessment of treatability of the Tietê River through a process of coagulation-flocculation associated with hydrodynamic cavitation and ozonation*. *An Acad Bras Cienc*, v. 96, p. e20230856, 2024.

7. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B.; VOLTAN, P. E. N. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: Ed. LDiBe, 2011.

8. DOMINGOS, J.; NEVES, T.; MAIA, D. L. et al. *Effect of the association of coagulation/flocculation, hydrodynamic cavitation, ozonation and activated carbon in landfill leachate treatment system. Scientific Reports*, v. 13, 9502, 2023.

9. GUILLOSSOU, R.; LE ROUX, J.; BROSILLON, S.; MAILLER, R.; VULLIET, E.; MORLAY, C.; NAULEAU, F.; ROCHER, V.; GASPERI, J. *Benefits of ozonation before activated carbon adsorption for the removal of organic micropollutants from wastewater effluents. Chemosphere*, v.245, p.125530, 2020.

10. LEBIOCKA, M. *Application of hydrodynamic cavitation to improve the biodegradability of municipal wastewater. Journal of Ecological Engineering*, v.21, n.6, p.155-160, 2020.

11. MARQUES, D.; DOMINGOS, J.; NOLASCO, M.; CAMPOS, V. Textile effluent treatment using coagulation-flocculation and a hydrodynamic cavitation reactor associated with ozonation. *Chemical Engineering Science*, v. 304, 121094, 2025.

12. REUNGOAT, J.; ESCHER, B.I.; MACOVA, M.; ARGAUD, F.X.; GERNJAK, W.; KELLER, J. *Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents. Water Research*, v.46, n.3, p.863-872, 2012.

13. SONG, Y.; HOU, R.; ZHANG, W.; LIU, J. *Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for various sewage: A review. Water Science and Technology*, v.86, n.2, p.302-320, 2022.

14. WANG, B.; SU, H.; ZHANG, B. *Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. Chemical Engineering Journal*, v.412, p.128685, 2021.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/13203-4