

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, Luiz Gustavo Rodrigues Godoy, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 26/02/2027.



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 


Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

LUIZ GUSTAVO RODRIGUES GODOY

**REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO DA ÁGUA VIA COAGULAÇÃO-
FLOCULAÇÃO COM O USO DE COAGULANTES SINTÉTICO E
NATURAL**

São José dos Campos
2025



LUIZ GUSTAVO RODRIGUES GODOY

**REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO DA ÁGUA VIA COAGULAÇÃO-
FLOCULAÇÃO COM O USO DE COAGULANTES SINTÉTICO E
NATURAL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

São José dos Campos
2025



Godoy, Luiz Gustavo Rodrigues

Remoção de microplástico da água via coagulação-floculação com o uso de coagulantes sintético e natural / Luiz Gustavo Rodrigues Godoy. - Bauru, 2025

76 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Adriano Gonçalves dos Reis

Coorientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. Microplástico. 2. Floculação lastreada. 3. Moringa oleifera. 4. Coagulação-Floculação. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LUIZ GUSTAVO RODRIGUES GODOY, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 25 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LUIZ GUSTAVO RODRIGUES GODOY, intitulada **REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO DA ÁGUA VIA COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO COM O USO DE COAGULANTES SINTÉTICO E NATURAL**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ADRIANO GONÇALVES DOS REIS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus São José dos Campos, Prof. Dr. DAGOBERTO YUKIO OKADA (Participação Virtual) do(a) FT / UNICAMP/Limeira (SP), Profa. Dra. ROSANE FREIRE BOINA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Química e Bioquímica / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ADRIANO GONÇALVES DOS REIS



Documento assinado digitalmente

ADRIANO GONCALVES DOS REIS

Data: 25/02/2025 14:55:50-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dedico essa dissertação aos meus pais, **Maria Aparecida Rodrigues Godoy e Vandil Godoy**, e a minha avó **Yolanda Esbriça Godoy** (*in memoriam*), com todo o meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que contribuíram para esta pesquisa.

Aos meus pais, Maria Aparecida Rodrigues Godoy e Vandil Godoy, a minha avó Yolanda Esbriça Godoy (*in memoriam*), por todo amor, apoio e incentivo nos momentos difíceis.

A minha namorada, Nathália Maria Ferreira Gonçalves, por me apoiar na conquista dos meus sonhos. Obrigada por ser presente na minha trajetória.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis, por tornar a pesquisa possível, por todos os ensinamentos que contribuíram com o meu desenvolvimento e por todo o suporte nos momentos difíceis.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Rodrigo Braga Morrúzi, por toda ajuda, ensinamentos e conselhos para o desenvolvimento do trabalho. Ao Dr. Pedro Grava por ensinar e dar suporte com a metodologia de análise não-intrusivas com imagens.

Agradeço a todos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, aos professores pelas contribuições e sugestões e aos funcionários pelo auxílio, em especial a Vanessa Pereira, Douglas Garrão e Clodoaldo Almeida pelo apoio nos experimentos.

Agradeço pelo excelente trabalho os alunos de iniciação científica Maria Gabrielle Custódio por toda ajuda na execução dos ensaios com a *Moringa oleifera* e Bruno Barreto pela ajuda com os ensaios com água superficial. As alunas de intercâmbio Florencia Olgin e Sanja Pejčić pela participação nos experimentos no laboratório. A Carrie Melo por toda ajuda e participação nos experimentos.

Ao ICT/UNIFESP de São José dos Campos pelas análises de MEV, tamanho de partícula e potencial zeta.

A Dra. Cely Roledo e a CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo pela ajuda com a análise de teor de proteína da extração salina da *M. oleifera*.

A SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo por fornecer água do rio Paraíba do Sul para realização dos experimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2022/16772-1.

Meus sinceros agradecimentos a todos!

Resumo

A poluição ambiental e os riscos à saúde causados por microplásticos (MPs) na água têm atraído grande preocupação. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a capacidade de remoção do MP policloreto de vinila (PVC) em água sintética (produzida a partir de água de torneira) e de fonte superficial (rio Paraíba do Sul) via coagulação, floculação e sedimentação (CFS) em ensaios de *jar test* utilizando coagulante sintético (sulfato de alumínio - SA) e natural (extrato salino da semente de *M. oleifera* - MO). Com o intuito de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos formados e otimizar a remoção do MP também foram realizados ensaios com adição do floculante sintético poliacrilamida aniônica (PAM), natural alginato de sódio (AS) e utilizando floculação lastreada. Ensaios não-intrusivos com imagens foram realizados para monitorar o tamanho dos flocos e velocidade média de sedimentação. Utilizando água sintética e somente o coagulante SA com floculação convencional foi obtido uma remoção máxima de $78,2\% \pm 7,4\%$ do MP PVC em 3,5 min de sedimentação, formando flocos de diâmetro médio (d_m) de 282 μm e uma velocidade média de sedimentação (v_s) de 0,7 cm/min. Com a floculação lastreada a remoção aumentou para $99,6\% \pm 0,01\%$, formando flocos com d_m de 481 μm e v_s de 120 cm/min. O coagulante natural MO na água sintética promoveu uma remoção máxima de $69,0 \pm 1,7\%$ em 60 min de sedimentação, proporcionando flocos com d_m de 63,5 μm e v_s de 0,54 cm/min, porém, com a adição do floculante natural a remoção aumentou para $85,2 \pm 1,8\%$. Para floculação lastreada o uso do MO e PAM reduziu em 17 vezes o tempo de sedimentação, proporcionando uma remoção de $72,2 \pm 0,6\%$ em 3,5 minutos de sedimentação, flocos com d_m de 100,0 μm e v_s de 21,4 cm/min. No estudo de caso utilizando água do rio Paraíba do Sul foram obtidas através das condições típicas de operação de sistemas de tratamento remoções de turbidez de $48,7 \pm 10,99\%$ após 3,5 minutos de sedimentação utilizando SA e $91,1 \pm 2,02\%$ após 60 minutos de sedimentação utilizando MO. Estudos adicionais são requeridos para contabilizar o MP PVC em água natural. Os resultados obtidos com floculação lastreada foram similares aos observados no tratamento de MPs de PVC em água de torneira, evidenciando o potencial do método para diferentes tipos de água.

Palavras-chave: policloreto de vinila, floculação lastreada, sulfato de alumínio, *Moringa oleifera*, monitoramento por imagens não-intrusivas

Abstract

Environmental pollution and health risks caused by microplastics (MPs) in water have garnered significant concern. In this context, the main objective of this study was to evaluate the removal efficiency of polyvinyl chloride (PVC) MPs from synthetic water (prepared from tap water) and surface water (Paraíba do Sul River) using coagulation, flocculation, and sedimentation (CFS) through jar test experiments with synthetic coagulant (aluminum sulfate - SA) and natural coagulant (saline extract from *Moringa oleifera* seeds - MO). To enhance the settling velocity of the formed flocs and optimize MP removal, additional tests were conducted with the synthetic flocculant anionic polyacrylamide (PAM), the natural flocculant sodium alginate (AS), and using ballasted flocculation. Non-intrusive imaging experiments were conducted to monitor floc size and average settling velocity. Using synthetic water and only the coagulant SA under conventional flocculation, a maximum PVC MP removal of $78.2\% \pm 7.4\%$ was achieved in 3.5 minutes of sedimentation, forming flocs with an average diameter (d_m) of $282 \mu\text{m}$ and an average settling velocity (v_s) of 0.7 cm/min . Ballasted flocculation increased the removal efficiency to $99.6\% \pm 0.01\%$, forming flocs with a d_m of $481 \mu\text{m}$ and v_s of 120 cm/min . The natural coagulant MO in synthetic water achieved a maximum removal of $69.0\% \pm 1.7\%$ within 60 minutes of sedimentation, forming flocs with d_m of $63.5 \mu\text{m}$ and v_s of 0.54 cm/min . However, with the addition of the natural flocculant, removal increased to $85.2\% \pm 1.8\%$. For ballasted flocculation, the use of MO and PAM reduced the sedimentation time by 17 times, achieving a removal of $72.2\% \pm 0.6\%$ within 3.5 minutes of sedimentation, forming flocs with d_m of $100.0 \mu\text{m}$ and v_s of 21.4 cm/min . In the case study using water from the Paraíba do Sul River, typical operational conditions of treatment systems led to turbidity removals of $48.7\% \pm 10.99\%$ after 3.5 minutes of sedimentation with SA and $91.1\% \pm 2.02\%$ after 60 minutes with MO. Additional studies are required to quantify PVC MPs in natural water. The results obtained with ballasted flocculation were similar to those observed in the treatment of PVC MPs in tap water, highlighting the potential of this method for different water types.

Keywords: polyvinyl chloride, ballasted flocculation, aluminum sulfate, *Moringa oleifera*, non-intrusive imaging monitoring

Índice de Figuras

Figura 1 – Metodologia para obter a farinha de <i>Moringa oleifera</i>	42
Figura 2 – Metodologia de extração salina da semente de <i>Moringa oleifera</i>	43
Figura 3 – Curva de calibração da turbidez (UNT) em função da concentração de PVC em mg/L	49
Figura 4 – Eficiência do tratamento com coagulação utilizado diferentes dosagens de SA em pH 6,5 e floculação convencional para a remoção de: a) turbidez; b) cor aparente; c) cor real; e d) UV254.	50
Figura 5 – Eficiência do tratamento com coagulação utilizado diferentes dosagens de MO em pH 7,0 e floculação convencional para a remoção de: a) turbidez; b) cor aparente; c) cor real; e d) UV254.	52
Figura 6 – Eficiência do tratamento com coagulação utilizado 30 mg/L de SA em pH 6,5 e floculação lastreada para a remoção de: a) turbidez; b) cor aparente; c) cor real; e d) UV254.	54
Figura 7 – Eficiência do tratamento com coagulação utilizado 30 mg/L de MO em pH 6,5 e floculação lastreada para a remoção de: a) turbidez; b) cor aparente; c) cor real; e d) UV254.	56

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Metodologias e equipamentos utilizados para os parâmetros avaliados	44
Tabela 2 - Condições dos ensaios de <i>jar test</i> via floculação convencional.....	46
Tabela 3 - Condições dos ensaios de <i>jar test</i> via floculação lastreada	46
Tabela 4 – Caracterização físico-química da água utilizada nos ensaios	48

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	IV
SUMÁRIO	V
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 ARTIGO PUBLICADO: “ENHANCED REMOVAL OF MICROPLASTICS FROM DRINKING WATER USING BALLASTED FLOCCULATION: A COMPARATIVE STUDY WITH CONVENTIONAL METHODS USING NON-INTRUSIVE IMAGE ANALYSIS”	7
4 ARTIGO SUBMETIDO: “ENHANCING MICROPLASTICS AGGREGATE SETTLING VELOCITY THROUGH BALLASTED FLOCCULATION VIA NATURAL-BASED COAGULANTS AND NONINTRUSIVE IMAGE MONITORING”	9
4.1 MANUSCRIPT.....	9
4.2 SUPPLEMENTARY DATA	40
5 ÁGUAS SUPERFICIAIS - MATERIAIS E MÉTODO	42
5.1 MATERIAIS.....	42
5.2 ÁGUA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO	44
5.3 ENSAIO DE CORRELAÇÃO ENTRE TURBIDEZ E CONCENTRAÇÃO DE PVC.....	45
5.4 ENSAIOS EM JAR TEST.....	45
5.4.1 <i>Floculação convencional</i>	45
5.4.2 <i>Floculação lastreada</i>	46
5.5 ANÁLISE DOS DADOS.....	47
6 ÁGUAS SUPERFICIAIS - RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO.....	48
6.2 DETERMINAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DO MP DE PVC E TURBIDEZ	49
6.3 FLOCULAÇÃO CONVENCIONAL	49
6.4 FLOCULAÇÃO LASTREADA	54

7	ÁGUAS SUPERFICIAIS – CONCLUSÕES	59
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	60
8.1	PRINCIPAL.....	60
8.2	RECOMENDAÇÕES.....	60
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são polímeros orgânicos sintéticos amplamente utilizados no cotidiano e nas indústrias devido às suas propriedades físicas e químicas, como boa ductilidade, durabilidade, leveza e baixo custo (TONG *et al.*, 2022). A produção em larga escala desse material iniciou em 1950, e estima-se que 8,9 bilhões de toneladas de plásticos primários (ou virgens) e secundário (produzidos de material reciclável) já foram fabricados, sendo projetado que até 2050 a produção global atinja 33 bilhões de toneladas (GEYER *et al.*, 2017; SHARMA *et al.*, 2020).

Em 2023, a produção mundial de plásticos no ano foi estimada em 413,8 milhões de toneladas, um aumento de 13,5 milhões de toneladas em relação ao ano anterior. Os plásticos mais produzidos foram o polietileno (PE), com 26,2%; o polipropileno (PP), com 19,0%; e o policloreto de vinila (PVC), com 12,8% da produção global (Plastic Europe, 2024). No entanto, apenas cerca de 55% dos plásticos produzidos são recicláveis devido à contaminação, enquanto o restante é destinado a aterros sanitários ou se acumula em ecossistemas naturais, existindo amplo consenso sobre suas consequências negativas ao meio ambiente (BAUER *et al.*, 2022; KAMPMANN *et al.*, 2019; TONG *et al.*, 2022).

Após serem descartados, os resíduos plásticos passam por processos mecânicos, de biodegradação e foto-oxidação, formando detritos plásticos, que são classificados como microplásticos, quando a partícula possui tamanho entre 0,1 μm e 5 mm e nanoplásticos, quando seu tamanho é inferior a 0,1 μm (MA *et al.*, 2019a). Os microplásticos podem ser categorizados como primários, sendo partículas de polietileno, polipropileno, poliestireno e policloreto de vinila ou secundários, sendo fibras de poliéster, acrílico e poliamida (SKAF *et al.*, 2020).

Parte dos microplásticos se acumulam em ambientes aquáticos, como rios, lagos e oceanos e são facilmente transportados em longas distâncias por meio de processos hidrodinâmicos e correntes oceânicas (MA *et al.*, 2019b; SHEN *et al.* 2020). Koelmans *et al.* (2019) identificaram a presença de microplásticos em água potável e em suas principais fontes de água doce, incluindo rios e lagos, águas subterrâneas, água da torneira e água potável engarrafada, e também em estações de tratamento de efluentes.

Como resultado, a presença de microplástico em ambientes aquáticos causa graves perdas econômicas, problemas ambientais e de saúde, sendo considerado um novo tipo de poluente emergente (MA *et al.*, 2019a). Dentre os problemas, os microplásticos podem

adsorver uma variedade de contaminantes, devido à sua carga de superfície negativa, grande área de superfície e forte hidrofobicidade, sendo um excelente transportador de produtos químicos orgânicos tóxicos, metais pesados e antibióticos, o que pode agravar a toxicidade no ambiente e em organismos aquáticos (MA *et al.*, 2019b; ZHOU *et al.*, 2021). Além disso, uma variedade de microrganismos e patógenos nocivos podem se estabelecer nas partículas de microplásticos (TONG *et al.*, 2020).

O problema se torna ainda mais crítico para a sociedade quando relacionamos com água potável para consumo, representando uma ameaça potencial à saúde humana e colocando a questão no topo das agências de saúde pública no mundo (KOELMANS *et al.*, 2019). Estudos recentes identificaram a presença de microplásticos na água de abastecimento que é utilizada para consumo na China, em amostras de água após tratamento em 3 estações de tratamento de água (ETA's) na República Tcheca e após tratamento em uma ETA na Suécia (KIRSTEIN *et al.*, 2021; TONG *et al.*, 2020; PIVOKONSKY *et al.*, 2018).

O tratamento de água de abastecimento pelo ciclo completo, normalmente utilizado pelas ETAs no Brasil (IBGE, 2017), passa pelas etapas de coagulação, floculação e sedimentação. A etapa de coagulação tem como objetivo reduzir as forças que mantêm separados as partículas no estado coloidal, através da adição de coagulantes na suspensão para que as partículas se agreguem e formem precipitados que varram as partículas da suspensão ou adsorva os constituintes dissolvidos. A floculação consiste em fornecer condições para facilitar o contato e agregação de partículas desestabilizadas em partículas maiores conhecidas como “flocos”. A sedimentação é uma operação unitária na qual, em decorrência da ação da gravidade, as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio fluido de menor massa específica, promovendo a clarificação do meio através da separação sólido-líquido (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Porém, poucos estudos no mundo foram realizados para avaliar a eficiência do processo de tratamento de água de abastecimento via ciclo completo para a remoção de microplásticos (SHEN *et al.*, 2020). E, dentre estes estudos, os microplásticos normalmente estudados são o PE e o PS (poliestireno), por estarem entre os mais produzidos e encontrados na forma de microplásticos.

Zhou *et al.* (2021) estudaram, via ensaios de *jar test*, a remoção de PE e PS utilizando os coagulantes PAC (Cloreto de polialumínio) e cloreto férrico em diferentes dosagens para determinar a melhor condição para remoção. Foi verificado que utilizando 90 mg/L de PAC é obtido o melhor resultado com a remoção de 29,70% de PE e 77,83%

de PS. No entanto, essas eficiências foram alcançadas após 30 minutos de sedimentação, enquanto, nas estações de tratamento de água (ETAs), o tempo usual de sedimentação é de aproximadamente 3,5 minutos (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Ma *et al.* (2019b) avaliaram, via *jar test*, a eficiência de remoção de PE via coagulação-floculação-sedimentação utilizando os coagulantes primários cloreto de alumínio e cloreto férrico e do floculante poliacrilamida aniônica (PAM). A melhor remoção encontrada foi de 61,19% para o PE com tamanho de partícula < 0,5 mm, com as dosagens de 60 mg/L de cloreto de alumínio e 15 mg/L de PAM, após 30 min de sedimentação.

O PVC, apesar de listar entre os polímeros mais produzidos (3º lugar) e entre os microplásticos mais encontrados (4º lugar) na água potável e em suas principais fontes de água doce (Koelmans *et al.*, 2019), apresenta uma literatura muito escassa referente a estudos da eficiência de remoção deste MP no tratamento de água via coagulação-floculação-sedimentação. Prokopova *et al.* (2021) avaliaram a remoção de PVC com tamanho de partícula < 50 µm, numa suspensão de 10 mg/L de PVC em água HPLC ultrapura, com o uso dos coagulantes sulfato férrico (20 mg/L) e sulfato de alumínio (20 a 60 mg/L), pH de 7 a 8 com 30 min de floculação e 2 h de sedimentação, atingindo uma remoção máxima de 80% do PVC, para ambos os coagulantes. Wiśniowska *et al.* (2024) investigaram a remoção de MP de PVC (60 a 100 µm), em água natural coletada de um reservatório e contaminada artificialmente em laboratório. Os autores utilizaram sulfato ferroso (10 a 80 mg/L) e sulfato de alumínio (10 a 80 mg/L) como coagulantes, associados ao floculante Praestol (0,4 mg/L), em condições de pH entre 7,6 e 7,8, com 30 minutos de floculação e 1 hora de sedimentação. O estudo alcançou uma remoção máxima de 95%. Não foram identificados na literatura outros estudos abordando a remoção de PVC em água de laboratório ou em fontes superficiais, como rios.

O PVC apresenta uma densidade média de 1,40 g/cm³, que é superior aos outros MPs normalmente encontrados na água, tais como PET (1,38 g/cm³), PS (1,05 g/cm³), PEAD (0,96 g/cm³) e PEBD (0,92 g/cm³) (QUEIROZ, 2022). Mas a sedimentabilidade do PVC, como das partículas em suspensão em geral, é limitada pelo tamanho da partícula. Comparativamente, partículas de caulim, normalmente utilizadas em ensaios de laboratório de coagulação-floculação-sedimentação via *jar test*, apresentam uma densidade média de 2,65 g/cm³ (NASSER, JAMES; 2006). De acordo com a Lei de Stokes, uma partícula de PVC teria uma velocidade de sedimentação 4 vezes menor que uma partícula de mesmo diâmetro de caulim (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Isto justifica o longo tempo de sedimentação (2 h) apresentado por Prokopova *et al.* (2021) para conseguir remover 80%

do PVC coagulado e floculado. As partículas formadas entre PVC e floco do coagulante provavelmente apresentam baixa densidade, resultando em uma baixa velocidade de sedimentação, o que demandaria, na prática, grandes áreas de sedimentação (CRITTENDEN *et al.*, 2012), o que se torna inviável em áreas urbanas.

Portanto, otimizar o tamanho e a densidade do floco é fundamental na coagulação-floculação-sedimentação para aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos coagulados formados e remoção de MPs. Sendo assim, existe a necessidade de desenvolver uma técnica de separação sólido-líquido que seja mais rápida que a coagulação-floculação-sedimentação convencional.

A floculação lastreada (nome comercial: ACTIFLO®) foi desenvolvida na década de 1990 como uma técnica inovadora de separação sólido-líquido (DESJARDINS *et al.*, 2022). Esse processo usa microareia e polímero floculante para acelerar o processo de sedimentação, formando grandes flocos com alta densidade específica (LAPOINTE e BARBEAU, 2016). Assim, torna a sedimentação do floco mais rápida do que a coagulação-sedimentação baseada em floculantes inorgânicos convencionais (BRAHMI *et al.*, 2018). A floculação com lastro tem sido empregada em vários processos de separação sólido-líquido, incluindo o tratamento de água de abastecimento (LAPOINTE e BARBEAU, 2018; KUMAR *et al.*, 2019; QASIM *et al.*, 2019; MURUJEW *et al.*, 2020). Esta tecnologia apresenta-se, portanto, atrativa para ser estudada na remoção de MPs da água, porém poucos estudos são reportados na literatura referente ao uso da floculação com lastro para remoção de microplásticos.

Lapointe *et al.* (2020) avaliaram a remoção dos microplásticos PE (15 e 140 μm), PS (140 μm) e poliéster (PEST) (90 μm) utilizando sulfato de alumínio e cloridrato de alumínio como coagulantes. A coagulação foi realizada a 600 rpm por 2 min, quando então foi adicionado 4 g/L de microareia GA39 (d_{50} de 130 μm) e floculante poliacrilamina (PAM) aniônica, iniciando então a floculação com lastro à 300 rpm por 4 min. A sedimentação foi mantida por 1 min, quando então uma amostra a 3 cm de profundidade (velocidade de sedimentação de 3 cm/min) era retirada. As melhores remoções de microplástico alcançadas foram de 99% para PEST, 82% para PE e 84% para PS na dosagem de 2,73 mg/L de Al e 0,3 mg/L de PAM. Observa-se um aumento significativo na velocidade de sedimentação (1 min de sedimentação), versus estudos anteriores quando se sedimentava por até 2 h (PROKOPOVA *et al.* 2021).

O uso potencial de coagulantes à base de plantas, como a semente de *Moringa oleifera*, é outro caminho importante para investigação de possível aplicação para aumento

de escala da abordagem de coagulação-floculação para remoção de microplásticos (RODRÍGUEZ-NARVAEZ *et al.* 2021). No entanto, a literatura ainda é muito escassa em relação a aplicação deste coagulante para remoção de MPs. Isso ocorre apesar de sua alta eficiência relatada para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos em suspensão na água quando usado como coagulante primário (CHALES *et al.* 2022; RIBEIRO *et al.* 2022; VEGA ANDRADE *et al.* 2021).

Com isso, é de interesse científico realizar estudos para avaliar o potencial de remoção de microplásticos adotando tratamento de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação utilizando coagulante natural (semente de *M. oleifera*) e sintético (sulfato de alumínio) em água de torneira e de fonte superficial (rio), além de propor uma melhoria na eficiência de remoção via floculação com lastro para aumento da velocidade de sedimentação.

Esta dissertação é apresentada na forma de um artigo científico já publicado (Seção 3), um artigo científico submetido (Seção 4), e resultados adicionais com o uso de águas superficiais (Seções 5 e 6). O artigo já publicado apresentado na Seção 3 apresenta a capacidade de remoção do MP de PVC utilizando o coagulante químico sulfato de alumínio com o uso de água de torneira com MP de PVC. O artigo submetido apresentado na Seção 4 consiste nos resultados sobre a capacidade de remoção do MP de PVC utilizando o coagulante natural da semente de *Moringa oleifera* e floculante natural alginato de sódio, também com o uso de água de torneira com MP de PVC. Os resultados adicionais apresentados nas Seções 5 e 6 se referem ao uso dos coagulantes sulfato de alumínio e da semente de *Moringa oleifera* para o tratamento de água superficial natural do Rio Paraíba do Sul (SP, Brasil) contaminado com MP de PVC em laboratório.

Este mestrado se enquadra ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU nº 6 (Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos) e nas áreas de tecnologia prioritárias definidas pelo MCTIC de Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável (setor V – Tratamento de Poluição) e de Tecnologias para Qualidade de Vida (setor II – Saneamento Básico).

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Principal

Esta dissertação avaliou a capacidade de remoção do microplástico (MP) de policloreto de vinila (PVC) adicionada em laboratório em água de torneira e água de rio, através do processo de coagulação-floculação-sedimentação (CFS). Para o tratamento foi avaliado o coagulante sintético sulfato de alumínio (SA) e natural extração salina da semente de *Moringa oleifera* (MO), em diferentes dosagens e pHs para determinar as condições ótimas para remoção do microplástico de estudo na água de estudo.

A quantificação da remoção do MP PVC de forma indireta através da análise de turbidez se mostrou eficiente para água de torneira, visto que as partículas em suspensão serem somente devido ao MP PVC adicionado. Porém, para água natural, onde outras partículas em suspensão estão presentes, estudos adicionais precisam ser realizados.

Os resultados evidenciaram que as técnicas convencionais de tratamento de água via CFS apresentam limitações para remoção do MP PVC, apresentando baixas taxas de remoção nas velocidades de sedimentação normalmente empregadas em ETAs, principalmente evidenciado com o coagulante natural MO. O uso da técnica de floculação lastreada trouxe uma melhora significativa tanto na velocidade de sedimentação quanto na taxa de remoção do MP PVC.

O monitoramento por imagem não intrusiva permitiu a análise do tamanho e da velocidade de sedimentação dos flocos formados, que foram muito importantes na determinação e discussão destes resultados. A floculação lastreada é, portanto, uma técnica promissora para remoção de MPs da água, tanto com o uso do coagulante natural MO quanto o sintético SA.

8.2 Recomendações

Como trabalhos futuros recomenda-se:

- **Análise direta de microplásticos:** Desenvolver e implementar uma metodologia específica para a contagem direta de partículas de MPs em água de rio, utilizando microscopia para quantificação do número de partículas removidas durante o tratamento.
- **Estudo de fractais:** Explorar os dados gerados pela técnica de imagens não intrusivas para realizar uma análise fractal. O objetivo seria correlacionar fatores

como diâmetro dos flocos, área superficial, porosidade e densidade com a velocidade de sedimentação, proporcionando maior compreensão dos mecanismos de formação e sedimentação de flocos.

- **Investigação de métodos alternativos:** Avaliar a eficiência de remoção de MPs utilizando outros métodos de tratamento, como filtração direta, e comparar os resultados com os obtidos por coagulação-floculação-sedimentação.
- **Avaliação de diferentes coagulantes:** Testar outros coagulantes sintéticos, como cloreto férrico e PAC (policloreto de alumínio), bem como coagulantes naturais, como tanino, Tanfloc SG e *Strychnos potatorum* (Nirmali), para identificar alternativas com maior eficiência ou custo-benefício.
- **Uso de floculantes naturais:** Investigar o desempenho de floculantes naturais combinados com MO no método de floculação lastreada, como *Aloe vera* e polímeros de amido, visando agregar os flocos com a microareia.
- **Reutilização de microareia:** Avaliar a viabilidade e eficiência do tratamento empregando microareia reutilizada na floculação lastreada, considerando aspectos econômicos e ambientais;
- **Tratamento e reutilização de lodo:** Estudar alternativas para o tratamento e possíveis reutilizações do lodo gerado em estações de tratamento de água que empregam floculação lastreada, promovendo práticas de economia circular e gestão sustentável de resíduos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington DC: **American Public Health Association**. 2017.

AWAN, M. M. A.; MALKOSKE, T.; ALMUHTARAM, H.; ANDREWS, R. C. Microplastic removal in batch and dynamic coagulation-flocculation-sedimentation systems is controlled by floc size. **Science of The Total Environment**, v. 909, p. 168631, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168631>

BATISTA, G. S.; ROLEDO, C.; ODJEGBA, E. E.; FIORE, F. A.; MORUZZI, R. B.; REIS, A. G. dos. Moringa oleifera seed addition prior to sludge thickening for supernatant quality improvement: analyses of clarification performance and toxicity. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 9, p. 7288, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/SU15097288/S1>

BAUER, F.; NIELSEN, T. D.; NILSSON, L. J.; PALM, E.; ERICSSON, K.; FRÅNE, A.; CULLEN, J. Plastics and climate change breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways. **One Earth**, v. 5, n. 4, p. 361–376, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2022.03.007>.

BRAHMI, K.; BOUGUERRA, W.; HARBI, S.; ELALOUI, E., LOUNGOU, M.; HAMROUNI, B. Treatment of heavy metal polluted industrial wastewater by a new water treatment process: ballasted electroflocculation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 968-980, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.051>

CAMACHO, F. P.; SOUSA, V. S.; BERGAMASCO, R.; RIBAU TEIXEIRA, M. The use of Moringa oleifera as a natural coagulant in surface water treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 226–237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2016.12.031>

CHALES, G.G.; TIHAMERI, B.S.; MILHAN, N.V.M.; KOGA-ITO, C.Y.; ANTUNES, M.L.P.; REIS, A.G.d. Impact of *Moringa oleifera* Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water. **Water**, v. 14, 2058, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14132058>

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition. **MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118131473>.

DESJARDINS, C.; KOUDJONOU, B.; DESJARDINS, R. Laboratory study of ballasted flocculation. **Water Research**, v. 36, p. 744-754, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00256-1](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00256-1)

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366>. Acesso em: 21 dez 2022.

GAIKWAD, V. T.; MUNAVALLI, G. R. Turbidity removal by conventional and ballasted coagulation with natural coagulants. **Applied Water Science**, v. 9, n. 5, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S13201-019-1009-6>

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/SCIADV.1700782>.

GODOY, L. G. R.; MORUZZI, R. B.; ODJEGBA, E. E.; SHARIFI, S.; DOS REIS, A. G. Enhanced removal of microplastics from drinking water using ballasted flocculation: a comparative study with conventional methods using non-intrusive image analysis. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 2024, p. 1–16, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S43153-024-00530-3>

KAMPMANN, M.; DAMGAARD, A.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. F. R E S E A R C H A N D A N A L Y S I S Quality Assessment and Circularity Potential of Recovery Systems for Household Plastic Waste. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jiec.12822>

KIRSTEIN, I. V.; HENSEL, F.; GOMIERO, A.; IORDACHESCU, L.; VIANELLO, A.; WITTGREN, H. B.; VOLLERTSEN, J. Drinking plastics? – Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and Py-GCMS. **Water Research**, v. 188, p. 116519, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116519>

KOELMANS, A. A.; MOHAMED NOR, N. H.; HERMSEN, E.; KOOI, M.; MINTENIG, S. M.; DE FRANCE, J. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. **Water Research**, v. 155, p. 410–422, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.02.054>

KUMAR, S.; KAZMI, A. A.; GHOSH, N. C.; KUMAR, A.; RAJPAL, A. Urban stormwater runoff treatment of Nainital Lake’s catchment: an application of ballasted sand flocculation technology. **Water Supply**, v. 19, p. 1017-1025, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2018.148>

LAPOINTE, M.; BARBEAU, B. Characterization of ballasted flocs in water treatment using microscopy. **Water Research**, v. 90, p. 199-127, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.018>

LAPOINTE, M.; BARBEAU, B. Selection of media for the design of ballasted flocculation processes. **Water Research**, v. 147, p. 25-32, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.041>

LAPOINTE, M.; JEFFREY FARNER, M.; HERNANDEZ, L.M.; TUFENKJI N. Understanding and Improving Microplastic Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation. **Environmental Science and Technology**, v. 54, p. 8719 – 8727, 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c00712>

MA, B.; XUE, W.; DING, Y.; HU, C.; LIU, H.; QU, J. Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 78, p. 267–275, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JES.2018.10.006>

MA, B.; XUE, W.; HU, C.; LIU, H.; QU, J.; LI, L. Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 359, p. 159–167, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2018.11.155>

MURUJEW, O.; GEOFFROY, J.; FOURNIE, E., GIOACCHINI; E. S., WILSON; A., VALE; P., JEFFERSON; B.; PIDOU, M. The impact of polymer selection and dose on the incorporation of ballasting agents onto wastewater aggregates. **Water Research**, v. 170, 115346, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115346>

NASSER, M.S.; JAMES, A.E. The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions. **Separation and Purification Technology**, v. 52(2), p. 241-252, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.04.005>

Plastic Europe. Plastics – the facts 2024. Belgium. 2024. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>. Acessado em: 23 de janeiro de 2025.

PIVOKONSKY, M.; CERMAKOVA, L.; NOVOTNA, K.; PEER, P.; CAJTHAML, T.; JANDA, V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. **Science of the Total Environment**, v. 643, p. 1644–1651, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.102>

PROKOPOVA, M.; NOVOTNA, K.; PIVOKONSKA, L.; CERMAKOVA, L.; CAJTHAML, T.; PIVOKONSKY, M. Coagulation of polyvinyl chloride microplastics by ferric and aluminium sulphate: Optimisation of reaction conditions and removal mechanisms. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9(6), 106465, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106465>.

QASIM, M.; PARK, S.; LEE, J.; KIM, J. O. Evaluation of floc settling velocity models through image analysis for ballasted flocculation. **Desalination and Water Treatment**, v. 144, p. 370-383, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23586>

QUEIROZ, L. G. Microplásticos: uma abordagem introdutória. In: POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T.C.B. **Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, p. 1-7, 2022.

RIBEIRO, J.V.M.; ANDRADE, P.V.; DOS REIS, A.G. *Moringa oleifera* seed as a natural coagulant to treat low-turbidity water by in-line filtration. **Revista Ambiente e Agua**, v. 14, e2442, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2442>

RODRÍGUEZ-NARVAEZ, O.M.; GOONETILLEKE, A.; PEREZ, L.; BANDALA, E.R. Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 414, 128692, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128692>

SHARMA, M. D.; ELANJICKAL, A. I.; MANKAR, J. S.; KRUPADAM, R. J. Assessment of cancer risk of microplastics enriched with polycyclic aromatic hydrocarbons. **Journal of Hazardous Materials**, v. 398, p. 122994, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122994>

SHEN, M.; SONG, B.; ZHU, Y.; ZENG, G.; ZHANG, Y.; YANG, Y.; WEN, X.; CHEN, M.; YI, H. Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions. **Chemosphere**, v. 251, p. 126612, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126612>

SKAF, D. W.; PUNZI, V. L.; ROLLE, J. T.; KLEINBERG, K. A. Removal of micron-sized microplastic particles from simulated drinking water via alum coagulation. **Chemical Engineering Journal**, v. 386, p. 123807, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.123807>

TONG, H.; JIANG, Q.; HU, X.; ZHONG, X. Occurrence and identification of microplastics in tap water from China. **Chemosphere**, v. 252, p. 126493, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126493>

TONG, H.; ZHONG, X.; DUAN, Z.; YI, X.; CHENG, F.; XU, W.; YANG, X. Micro- and nanoplastics released from biodegradable and conventional plastics during degradation: Formation, aging factors, and toxicity. **Science of The Total Environment**, v. 833, p. 155275, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155275>.

VEGA ANDRADE, P.; PALANCA, C.F.; OLIVEIRA, M.A.C.; ITO, C.Y.K.; REIS, A.G. Use of *Moringa oleifera* seed as a natural coagulant in domestic wastewater tertiary treatment: Physicochemical, cytotoxicity and bacterial load evaluation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, 101859, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101859>

WIŚNIEWSKA, MORACZEWSKA-MAJKUT, K.; NOCOŃ, W.; POPENDA, A. Microplastics removal from natural surface water by coagulation process. **Desalination and Water Treatment**, v. 319, p. 100462, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100462>

ZHOU, G.; WANG, Q.; LI, J.; LI, Q.; XU, H.; YE, Q.; WANG, Y.; SHU, S.; ZHANG, J. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl₃ coagulation: Performance and mechanism. **Science of The Total Environment**, v. 752, p. 141837, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141837>