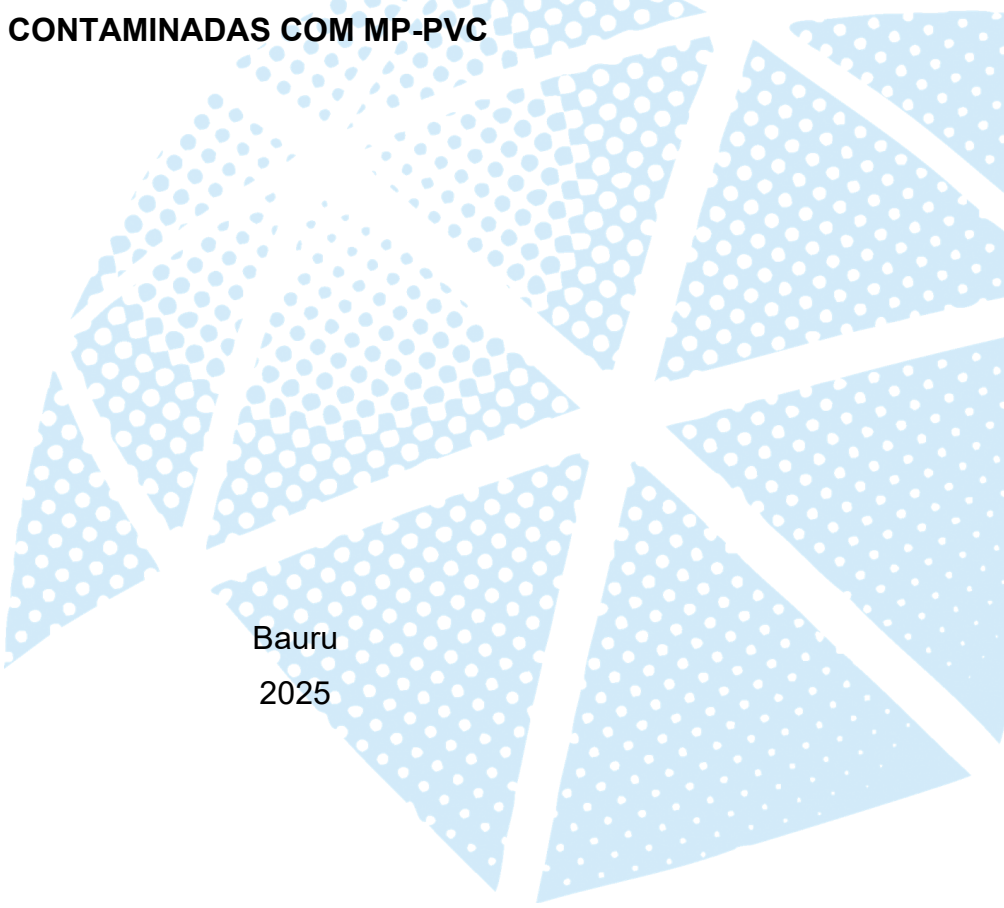


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia - Campus de Bauru

PATRICIA BRAGANÇA SAKAMOTO

**DESEMPENHO DE COAGULANTES NATURAIS NA REGENERAÇÃO DE
FLOCOS PARA A SEPARAÇÃO DE MICROALGAS EM ÁGUAS RESIDUAIS
CONTAMINADAS COM MP-PVC**

Bauru
2025



PATRICIA BRAGANÇA SAKAMOTO

**DESEMPENHO DE COAGULANTES NATURAIS NA REGENERAÇÃO DE
FLOCOS PARA A SEPARAÇÃO DE MICROALGAS EM ÁGUAS RESIDUAIS
CONTAMINADAS COM MP-PVC**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Bauru

2025

S158d	Sakamoto, Patricia Bragança Desempenho de coagulantes naturais na regeneração de flocos para a separação de microalgas em águas residuais contaminadas com mp-pvc / Patricia Bragança Sakamoto. -- Bauru, 2025 127 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi 1. Engenharia. 2. Tecnologia. 3. Contaminação (Tecnologia). 4. Microalgas. 5. Microplásticos. I. Título.
-------	--

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PATRICIA BRAGANÇA SAKAMOTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 16 de outubro de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PATRICIA BRAGANÇA SAKAMOTO, intitulada **RESISTÊNCIA E RECRESCIMENTO DE FLOCOS FORMADOS POR MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS DIGERIDAS ANAEROBIAMENTE CONTAMINADAS POR MP-PVC E COAGULANTES NATURAIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de São José dos Campos - ICT, Prof. Dr. ADRIANO GONÇALVES DOS REIS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de São José dos Campos - ICT, Prof. Dr. LUIZ ANTONIO DANIEL (Participação Virtual) do(a) Departamento de Hidráulica e Saneamento / Escola de Engenharia - USP - São Carlos, Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a 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.

Documento assinado digitalmente

gov.br

RODRIGO BRAGA MORUZZI

Data: 16/10/2025 18:18:35-0300

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

Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: **PATRÍCIA BRAGANÇA SAKAMOTO** DE: **"RESISTÊNCIA E RECRESCEMENTO DE FLOCOS FORMADOS POR MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS DIGERIDAS ANAEROBIAMENTE CONTAMINADAS POR MP-PVC E COAGULANTES NATURAIS"**

PARA:

_____ Desempenho de Coagulantes Naturais na Regeneração de Flocos para Separação de Microalgas em
Águas Residuais Contaminadas com MP-
PVC _____

Bauru, 16 de outubro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br **RODRIGO BRAGA MORUZZI**
Data: 16/10/2025 18:18:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi
Orientador

PATRICIA BRAGANÇA SAKAMOTO

**DESEMPENHO DE COAGULANTES NATURAIS NA REGENERAÇÃO DE
FLOCOS PARA A SEPARAÇÃO DE MICROALGAS EM ÁGUAS RESIDUAIS
CONTAMINADAS COM MP-PVC**

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Data da defesa: 16/10/2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia- Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia- Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Luiz Antônio Daniel
USP – Escola de Engenharia de São Carlos

Prof. Dr.a. Caroline Moço Erba Pompei
UNESP – Faculdade de Engenharia – Campus Bauru

Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos
UFRN – Centro de Tecnologia

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional, ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi e a todos os professores e pesquisadores que, com sua dedicação e exemplo, despertaram em mim o desejo de contribuir para a ciência e a sustentabilidade ambiental.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À FAPESP, pelo apoio financeiro, concedido por meio do Projeto nº 2022/07475-3, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro - Processos 304082/2024-4, 441002/2023-4 e 201641/2024-0.

Agradecimento ao Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis, da Universidade Estadual Paulista - UNESP Campus de São José dos Campos, pela valiosa colaboração na pesquisa, ao disponibilizar o microplástico PVC utilizado nos experimentos. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento e a execução desta investigação, enriquecendo significativamente a qualidade e a profundidade dos resultados obtidos.

“Na natureza, nada existe de forma isolada.”
Rachel Carson

RESUMO

Este estudo avaliou o desempenho dos coagulantes naturais extrato aquoso de *Moringa oleifera* em pó (AEMOP) e solução de tanino (STANSG), em comparação ao coagulante químico sulfato de alumínio (SSA), na separação de microalgas e microplásticos de cloreto de polivinila (MP-PVC) presentes em águas residuárias domésticas digeridas anaerobiamente. A formação, ruptura e refloculação dos flocos foram monitoradas por meio de um Analisador de Dispersão Fotométrica (PDA), permitindo a determinação do Índice de Floculação (IF) e dos fatores de quebra (F1) e recrescimento (F2). A presença de MP-PVC alterou a dinâmica de floculação, resultando em redução da eficiência de separação em alguns tratamentos. O AEMOP favoreceu a formação de flocos flexíveis e moderadamente regeneráveis (F2 entre 40% e 70%), enquanto o STANSG apresentou o melhor desempenho, com recrescimento superior a 100%, indicando elevada capacidade de reorganização estrutural após ruptura. Em contraste, o SSA produziu flocos mais rígidos e pouco reversíveis, com F2 inferior a 30%. As dosagens ótimas obtidas pelo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) resultaram em eficiências de separação entre 98% e 100% para turbidez e densidade óptica, sendo 735 e 690 mg·L⁻¹ para o AEMOP, 102 e 109 mg·L⁻¹ para o STANSG e 125 e 131 mg·L⁻¹ para o SSA, nos respectivos fotobiorreatores FBR R1 e FBR R2. Os resultados demonstram que os coagulantes naturais constituem alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis aos coagulantes convencionais, promovendo flocos mais resilientes e condições favoráveis à recuperação da biomassa algal. Conclui-se que o uso de coagulantes naturais pode reduzir impactos ambientais e aprimorar a clarificação em sistemas que contenham microplásticos, recomendando-se estudos adicionais em escala piloto e industrial, bem como a avaliação de combinações entre coagulantes naturais e químicos para aprimorar o reaproveitamento da biomassa de microalgas.

Palavras-chave: microplástico PVC; microalgas; coagulantes naturais; floculação; PDA.

ABSTRACT

This study evaluated the performance of the natural coagulants aqueous extract of *Moringa oleifera* powder (AEMOP) and tannin solution (STANSG), compared with the inorganic coagulant aluminum sulfate (SSA), in the separation of microalgae and polyvinyl chloride microplastics (MP-PVC) from anaerobically digested domestic wastewater. Floc formation, breakage, and reflocculation were monitored using a Photometric Dispersion Analyzer (PDA), which enabled the determination of the Flocculation Index (FI) and the breakage (F1) and regrowth (F2) factors. The presence of MP-PVC affected flocculation dynamics and reduced separation efficiency in some treatments. AEMOP promoted the formation of flexible flocs with moderate regeneration capacity (F2 ranging from 40% to 70%), while STANSG exhibited the best performance, with regrowth values above 100%, indicating strong structural reorganization after breakage. In contrast, SSA generated more rigid and poorly reversible flocs, with F2 values below 30%. Optimal dosages obtained through Central Composite Design (CCD) resulted in separation efficiencies between 98% and 100% for turbidity and optical density, corresponding to 735 and 690 mg·L⁻¹ for AEMOP, 102 and 109 mg·L⁻¹ for STANSG, and 125 and 131 mg·L⁻¹ for SSA in the respective photobioreactors. The results demonstrate that natural coagulants are sustainable and technically viable alternatives to conventional coagulants, producing more resilient flocs and supporting microalgal biomass recovery. It is concluded that natural coagulants can reduce environmental impacts and enhance clarification in systems containing microplastics, and future studies should explore pilot- and industrial-scale applications, as well as combinations of natural and chemical coagulants to improve microalgal biomass recovery.

Keywords: PVC microplastic; microalgae; natural coagulants; flocculation; PDA.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	MICROPLÁSTICO	18
3.1.1	Os microplásticos nas estações de tratamento de água para abastecimento público e de águas residuárias	19
3.2	COAGULANTES NATURAIS	20
3.2.1	Mecanismos de coagulação e floculação de coagulantes naturais e coagulantes químicos inorgânicos	22
3.3	RESISTÊNCIA, QUEBRA E RECRESCIMENTO DOS FLOCOS	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	CULTIVO DAS MICROALGAS	26
4.1.1	Fotobiorreator fechado do tipo “flat panel”	27
4.1.2	Microplástico PVC	28
4.2	SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS E FORMAÇÃO DO FOCO	29
4.2.1	Preparo dos coagulantes	29
4.2.1.1	Extração aquosa de farinha de semente de M. oleífera 5%	29
4.2.1.2	Solução de Tanfloc SG 10%	30
4.2.1.3	Solução de Sulfato de Alumínio 5%	30
4.2.2	Ensaio de coagulação e floculação seguido de sedimentação	31
4.2.2.1	Eficiência de separação (%)	33
4.3	RECRESCIMENTO E RESISTÊNCIA DO FOCO	34
4.3.1	Monitoramento dos flocos	34
4.3.2	Dosagem adicional de coagulante	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

5.1	Caracterização do efluente.....	39
5.2	Obtenção dos pontos ótimos das variáveis independentes a partir da matriz do método do delineamento composto central rotacional (DCCR) Erro! Indicador não definido.	
5.2.1	Extração aquosa da farinha de semente de <i>M. oleifera</i> 5%	39
5.2.2	Solução de Tanfloc SG 10%	40
5.2.3	Solução de Sulfato de Alumínio 5%	44
5.3	QUEBRA E RECRESCIMENTO DOS FLOCOS FORMADOS POR MICROALGAS E COAGULANTES NATURAIS CONTAMINADOS COM MP-PVC	50
5.3.1	Os efeitos da dosagem inicial de coagulante	50
5.3.1.1	Os efeitos do microplástico PVC	53
5.3.2	Os efeitos da dosagem adicional de coagulante	58
5.3.2.1	Extrato aquoso de farinha de semente de <i>M. oleifera</i> (AEMOP) 5%.....	59
5.3.2.2	Solução de Tanfloc SG (STANSNG) 10%	66
5.3.2.3	Solução de Sulfato de Alumínio (SSA) 5%.....	74
5.3.2.4	Combinação do SSA 5% com os coagulantes naturais.....	80
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL AEMOP 5% PARA FBR R1.....	94
	APÊNDICE B – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL AEMOP 5% PARA FBR R2.....	98
	APÊNDICE C – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL STANSNG 10% PARA FBR R1	102

APÊNDICE D – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL STANSG 10% PARA FBR R2.....	106
APÊNDICE E – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE QUÍMICO INORGÂNICO SSA 5% PARA FBR R1.....	110
APÊNDICE F – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE QUÍMICO INORGÂNICO SSA 5% PARA FBR R2.....	114
APÊNDICE G – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E AEMOP 5% PARA FBR R1	118
APÊNDICE H – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E AEMOP 5% PARA FBR R2	121
APÊNDICE I – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E STANSG 10% PARA FBR R1	124
APÊNDICE J – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E STANSG 10% PARA FBR R2	127

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são materiais compostos por polímeros sintéticos e estão presentes em diversos produtos devido a sua versatilidade e seu uso de forma generalizada (Hassan et al., 2023). Apesar de parecer vantajoso, o consumo exacerbado desse tipo de material gera problemas desde a sua fabricação até o descarte, com alta produção de resíduos acumulados nos oceanos, aterros sanitários entre outros, causando riscos para diversos seres vivos, incluindo a saúde humana (Lithner et al., 2011). A presença de microplásticos nos ecossistemas vivos já é possível de ser detectada, o que torna uma preocupação para especialistas e público em geral (Dronjak et al., 2023).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (2019), os microplásticos foram encontrados em alimentos, ar, água potável e águas residuárias, sendo uma das principais vias de entrada para o ambiente de água doce.

Diversos estudos mostram que os tipos de microplásticos mais encontrados em águas brutas e águas tratadas são tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE), polipropileno (PP), cloreto de polivinila (PVC) e poliestireno (PS) (Pivokonský et al., 2020; Wang et al., 2020).

Os coagulantes naturais têm mostrado resultados bastante satisfatórios para remoção de partículas poluidoras presentes em águas e esgoto. Leiviskä; Santos, 2023), por exemplo, relatam as vantagens da aplicação do tanino e prováveis mecanismos de coagulação/floculação que levam o tanino a ter a eficiência na remoção de turbidez, cor e DQO nos efluentes. Já a pesquisa feita por (Vunain et al., 2019), os autores mostraram que o pó da semente de *M. oleifera* atingiu parâmetros ideais para redução de carga microbiana e total de sólidos dissolvidos recomendado pela OMS nas águas residuárias domésticas de Zomba, Malawi.

As microalgas têm chamado atenção do corpo científico devido à grande diversidade na aplicação em produtos, porém o sistema operacional para a colheita é dispendioso (Singh; Patidar, 2018). O uso de águas residuárias para o cultivo de microalgas em larga escala tem sido uma alternativa mais econômica para o desenvolvimento desses microrganismos fotossintetizantes (Jain et al., 2022; Vargas et al., 2023). Além disso, os métodos mecânicos que envolvem a coagulação e a floculação para a colheita das microalgas são eficientes e menos custosos quando

comparados a outras técnicas de separação, como centrifugação, a qual exige elevado investimento operacional e de manutenção, limitando a sua aplicação em grande escala (Singh; Patidar, 2018).

Os ensaios de coagulação e floculação seguido de sedimentação são considerados uma das técnicas mais eficientes para a separação de microalgas (Teixeira et al., 2022). Diante disso, é importante o estudo do floco para analisar a eficiência dos processos de separação dos componentes sólido e líquido, e compreender os mecanismos que envolvem a formação, crescimento e resistência do floco.

A ênfase deste trabalho está em avaliar, a partir dos dados do Índice de Floculação fornecidos pelo monitoramento contínuo de um analisador de dispersão, a formação, quebra, recrescimento e resistência dos flocos formados por microalgas, MP-PVC, incorporados e coagulantes naturais no processo de separação das microalgas cultivadas em águas residuárias domésticas tratadas anaerobicamente através dos ensaios de coagulação e floculação seguido de sedimentação.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a resistência e o recrescimento de flocos formados por microalgas cultivadas em águas residuais domésticas digeridas anaerobicamente e contaminadas com microplástico PVC (MP-PVC) com o uso dos coagulantes naturais à base de semente de *M. oleifera* Lam e Tanfloc SG nos processos de coagulação e floculação seguido de sedimentação em ensaios de *Jar Test*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar as dosagens ótimas para os coagulantes naturais à base de semente de *M. oleifera* Lam e Tanfloc SG e o coagulante químico inorgânico Sulfato de Alumínio;
2. Analisar a resistência dos flocos formados pelos coagulantes nos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação em duas águas de estudo, sendo: águas residuais domésticas digeridas anaerobicamente com microalgas (FBR R1) e águas residuais domésticas digeridas anaerobicamente com microalgas e MP-PVC (FBR R2);
3. Investigar o comportamento dos flocos na ruptura e recrescimento sem dosagem adicional e com dosagem adicional de coagulante nos ensaios de *Jar Test*;
4. Avaliar a resistência e o recrescimento dos flocos formados a partir da combinação do coagulante químico inorgânico Sulfato de Alumínio (coagulante primário) com os coagulantes naturais à base de semente de *M. oleifera* Lam e Tanfloc SG (coagulantes secundários) para os dois fotobiorreatores;
5. Analisar a eficiência de separação das microalgas nos dois efluentes tratados para os coagulantes utilizados nos ensaios de coagulação/floculação seguido de sedimentação, quebra e refloculação dos flocos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MICROPLÁSTICO

Uma visão predominante nas pesquisas é a de que o uso generalizado de materiais plásticos pela população devido a sua versatilidade apresenta relação direta com a contaminação de solos, águas subterrâneas (Huang et al., 2021), água potável e águas residuárias (Bem-David et al., 2021; Carr et al., 2016; Liu et al., 2022) por microplásticos, poluindo os ecossistemas terrestre e aquático, e afetando a economia circular de subprodutos (Bem-David et al., 2021). Apesar das vantagens, os produtos plásticos apresentam em sua composição elementos químicos considerados prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (Lithner et al., 2011).

Os microplásticos (MP) são partículas que apresentam tamanhos menores que 5 mm, compostos principalmente de polietileno, polipropileno e outros polímeros (Carr et al., 2016), podendo ser classificados em primários, com partículas pequenas e muito utilizadas em cosméticos e em tecidos de microfibra (Jung et al., 2021) e secundários, também com partículas pequenas, porém provenientes da degradação e fragmentação de grandes plásticos, ocorrendo interações físicas, químicas e biológicas ao longo da exposição à luz solar, da ação dos ventos e de outros fatores ambientais (Jung et al., 2021; Liu et al., 2022). A presença de microplásticos nos ecossistemas vivos já é possível de ser detectada, o que torna uma preocupação para pesquisadores e ambientalistas (Dronjak et al., 2023).

Uma ideia central presente na literatura é o risco que os microplásticos podem trazer para o corpo humano e os ecossistemas aquático e terrestre. Em um levantamento realizado para a elaboração de um modelo de classificação de perigo para os polímeros mais presentes em produtos plásticos a partir da avaliação dos seus monômeros e suas substâncias químicas, Lithner et al., (2011) relata que o policloreto de vinila (PVC) é um dos polímeros mais produzidos em escala mundial e classificados como mais perigoso por apresentar em sua composição monômeros de nível V, sendo o cloreto de vinil, muito prejudicial à saúde humana, e ftalato de benzilbutila (BBP) para PVC plastificado, perigoso para a saúde humana e também para o meio ambiente pela alta toxicidade principalmente para animais aquáticos. Hassan et al., (2023) enfatiza que polímeros com nível V de classificação são considerados os mais

perigosos por conterem pelo menos um monômero categorizado como carcinogênico e mutagênico.

3.1.1 Os microplásticos nas estações de tratamento de água para abastecimento público e de águas residuárias

Um dos caminhos para a contaminação do meio ambiente por microplástico é através das Estações de Tratamento de Águas Residuárias (Dronjak et al., 2023). Em um estudo sobre a distribuição e poluição causada por microplásticos na zona costeira de Jiangsu, na China, Xu et al., (2023) mostrou que as águas residuárias domésticas apresentaram quantidades significativas de microplásticos, com $13,7 \pm 0,5$ item/m³, sendo predominante a poliamida (PA), polietileno (PE), cloreto de polivinila (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e rayol (RA).

De acordo com o trabalho de Carr et al., (2016) sobre o transporte e destino dos microplásticos nas estações de tratamento de águas residuárias, os pesquisadores afirmaram que partículas de MP foram removidas das águas residuais principalmente no tratamento primário, através dos processos de desnatação de sólidos e sedimentação de lodo. Em conformidade com a discussão acima, Ben- David et al., (2021) mostrou em sua pesquisa realizada na ETAR de Karmiel (norte de Israel) que a redução na concentração de MP no efluente foi maior antes do tratamento terciário, sendo a técnica de filtração de areia pouco eficaz para remoção de microplásticos. A partir da evidência de que a principal entrada de MP no meio ambiente é através das Estações de Tratamento de Águas Residuárias (ETARs), Dronjak et al., (2023) fez uma investigação da abundância dos MPs nas várias unidades de tratamentos da ETAR localizada próxima da cidade de Barcelona, na Espanha, e concluiu por meio dos dados obtidos que o pré-tratamento associado ao tratamento primário apresentou maior remoção de MP, no entanto essas partículas podem estar acumuladas nas lamas que normalmente são aplicadas na agricultura.

No estudo sobre os impactos causados pelos microplásticos presentes nos lodos de esgoto doméstico, Hassan et al., (2023) aponta que essas partículas plásticas trazem não apenas malefícios para a saúde humana e meio ambiente, mas afetam a economia circular, que tem o conceito de recuperar energia e produtos que foram eliminados durante as etapas de tratamento de água e águas residuárias e

alojados nos resíduos, tornando o processo mais sustentável na visão ambiental e econômica. Os autores ainda ressaltam a importância da adoção de medidas práticas para o manejo de resíduos (reciclagem e incentivos de reutilização de materiais plásticos, por exemplo) e a realização de normas regulamentadoras para o uso de lodos como fertilizantes, para a redução da toxicidade causada por MP e outros agentes poluidores.

3.2 COAGULANTES NATURAIS

Os processos de coagulação e floculação seguido de sedimentação são amplamente empregados no que se refere a tratamento de água (Yu et al., 2015) e águas residuárias. Coagulantes inorgânicos (sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio, sulfato férrico, entre outros) ainda são muito utilizados nas ETEs e ETAs pela alta eficiência na remoção de contaminantes, mas a geração de resíduos poluentes e metais em lodos é um fator preocupante (Kurniawan et al., 2022; Vargas et al., 2023). Em busca de alternativas mais econômicas e sustentáveis, com menor produção de partículas contaminantes em lodos e biomassas, pesquisas com o uso de coagulantes naturais, como tanino, quitosana e semente de *M. Oleífera*, para a medição da eficiência de coagulação estão sendo realizadas constantemente (Leiviskä; Santos, 2023).

A partir dessa abordagem, os biocoagulantes podem ser considerados uma alternativa para substituição dos coagulantes químicos, já que são mais ecológicos, orgânicos e biodegradáveis devido a sua origem biológica, podendo ser animal, vegetal ou de fontes de microrganismos (fungos, bactérias e algas) (Kurniawan et al., 2022). Apesar de haver consenso na literatura sobre os benefícios quanto ao uso de coagulantes orgânicos, Polasek; Wantenaar, (2023) salienta em sua pesquisa voltada para a purificação de água que o uso de coagulantes orgânicos pode trazer problemas operacionais nas estações de tratamento projetadas para suspensões de coagulantes hidrolisados, como o aumento da perda de carga do filtro de gravidade rápida devido as propriedades pegajosas das suspensões formadas pelos coagulantes orgânicos, causando o efeito de peneiramento do filtro, além de problemas relacionados aos padrões de potabilidade da água.

No estudo conduzido por Khatiabi Rifi et al. (2023) acerca da aplicação do coagulante derivado de *Moringa oleifera* em águas residuárias oleosas, os autores observaram que a combinação do processo de coagulação com *M. oleifera* e o método de flotação promoveu reduções significativamente superiores nos parâmetros de turbidez, polifenóis e demanda química de oxigênio (DQO), atingindo aproximadamente 83%, 65,6% e 57,6%, respectivamente. Esses valores superaram aqueles obtidos pelo uso exclusivo da flotação natural, que apresentou reduções de 50% para turbidez, 16% para polifenóis e 31% para DQO.

O uso de coagulantes à base de tanino tem apresentado resultados bastante satisfatórios. Em seu trabalho para separação de microalgas da água residuária gerada pelo processo térmico da carne de frango, Vargas et al., (2023) mostraram que o Tanfloc MT promoveu aumento na concentração de proteína na biomassa quando comparado com o método de centrifugação, além de reduzir 99,76% na turbidez e 80% na cor aparente. Ao discorrerem sobre alternativas sustentáveis para purificação de água e águas residuárias, Leiviskä e Santos (2023) discutem a eficiência do coagulante tanino para diversas aplicações com outros tipos de coagulantes, e concluíram que para boa parte dessas aplicações o tanino demonstrou maior desempenho que os coagulantes convencionais, com baixo impacto no valor do pH da água tratada e menor volume de lodo; no entanto, os autores ressaltam a necessidade da continuação de pesquisas quanto a aplicação do tanino para diferentes águas residuárias e a comparação da sua eficiência a partir de outras técnicas de extração e pela associação com outros coagulantes biológicos.

Na contramão do que diz a respeito da aplicação de coagulantes naturais, Polasek e Wantenaar (2023) demonstra a necessidade de realizar estudos mais aprofundados a respeito da eficiência dos coagulantes naturais em se tratando de água potável. Mesmo com eficiência de remoção de partículas turvas em 88,7%, o coagulante orgânico aplicado não atingiu a faixa desejável para água potável de acordo com várias normativas, o que mostra o porquê as Estações de Tratamento de Água para abastecimento público continuarem utilizando coagulantes químicos inorgânicos, mesmo com acúmulo de partículas metálicas nos resíduos de pós-tratamento. Apesar disso, os autores destacam que os coagulantes naturais podem ser utilizados nos casos em que o teor de matéria orgânica da água bruta não seja parâmetro para as análises técnicas.

3.2.1 Mecanismos de coagulação e floculação de coagulantes naturais e coagulantes químicos inorgânicos

Uma visão predominante nas pesquisas é a de que o uso de coagulantes naturais nos ensaios de coagulação e floculação tem mostrado resultados iguais ou mesmo superiores aos resultados de eficiência de remoção de partículas suspensas dos coagulantes convencionais. Essa perspectiva lança uma luz na necessidade de compreender de que forma os coagulantes naturais interagem com as partículas suspensas contidas em diversos efluentes durante a formação dos flocos, favorecendo a separação do material sólido do meio líquido através de processos de sedimentação ou filtração.

Ao se tratar do sistema de CFS, são apresentados quatro mecanismos de coagulação e floculação (Girish et al., 2023; Yang et al., 2016; Zhao et al., 2021):

- Neutralização de cargas simples: as cargas negativas dos poluentes dispersos nas águas são neutralizadas com a adição de uma dose ideal de coagulante carregado positivamente. Para esta situação, o uso da dosagem ótima do coagulante é importante para a promoção da desestabilização e agregação dos flocos, favorecendo o processo de sedimentação. Doses elevadas do coagulante podem ocasionar na repulsão das cargas, trazendo estabilidade para o sistema devido total revestimento das membranas das partículas poluidores pelos elementos do coagulante;
- Patch de carga: diferente do mecanismo de neutralização de cargas, o excesso de coagulantes/floculantes não afeta a eficiência de floculação. Como o potencial zeta não atinge o marco zero na dose ideal do coagulante, abre-se uma gama maior na janela de floculação. A distribuição irregular das cargas heterogêneas nas membranas das partículas suspensas faz com que ocorra possíveis choques entre si e agregação, formando flocos grandes e compactos;
- Ponte: os polímeros presentes nos coagulantes/floculantes formam laços com as partículas coloidais; durante o processo de floculação, as partes livres da cadeia polimérica se ligam a outros coloides, criando-se as pontes. O peso molecular do polímero está diretamente relacionado com o tamanho dos flocos e a força de ligação dessas pontes, ou seja, quanto maior o PM do polímero, maior o tamanho dos flocos e pontes mais eficientes;

- Varredura: mecanismo estabelecido a partir de coagulantes inorgânicos, caracterizada pela formação de flocos de hidróxido responsáveis por “varrer” os coloides presentes nas águas.

Ao discorrerem os fatores que determinam a eficiência dos ensaios de coagulação e floculação com o uso de biocoagulantes, Kurniawan et al., (2022) discutem em um artigo de revisão a relação de grupos funcionais presentes nos biocoagulantes/biofloculantes com os mecanismos que ocasionam a desestabilização das partículas. Seguindo o mesmo conceito para os coagulantes convencionais, os autores apontam que coagulantes naturais com componentes carregados positivamente, como a *M. oleifera*, se comportam da mesma forma que o alumínio na forma de sulfato de alumínio durante a coagulação, enquanto os coagulantes naturais com grupos funcionais carregados negativamente agem por meio do mecanismo de varredura ou mecanismo de floculação em ponte.

No estudo sobre mecanismos de coagulação para remoção de microplásticos, Leiviskä e Santos, (2023) apontam que os mecanismos mais prováveis para os coagulantes naturais de origem vegetal são as pontes poliméricas e a neutralização de cargas. Nessa revisão bibliográfica, os autores revelam que a presença do grupo amina na composição dos coagulantes obtidos a partir da extração do tanino é o grupo funcional responsável pela adsorção das partículas coloidais presentes nas águas, normalmente carregadas negativamente. No entanto, os autores ressaltam que a quantidade do grupo fenóis pode interferir nas propriedades do coagulante, afetando as reações químicas de protonação (sem perda de H^+) e desprotonação (perda de H^+) da amina, alterando o pH, e consequentemente a densidade de cargas.

A respeito dos mecanismos potencializadores de coagulação e floculação para coagulantes de sais metálicos, He et al., (2023) comprovaram em sua pesquisa sobre a remoção de contaminantes microplásticos PP pré-tratados quimicamente de águas naturais e águas sintéticas com uso do coagulante sulfato férrico que o mecanismo de neutralização de cargas é o grande responsável por desestabilizar as partículas microplásticas, fazendo com que o produto resultante da hidrólise seja adsorvido mais facilmente nas membranas dos contaminantes microplásticos, diminuindo a repulsão das cargas e aumentando a agregação para a formação de flocos maiores e mais pesados.

3.3 RESISTÊNCIA, QUEBRA E RECRESCIMENTO DOS FLOCOS

Os processos que envolvem a formação de flocos ainda são muito aplicáveis para a separação dos componentes sólido e líquido nos tratamentos de água e águas residuárias. O conhecimento sobre os mecanismos de formação e resistência dos flocos são parâmetros importantes para avaliar o desempenho no processo da floculação (He et al., 2023).

Uma técnica empregada para analisar o crescimento, quebra e recrecimento dos flocos formados para os ensaios de coagulação e floculação consiste no uso de um analisador de dispersão fotométrica (PDA – *photometric dispersion analyzer*). De acordo com Yu et al., (2010), essa metodologia fornece valores referentes ao Índice de Floculação (IF), medida obtida através da relação entre o valor quadrático médio do composto flutuante (rms) e o valor da intensidade da luz que passa pela amostra líquida (dc). Para investigar os efeitos das dosagens adicionais do coagulante alumínio na forma de sulfato de alumínio em amostras de água preparada em laboratório, Yu et al., (2010) investigaram a formação e resistência dos flocos pelos fatores de quebra (equação 1) e recrecimento (equação 2) determinados a partir do IF:

$$F1 (\%) = \frac{V2}{V1} \times 100 \quad (1)$$

$$F2 (\%) = \frac{V3 - V2}{V1 - V2} \times 100 \quad (2)$$

Em que F1 é o fator de quebra, F2 o fator de recrecimento, V1 o máximo valor de IF antes da ruptura dos flocos, V2 o valor mínimo de IF obtido no período quebra e V3 o valor máximo de IF do recrecimento dos flocos.

Em outro estudo relacionado com a formação dos flocos, Yu et al., (2015) mostra que a relação do IF está associada com a agregação de partículas, dada pela equação 3:

$$IF = K \times C \times N^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Sendo K é uma constante relacionada com as dimensões do feixe luz, C a seção transversal efetiva da luz e N a concentração de partículas. Os autores explicam que o valor do IF implica na concentração de partículas e o tamanho da seção transversal de dispersão, ou seja, apesar do número de partículas ser inversamente proporcional ao valor de IF, a seção transversal de dispersão expande a ponto de causar o aumento do IF.

Outra forma de analisar as características de formação dos flocos nos processos de coagulação e floculação é através da análise de imagens. Em sua pesquisa sobre a eficiência do coagulante natural tanino para coleta de biomassa de microalgas cultivadas em efluente sanitário digerido em um biofiltro de fluxo ascendente na cidade de Bauru, São Paulo, Teixeira et al., (2022) determinam as taxas de resistência e recuperação dos flocos a partir dos valores médios dos diâmetros máximos dos flocos obtidos pela captura sequencial de imagens dos flocos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em conjunto com a Dra. Larissa Quartaroli e com a doutoranda Fernanda Filipaki nos laboratórios de Hidráulica e Saneamento do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus Bauru, São Paulo, e LATARE, do Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus Rio Claro, São Paulo.

4.1 CULTIVO DAS MICROALGAS

As microalgas foram cultivadas em águas residuais domésticas digeridas anaerobicamente. Um inóculo de 10% v/v de microalgas nativas e isoladas do próprio esgoto sanitário anaerobicamente tratado, o qual foi exposto em ambiente externo sem controle das condições ambientais, foi utilizado para dar início à batelada do cultivo das microalgas.

As águas residuais domésticas digeridas anaerobicamente foram coletadas semanalmente na Estação de Tratamento de Esgoto ETE Candeia, do Departamento de Água e Esgoto – DAE do município de Bauru, São Paulo. A ETE Candeia está localizada no Núcleo Gasparini e implantada às margens dos córregos Pau D’alho e Monte Belo, que são afluentes do Córrego Água Parada. Suas coordenadas geográficas são: latitude de 22°16’1.56” sul e longitude de 49°5’12.62” oeste. De acordo com as informações disponibilizadas pelo DAE - Bauru, a ETE Candeia atende capacidade final de 50.000 habitantes, com vazão de 60 a 100 L/s. Os bairros contemplados com o serviço de tratamento de esgoto são: Núcleos Edson Bastos Gasparini, Índia Vanuire, Residencial Nova Bauru, Vitória Régia, Pousada da Esperança I e II, Vila São Paulo e Jardim Helena.

Os processos de tratamento do esgoto sanitário da ETE Candeia consistem no tratamento preliminar, composto por sistema de gradeamento, medição de vazão por Calha Parshall e medidor ultrassônico, caixa de areia, tratamento primário pelo Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), tratamento secundário, constituído pelo Filtro Biológico Submerso Aerado (BF) e Decantador Secundário (DS). Além disso, a

ETE Candeia conta com os processos finais de desinfecção e tratamento da fase sólida (desidratação do lodo biológico removido do reator UASB).

4.1.1 Fotobiorreator fechado do tipo “*flat panel*”

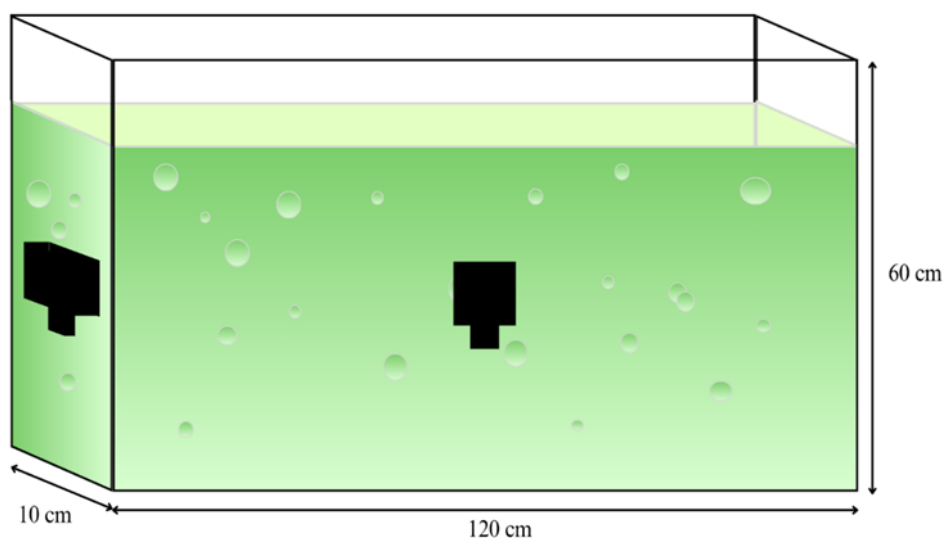
O sistema adotado para o cultivo das microalgas em águas residuais domésticas digeridas anaerobicamente foi o fotobiorreator fechado do tipo “*flat panel*” (FBR). Construído com material de vidro, o FBR possui forma geométrica de paralelepípedo, com dimensões de 120 cm de largura, 60 cm de altura e 10 cm de profundidade.

Nesta pesquisa, foram utilizados dois fotobiorreatores fechados do tipo “*flat panel*”, denominados de R1 e R2, e instalados na Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB. Apesar da capacidade volumétrica ser de 64 litros, os dois fotobiorreatores foram operados com volume de 50 litros e de modo semi-contínuo, com tempo de retenção hidráulica (HRT) de 3,33 dias (fluxo de entrada de 15 L.dia⁻¹) e pelo período de 60 dias. Para assegurar a homogeneidade das culturas das microalgas, foram instaladas três bombas submersas de recirculação em cada fotobiorreataor. Para a alimentação dos dois fotobiorreatores, era coletado, semanalmente, um volume de 210 litros de esgoto sanitário na saída do UASB da ETE Candeia e armazenados em bombonas plásticas de 20 litros devidamente higienizadas.

No FBR R2, diariamente foram adicionados ao efluente de alimentação 50 mg.L⁻¹ de cloreto de polivinila (PVC) conforme critérios estabelecidos em Li et al., (2023), Murphy et al., (2016), Parsai et al., (2022) e Zhang et al., (2020).

Durante toda a operação dos dois fotobiorreatores, foram coletadas diariamente amostras de efluente do sistema de cultivo para o monitoramento do crescimento das microalgas. Os parâmetros analisados foram: temperatura, oxigênio dissolvido (OD), densidade ótica (DO) em 540, 680 e 750 nm, turbidez, fosfato (PO₄⁻³-P), pH, alcalinidade (total e parcial) e ácidos voláteis totais (AVT) (APHA, 2017). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático com as dimensões do fotobiorreator do tipo “*flat panel*” utilizado nesta pesquisa.

Figura 1 - Desenho esquemático com as dimensões do fotobiorreator (FBR) fechado do tipo "*flat panel*"



Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Análises físico-químicas

A coleta de amostras dos efluentes provenientes dos sistemas de cultivo de microalgas (R1 e R2) foi realizada diariamente, com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento das microalgas e a eficiência de remoção de nutrientes. As amostras obtidas foram submetidas à análise dos seguintes parâmetros: turbidez, cor aparente, densidade óptica (DO) nos comprimentos de onda de 540, 680 e 750 nm, pH e demanda química de oxigênio (DQO), conforme metodologia descrita pela APHA (2017).

4.1.3 Microplástico PVC

O microplástico empregado para a contaminação das microalgas cultivadas em águas residuais domésticas digeridas anaerobiamente foi o pó de cloreto de polivinila (PVC), fornecido pela Niox Comercial Importadora Ltda., Brasil. O material apresenta partículas com tamanho inferior a 150 μm e densidade média de aproximadamente $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

O PVC é um dos polímeros mais produzidos mundialmente e destaca-se por sua elevada densidade e pela presença de aditivos potencialmente tóxicos, características que influenciam seu comportamento ambiental, sua interação com partículas suspensas e sua eficiência de remoção em processos físico-químicos de tratamento de água e efluentes (Savrik *et al.*, 2024). Microplásticos de PVC tendem a apresentar maior propensão à sedimentação quando comparados a polímeros de menor densidade, além de elevada capacidade de adsorção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, o que os torna particularmente relevantes em estudos de poluição e controle ambiental.

Estudos recentes indicam que a eficiência de remoção de microplásticos por processos de coagulação e floculação é fortemente dependente de propriedades como tamanho de partícula, densidade, forma e composição polimérica, sendo o PVC frequentemente apontado como um dos microplásticos mais persistentes e desafiadores em sistemas aquáticos e de tratamento de água (Godoy *et al.*, 2025). Dessa forma, a escolha do PVC como microplástico modelo neste estudo visa representar um cenário ambiental crítico para a avaliação dos processos de separação em efluentes tratados anaerobiamente.

4.2 SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS E FORMAÇÃO DO FOCO

Ensaio de *Jar Test* foram realizados para os processos de crescimento, quebra e recrescimento dos flocos formados a partir de microalgas, MP-PVC e coagulante. Para os ensaios de coagulação e floculação seguido de sedimentação, foram utilizados os coagulantes naturais à base de semente de *M. oleífera* Lam e Tanfloc SG e o coagulante químico inorgânico Sulfato de Alumínio.

4.2.1 Preparo dos coagulantes

4.2.1.1 Extração aquosa de farinha de semente de *M. oleífera* 5%

As sementes de MO utilizadas nesta pesquisa foi fornecida pela Arbocenter Comércio de Sementes Ltda, que também foi responsável pela colheita na cidade de Araçatuba, São Paulo – Brasil.

A extração aquosa de farinha de semente de MO foi preparada de acordo com as técnicas empregadas por Chales et al., (2022). Para a obtenção da farinha de MO, as sementes foram devidamente descascadas, secas, selecionadas e trituradas com o auxílio de um liquidificador doméstico até atingir o aspecto de farinha; após esse processo, a farinha foi passada em peneira com malha de 30 *mesh* (600 μm) para limitação e homogeneização das partículas. Para preservar as proteínas catiônicas da *Moringa oleifera*, a farinha peneirada foi armazenada em um frasco de vidro fechado e refrigerado a temperatura de 4 °C. Para a extração aquosa da farinha de semente de MO, foi realizada uma solução de 5% (m/v) com a farinha preparada e água destilada e misturadas à velocidade de 100 rpm por 1 minuto. Imediatamente, a mistura passou pelos processos de filtração em papel filtro Whatman nº 1 (11 μm) e filtração à vácuo com microfiltro de fibra de vidro de diâmetro de 47 mm (1,2 μm). Para evitar qualquer tipo de degradação, a extração aquosa de farinha de semente de *M. Oleifera* (AEMOP) foi preparada no mesmo dia da realização dos ensaios de coagulação e floculação seguida de sedimentação.

4.2.1.2 Solução de Tanfloc SG 10%

O Tanfloc SG em sua forma líquido foi adquirido na Tanac S. A. Segundo o fabricante, o Tanfloc SG é um polímero orgânico catiônico de baixo peso molecular, de origem essencialmente vegetal e atua como coagulante, floculante e auxiliar de coagulação no tratamento de águas em geral.

Para os ensaios de coagulação e floculação seguido de sedimentação, foi preparada uma diluição do produto Tanfloc SG líquido para obtenção da solução de Tanino (STANSO) 10% (m/v), sendo 10 g de Tanfloc SG líquido para 100 ml de água destilada.

4.2.1.3 Solução de Sulfato de Alumínio 5%

O Sulfato de Alumínio (14-18 H_2O) da Êxodo Científica é um reagente químico utilizado em laboratório. De acordo com as informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante, esse reagente apresenta aspecto de cristais brancos e peso molecular de 666,43 g/mol.

Para os ensaios de coagulação e floculação seguido de sedimentação, foi preparada uma diluição para obtenção da solução de sulfato de alumínio (SSA) 5 % (m/v), com 5 g de sulfato de alumínio para 100 ml de água destilada.

4.2.2 Ensaio de coagulação e floculação seguido de sedimentação

Os ensaios de coagulação, floculação seguido de sedimentação foram realizados em equipamento do tipo Jar Test (Nova Ética), mantendo-se constantes as condições operacionais de mistura rápida (500 s^{-1}) tempo de mistura rápida (30 s), mistura lenta (15 min) e taxa de sedimentação ($0,12\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) (Abdul Hamid et al., 2014; Andrade et al., 2021; Butler et al., 2021; Leite et al., 2019; Silva et al., 2021; Yang et al., 2021). A avaliação da dosagem de coagulante (x_1) e do gradiente de mistura lenta (x_2) foi estruturada com base no método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), cuja matriz experimental foi planejada e analisada por meio do software Protimiza Experimental Design® (Rodrigues; Iemma, 2014). As faixas de dosagem dos coagulantes foram definidas de acordo com o desempenho observado previamente para cada coagulante ao longo dos ensaios preliminares, estabelecendo-se valores entre 0 e $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para *Moringa oleifera*, entre 25 e $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para o tanino e entre 0 e $140\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para o sulfato de alumínio. O gradiente de mistura lenta variou entre 0 e 100 s^{-1} (Abdul Hamid et al., 2014; Marinho et al., 2022; Silva et al., 2021; Teixeira et al., 2012; Yu et al., 2010)). Para duas variáveis independentes, a matriz DCCR compreende em 4 ensaios nos pontos fatoriais, 4 nos pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 experimentos, conforme apresentado nas Tabelas 1, 2 e 3 para os coagulantes à base de *M. oleifera*, tanino e sulfato de alumínio, respectivamente. As variáveis-resposta empregadas para avaliar a eficiência do tratamento incluíram os percentuais de remoção de turbidez (Y_1), cor aparente (Y_2) e densidade óptica (DO) nos comprimentos de onda de 254 nm (Y_3), 540 nm (Y_4), 680 nm (Y_5) e 750 nm (Y_6).

Os equipamentos empregados para a obtenção dos variáveis-resposta encontram-se descritos no Quadro 1.

Tabela 1 - Matriz de delineamento composto central rotacional (DCCR) com duas variáveis independentes (dosagem de coagulante e gradiente de mistura lenta) para o coagulante Extração Aquosa de Semente de *M. oleifera*. Os valores entre parênteses representam os valores codificados e os ensaios 9, 10 e 11 representam a triplicata do ponto central do DCCR.

Ensaio	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹)	Gradiente de mistura lenta (s ⁻¹)
1	115 (-1)	15 (-1)
2	685 (1)	15 (-1)
3	115 (-1)	85 (1)
4	685 (1)	85 (1)
5	0 (-1,41)	50 (0)
6	800 (1,41)	50 (0)
7	400 (0)	0 (-1,41)
8	400 (0)	100 (1,41)
9/10/11	400 (0)	50 (0)

Fonte: Quartaroli et al., (2024).

Tabela 2 - Matriz de delineamento composto central rotacional (DCCR) com duas variáveis independentes (dosagem de coagulante e gradiente de mistura lenta) para o coagulante STANSG. Os valores entre parênteses representam os valores codificados e os ensaios 9, 10 e 11 representam a triplicata do ponto central do DCCR.

Ensaio	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹)	Gradiente de mistura lenta (s ⁻¹)
1	36 (-1)	15 (-1)
2	89 (1)	15 (-1)
3	36 (-1)	85 (1)
4	89 (1)	85 (1)
5	25 (-1,41)	50 (0)
6	100 (1,41)	50 (0)
7	63 (0)	0 (-1,41)
8	63 (0)	100 (1,41)
9/10/11	63 (0)	50 (0)

Fonte: elaboração própria.

Tabela 3 - Matriz de delineamento composto central rotacional (DCCR) com duas variáveis independentes (dosagem de coagulante e gradiente de mistura lenta) para o coagulante SSA. Os valores entre parênteses representam os valores codificados e os ensaios 9, 10 e 11 representam a triplicata do ponto central do DCCR.

Ensaio	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹)	Gradiente de mistura lenta (s ⁻¹)
1	22 (-1)	15 (-1)
2	118 (1)	15 (-1)
3	22 (-1)	85 (1)
4	118 (1)	85 (1)
5	0 (-1,41)	50 (0)
6	140 (1,41)	50 (0)
7	72 (0)	0 (-1,41)
8	72 (0)	100 (1,41)
9/10/11	72 (0)	50 (0)

Fonte: elaboração própria.

Quadro 1 - Equipamentos utilizados para a realização das análises

Parâmetros	Equipamentos
Turbidez (NTU)	Espectrofotômetro NANOCOLOR UV/VIS II
Cor Aparente (PtCo)	Espectrofotômetro NANOCOLOR UV/VIS II
Densidade ótica (DO) de 254, 540, 680 e 750 nm	Espectrofotômetro NANOCOLOR UV/VIS II
pH	pHmetro Orion Star

Fonte: elaboração própria.

As variáveis-resposta obtidas no delineamento experimental foram tratadas por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). A regressão dos dados foi realizada adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$), sendo os modelos posteriormente ajustados pela inclusão apenas dos coeficientes estatisticamente relevantes. Para verificar a adequação e a significância dos modelos propostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA). Quando os modelos apresentaram significância estatística, as superfícies de resposta correspondentes foram geradas utilizando o software Protimiza Experimental Design® (Rodrigues; Iemma, 2014).

4.2.2.1 Eficiência de separação (%)

Para a determinação da eficiência de separação das microalgas do efluente tratado, foram avaliados os parâmetros de turbidez, cor e densidades óticas de 254,

540, 680 e 750 nm. Amostras foram coletadas antes dos ensaios de *Jar Test* e para a velocidade de sedimentação de 0,12 cm.min⁻¹. Os resultados da eficiência de remoção (ER) para os parâmetros de turbidez (ER_T), cor (ER_C) e densidade ótica (ER_{DO}) foram obtidos de acordo com as equações 4, 5 e 6, respectivamente.

$$ER_T (\%) = \frac{T_i - T_f}{T_i} \times 100 \quad (4)$$

$$ER_C (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (5)$$

$$ER_{DO} (\%) = \frac{DO_i - DO_f}{DO_i} \times 100 \quad (6)$$

4.3 RECRESCIMENTO E RESISTÊNCIA DO FOCO

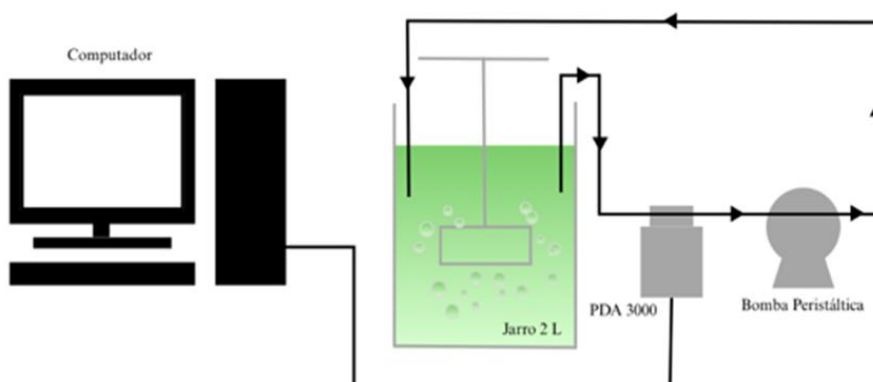
Para a determinação dos parâmetros de resistência e recrescimento dos focos, foram realizados ensaios de quebra e refloculação. A etapa de quebra foi conduzida sob gradiente de mistura rápida de 500 s⁻¹, com tempo de 30 s, enquanto a etapa de refloculação foi mantida por 15 min ou mais, até a estabilização dos valores do Índice de Floculação (IF), conforme monitoramento de um Analisador de Dispersão Fotométrica (PDA). Os ensaios foram efetuados tanto sem adição de coagulante, a fim de avaliar o potencial intrínseco de recuperação dos focos após a ruptura, quanto com a dosagem adicional de coagulante, permitindo verificar a influência desse reforço no processo de recrescimento.

4.3.1 Monitoramento dos focos

O Índice de Floculação (IF) foi o parâmetro adotado para análise do crescimento, quebra e recrescimento dos focos para a determinação dos fatores de quebra e recrescimento (F1 e F2, respectivamente), empregado de forma semelhante aos trabalhos de Moruzzi et al., (2019) e Yu et al., (2010). O método adotado para a obtenção do IF consiste no princípio do espalhamento de luz por meio de um Analisador de Dispersão Fotométrica (PDA). Durante todo o ensaio de *Jar Test*, a

amostra era sifonada no jarro em agitação por um tubo plástico de 5 mm e monitorada por um dispositivo PDA (PDA 3000, Rank Brothers, Reino Unido). Após a passagem pelo dispositivo de monitoramento, a amostra era devolvida para o jarro por meio de uma bomba peristáltica. O procedimento experimental do PDA foi montado de acordo com o trabalho de Yu et al., (2010) e as variáveis gradiente de mistura rápida, tempo de mistura rápida e gradiente de mistura lenta adotadas nos ensaios para a separação das microalgas e microplásticos PVC do efluente tratado foram mantidas para os processos de quebra e refloculação. Segundo Yu et al., (2010), o dispositivo PDA 3000 mede os valores referentes ao Índice de Floculação (IF), que consiste na relação entre a intensidade média da luz transmitida (valor dc) e o valor quadrático médio (rms) do componente flutuante da intensidade. A Figura 2 mostra um esquema simplificado do procedimento experimental que envolve o ensaio de *Jar Test* e o monitoramento do floco através do espalhamento da luz (PDA 3000).

Figura 2 - Esquema simplificado do procedimento experimental



Fonte: elaboração própria.

4.3.2 Dosagem adicional de coagulante

As dosagens adicionais dos coagulantes adotadas para esta pesquisa foram baseadas a partir da concentração da dosagem adicional de alumínio utilizada no trabalho de Yu et al., (2010), que tratou sobre os efeitos dos flocos com uso de dosagem adicional do coagulante químico inorgânico Sulfato de Alumínio em uma água preparada em laboratório com ácido húmico. Para a Solução de Sulfato de

Alumínio 5% (SSA), foi adotado como primeira dosagem adicional a mesma concentração de Al da dosagem adicional utilizada na pesquisa de Yu et al., (2010). De acordo com os resultados dos cálculos, viu-se que a dosagem adicional de 0,03 mMol de Al corresponde a proporção de 50% da Solução de Sulfato de Alumínio a 5% (m/v) utilizada nas etapas de coagulação e floculação seguido de sedimentação. Para efeitos comparativos, essa mesma proporção de 50% foi empregada para os coagulantes naturais Extrato Aquoso de farinha de semente de M. oleifera 5% (AEMOP) e Solução de Tanfloc SG 10% (STANSG). Ensaio expedidos também foram realizados com os coagulantes a fim de compreender melhor a formação dos flocos de microalgas presentes nos efluentes tratados dos fotobiorreatores. A partir dessa proporção de dosagem adicional e dos resultados dos ensaios expedidos, foram adotadas mais duas dosagens adicionais: 10 e 25% de acordo com as dosagens ótimas para cada coagulante. As dosagens adicionais dos coagulantes foram inseridas imediatamente no início do processo de ruptura dos flocos. A Tabela 4 mostra as dosagens, em miligramas por litro, que foram utilizadas nos processos de coagulação/floculação/sedimentação e recrescimento dos flocos para todos os coagulantes.

Tabela 4 - Dosagens dos coagulantes (mg.L⁻¹) para FBR R1 e FBR R2

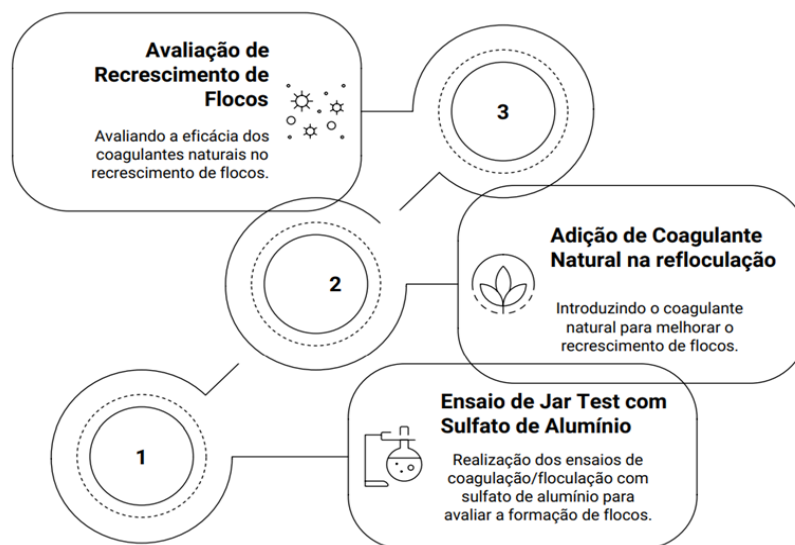
FBR R1		
Coagulante	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹) na 1ª etapa (coagulação e floculação seguidas de sedimentação)	Dosagem adicional de coagulante (mg.L ⁻¹) na 2ª etapa (refloculação)
		0
Solução de Sulfato de Alumínio a 5%	125	+ 12,5 + 31,7 + 63
		0
Extração Aquosa de <i>M. oleífera</i> 5%	735	+ 73,5 + 183,7 367,5
		0
Solução de Tanino 10%	102	+ 10,2 + 25,5 + 51
FBR R2		
Coagulante	Dosagem de coagulante (mg.L ⁻¹) na 1ª etapa (coagulação e floculação seguidas de sedimentação)	Dosagem adicional de coagulante (mg.L ⁻¹) na 2ª etapa (refloculação)
		0
Solução de Sulfato de Alumínio a 5%	131	+ 13,1 + 33,3 + 66
		0
Extração Aquosa de <i>M. oleífera</i> 5%	690	+ 69 + 172,5 + 345
		0
Solução de Tanino 10%	109	+ 10,9 + 27 + 54,5

Fonte: elaboração própria.

Para potencializar a eficácia dos processos de coagulação e floculação e diminuir os impactos ambientais causados por coagulante químicos, foram realizadas combinações entre o coagulante SSA (coagulante primário) e os coagulantes naturais AEMOP e STANSO (coagulantes secundários), conforme ilustrado na Figura 3. Para

isso, foram mantidas as concentrações do coagulante Sulfato de Alumínio adotadas na 1ª etapa dos ensaios de *Jar Test* e empregadas as dosagens adicionais dos coagulantes naturais na etapa de refloculação dos flocos (conforme Tabela 2) para avaliação do recrescimento dos flocos.

Figura 3 - Fluxograma da associação do coagulante químico inorgânico SSA com os coagulantes naturais AEMOP e STANSO



Fonte: elaboração própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Os resultados mostraram altos níveis de turbidez, cor e DO, significando alta concentração de microalgas (Quartaroli et al., 2024). A Tabela 5 traz os valores médios e desvios-padrão desses parâmetros que caracterizam o efluente.

Tabela 5 - Caracterização dos efluentes utilizados nos FBRs R1 e R2 (média±desvio padrão).

Parâmetros	FBR R1	FBR R2
Turbidez (NTU)	94,5±6,4	143,0±12,0
Cor Aparente (uC)	919±30	902±32
DO 254 nm	1,286±0,077	1,300±0,058
DO 540 nm	0,442±0,021	0,487±0,024
DO 680 nm	0,524±0,018	0,562±0,023
DO 750 nm	0,334±0,016	0,374±0,019
pH	7,6±0,2	7,6±0,1
DQO (mg.L ⁻¹)	525±30	548±43
MP-PVC (mg.L ⁻¹)	-	50

Fonte: Quartaroli et al., (2024).

5.2 DCCR APLICADO AOS FBRs R1 E R2 PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES ÓTIMAS DOS COAGULANTES

5.2.1 Extração aquosa da farinha de semente de *M. oleifera* 5%

As dosagens ótimas para a Extração Aquosa da farinha de semente de *M. oleifera* 5% (AEMOP) para FBRs R1 e R2 foram adotadas para esta pesquisa de acordo com os resultados de Quartaroli et al., (2024), que tratou dos diferentes métodos de processamento da semente de *M. oleifera* e suas eficiências na separação da biomassa algal para uso como biofertilizante.

A pesquisa desenvolvida pela Dra. Larissa Quartaroli avaliou seis métodos de extração da semente de *Moringa oleifera*, permitindo comparar o desempenho de diferentes preparações do coagulante na separação de microalgas e na remoção de sólidos suspensos totais. Os métodos testados resultaram em distintas formas de processamento, incluindo farinha de semente, farinha delipidada, soluções aquosas e

soluções salinas — cada uma em versões com e sem delipidação. A partir das superfícies-resposta obtidas em seu estudo, verificou-se que dois desses extratos apresentaram desempenho superior na separação das microalgas e dos microplásticos PVC: para o FBR R1, destacou-se a Extração Aquosa de Farinha de *M. oleifera*, enquanto para o FBR R2 o melhor resultado foi alcançado com a Farinha de Semente de *M. oleifera*.

Considerando esses resultados, e visando permitir uma comparação direta entre os fotobiorreatores, adotou-se a Extração Aquosa da Semente de *M. oleifera* nos ensaios de resistência e recrescimento dos flocos com dosagem adicional do coagulante. As condições ótimas determinadas para cada sistema indicaram dosagens de $735 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ no FBR R1 e $690 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ no FBR R2 (Tabela 6), enquanto o gradiente de mistura lenta (GML) apresentou ponto ótimo coincidente para ambos os fotobiorreatores, estabelecido em 50 s^{-1} . Esses resultados evidenciam a influência do tipo de extração na eficiência do processo de coagulação, ao mesmo tempo em que sugerem comportamento semelhante dos sistemas quanto à condição de mistura lenta necessária para maximizar o desempenho dos flocos formados.

Tabela 6 - Pontos ótimos obtidos pelas respostas do DCCR para as variáveis independente dosagem de coagulante ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e GML (s^{-1}) para a Extração Aquosa da farinha de semente de *M. oleifera*.

FBR	Dosagem de coagulante ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	GML (s^{-1})
R1	735	50
R2	690	50

Fonte: elaboração própria.

5.2.2 Solução de Tanfloc SG 10%

A eficiência de separação das microalgas (%) para os parâmetros de turbidez, cor, densidades ópticas (DO) de 254 (DO_{254}), 540 (DO_{540}), 680 (DO_{680}) e 750 nm (DO_{750}) estão expostos na Tabela 7 (FBR R1) e Tabela 8 (FBR R2). Os pontos centrais (ensaios 9, 10 e 11) mostraram poucas variações, o que demonstra boa consistência no processo.

Tabela 7 - Eficiência de separação das microalgas do efluente do FBR R1 (%) para STANSG. As três repetições do ponto central, correspondentes aos ensaios 9, 10 e 11, foram expressas pelas médias acompanhadas dos respectivos desvios padrão.

Ensaio	Turbidez	Cor Aparente	DO ₂₅₄	DO ₅₄₀	DO ₆₈₀	DO ₇₅₀
1	49,0	25,1	5,7	21,8	17,7	22,4
2	98,0	90,9	65,5	97,5	99,6	100,0
3	50,6	23,4	20,9	28,7	26,1	31,2
4	97,6	91,4	69,0	93,9	95,7	96,0
5	48,3	29,3	4,2	27,3	22,8	29,2
6	98,3	93,4	66,8	100,0	100,0	100,0
7	70,7	52,2	29,2	57,3	57,5	61,4
8	79,4	67,5	38,4	58,0	60,7	60,5
9/10/11	84,5±4,5	77,3±2,8	34,3±6,6	74,4±8,6	76,1±5,7	78,9±10,0

Fonte: elaboração própria.

Tabela 8 - Eficiência de separação das microalgas do efluente do FBR R2 (%) para STANSG. As três repetições do ponto central, correspondentes aos ensaios 9, 10 e 11, foram expressas pelas médias acompanhadas dos respectivos desvios padrão.

Ensaio	Turbidez	Cor Aparente	DO ₂₅₄	DO ₅₄₀	DO ₆₈₀	DO ₇₅₀
1	50,4	24,7	0,0	24,5	24,7	31,5
2	96,5	86,3	60,1	92,3	94,9	94,3
3	45,5	21,5	29,6	27,4	21,3	26,1
4	96,9	87,9	18,0	88,9	91,3	88,1
5	48,6	25,7	-10,7	10,4	20,0	16,4
6	98,6	90,2	71,9	100,0	98,6	98,8
7	53,8	28,0	32,8	38,9	36,0	40,5
8	83,8	65,5	35,2	62,0	63,5	63,7
9/10/11	87,3±1,1	74,1±2,6	43,8±1,2	76,5±1,5	76,1±2,1	76,8±1,5

Fonte: elaboração própria.

A partir dos dados da matriz de delineamento, foram geradas 6 superfícies respostas para velocidade de sedimentação de 0,12 cm.s⁻¹.

Com base nos resultados obtidos, foram calculados os modelos re-parametrizados, os coeficientes de regressão e a análise de variância (ANOVA) para cada uma das respostas (Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅ e Y₆), por meio do software Protimiza Experimental Design (Rodrigues & lemma, 2014), conforme apresentado nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Equação de regressão, coeficientes de regressão e ANOVA de STANSO para o FBR R1

Resposta	Regressão				ANOVA		
	Modelo re-parametrizado	Var	t _{cal.}	p-valor	F _{cal}	p-valor	R ²
Turbidez	$Y_1 = 76,85 + 20,84 x_1$	x_1	8,6 2	0,0000	74,23	0,0000	0,89
Cor Aparente	$Y_2 = 77,30 + 28,06 x_1 - 8,70 x_1^2 - 9,45 x_2^2$	x_1	10, 60	0,0000	41,73	0,0001	0,95
		x_1^2	- 2,76	0,0280			
		x_2^2	- 3,00	0,0200			
DO ₂₅₄	$Y_3 = 38,10 + 24,55 x_1$	x_1	9,5 5	0,0000	91,21	0,0000	0,91
DO ₅₄₀	$Y_4 = 64,34 + 30,46 x_1$	x_1	8,6 6	0,0000	75,06	0,0000	0,89
DO ₆₈₀	$Y_5 = 76,10 + 32,60 x_1 - 7,46 x_1^2 - 8,61 x_2^2$	x_1	12, 63	0,0000	56,73	0,0000	0,96
		x_1^2	- 2,43	0,0455			
		x_2^2	- 2,80	0,0264			
DO ₇₅₀	$Y_6 = 67,04 + 30,32 x_1$	x_1	7,5 4	0,0000	56,88	0,0000	0,86

Fonte: elaboração própria.

Tabela 10 - Equação de regressão, coeficientes de regressão e ANOVA de STANSG para o FBR R2

Resposta	Regressão				ANOVA		
	Modelo re-parametrizado	Var	t _{cal.}	p-valor	F _{cal}	p-valor	R ²
Turbidez	$Y_1 = 76 + 21,03 x_1$	x_1	5,36	0,0005	28,8	0,0005	0,76
Cor Aparente	$Y_2 = 59,27 + 27,40 x_1$	x_1	5,28	0,0005	27,8	0,0005	0,76
DO ₂₅₄	$Y_3 = 38,41 + 24,21 x_1$	x_1	8,4	0,0000	70,6	1E-05	0,89
DO ₅₄₀	$Y_4 = 76,57 + 32 x_1 - 9,32 x_1^2 - 11,70 x_2^2$	x_1	12,9	0,0000	62,4	2E-05	0,96
		x_1^2	-3,16	0,0159			
		x_2^2	-3,97	0,0054			
DO ₆₈₀	$Y_5 = 54,18 + 33,10 x_1$	x_1	4,17	0,0024	17,4	0,0024	0,66
DO ₇₅₀	$Y_6 = 76,80 + 32,15 x_1 - 10,41 x_1^2 - 10,36 x_2^2$	x_1	11,4	0,0000	48,4	5E-05	0,95
		x_1^2	-3,11	0,0171			
		x_2^2	-3,09	0,0175			

Fonte: elaboração própria.

A partir das análises gráficas das superfícies-resposta e nos cálculos das derivadas das equações obtidas por meio da ANOVA para cada parâmetro, foram determinados os valores ótimos da dosagem de coagulante e do GML para cada fotobiorreator, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Pontos ótimos para coagulante natural STANSG 10%

Fotobiorreator	Dosagem (mg.L ⁻¹)	GML (s ⁻¹)
FBR R1	102	50
FBR R2	109	50

Fonte: elaboração própria.

Para a validação do modelo, o ponto ótimo da dosagem de coagulante para cada fotobiorreator foi utilizado em ensaios experimentais (CFS). Apesar da variável independente relacionada ao gradiente de mistura lenta (x_2) não ter apresentado significância estatística na maioria das respostas avaliadas, para dois parâmetros demonstrou impacto relevante (cor aparente e DO₆₈₀, para FBR R1; DO₅₄₀ e DO₇₅₀, para FBR R2), indicando ponto ótimo para gradiente de mistura lenta de 50 s⁻¹. Por esse motivo, esse valor foi adotado como padrão nos experimentos de validação. A Tabela 12 apresenta os resultados previstos pelo modelo em comparação com os valores observados durante a validação experimental.

Tabela 12 - Valores previstos pelo modelo e valores experimentais utilizados no processo de validação de STANSG para FBR R1 e FBR R2.

FBR R1	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
Remoção prevista (%)	100	97,75	65,88	98,8	100	100
Remoção experimental (%)	98,8	95,1	71,3	97,0	98,9	95,6
FBR R2	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
Remoção prevista (%)	100	98,0	72,7	100	99,1	100
Remoção experimental (%)	98,0	94,7	76,6	97,7	98,5	99,7

Fonte: elaboração própria.

5.2.3 Solução de Sulfato de Alumínio 5%

A eficiência de separação das microalgas, expressa em termos percentuais, foi avaliada por meio dos parâmetros de turbidez, cor aparente e densidades ópticas (DO) nos comprimentos de onda de 254 nm (DO₂₅₄), 540 nm (DO₅₄₀), 680 nm (DO₆₈₀) e 750 nm (DO₇₅₀), cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 13 (FBR R1) e

14 (FBR R2). Os ensaios correspondentes aos pontos centrais (9, 10 e 11) revelaram baixa dispersão nos dados, indicando elevada reprodutibilidade e estabilidade do processo experimental.

Tabela 13 - Eficiência de separação das microalgas do efluente do FBR R1 (%) para SSA. As três repetições do ponto central, correspondentes aos ensaios 9, 10 e 11, foram expressas pelas médias acompanhadas dos respectivos desvios padrão.

Ensaio	Turbidez	Cor Aparente	DO ₂₅₄	DO ₅₄₀	DO ₆₈₀	DO ₇₅₀
1	58,0	35,9	14,7	40,6	50,7	39,5
2	99,9	95,0	86,9	100,0	100,0	100,0
3	34,9	25,0	17,7	16,8	14,8	19,8
4	98,6	94,7	77,9	98,5	99,3	99,6
5	36,7	24,3	17,0	12,5	13,2	14,8
6	98,7	95,2	79,1	95,5	96,4	94,7
7	87,7	80,2	61,8	79,0	75,2	76,6
8	83,9	80,0	59,0	93,3	87,5	96,6
9/10/11	93,7±1,8	87,0±2,5	61,6±4,8	87,5±6,3	87,8±5,1	88,5±6,2

Fonte: elaboração própria.

Tabela 14 - Eficiência de separação das microalgas do efluente do FBR R2 (%) para SSA. As três repetições do ponto central, correspondentes aos ensaios 9, 10 e 11, foram expressas pelas médias acompanhadas dos respectivos desvios padrão.

Ensaio	Turbidez	Cor Aparente	DO ₂₅₄	DO ₅₄₀	DO ₆₈₀	DO ₇₅₀
1	81,7	57,6	36,6	77,0	48,2	53,8
2	99,9	93,8	70,3	88,9	94,2	89,3
3	72,5	57,3	31,4	44,4	39,3	41,6
4	98,8	93,5	79,3	100,0	100,0	100,0
5	51,1	30,6	30,2	46,4	38,5	44,5
6	96,2	92,6	86,9	100,0	100,0	100,0
7	90,7	84,0	65,6	84,2	82,1	83,8
8	95,9	88,7	66,7	86,7	85,9	87,2
9/10/11	94,7±1,1	84,1±1,3	62,9±1,6	85,1±1,6	84,9±2,3	86,0±2,5

Fonte: elaboração própria.

Com base nos dados obtidos a partir da matriz de planejamento experimental, foram geradas seis superfícies de resposta associadas à velocidade de sedimentação de $0,12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

A partir desses resultados, foram ajustados os modelos re-parametrizados, calculados os coeficientes de regressão e realizada a análise de variância (ANOVA) para cada variável de resposta (Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 e Y_6), utilizando o software Protimiza Experimental Design (Rodrigues & lemma, 2014), conforme demonstrado nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Equação de regressão, coeficientes de regressão e ANOVA de SSA para o FBR R1

Resposta	Regressão				ANOVA		
	Modelo re-parametrizado	Var	tcal.	p-valor	Fcal	p-valor	R ²
Turbidez	$Y_1 = 89,03 + 24,16 x_1 - 12,50 x_1^2$	x_1	8,73	0,0000	45,9	0,00004	0,92
		x_1^2	-3,97	0,0041			
Cor	$Y_2 = 82,06 + 28,63 x_1 - 13,91 x_1^2$	x_1	10,89	0,0000	70,1	0,00001	0,95
		x_1^2	-4,65	0,0016			
DO 254 nm	$Y_3 = 59,89 + 27,53 x_1 - 7,48 x_1^2$	x_1	10,58	0,0000	59,1	0,00002	0,94
		x_1^2	-2,53	0,0355			
DO 540 nm	$Y_4 = 85,41 + 32,31 x_1 - 17,62 x_1^2$	x_1	9,93	0,0000	60,6	0,00001	0,94
		x_1^2	-4,76	0,0014			
DO 680 nm	$Y_5 = 84,31 + 31,43 x_1 - 15,87 x_1^2$	x_1	8,32	0,0000	41,4	0,00006	0,92
		x_1^2	-3,69	0,0061			
DO 750 nm	$Y_6 = 86,85 + 31,67 x_1 - 18,06 x_1^2$	x_1	9,10	0,0000	51,9	0,00003	0,93
		x_1^2	-4,56	0,0018			

Fonte: elaboração própria.

Tabela 16 - Equação de regressão, coeficientes de regressão e ANOVA de SSA para o FBR R2

Resposta	Modelo re-parametrizado	Regressão			ANOVA		
		Var	tcal.	p-valor	Fcal	p-valor	R ²
Turbidez	$Y_1 = 95,14 + 13,54 x_1 - 9,47 x_1^2$	x_1	8,75	0,0000	52,8	0,00002	0,93
		x_1^2	-5,38	0,0007			
Cor aparente	$Y_2 = 85,53 + 20,01 x_1 - 11,30 x_1^2$	x_1	20,1	0,0000	250,9	0,00000	0,98
		x_1^2	-9,96	0,0000			
DO254	$Y_3 = 60,15 + 19,30 x_1$	x_1	8,94	0,0000	79,9	0,00001	0,90
DO540	$Y_4 = 83,55 + 20,68 x_1 - 7,29 x_1^2$	x_1	10,5	0,0000	59,9	0,00002	0,94
		x_1^2	-3,24	0,0119			
DO680	$Y_5 = 82,98 + 24,21 x_1 - 8,76 x_1^2$	x_1	12,9	0,0000	91,1	0,00000	0,96
		x_1^2	-4,09	0,0035			
DO750	$Y_6 = 83,97 + 21,55 x_1 - 8,17 x_1^2$	x_1	9,47	0,0000	49,8	0,00003	0,93
		x_1^2	-3,16	0,0135			

Fonte: elaboração própria.

A partir da interpretação das superfícies de resposta, associada à análise das derivadas das equações geradas pela ANOVA para cada parâmetro avaliado, foi identificado os valores ótimos correspondentes a cada fotobiorreator, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Pontos ótimos para o coagulante químico inorgânico SSA

Fotobiorreator	Dosagem (mg.L ⁻¹)	GML (s ⁻¹)
FBR R1	125	50
FBR R2	131	50

Fonte: elaboração própria.

Para fins de validação do modelo, o ponto ótimo referente à dosagem de coagulante foi empregado em ensaios experimentais conduzidos por meio do processo de coagulação-floculação-sedimentação (CFS). Embora a variável independente associada ao gradiente de mistura lenta (x2) não tenha apresentado significância estatística para as variáveis de resposta analisadas, observou-se influência significativa nas análises gráficas das superfícies-resposta, os quais indicaram um valor ótimo correspondente a um gradiente de 50 s⁻¹. Em função desse resultado, esse valor foi adotado como referência nos experimentos de validação. A Tabela 18 apresenta a comparação entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais obtidos.

Tabela 18 - Valores previstos pelo modelo e valores experimentais utilizados no processo de validação de SSA para FBR R1 e FBR R2

FBR R1	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
Remoção prevista (%)	99,9	96,7	76,2	99,45	92,7	94,3
Remoção experimental (%)	99,2	95,5	66,2	94,2	94,7	93,4
FBR R2	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
Remoção prevista (%)	99,9	94,4	87,5	98,2	99,7	98,2
Remoção experimental (%)	98,9	94,2	81,7	99,2	99,6	99,4

Fonte: elaboração própria.

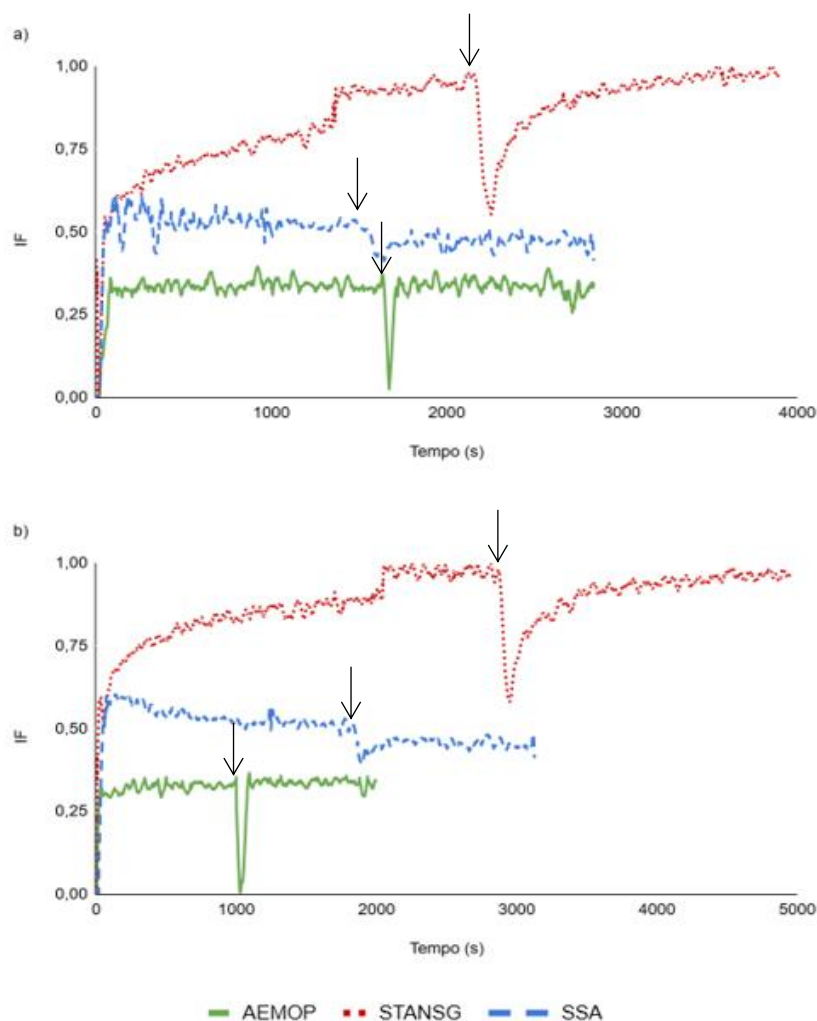
Os resultados obtidos através dos ensaios experimentais mostraram elevada concordância com os valores previstos pelo modelo proposto. No entanto, no fotobiorreator R1, verificou-se menor precisão na estimativa da variável de resposta Y₃. De forma semelhante, no fotobiorreator R2, foi observada uma divergência entre os valores estimados e os dados experimentais referentes também à variável Y₃.

5.3 QUEBRA E RECRESCIMENTO DOS FLOCOS FORMADOS POR MICROALGAS E COAGULANTES NATURAIS CONTAMINADOS COM MP-PVC

5.3.1 Os efeitos da dosagem inicial de coagulante

A Figura 4 apresenta o comportamento temporal do Índice de Flocação (IF) durante as etapas de crescimento, quebra e recrescimento dos flocos formados nos FBRs R1 e R2, utilizando os coagulantes AEMOP, STANSG e SSA, enquanto os valores quantitativos associados aos fatores de quebra (F1) e de recrescimento (F2) estão sintetizados na Tabela 19. As setas indicadas na Figura 4 delimitam o instante correspondente à aplicação do cisalhamento elevado, caracterizando o início da ruptura dos flocos e a subsequente fase de recrescimento, conduzida sem adição suplementar de coagulante.

Figura 4 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos sem dosagem adicional de coagulante. (a) FBR R1, (b) FBR R2.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 19 - Fatores de quebra e recrescimento (%) dos flocos formados por microalgas para os coagulantes AEMOP, STANSG e SSA de FBR R1 e FBR R2

FBR R1				
Coagulante	AEMOP	STANSG	SSA	
F1	6,8	56,5	67,8	
F2 (sem)	96,5	112,5	50,1	
FBR R2				
Coagulante	AEMOP	STANSG	SSA	
F1	1,7	58,2	64,8	
F2 (sem)	103,7	109,3	45,4	

Fonte: elaboração própria.

A partir do monitoramento do crescimento, da ruptura e do recrescimento dos flocos (Figura 4), observou-se que o coagulante AEMOP apresentou, para ambos os fotobiorreatores, os menores valores de Índice de Floculação (IF) quando comparado aos demais coagulantes avaliados. O IF é uma métrica sensível ao estado de agregação das partículas, de modo que valores elevados estão associados à formação de flocos maiores e mais estruturados, enquanto reduções nos valores de IF indicam desagregação ou ruptura dessas estruturas (Gregory; Nelson, 1986; Yu et al., 2010). Assim, os resultados indicam que os flocos formados com AEMOP apresentaram menor grau de agregação ao longo do ensaio.

Em relação aos coagulantes à base de tanino, Graham et al. (2008) demonstraram que esses materiais podem apresentar comportamento similar ao dos coagulantes constituídos por sais metálicos em ensaios de coagulação, floculação e sedimentação conduzidos na faixa de pH entre 6 e 7, atuando por meio de mecanismos associados à adsorção do tanino na fase sólida. De forma consistente com esse comportamento, nesta pesquisa o coagulante STANSG apresentou valores de IF superiores aos observados para AEMOP e SSA (Figura 4), indicando a formação de flocos mais agregados. A análise dos fatores de resistência e recrescimento (F1 e F2, Tabela 19) evidenciou que os flocos formados com STANSG apresentaram elevada capacidade de regeneração estrutural, com valores de F2 superiores a 100%, o que indica recrescimento completo e até mesmo incremento no grau de agregação após a etapa de cisalhamento. Para o AEMOP, os flocos regenerados atingiram aproximadamente 95% do tamanho anterior à ruptura, caracterizando recuperação quase total da estrutura flocular.

Em contraste, os flocos formados com o coagulante químico inorgânico sulfato de alumínio (SSA) apresentaram recuperação parcial após o retorno do gradiente de mistura lenta para 50 s^{-1} . Conforme observado na Figura 4 e quantificado na Tabela 19, os valores de IF após a etapa de cisalhamento permaneceram inferiores aos registrados antes da ruptura, resultando em fatores de recrescimento da ordem de 50%. Esse comportamento indica que apenas uma fração dos flocos originalmente formados foi capaz de reassumir o grau de agregação anterior, evidenciando limitação na capacidade de regeneração estrutural desses flocos.

Apesar de os ensaios desta pesquisa não terem sido realizados com o mesmo tipo de solução empregado por Yu et al. (2010), o comportamento observado para os

flocos formados com SSA é análogo ao descrito para flocos gerados com coagulante à base de sulfato de alumínio, nos quais a regeneração após cisalhamento ocorre de forma incompleta. Essa semelhança sugere que, após a ruptura, a refloculação resulta predominantemente na formação de novos agregados menores, em vez da reconstrução da estrutura flocular original.

A quebra dos flocos está diretamente relacionada à resistência estrutural das agregações e à intensidade do cisalhamento aplicado, sendo o valor mínimo do IF um indicativo do tamanho dos flocos após a ruptura (Yu et al., 2010). Para o SSA, o curto tempo de exposição ao cisalhamento elevado (30 s) não promoveu desagregação acentuada, refletindo-se em reduções moderadas nos valores de IF em ambos os fotobiorreatores. Comportamento semelhante foi observado para o STANSG, cujos fatores de quebra situaram-se em torno de 55% para os dois sistemas. Esses resultados indicam que o tempo de cisalhamento aplicado foi insuficiente para causar desestabilização completa dos flocos formados por esses coagulantes.

Entretanto, após o restabelecimento da velocidade de agitação para 50 s^{-1} , os flocos formados com STANSG apresentaram recrescimento gradual e consistente, sem prejuízo à capacidade regenerativa em nenhum dos fotobiorreatores avaliados. Os valores de platô do IF, que representam os limites de crescimento flocular sob determinada taxa de cisalhamento e refletem a resistência estrutural dos flocos (Yu et al., 2010), evidenciaram diferenças no tempo necessário para que cada coagulante atingisse seus valores máximos. Embora o gradiente de mistura lenta tenha sido mantido constante, o STANSG demandou maior intervalo de tempo tanto para o crescimento inicial quanto para o recrescimento dos flocos, porém resultou nos maiores valores finais de IF. Em contrapartida, os coagulantes à base de semente de *M. oleifera* e o sulfato de alumínio atingiram seus respectivos platôs em menor tempo, indicando diferenças nos mecanismos de agregação e na dinâmica estrutural dos flocos formados.

5.3.1.1 Os efeitos do microplástico PVC

Com o objetivo de avaliar os efeitos da presença de microplásticos PVC (MP- PVC) na formação, estabilidade e comportamento dos flocos, foram analisados os fatores de quebra (F1) e recrescimento (F2), bem como as eficiências de separação

das microalgas para os parâmetros turbidez, cor aparente e densidades ópticas (DO_{254} , DO_{540} , DO_{680} e DO_{750}), nos fotobiorreatores FBR R1 e FBR R2 (este último contendo MP-PVC). Os valores dos fatores F1 e F2, obtidos sem dosagem adicional de coagulante, estão apresentados na Tabela 19. Esses fatores foram calculados a partir do monitoramento contínuo do Índice de Floculação (IF), registrado pelo sistema PDA ao longo dos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação (CFS), conforme descrito nas Equações 1 e 2.

De modo geral, os resultados indicaram que a presença do MP-PVC não promoveu alterações significativas nos processos de ruptura e recrescimento dos flocos para os três coagulantes avaliados. Para o coagulante natural AEMOP, observou-se uma discreta redução do fator de quebra (F1) no FBR R2 em relação ao FBR R1, acompanhada por valores de recrescimento superiores a 100%, evidenciando elevada capacidade de reorganização estrutural dos flocos após o cisalhamento. Esse comportamento indica que a presença do MP-PVC não comprometeu a integridade dos flocos formados por esse coagulante.

Para o coagulante químico inorgânico sulfato de alumínio (SSA), mesmo considerando as diferenças na composição da matriz particulada em relação a sistemas sintéticos, os resultados obtidos mostraram-se consistentes com aqueles reportados por Yu et al. (2010). Em ambos os casos, a capacidade de regeneração dos flocos permaneceu limitada, com valores de F2 próximos de 50%, indicando que apenas uma fração das estruturas rompidas foi capaz de recuperar o grau de agregação anterior após o retorno à condição de mistura lenta.

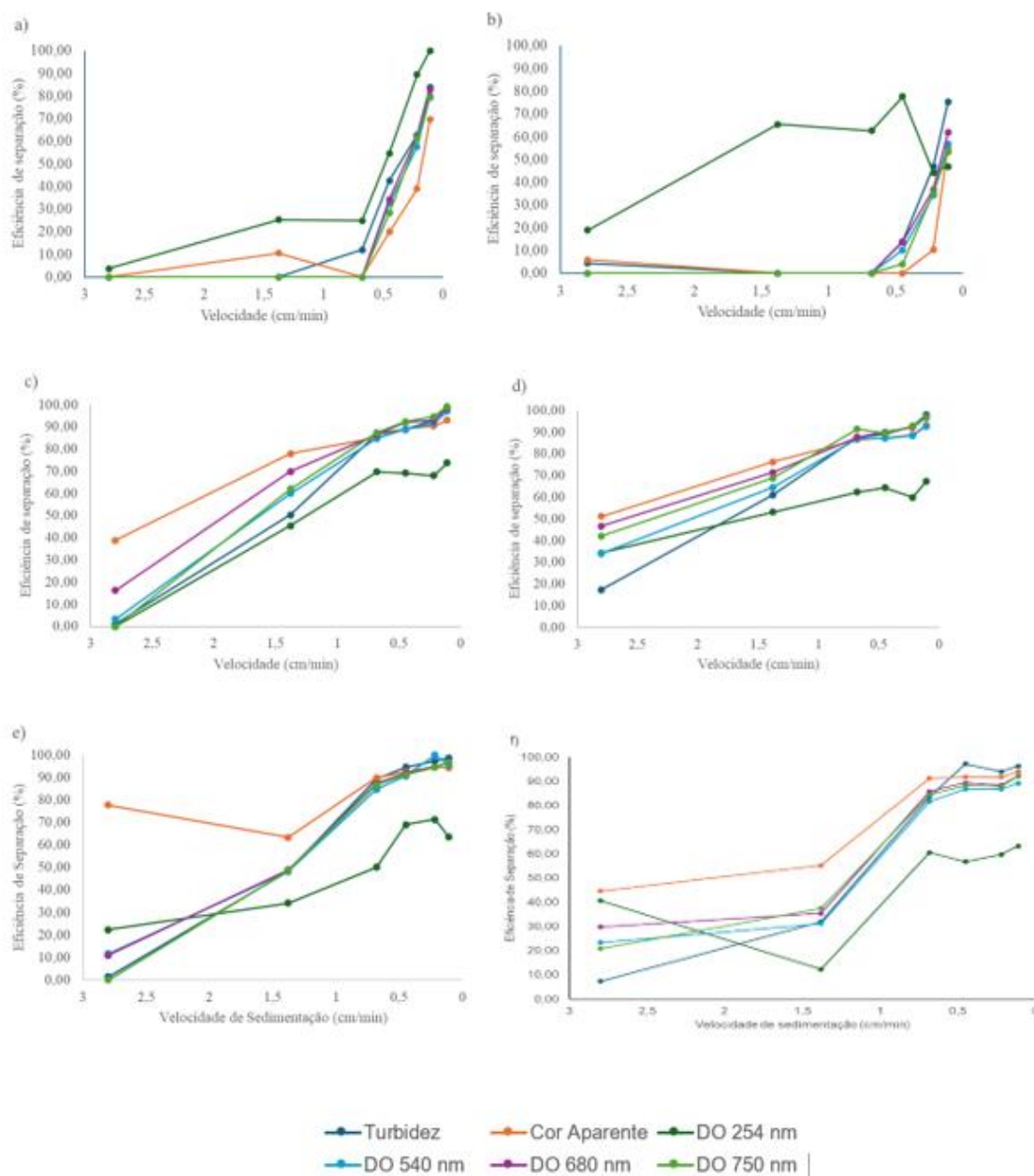
O contraste observado entre o comportamento do AEMOP, classificado como polieletrólito natural, e do SSA pode ser atribuído às diferenças nos mecanismos de floculação predominantes e à estabilidade estrutural dos flocos formados. Coagulantes inorgânicos hidrolisantes, como o SSA, atuam majoritariamente por mecanismo de varredura em faixas de pH próximas à neutralidade, promovendo a incorporação das partículas em precipitados de hidróxidos metálicos. A ruptura desses flocos é reconhecidamente pouco reversível, em razão do envelhecimento do precipitado amorfo e da redução da reatividade das superfícies recém-expostas após o cisalhamento. Em contraste, o AEMOP promove a agregação por meio de neutralização de cargas e formação de pontes poliméricas, originando flocos estruturalmente mais flexíveis e com maior capacidade de reorganização, o que

explica a recuperação de aproximadamente 95% do tamanho original após a ruptura. Esses resultados indicam que, mesmo em um sistema contendo diferentes espécies de microalgas e MP-PVC, os mecanismos de coagulação associados ao sulfato de alumínio permaneceram inalterados.

Para o coagulante natural à base de tanino (STANSG), não foram observadas variações relevantes nos fatores de quebra e recrescimento entre os dois fotobiorreatores, sendo mantida elevada capacidade regenerativa, com valores de F2 em torno de 110% para ambos os sistemas. Esse desempenho evidencia a elevada resistência estrutural e a capacidade de reorganização dos flocos formados por esse coagulante, independentemente da presença de MP-PVC.

Como abordagem complementar para a avaliação do comportamento sedimentar dos flocos e dos efeitos do MP-PVC na separação das microalgas, foram construídas curvas de sedimentação a partir das eficiências de separação (%) obtidas para turbidez, cor aparente e densidades ópticas nos comprimentos de onda de 254, 540, 680 e 750 nm. As análises foram realizadas considerando seis condições distintas de velocidade de sedimentação (2,8; 1,38; 0,68; 0,45; 0,22 e 0,12 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$), definidas com base nas condições experimentais adotadas no ensaio de sedimentação. As curvas correspondentes aos fotobiorreatores FBR R1 e FBR R2 são apresentadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Eficiência de separação (%) em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) para FBR R1

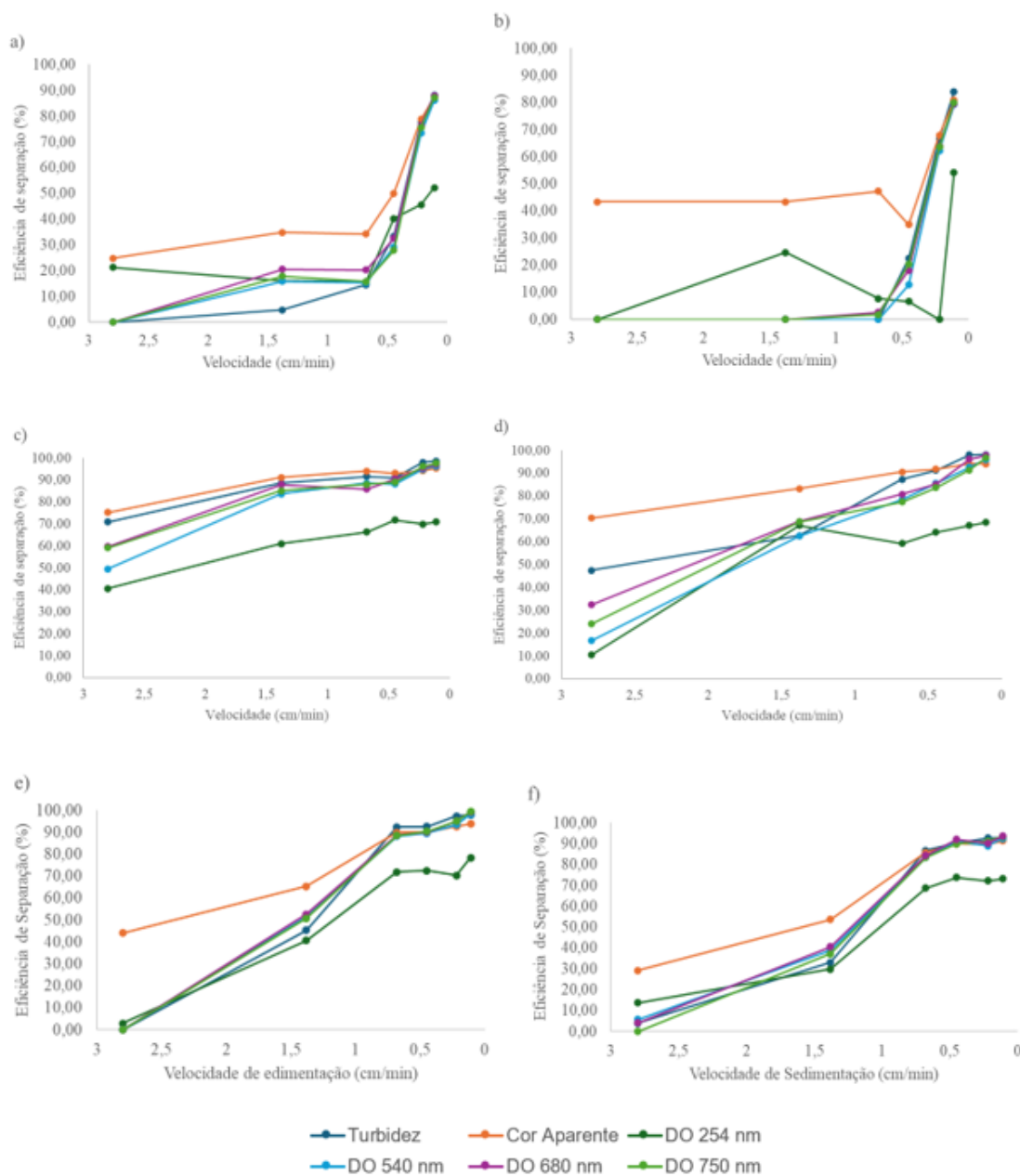


Nota: a) AEMOP 5% (floculação), b) AEMOP 5% (refloculação), c) STANSNG 10% (floculação), d) STANSNG 10% (refloculação), e) SSA 5% (floculação) e f) SSA 5% (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e 2,8 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

Figura 6 - Eficiência de separação (%) em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) para FBR R2



Nota: a) AEMOP 5% (floculação), b) AEMOP 5% (refloculação), c) STANSO 10% (floculação), d) STANSO 10% (refloculação), e) SSA 5% (floculação) e f) SSA 5% (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

Para ambos os fotobiorreatores, verificou-se que as eficiências de separação das microalgas passaram a apresentar incrementos mais expressivos a partir da velocidade de sedimentação de $0,45 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, correspondente a um tempo de sedimentação de aproximadamente 15 minutos. Para o coagulante AEMOP, observou-se que, no FBR R2, os valores de eficiência de separação obtidos na etapa

de refloculação foram superiores àqueles registrados no FBR R1 para todos os parâmetros físicos avaliados. Esse comportamento evidencia uma diferença no desempenho sedimentar dos flocos na presença de MP-PVC, conforme observado experimentalmente nas curvas de sedimentação, sem que se estabeleça relação causal ou inferencial.

Embora os valores de eficiência obtidos após a refloculação não tenham atingido os máximos registrados ao final da etapa de floculação, foi observada uma melhoria consistente na separação para todos os parâmetros físicos analisados, com destaque para turbidez (ERT = 83,95%), cor aparente (ERC = 80,83%) e densidades ópticas nos comprimentos de onda de 540, 680 e 750 nm, cujas eficiências se aproximaram de 80%.

Para os coagulantes STANSG e SSA, a presença do MP-PVC não evidenciou interferência significativa no comportamento sedimentar dos flocos. No entanto, no caso do SSA, observou-se uma melhoria pontual na eficiência de separação para o parâmetro DO254 durante a etapa de refloculação no FBR R2, com incremento de aproximadamente 15% em relação ao FBR R1. Esse resultado está associado a alterações na contribuição óptica dos flocos após o cisalhamento, sem que, necessariamente, tenha ocorrido aumento proporcional no tamanho físico das estruturas agregadas.

5.3.2 Os efeitos da dosagem adicional de coagulante

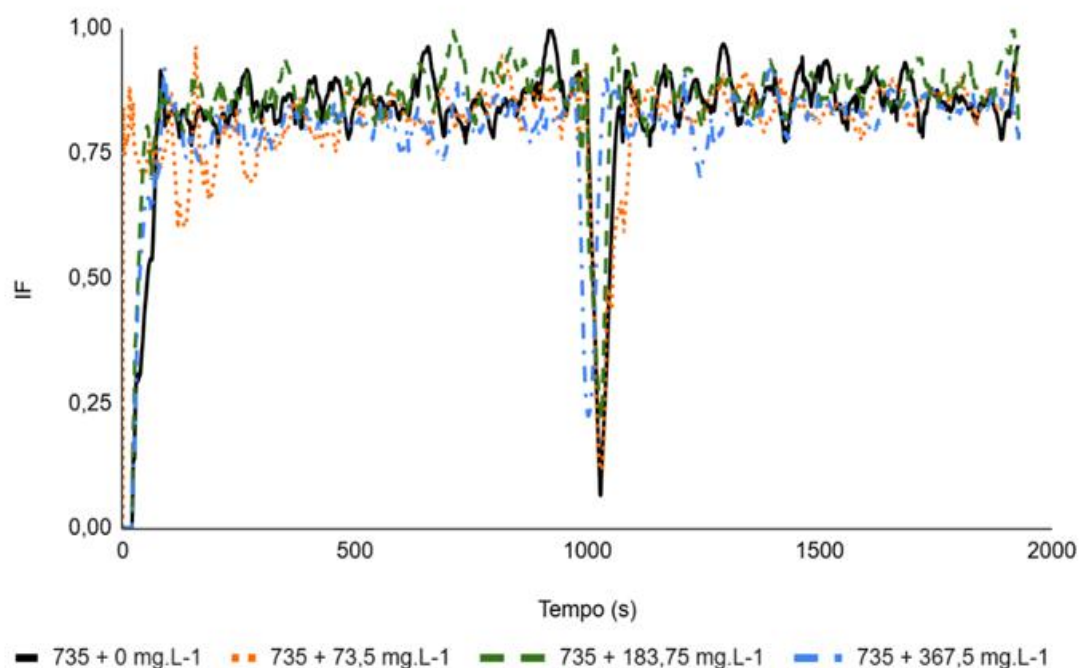
Em uma série de testes, foram adicionados no sistema CFS dosagens de coagulantes no início da etapa de quebra dos flocos para analisar uma possível melhoria no desempenho de recrescimento. Novamente foram utilizados os valores de IF obtidos pelo PDA como parâmetro para a determinação dos fatores de quebra e recrescimento dos flocos e os valores da eficiência de remoção de microalgas e MP-PVC para os mesmos parâmetros adotados anteriormente, complementando os resultados dos efeitos da dosagem adicional de coagulante. Os ensaios de CFS seguiram iguais aos ensaios de *Jar Test* realizados anteriormente, seguindo o mesmo tempo de mistura rápida, as mesmas velocidades de mistura rápida e lenta e o mesmo tempo de sedimentação de 30 e 60 minutos. Para a determinação das dosagens adicionais, foi adotada como primeira a mesma concentração molar de alumínio

utilizada por Yu *et al.*, (2010) para o coagulante SSA. De acordo com os cálculos relacionados com a concentração molar de alumínio e a solução de sulfato de alumínio realizada em laboratório, verificou-se que a concentração de 0,03 Mm Al era o equivalente a 25% da dosagem ótima de SSA obtida pelo método DCCR. A partir dessa proporção, foram adotadas mais duas: uma medida inferior (10%) e outra superior (50%). Para análises comparativas, essas mesmas proporções foram aplicadas para os coagulantes naturais AEMOP e STANSG. Os valores das dosagens ótimas e adicionais para os coagulantes utilizados nesta pesquisa podem ser encontradas na Tabela 2. Não foram realizadas correções do pH durante os ensaios de CFS, quebra e recrescimento dos flocos.

5.3.2.1 Extrato aquoso de farinha de semente de *M. oleifera* (AEMOP) 5%

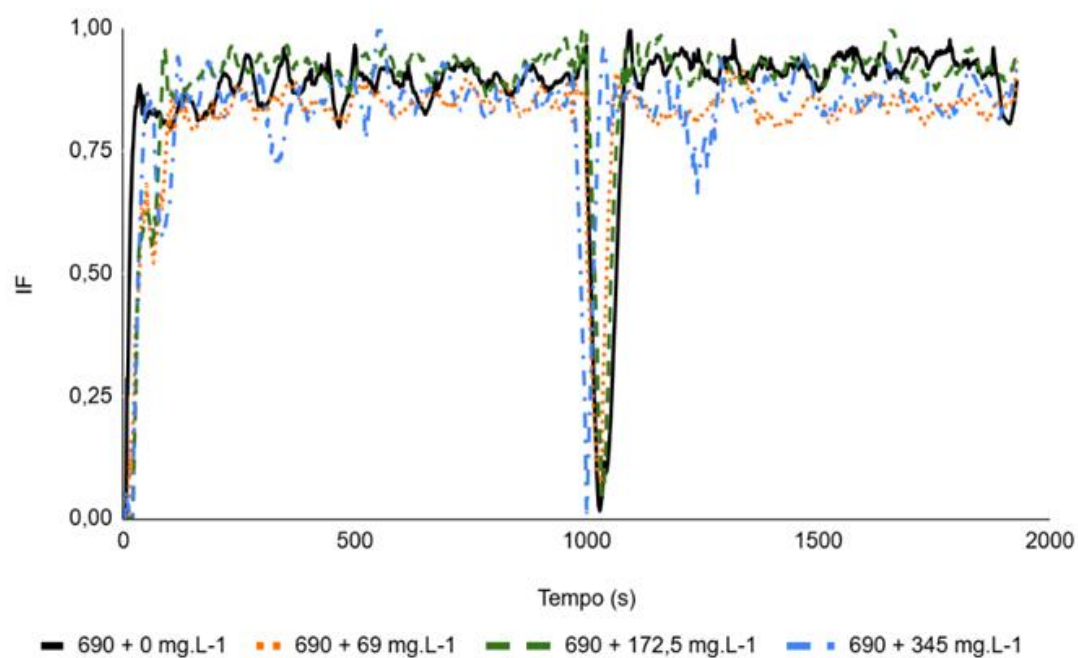
Os resultados obtidos no monitoramento contínuo com o PDA no crescimento, quebra e recrescimento dos flocos formados por microalgas pelo AEMOP para FBR R1 e FBR R2 estão apresentados nas Figuras 7 e 8. Os valores quantitativos dos fatores de quebra (F1) e recrescimento (F2) para FBR R1 e FBR R2 estão presentes na Tabela 20.

Figura 7 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas com dosagens adicionais do coagulante AEMOP 5% para FBR R1



Fonte: elaboração própria.

Figura 8 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas com dosagens adicionais do coagulante AEMOP 5% para FBR R2



Fonte: elaboração própria.

Tabela 20 - Fatores de quebra e recrescimento (%) dos flocos formados por microalgas pelo coagulante AEMOP 5% para FBR 1 e FBR R2

FBR R1 *				
Dosagem adicional (mg.L ⁻¹)	0	73,5	183,75	367,5
F1	6,8	11,9	21,9	24,3
F2	96,5	95,2	100,9	99,5
V3/V1	96,8	95,7	100,7	99,6
FBR R2 (com adição de MP-PVC) **				
Dosagem adicional (mg.L ⁻¹)	0	69	172,5	345
F1	1,7	7	5,2	1,5
F2	103,7	104	100,8	95,9
V3/V1	103,6	103,7	100,7	96

*Para FBR R1: dosagem inicial de AEMOP 5% = 735 mg.L⁻¹, velocidade de quebra de 500 s⁻¹, tempo de quebra = 30 s, velocidade de mistura lenta = 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

**Para FBR R2: dosagem inicial de AEMOP 5% = 690 mg.L⁻¹, velocidade de quebra de 500 s⁻¹, quebra de 30 s, velocidade de mistura lenta = 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

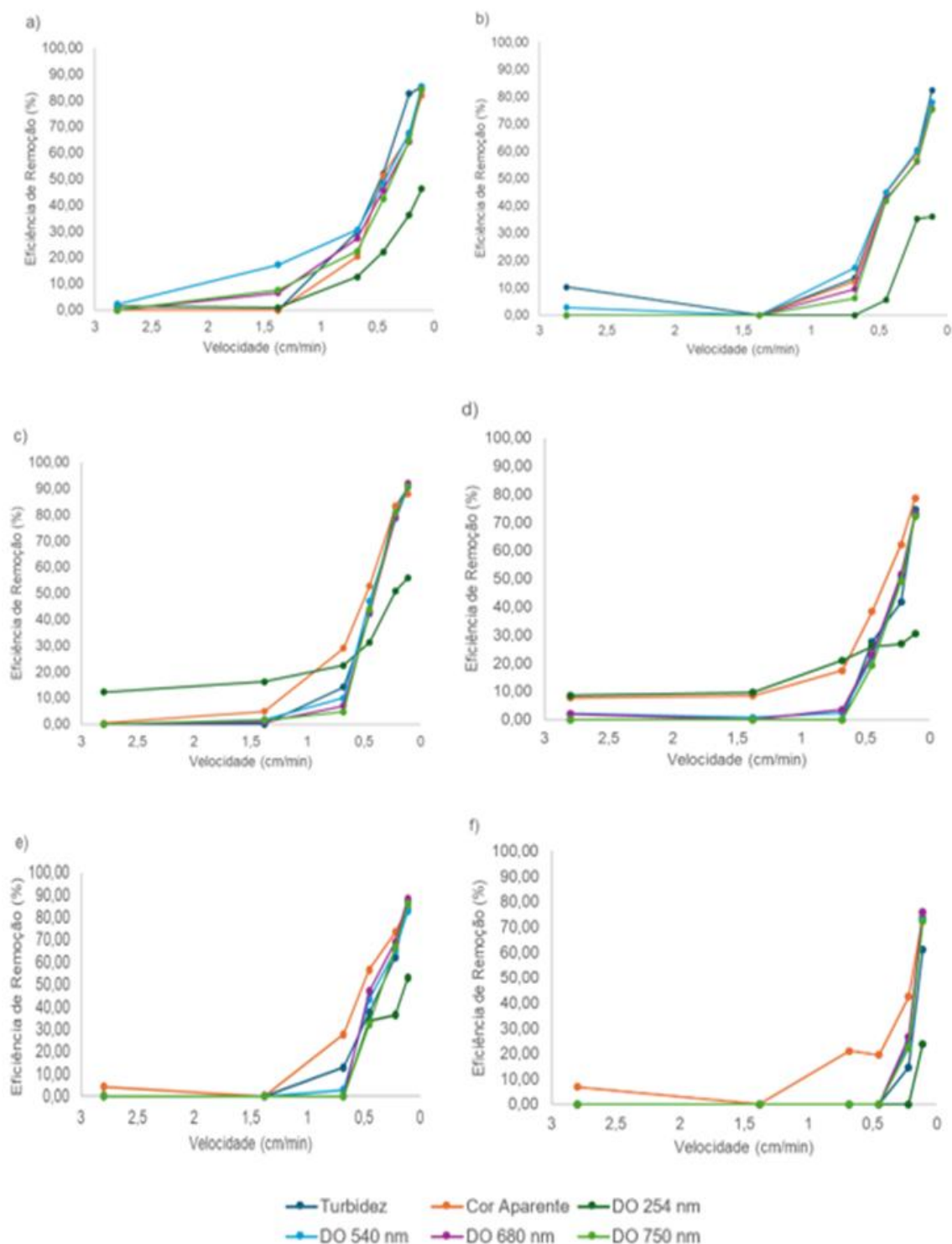
Fonte: elaboração própria.

Em geral, pode-se dizer a partir dos valores de F1 e F2 que a dosagem adicional de AEMOP no início da quebra dos flocos após a floculação não afetou o recrescimento dos flocos, mantendo uma recuperação dos flocos acima dos 95% após uma alta taxa de cisalhamento (500 s⁻¹) em um curto período (30 s). Para o FBR R1, observou-se que as dosagens adicionais incorporadas no início da ruptura dos flocos podem ter contribuído de maneira gradativa e discreta na resistência dos flocos, tornando-os um pouco mais resistentes à quebra com o aumento do valor de F1. Apesar disso, os flocos de AEMOP com microalgas atingiram capacidade regenerativa de 100% somente para a dosagem adicional intermediária (183,75 mg.L⁻¹). Já no FBR R2, a dosagem adicional mais baixa (69 mg.L⁻¹) foi suficiente para proporcionar flocos um pouco mais resistentes, com fator de recrescimento acima dos 100% quando comparado com as outras duas dosagens adicionais, que mostraram aumento na quebra dos flocos e diminuição do recrescimento com o aumento da dosagem adicional. Neste momento, não é possível afirmar que os MP-PVC presentes nas águas residuais tratadas do FBR R2 impactaram na ruptura e no tamanho dos flocos somente pelos dos F1 e F2, pois esses valores foram determinados pelo IF, parâmetro baseado na projeção da área da seção transversal de espalhamento do floco. Com isso, as medições por métodos com transmissão de luz podem trazer alterações nos resultados, podendo projetar flocos aparentemente maiores ou menores em relação

ao seu tamanho real (Yu et al., 2010). Portanto, são necessários estudos que envolvam metodologias (análise de imagem, por exemplo) que forneçam resultados absolutos da dimensão dos flocos de microalgas formados por coagulantes à base de semente de *M. oleífera* para trazer mais esclarecimentos.

Na tentativa de compreender melhor de que maneira o MP-PVC pode influenciar nas características dos flocos formados pelo AEMOP, foram realizadas curvas de sedimentação para seis velocidades (2,8, 1,38, 0,68, 0,45, 0,22 e 0,12 cm.min⁻¹) em relação as eficiências de separação das microalgas para os parâmetros de turbidez, cor aparente e densidades ópticas de 254, 540, 680 e 750 nm. A seguir, são apresentadas as curvas de sedimentação para FBR R1 (Figura 9) e FBR R2 (Figura 10).

Figura 9 - Eficiência de separação (%) do coagulante AEMOP 5% com dosagem adicional em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para FBR R1

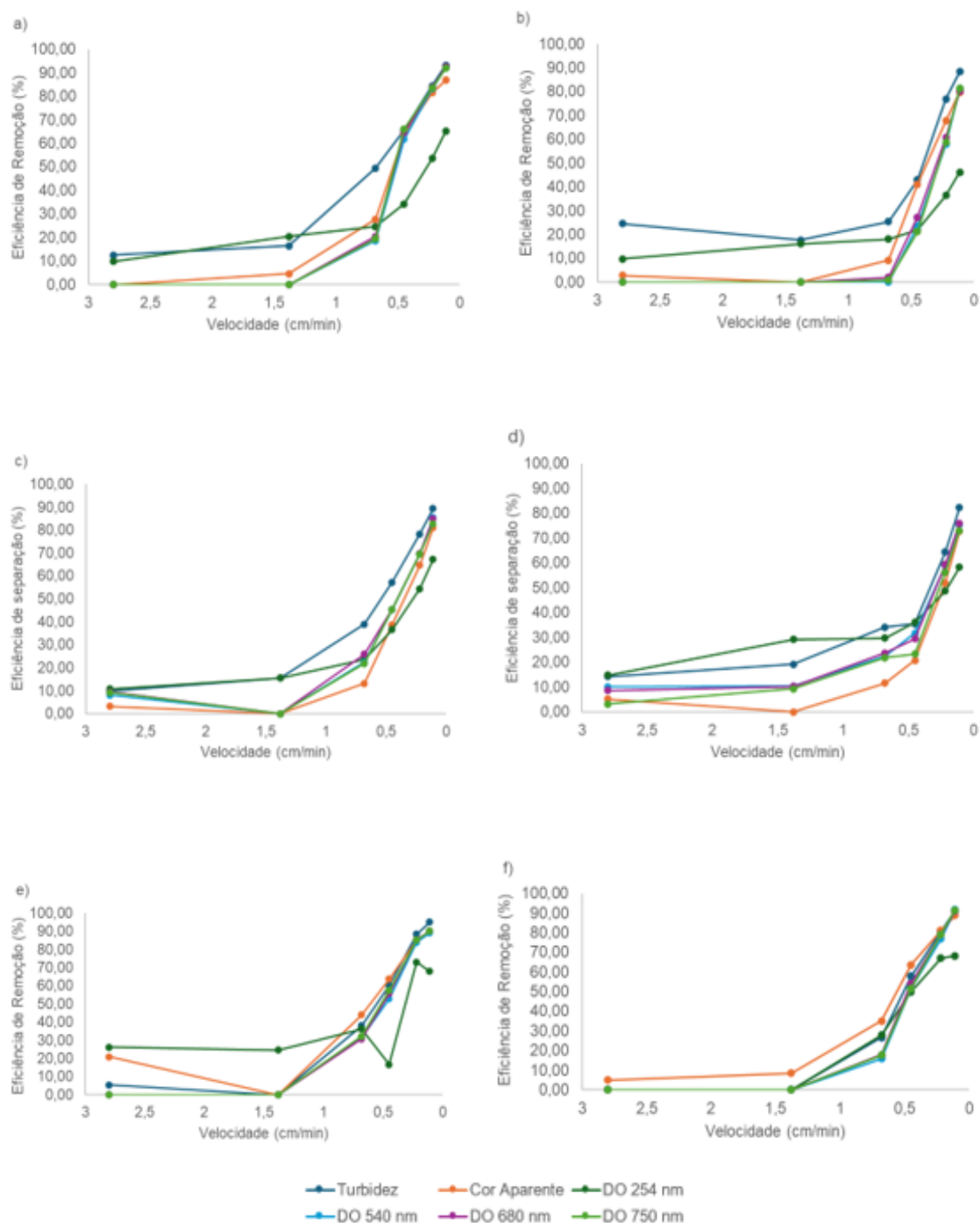


Nota: a), c) e e): dosagem inicial de coagulante de $735 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (floculação); b) dosagem adicional de $73,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); d) dosagem adicional de $183,75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); e) dosagem adicional de $367,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

Figura 10 - Eficiência de separação (%) do coagulante AEMOP 5% com dosagem adicional em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para FBR R2



Nota: a), c) e e): dosagem inicial de coagulante de $690 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (floculação); b) dosagem adicional de $69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); d) dosagem adicional de $172,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); e) dosagem adicional de $345 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

Nos dois fotobiorreatores avaliados, a adição de AEMOP na etapa de refloculação não resultou em eficiências de separação das microalgas equivalentes às aquelas observadas ao final da etapa de floculação, o que pode impactar diretamente o rendimento do processo de recuperação da biomassa algal. Ainda assim, verificou-se que a aplicação de dosagem adicional de AEMOP promoveu incremento nas eficiências de remoção para todos os parâmetros analisados quando comparada aos ensaios de refloculação conduzidos sem adição suplementar de coagulante, evidenciando que o material permaneceu ativo no sistema mesmo após a ruptura dos flocos.

Embora tenha sido observada redução das eficiências de separação após a dosagem adicional de coagulante em relação à floculação, o AEMOP apresentou desempenho superior no FBR R2 quando comparado ao FBR R1 para o tempo de sedimentação de 60 minutos. Esse comportamento pode ser discutido à luz das interações entre os MP-PVC e a matriz biológica das microalgas presentes no FBR R2. Conforme evidenciado por Quartaroli et al. (2024), análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram a adesão de MP-PVC à superfície celular das microalgas, bem como alterações morfológicas na parede celular das espécies provenientes do FBR R2. Adicionalmente, foi observado acúmulo de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) ao redor das células microalgais, fenômeno frequentemente associado a respostas fisiológicas ao estresse induzido pela presença de microplásticos (Lagarde et al., 2016; Quartaroli et al., 2024).

Essas alterações estruturais e bioquímicas podem favorecer a interação entre o AEMOP e os constituintes celulares das microalgas, uma vez que o aumento da produção de EPS amplia a disponibilidade de sítios para adsorção e formação de pontes poliméricas, mecanismos reconhecidamente predominantes na atuação coagulante da *Moringa oleifera*. Diversos estudos apontam que os compostos responsáveis pela atividade coagulante da *M. oleifera* atuam majoritariamente por adsorção, neutralização de cargas e formação de pontes entre partículas, não estando associados a mecanismos de varredura típicos de coagulantes inorgânicos hidrolisantes (Ndabigengesere et al., 1995; Kansal; Kumari, 2014).

Ndabigengesere et al. (1995), ao investigarem a aplicação da *M. oleifera* em suspensões de caulim, demonstraram que, apesar da composição heterogênea do material — constituído por proteínas, lipídios e carboidratos —, as proteínas catiônicas

solúveis em água são as principais responsáveis pelo processo de coagulação. Essas proteínas promovem a desestabilização das partículas carregadas negativamente por meio da neutralização de cargas e da formação de pontes, favorecendo a agregação e posterior sedimentação.

Por meio de análises de potencial zeta, os autores verificaram que a aplicação de dosagens elevadas de coagulante à base de *M. oleifera* foi capaz de inverter o sinal do potencial elétrico das partículas, sem, contudo, provocar reestabilização da suspensão, uma vez que os valores de turbidez permaneceram baixos. Esse comportamento reforça que, mesmo em condições de superdosagem, o mecanismo de ação da *M. oleifera* permanece associado à adsorção e à formação de pontes entre partículas previamente desestabilizadas, e não à formação de precipitados ou varredura física do meio.

Complementarmente, Kurniawan et al. (2022) destacam que, embora os coagulantes derivados de *M. oleifera* apresentem caráter catiônico, sua atuação decorre da presença de grupos funcionais, como hidroxilas e aminas, que favorecem a interação eletrostática com partículas carregadas negativamente e a ligação entre superfícies particuladas. Esses grupos funcionais conferem ao material comportamento semelhante ao de polieletrólitos naturais, sem envolvimento de mecanismos hidrolíticos típicos de sais metálicos.

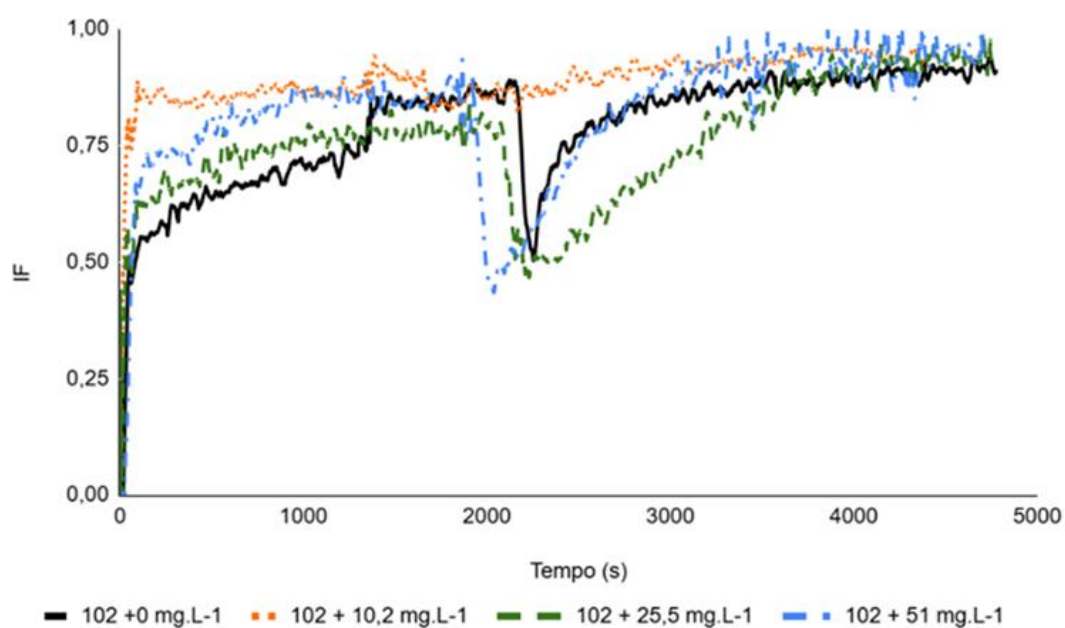
Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo indicam que a adição de dosagens suplementares de AEMOP após a formação inicial dos flocos não promoveu alterações significativas na capacidade de recrescimento, uma vez que os mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes poliméricas já se encontravam plenamente estabelecidos. Em condições de dosagem adicional, o sistema tende a atingir um estado de saturação dos sítios ativos disponíveis, limitando a formação de novas ligações estruturais relevantes e explicando a ausência de ganhos expressivos no recrescimento dos flocos, mesmo com o aumento da concentração de coagulante.

5.3.2.2 Solução de Tanfloc SG (STANSG) 10%

Os resultados do monitoramento contínuo do processo de coagulação, floculação, ruptura e recrescimento dos flocos formados pelo coagulante STANSG nos

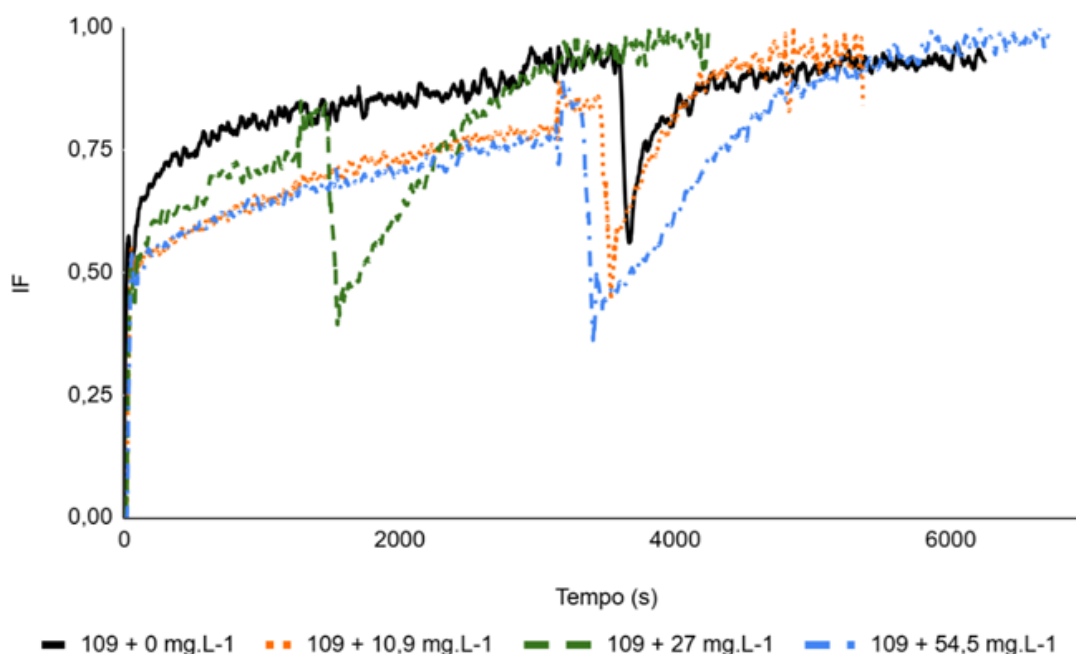
fotobiorreatores FBR R1 e FBR R2 foram obtidos por meio do Analisador de Dispersão Fotométrica (PDA) e estão apresentados nas Figuras 11 e 12. Os valores quantitativos dos fatores de quebra e de recrescimento calculados a partir desses dados, para ambos os fotobiorreatores, encontram-se consolidados na Tabela 21.

Figura 11 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas com dosagens adicionais do coagulante STANSO 10% para FBR R1



Fonte: elaboração própria.

Figura 12 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas com dosagens adicionais do coagulante STANSG 10% para FBR R2



Fonte: elaboração própria.

Tabela 21 - Fatores de quebra e recrescimento (%) dos flocos formados por microalgas pelo coagulante STANSG 10% para FBR 1 e FBR R2

FBR R1 *				
Dosagem adicional (mg.L ⁻¹)	0	10,2	25,5	51
F1	56,5	87,1	55	46,6
F2	112,5	148,8	136	113,4
V3/V1	105,4	106,3	116,2	107,2
FBR R2 (com adição de MP-PVC) **				
Dosagem adicional (mg.L ⁻¹)	0	10,9	27	54,5
F1	58,2	50,1	46,4	40,7
F2	109,3	126	133,2	121,4
V3/V1	103,9	113	117,8	112,7

*Para FBR R1: dosagem inicial de STANSG 10% = 102 mg.L⁻¹, velocidade de quebra de 500 s⁻¹, tempo de quebra = 30 s, velocidade de mistura lenta = 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

**Para FBR R2: dosagem inicial de STANSG 10% = 109 mg.L⁻¹, velocidade de quebra de 500 s⁻¹, quebra de 30 s, velocidade de mistura lenta = 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

Fonte: elaboração própria.

A aplicação de dosagem adicional de STANSG resultou em elevada capacidade de recrescimento dos flocos em ambos os fotobiorreatores avaliados. Conforme apresentado nas Figuras 11 e 12, a redução abrupta nos valores do Índice de Floculação (IF) corresponde à resposta do sistema à aplicação da elevada taxa de cisalhamento, sendo interpretada como a ruptura induzida dos flocos. O valor mínimo do IF atingido após essa redução representa o parâmetro V2, associado ao estado de agregação imediatamente após a ruptura. A elevação subsequente do IF caracteriza o processo de recrescimento dos flocos durante a etapa de refloculação.

No FBR R1, a menor dosagem adicional avaliada ($10,2 \text{ mg.L}^{-1}$) apresentou fator de recrescimento superior a 100%, com aumento aproximado de 50% em relação ao valor máximo de IF registrado antes da etapa de ruptura. Esse comportamento indica elevada capacidade de reorganização estrutural dos flocos formados pelo STANSG, característica compatível com a natureza polimérica do coagulante à base de tanino.

Os resultados obtidos neste estudo são coerentes com as observações de Graham et al. (2008), que avaliaram o desempenho de um polímero à base de tanino em comparação a coagulantes convencionais por meio de PDA. Os autores relataram que, em suspensões de caulim sob pH neutro ($\text{pH} = 7$), ocorre redução da eficiência do polímero em função da perda de carga catiônica e da menor solubilidade do tanino em faixas de pH entre 6 e 9, condição típica de sistemas de tratamento de água. Nessas circunstâncias, o mecanismo de atuação do tanino torna-se predominantemente associado à adsorção, aproximando-se do comportamento de coagulantes inorgânicos.

De forma semelhante, no presente estudo, o desempenho do STANSG foi influenciado pelas condições de pH neutro do meio. Ainda assim, mesmo com possível redução parcial da disponibilidade de grupos catiônicos, o STANSG apresentou desempenho superior ao sulfato de alumínio (SSA) em termos de recrescimento dos flocos, o que pode ser atribuído à presença de grupos funcionais ativos e à estrutura polimérica do coagulante natural, favorecendo interações adicionais com a matriz particulada composta por microalgas e microplásticos de PVC.

A análise dos fatores de quebra (F1) indicou que o aumento da dosagem adicional de STANSG esteve associado a uma redução discreta da resistência dos flocos à ruptura, efeito observado de forma mais evidente no FBR R1. No FBR R2,

tendência semelhante foi identificada, porém com variações menos pronunciadas. Apesar disso, os valores médios do fator de recrescimento mantiveram-se elevados, em torno de 127%, indicando que o aumento da dosagem adicional não comprometeu a capacidade de reorganização estrutural dos flocos. Dessa forma, os resultados sugerem que, para o FBR R2, a dosagem adicional de STANSG não exerceu influência significativa sobre a formação e o recrescimento dos flocos de microalgas.

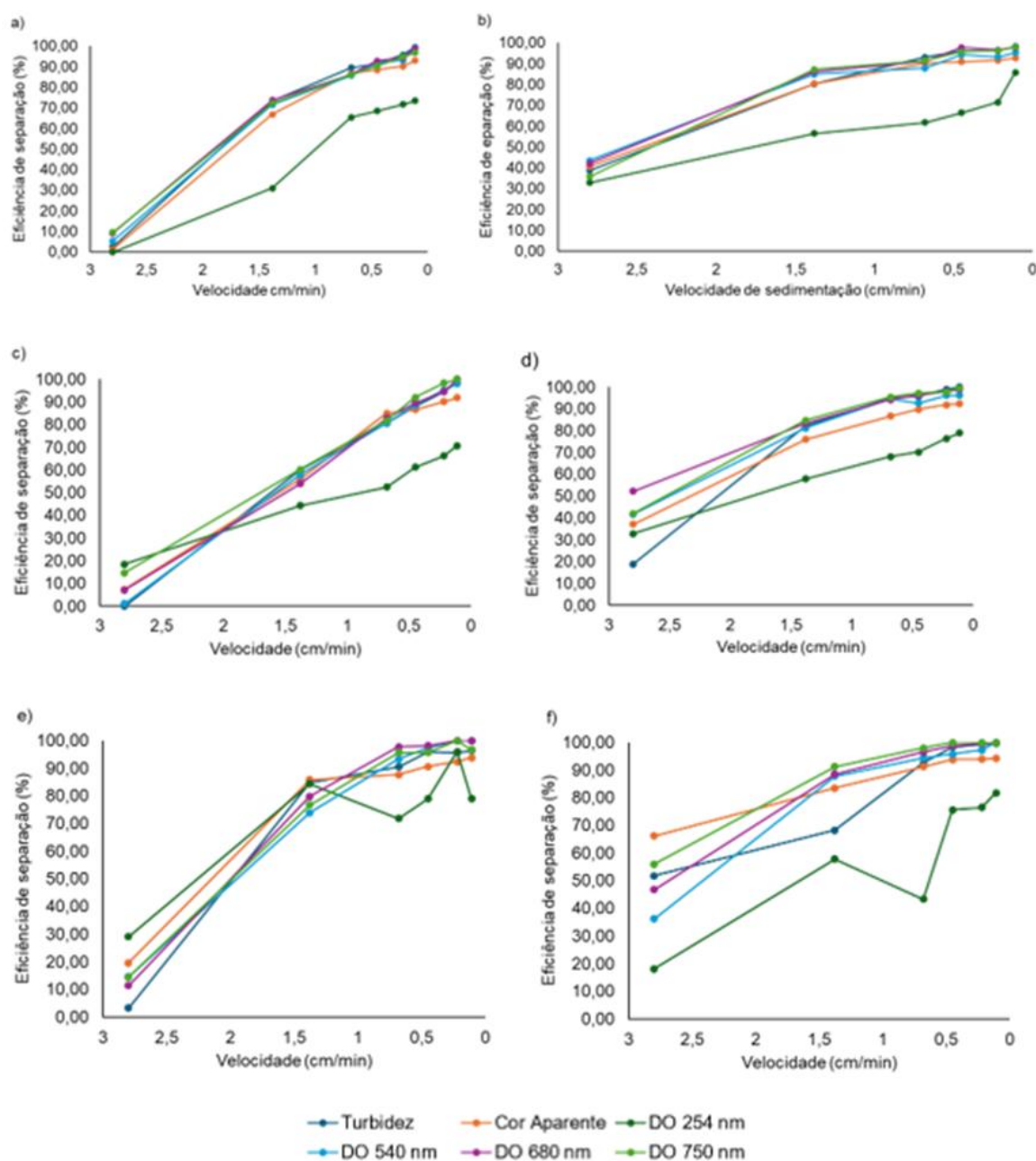
Embora a presença de MP-PVC possa estar associada a alterações nas propriedades estruturais dos flocos, os valores de IF obtidos por meio do PDA não permitem conclusões definitivas a esse respeito, uma vez que se trata de um parâmetro baseado na resposta óptica do sistema. Assim, variações no IF podem refletir mudanças na composição e na estrutura interna dos flocos, e não necessariamente alterações diretas em seu tamanho físico. Ainda assim, para todas as dosagens adicionais avaliadas, os flocos formados com STANSG apresentaram capacidade de recrescimento superior a 100%, comportamento distinto daquele observado para o coagulante AEMOP.

Resultados semelhantes foram reportados por Teixeira et al. (2022), que avaliaram a resistência de flocos formados por tanino na separação de microalgas em águas residuárias domésticas tratadas, a partir da análise de diâmetros estáveis antes e após a ruptura. Os autores demonstraram que flocos com menores diâmetros estáveis apresentaram maior resistência à ruptura tanto para o tanino quanto para o sulfato de alumínio. Considerando que o PDA é uma técnica baseada na transmissão de luz, suas medições podem não refletir diretamente o tamanho físico real dos flocos, limitando a análise a uma avaliação do potencial relativo de quebra e recrescimento. Ainda assim, os resultados obtidos neste estudo confirmam que o STANSG apresenta elevada resistência à ruptura e expressiva capacidade de recuperação estrutural, em concordância com os achados de Teixeira et al. (2022).

De forma complementar, foram construídas curvas de sedimentação para o coagulante STANSG nas mesmas condições experimentais adotadas para o AEMOP, considerando as velocidades de sedimentação avaliadas (Figuras 13 e 14). Observou-se que, para o FBR R1, os flocos formados com STANSG sedimentaram rapidamente, atingindo elevadas eficiências de separação das microalgas nos primeiros minutos do ensaio. Após 10 minutos de sedimentação ($v = 0,68 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$), as eficiências de separação para turbidez, cor aparente e densidades ópticas nos

comprimentos de onda de 540, 680 e 750 nm atingiram valores superiores a 90% para as três dosagens adicionais avaliadas. O parâmetro DO_{254} apresentou valores inferiores a 70%, indicando menor remoção das frações dissolvidas ou coloidais mais finas. Esses resultados possuem relevância prática para análises futuras de custo e viabilidade operacional visando à produção em larga escala de biomassa algal associada ao uso de coagulantes à base de tanino.

Figura 13 - Eficiência de separação (%) do coagulante STANSO 10% com dosagem adicional em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para FBR R1

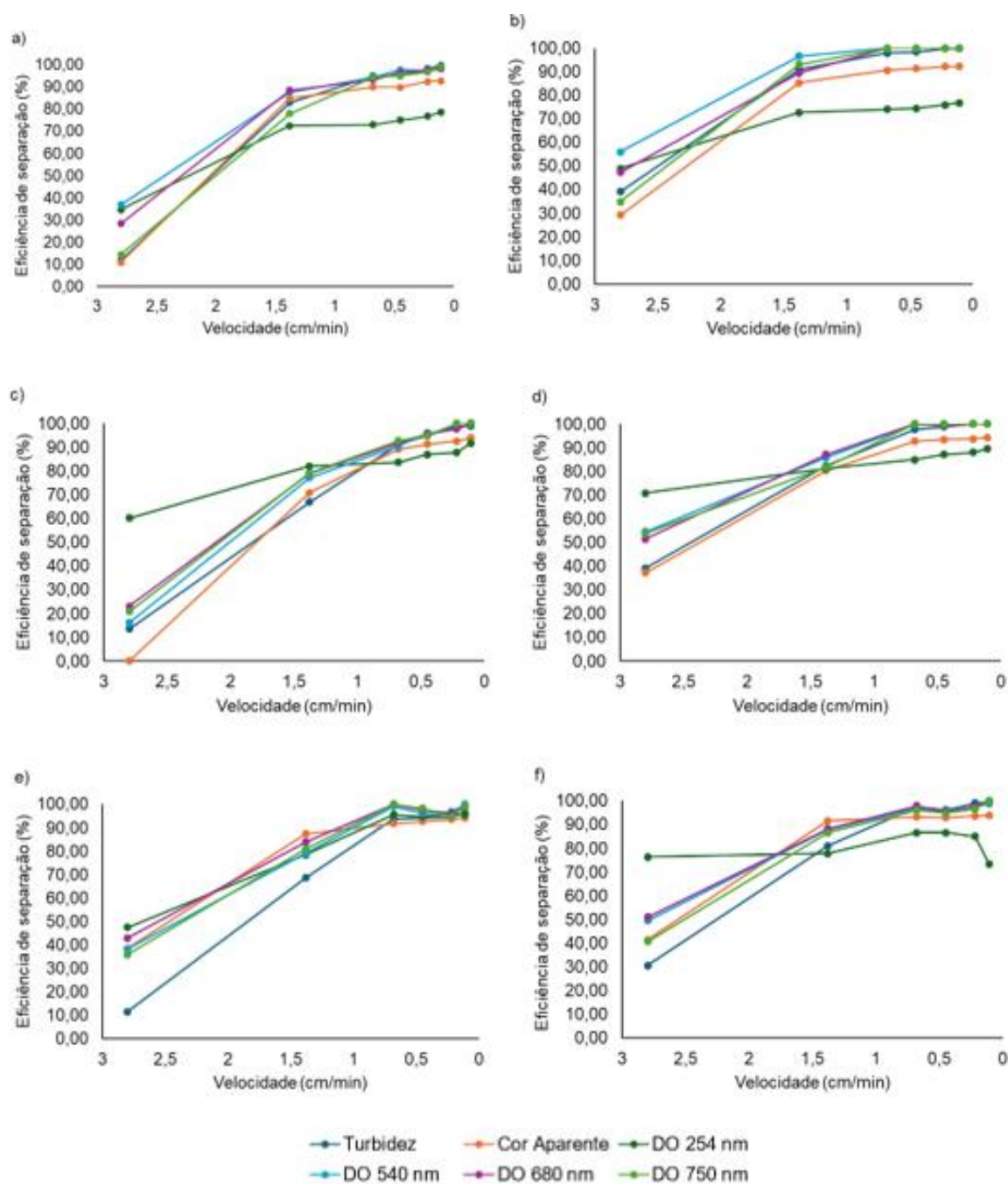


Nota: a), c) e e): dosagem inicial de coagulante de $102 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (floculação); b) dosagem adicional de $10,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); d) dosagem adicional de $25,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); e) dosagem adicional de $51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

Figura 14 - Eficiência de separação (%) do coagulante STANSG 10% com dosagem adicional em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para FBR R2



Nota: a), c) e e): dosagem inicial de coagulante de $109 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (floculação); b) dosagem adicional de $10,9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); d) dosagem adicional de $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); e) dosagem adicional de $54,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação).

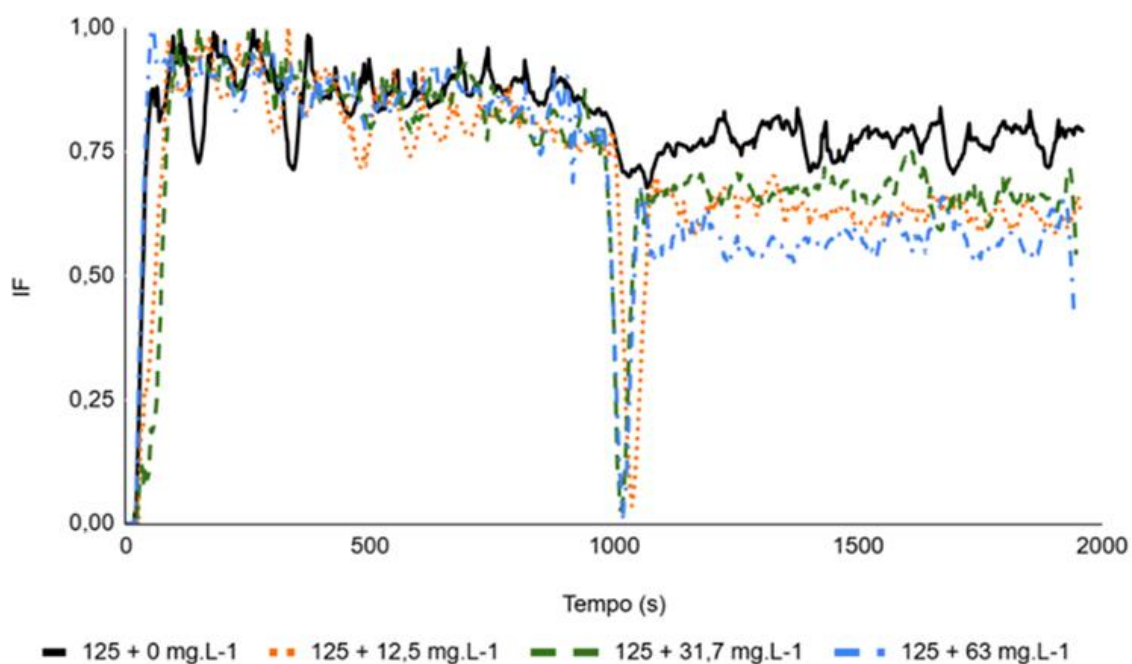
Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

5.3.2.3 Solução de Sulfato de Alumínio (SSA) 5%

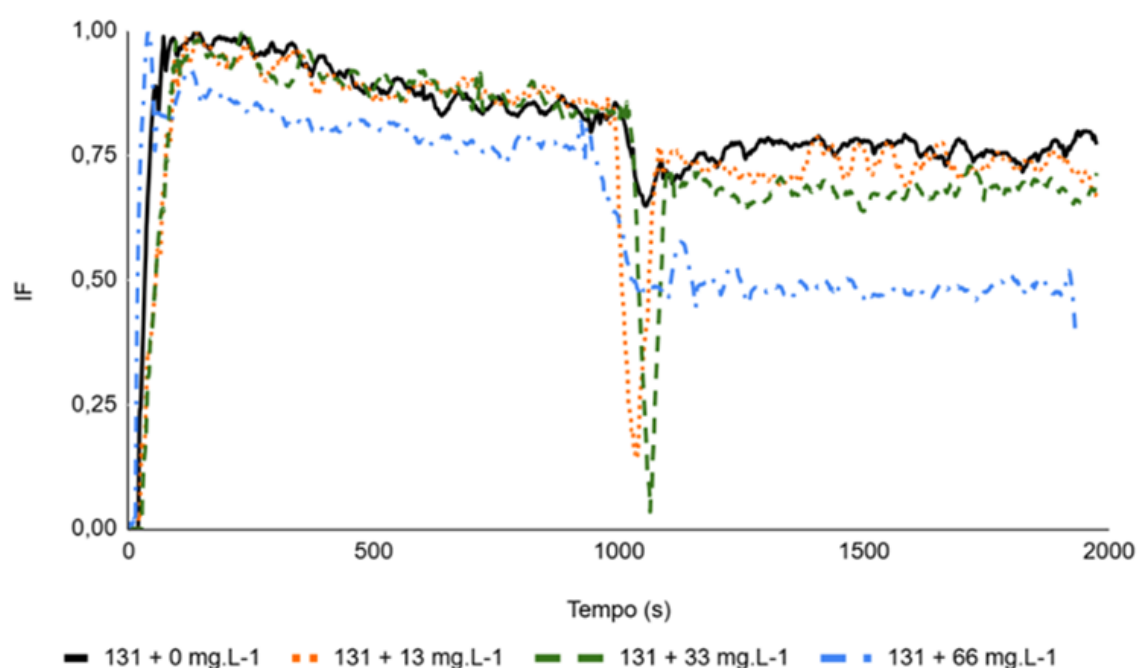
Os resultados do monitoramento contínuo dos flocos formados com sulfato de alumínio (SSA), obtidos por meio do Analisador de Dispersão Fotométrica (PDA), evidenciam comportamentos distintos ao longo das etapas de floculação, ruptura e refloculação para os fotobiorreatores FBR R1 e FBR R2. Os valores quantitativos dos fatores de quebra (F1) e recrescimento (F2) encontram-se apresentados na Tabela 22, enquanto o gráfico do Índice de Floculação (IF) em relação ao tempo (s) é ilustrada nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas com dosagens adicionais do coagulante SSA 5% para FBR R1



Fonte: elaboração própria.

Figura 16 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas com dosagens adicionais do coagulante SSA 5% para FBR R2



Fonte: elaboração própria.

Tabela 22 - Fatores de quebra e recrescimento (%) dos flocos formados por microalgas pelo coagulante SSA 5% para FBR 1 e FBR R2

FBR R1 *				
Dosagem adicional (mg/L)	0	12,5	31,7	63
F1	67,8	3,7	2,8	1,4
F2	50,1	68,9	74,3	66,9
V3/V1	83,9	70	75	67,3
FBR R2 (com adição de MP-PVC) **				
Dosagem adicional (mg/L)	0	13,1	33,3	66
F1	64,8	15,1	3,4	50,3
F2	45,4	77,4	71,9	24,5
V3/V1	80,8	80,8	72,9	62,5

*Para FBR R1: dosagem inicial de SSA 5% = 125 mg.L⁻¹, velocidade de quebra de 500 s⁻¹, tempo de quebra = 30 s, velocidade de mistura lenta = 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

**Para FBR R2: dosagem inicial de SSA 5% = 131 mg.L⁻¹, velocidade de quebra de 500 s⁻¹, quebra de 30 s, velocidade de mistura lenta = 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

Fonte: elaboração própria.

Durante a etapa de floculação, observou-se que os flocos formados com SSA atingiram rapidamente valores elevados de IF, compatíveis com o mecanismo de coagulação por varredura típico de coagulantes hidrolisantes. Em alguns ensaios, o IF apresentou tendência à estabilização ou leve redução ainda durante a floculação, comportamento atribuído não à ruptura dos flocos, mas a rearranjos estruturais internos e processos de compactação sob cisalhamento contínuo, fenômeno amplamente descrito para flocos inorgânicos formados por precipitados de hidróxido metálico.

A aplicação do gradiente elevado de cisalhamento (500 s^{-1}) por 30 s resultou em uma queda abrupta do IF, caracterizando a etapa de ruptura dos flocos. O valor mínimo do IF registrado após essa etapa foi utilizado para o cálculo do fator de quebra (F1), conforme metodologia descrita anteriormente. A dosagem adicional de SSA foi aplicada imediatamente no início dessa fase de alto cisalhamento, permitindo avaliar seu efeito sobre a resistência estrutural e o recrescimento subsequente dos flocos.

Os resultados indicaram que a dosagem adicional de SSA não promoveu aumento significativo na resistência à ruptura nem no recrescimento dos flocos, com fatores de recrescimento permanecendo em torno de 50% para ambos os fotobiorreatores. Esse comportamento é consistente com a literatura, que aponta a ruptura de flocos formados por varredura como um processo predominantemente irreversível, associado ao envelhecimento e à reorganização do precipitado amorfo de $\text{Al}(\text{OH})_3$, cujas superfícies recém expostas apresentam menor reatividade para reagregação.

Adicionalmente, o monitoramento do pH durante os ensaios indicou valores médios entre 6,0 e 6,5 após a dosagem adicional de SSA. Embora essa faixa ainda seja compatível com a ocorrência de coagulação por varredura, a redução do pH pode ter limitado a eficiência do precipitado de hidróxido de alumínio, contribuindo para a formação de flocos estruturalmente mais frágeis e com menor capacidade de regeneração após a ruptura. Assim, a dosagem adicional de SSA não deslocou o sistema para fora do regime de varredura, mas possivelmente enfraqueceu esse mecanismo.

A presença de microplásticos de PVC (MP-PVC) no FBR R2 não alterou de forma significativa o padrão de ruptura e recrescimento dos flocos formados com SSA, indicando que os mecanismos predominantes de coagulação e floculação do

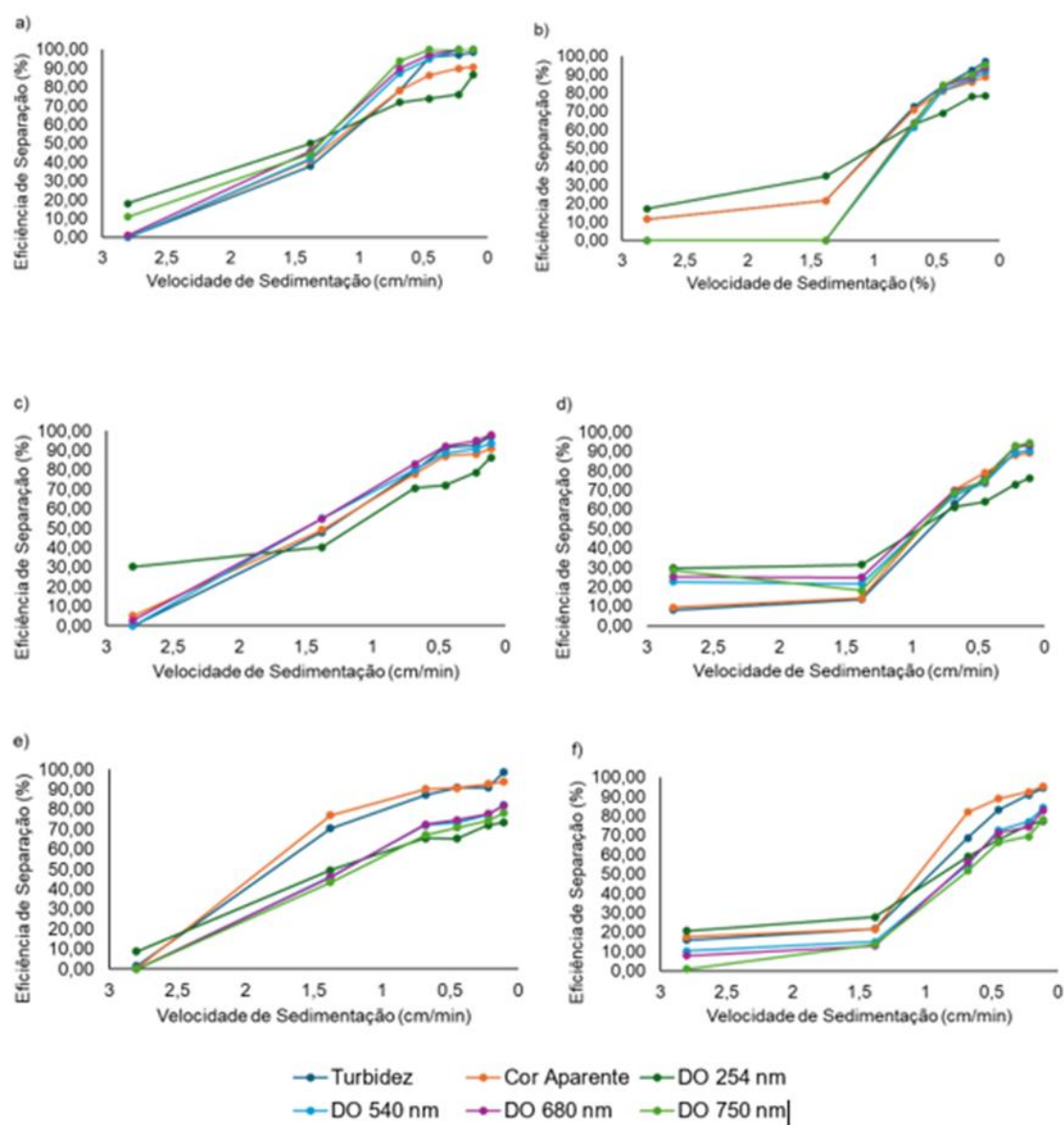
coagulante inorgânico permaneceram governados principalmente pelas características do precipitado de alumínio, independentemente da heterogeneidade adicional imposta pela matriz particulada.

Cabe ressaltar que os valores de IF obtidos por técnicas ópticas baseadas em transmissão de luz representam a projeção da seção transversal de espalhamento dos flocos e não fornecem uma medida direta de seu tamanho real. Assim, as conclusões relativas à resistência e ao recrescimento dos flocos devem ser interpretadas em termos de comportamento relativo e potencial de regeneração estrutural, conforme discutido por Yu et al. (2010).

De modo geral, os resultados confirmam que, diferentemente dos coagulantes naturais avaliados nesta pesquisa, o sulfato de alumínio apresenta limitada capacidade de recrescimento dos flocos após ruptura, mesmo com a aplicação de dosagem adicional, reforçando as limitações intrínsecas do mecanismo de varredura em sistemas sujeitos a variações de cisalhamento.

A análise dos fatores de quebra e recrescimento evidenciou que os flocos formados com sulfato de alumínio apresentaram limitada capacidade de regeneração estrutural após a ruptura, característica típica de sistemas governados pelo mecanismo de coagulação por varredura. Entretanto, essa limitação não se refletiu de forma proporcional na eficiência de separação das microalgas por sedimentação, conforme indicado pelas curvas de sedimentação apresentadas nas Figuras 17 e 18 para os fotobiorreatores FBR R1 e FBR R2.

Figura 17 - Eficiência de separação (%) do coagulante SSA 5% com dosagem adicional em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para FBR R1

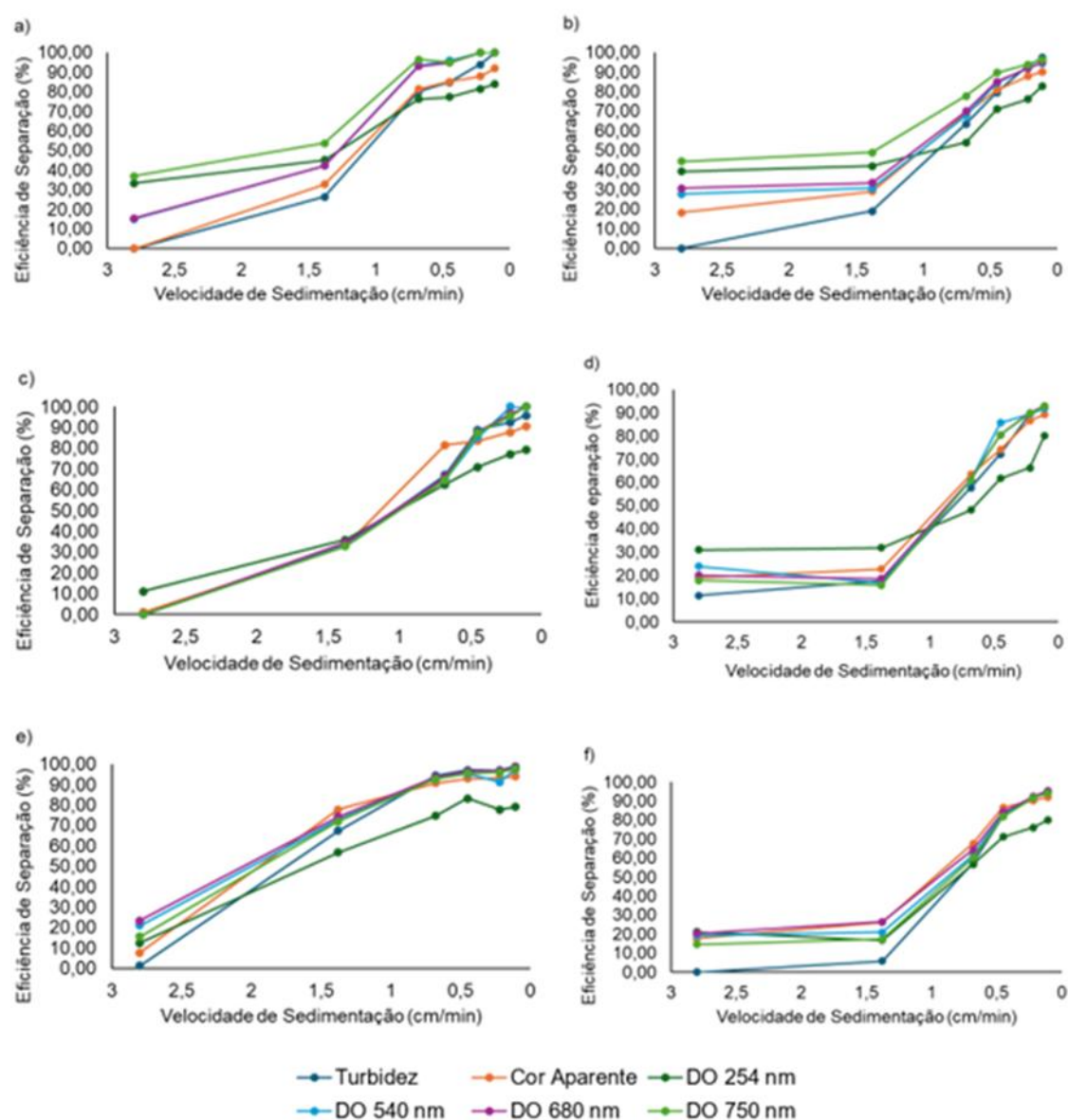


Nota: a), c) e e): dosagem inicial de coagulante de $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (floculação); b) dosagem adicional de $12,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); d) dosagem adicional de $31,7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); e) dosagem adicional de $63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

Figura 18 - Eficiência de separação (%) do coagulante SSA com dosagem adicional em função da velocidade de sedimentação ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para FBR R2



Nota: a), c) e e): dosagem inicial de coagulante de $131 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (floculação); b) dosagem adicional de $13,1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); d) dosagem adicional de $33,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação); e) dosagem adicional de $66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (refloculação).

Velocidades de sedimentação: 0,12, 0,22, 0,45, 0,68, 1,38 e $2,8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Fonte: elaboração própria.

As curvas de sedimentação mostraram que, para ambos os fotobiorreatores, os flocos formados com SSA apresentaram elevadas eficiências de separação das microalgas mesmo em tempos reduzidos de sedimentação, especialmente a partir da velocidade de $0,45 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($t_{\text{sed}} = 15 \text{ min}$). Esse comportamento indica que, apesar da baixa capacidade de recrescimento após a ruptura, os flocos mantiveram densidade e massa suficientes para promover uma sedimentação eficiente,

característica associada à formação de precipitados amorfos de hidróxido de alumínio com partículas algais incorporadas.

No FBR R2, que continha microplásticos de PVC (MP-PVC), não foram observadas alterações significativas no perfil das curvas de sedimentação em comparação ao FBR R1, sugerindo que a presença dos MP-PVC não comprometeu o desempenho de sedimentação dos flocos formados com SSA. Observou-se, inclusive, uma discreta melhoria na eficiência de separação para o parâmetro DO₂₅₄ após a etapa de refloculação no FBR R2, o que pode estar relacionado à incorporação de frações orgânicas dissolvidas ao precipitado de hidróxido metálico, sem implicar necessariamente em aumento do tamanho real dos flocos.

Esses resultados reforçam que a eficiência de sedimentação dos flocos formados por coagulantes hidrolisantes não depende exclusivamente de sua capacidade de recrescimento estrutural, mas também da densidade e da natureza do precipitado formado durante a coagulação por varredura. Assim, mesmo apresentando comportamento irreversível à ruptura, os flocos gerados com sulfato de alumínio mantiveram desempenho satisfatório na separação das microalgas, corroborando os resultados observados pelo monitoramento óptico e evidenciando a robustez do mecanismo de varredura em termos de sedimentação.

5.3.2.4 Combinação do SSA 5% com os coagulantes naturais

Diversos estudos têm destacado o potencial dos coagulantes naturais a partir de resultados obtidos em experimentos em escala laboratorial, sobretudo no que se refere à eficiência de separação de partículas e à redução de impactos ambientais associados ao uso de coagulantes químicos convencionais. Entretanto, mesmo considerando simulações próximas às condições operacionais reais, ainda são limitadas as investigações voltadas à aplicação desses materiais em escala industrial. Nesse contexto, uma estratégia promissora consiste na associação de coagulantes naturais com coagulantes químicos inorgânicos, de modo a potencializar a eficiência global do processo e mitigar eventuais limitações inerentes a cada material quando aplicado isoladamente (Ang; Mohammad, 2020).

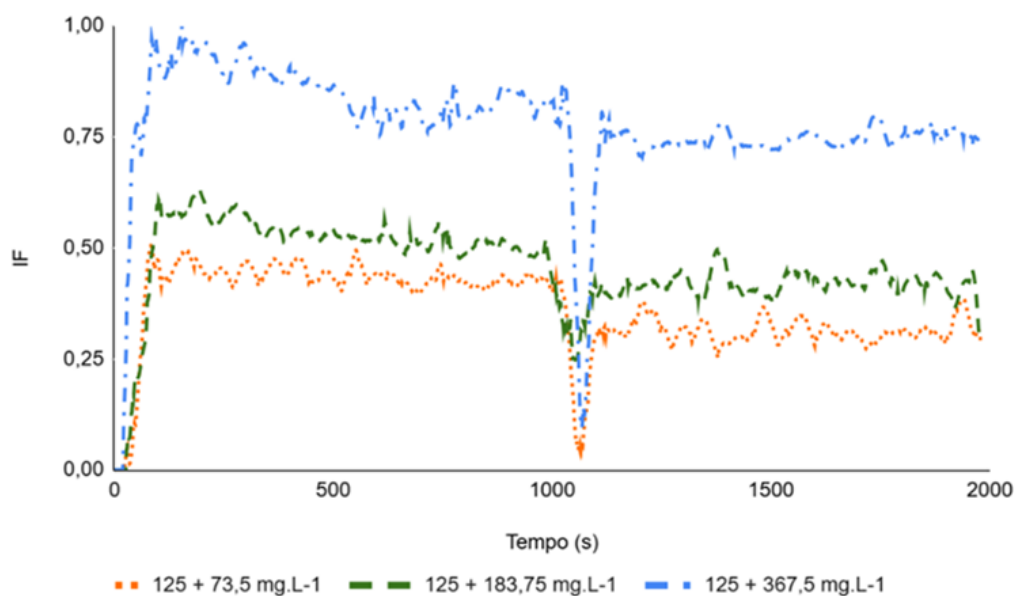
Com o objetivo de intensificar os processos de coagulação e floculação e, simultaneamente, reduzir os impactos ambientais relacionados ao uso exclusivo de coagulantes químicos, foram avaliadas combinações entre o SSA, empregado como

coagulante primário, e os coagulantes naturais AEMOP e STANSG, utilizados como coagulantes secundários. Embora os ensaios tenham sido conduzidos em escala laboratorial, os resultados obtidos a partir dessas associações fornecem subsídios relevantes para a compreensão da estrutura, resistência e capacidade de sedimentação dos flocos, podendo contribuir para o delineamento de aplicações futuras em maior escala.

Para esta etapa experimental, as dosagens ótimas de sulfato de alumínio, previamente determinadas pelo método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), foram aplicadas para cada fotobiorreator. As dosagens adicionais de AEMOP e STANSG foram introduzidas no início da etapa de ruptura dos flocos, imediatamente após a elevação do gradiente de mistura para 500 s^{-1} . Após 30 s sob alta taxa de cisalhamento, o gradiente de mistura foi reduzido para 50 s^{-1} , caracterizando o início da etapa de refloculação. As demais condições operacionais — gradientes de mistura rápida e lenta, tempo de floculação e tempo de refloculação ($\geq 15\text{ min}$) — foram mantidas em conformidade com os ensaios anteriores.

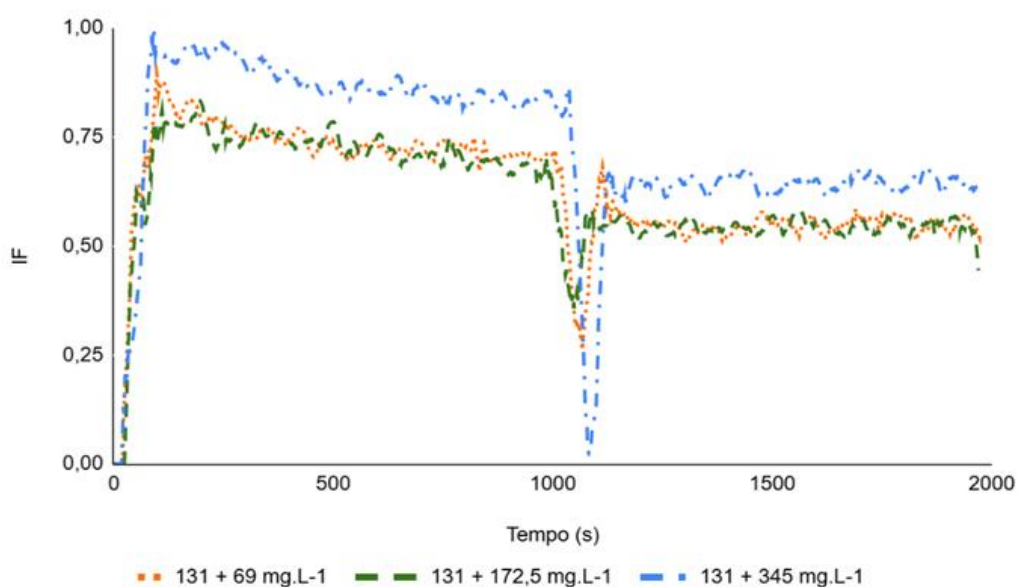
Os gráficos do Índice de Floculação (IF) em relação ao tempo (s) obtidos por meio do PDA estão apresentados nas Figuras 19 e 20 para a combinação SSA 5% (coagulante primário) + AEMOP 5% (coagulante secundário), e nas Figuras 21 e 22 para a combinação SSA 5% e STANSG 10%. Os dados de IF, registrados a cada segundo, foram tratados com a aplicação do filtro de Savitzky–Golay para remoção de ruídos e suavização das curvas, sendo posteriormente normalizados pelo método dos valores mínimo e máximo globais, em escala de 0 a 1.

Figura 19 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas formados com a combinação de SSA 5% (coagulante primário) e AEMOP 5% (coagulante secundário) para FBR R1



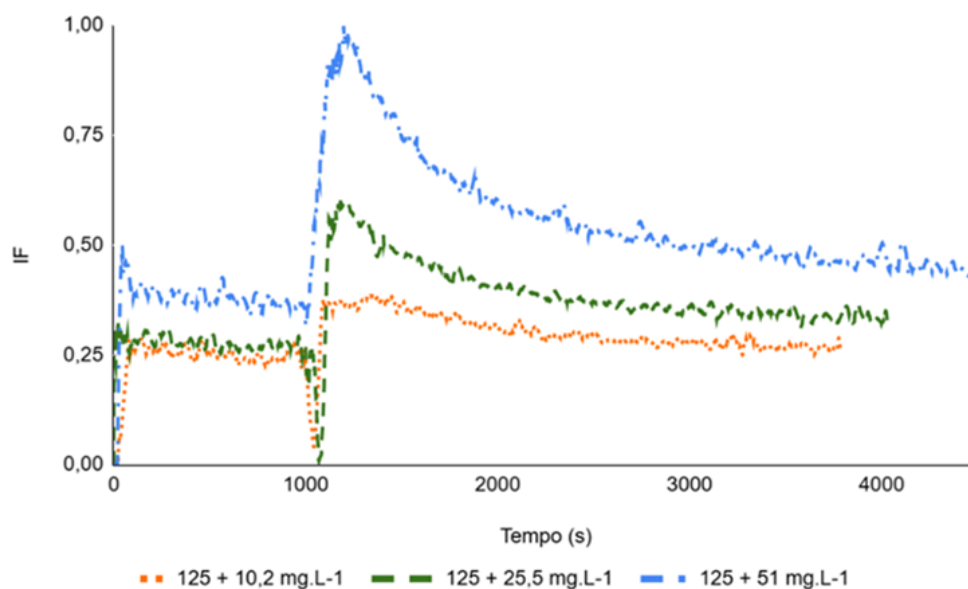
Fonte: elaboração própria.

Figura 20 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas formados com a combinação de SSA 5% (coagulante primário) e AEMOP 5% (coagulante secundário) para FBR R2



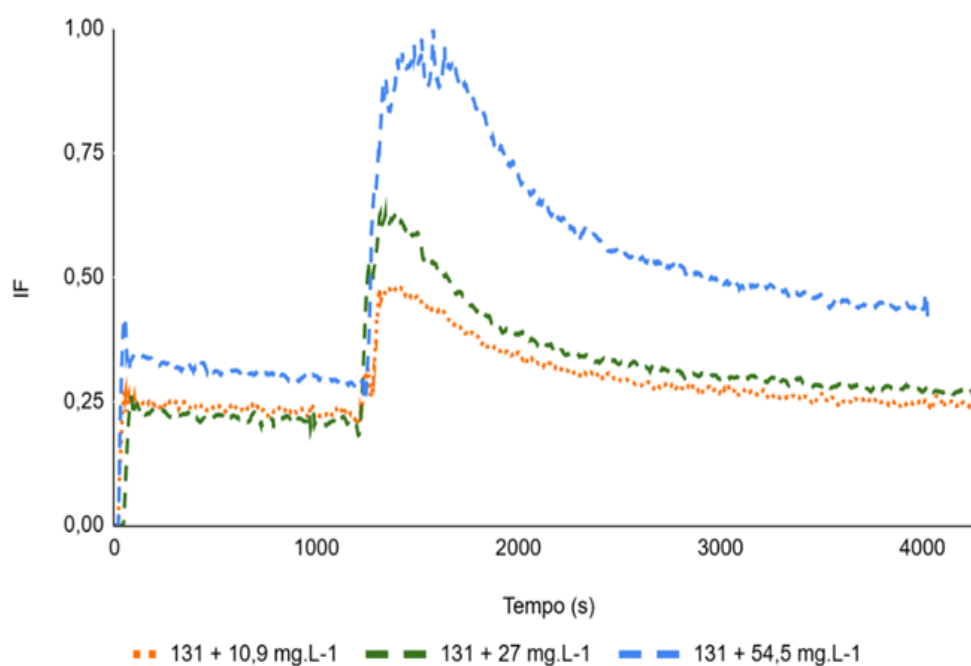
Fonte: elaboração própria.

Figura 21 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas formados com a combinação de SSA 5% (coagulante primário) e STANSO 10% (coagulante secundário)



Fonte: elaboração própria.

Figura 22 - Crescimento, quebra e recrescimento dos flocos de microalgas formados com a combinação de SSA 5% (coagulante primário) e STANSO 10% (coagulante secundário) para FBR R2



Fonte: elaboração própria.

A análise do monitoramento contínuo da formação dos flocos indicou que a combinação do sulfato de alumínio com o coagulante natural AEMOP favoreceu a recuperação estrutural dos flocos após a ruptura, embora os valores de IF observados durante a refloculação não tenham atingido os níveis máximos registrados antes da aplicação do cisalhamento. Os fatores de quebra e de recrescimento, determinados a partir dos valores de IF, estão apresentados nas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23 - Fatores de quebra e recrescimento (%) dos flocos formados por microalgas na combinação de SSA 5% (coagulante primário) com AEMOP 5% e STANSG 10% (coagulantes secundários) para FBR R1

SSA + AEMOP *				
Dosagem adicional (mg/L)	0	73,5	183,75	367,5
F1	67,8	8,5	43,9	10,5
F2	50,1	74	78,6	91,3
V3/V1	83,9	76,2	88	92,2
SSA + STANSG *				
Dosagem adicional (mg/L)	0	10,2	25,5	51
F1	67,8	15,1	2,5	74,6
F2	50,1	113,5	121,1	176,4
V3/V1	83,9	111,4	120,6	119,4

*Dosagem inicial de SSA 5% = 125 mg.L⁻¹, velocidade de quebra: 500 s⁻¹, tempo de quebra: 30 s, velocidade de mistura lenta: 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.
Fonte: elaboração própria.

Tabela 24 - Fatores de quebra e recrescimento (%) dos flocos formados por microalgas na combinação de SSA 5% (coagulante primário) com AEMOP 5% e STANSG 10% (coagulantes secundários) para FBR R2

SSA + AEMOP *				
Dosagem adicional (mg/L)	0	69	172,5	345
F1	64,8	34,9	45,4	2,6
F2	45,4	66,5	53,2	75,5
V3/V1	80,8	78,2	74,4	76,1
SSA + STANSG *				
Dosagem adicional (mg/L)	0	10,9	27	54,5
F1	64,8	73,9	70,4	59,6
F2	45,4	119	159,8	145
V3/V1	80,8	105	117,7	118,2

*Dosagem inicial de SSA 5% = 131 mg.L⁻¹, velocidade de quebra: 500 s⁻¹, tempo de quebra: 30 s, velocidade de mistura lenta: 50 s⁻¹, tempo de mistura lenta: 15 min ou mais.

Fonte: elaboração própria.

No FBR R1, a recuperação mais expressiva foi observada para a maior dosagem adicional de AEMOP (367,5 mg.L⁻¹), resultando em fator de recrescimento de aproximadamente 91%. No FBR R2, o aumento na capacidade de recuperação foi mais evidente para a dosagem adicional de 345 mg.L⁻¹, com fator de recrescimento de 76%, superior às demais dosagens avaliadas. Esse comportamento pode ser atribuído aos mecanismos característicos dos polímeros naturais, que atuam predominantemente por neutralização de cargas e formação de pontes entre partículas, originando flocos com estrutura mais flexível e maior capacidade de reorganização após a ruptura. Assim, sob as mesmas condições de cisalhamento (500 s⁻¹ por 30 s), as maiores dosagens adicionais de AEMOP resultaram em menores fatores de quebra, favorecendo o recrescimento subsequente dos flocos.

Em contraste, a associação do sulfato de alumínio com o coagulante STANSG apresentou comportamento distinto. Após a queda abrupta do IF associada à etapa de ruptura, os valores aumentaram rapidamente, atingiram um máximo e, em seguida, decresceram até a estabilização, aproximadamente 30 min após o início da refloculação. De forma consistente com os resultados previamente discutidos para o

STANSG aplicado isoladamente, a associação SSA–STANSG demandou maior tempo para atingir valores estáveis de IF durante a refloculação, refletindo a dinâmica de reorganização estrutural dos flocos formados por coagulantes de natureza polimérica.

Para as menores dosagens adicionais de STANSG (10,2 mg.L⁻¹ no FBR R1 e 10,9 mg.L⁻¹ no FBR R2), foram observadas taxas de recrescimento superiores a 100%. Esse comportamento não implica necessariamente na formação de flocos de maior tamanho real, especialmente em sistemas operando em pH próximo à neutralidade (6–7), uma vez que os valores de IF obtidos por técnicas ópticas refletem alterações na seção de espalhamento da luz, que podem ser influenciadas pela densidade e organização interna dos flocos. Ainda assim, os resultados indicam que a presença do STANSG como coagulante secundário contribuiu para a recuperação estrutural dos flocos formados pelo sulfato de alumínio, possivelmente em função da atuação de grupos funcionais ativos e da natureza polimérica do tanino, que favorecem interações adicionais com a matriz algal.

Os resultados obtidos estão em consonância com as observações de Kurniawan et al. (2022), que destacam o potencial dos coagulantes naturais em atuar de forma complementar aos coagulantes convencionais, promovendo melhorias na eficiência do tratamento e na resistência estrutural dos flocos. Assim, a associação entre coagulantes naturais e químicos inorgânicos configura-se como uma estratégia promissora para ampliar a aplicabilidade desses materiais em sistemas de tratamento de maior porte, contribuindo para processos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis (Ang; Mohammad, 2020).

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a separação de microalgas em efluentes domésticos tratados anaerobicamente, na presença de microplásticos de PVC (MP-PVC), é fortemente dependente do tipo de coagulante empregado e, sobretudo, dos mecanismos de coagulação e floculação predominantes associados a cada material. A análise integrada dos ensaios de coagulação, floculação, ruptura, refloculação e sedimentação evidenciou comportamentos distintos entre os coagulantes naturais à base de semente de *Moringa oleífera* (AEMOP), tanino (STANSG) e o coagulante inorgânico sulfato de alumínio (SSA), refletindo diferenças estruturais, químicas e operacionais na formação e evolução dos flocos.

O AEMOP atuou predominantemente como um polieletrólito natural, promovendo a agregação das microalgas por mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes entre partículas. Esse comportamento resultou na formação de flocos estruturalmente mais flexíveis, com elevada capacidade de reorganização após a aplicação de cisalhamento elevado, evidenciada por fatores de recrescimento próximos ou superiores a 95%. A adição suplementar de AEMOP durante a etapa de ruptura não promoveu reestabilização das partículas, mas contribuiu para a manutenção da capacidade regenerativa dos flocos, mesmo em sistemas contendo MP-PVC, indicando robustez do mecanismo de floculação por pontes em matrizes particuladas heterogêneas.

O coagulante STANSG apresentou comportamento intermediário entre os coagulantes naturais e o coagulante inorgânico. Em condições de pH próximas à neutralidade, seu mecanismo de atuação aproximou-se do observado para coagulantes hidrolisantes, com atuação por adsorção e interações superficiais. Ainda assim, a natureza polimérica do tanino e a presença de grupos funcionais ativos favoreceram a formação de flocos com elevada capacidade de recrescimento, frequentemente superior a 100%, conforme indicado pelos valores do Índice de Floculação (IF). Os resultados demonstraram que, embora o STANSG demande maior tempo para atingir valores estáveis de floculação e refloculação, sua eficiência na recuperação estrutural dos flocos foi superior à observada para o coagulante inorgânico, tanto na aplicação isolada quanto na condição de dosagem adicional.

Em contraste, o sulfato de alumínio apresentou comportamento típico de coagulantes hidrolisantes, com formação de flocos governada pelo mecanismo de coagulação por varredura, associado à precipitação de hidróxidos metálicos amorfos. Esses flocos apresentaram maior densidade e boa capacidade de sedimentação, porém limitada reversibilidade estrutural após a ruptura, com fatores de recrescimento em torno de 50%, mesmo com a aplicação de dosagem adicional de coagulante. A redução do pH observada durante os ensaios com SSA, atingindo valores próximos a 6, pode ter contribuído para o enfraquecimento do mecanismo de varredura, sem, contudo, deslocar o sistema para fora dessa região de atuação. A presença de MP- PVC não alterou de forma significativa esse comportamento, indicando que a limitação no recrescimento está associada principalmente à natureza irreversível do precipitado de hidróxido de alumínio.

A análise das curvas de sedimentação complementou os resultados obtidos pelo monitoramento óptico, demonstrando que a capacidade de recrescimento dos flocos não está necessariamente associada à eficiência de separação das microalgas. Enquanto os flocos formados com SSA apresentaram elevada capacidade de sedimentação, mesmo com baixo recrescimento, os flocos formados com AEMOP e STANSG combinaram boa recuperação estrutural com desempenho satisfatório na separação, reforçando a importância da avaliação conjunta de parâmetros estruturais e operacionais.

A associação do sulfato de alumínio como coagulante primário com os coagulantes naturais AEMOP e STANSG como coagulantes secundários mostrou-se uma estratégia promissora, permitindo melhorar a recuperação estrutural dos flocos formados por SSA sem comprometer a eficiência de sedimentação. Esses resultados indicam que a combinação de mecanismos distintos — varredura, neutralização de cargas e formação de pontes — pode representar uma alternativa tecnicamente viável para otimizar processos de separação de microalgas, reduzindo a dependência exclusiva de coagulantes químicos convencionais.

De forma geral, esta dissertação contribui para o avanço do entendimento sobre a formação, resistência, ruptura e recrescimento de flocos de microalgas em matrizes complexas contendo microplásticos, evidenciando que coagulantes naturais e inorgânicos não devem ser avaliados sob uma perspectiva única, mas sim a partir de seus mecanismos específicos de atuação. Os resultados obtidos reforçam o

potencial dos coagulantes naturais como alternativas ambientalmente sustentáveis e tecnicamente eficientes, especialmente quando empregados de forma complementar aos coagulantes químicos. Recomenda-se que estudos futuros explorem a aplicação desses sistemas em escalas piloto e industrial, bem como o uso de técnicas complementares de caracterização estrutural dos flocos, como análise de imagens, para aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos.

REFERÊNCIAS

- ABDUL HAMID, S. H. et al. Harvesting microalgae, *Chlorella* sp., by bioflocculation of *Moringa oleifera* seed derivatives from aquaculture wastewater phyto remediation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, [S. l.], v. 95, p. 270–275, 2014.
- ANDRADE, P. V. et al. 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*, [S. l.], v. 40, p. 101859, 2021.
- ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 262, p. 121267, 2020.
- APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2017.
- BUTLER, T. O. et al. The transition away from chemical flocculants: commercially viable harvesting of *Phaeodactylum tricornutum*. *Separation and Purification Technology*, [S. l.], v. 255, p. 117733, 2021.
- BEN-DAVID, E. A. et al. Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique. *Science of the Total Environment*, [S. l.], v. 752, p. 141880, 2021.
- CARR, S. A.; LIU, J.; TESORO, A. G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, [S. l.], v. 91, p. 174–182, 2016.
- CHALES, G. G. *Efeito dos métodos de extração no uso da semente de Moringa oleifera como coagulante primário*. 2022. Trabalho acadêmico (nível não informado) – Instituição não informada, [S. l.], 2022.
- DRONJAK, L. et al. Tracing the fate of microplastic in wastewater treatment plant: a multi-stage analysis of treatment units and sludge. *Environmental Pollution*, [S. l.], v. 333, p. 122095, 2023.
- GIRISH, N.; PARASHAR, N.; HAIT, S. Coagulative removal of microplastics from aqueous matrices: recent progresses and future perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, [S. l.], v. 52, p. 103505, 2023.
- GODOY, L. G. R. et al. Improving microplastics aggregate settling velocity through ballasted flocculation via natural-based coagulants and nonintrusive image monitoring. *Journal of Water Process Engineering*, v. 74, p. 107761, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107761
- GRAHAM, N. et al. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based cationic polymer: a preliminary assessment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [S. l.], v. 327, n. 1–3, p. 9–16, 2008.

GREGORY, J. *Monitoring particle aggregation processes*. London: Imperial College Press, 2009.

GREGORY, J.; NELSON, D. W. Monitoring of aggregates in flowing suspensions. *Colloids and Surfaces*, [S. I.], v. 19, p. 205–214, 1986.

HASSAN, F. et al. Microplastic contamination in sewage sludge: abundance, characteristics, and impacts on the environment and human health. *Environmental Technology & Innovation*, [S. I.], v. 31, p. 103089, 2023.

HE, W. et al. Internal interaction between chemically pretreated polypropylene microplastics and floc growth during flocculation: critical effect on floc properties and flocculation mechanisms. *Separation and Purification Technology*, [S. I.], v. 306, p. 122584, 2023.

HUANG, J. et al. Microplastic pollution in soils and groundwater: characteristics, analytical methods and impacts. *Chemical Engineering Journal*, [S. I.], v. 425, p. 130845, 2021.

JAIN, R.; MISHRA, S.; MOHANTY, K. Cattle wastewater as a low-cost supplement augmenting microalgal biomass under batch and fed-batch conditions. *Journal of Environmental Management*, [S. I.], v. 304, p. 114234, 2022.

JUNG, S. et al. Progress in quantitative analysis of microplastics in the environment: a review. *Chemical Engineering Journal*, [S. I.], v. 422, p. 130154, 2021.

KANSAL, S. K.; KUMARI, A. Potential of *Moringa oleifera* for the treatment of water and wastewater. Washington, DC: American Chemical Society, 2014.

KHATTABI RIFI, S. et al. *Moringa oleifera* organic coagulant to eliminate pollution in olive oil mill wastewater. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, [S. I.], v. 20, p. 100819, 2023.

KURNIAWAN, S. B. et al. What compound inside biocoagulants/bioflocculants is contributing the most to the coagulation and flocculation processes? *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [S. I.], v. 10, n. 6, p. 108650, 2022.

LEITE, L. de S.; HOFFMANN, M. T.; DANIEL, L. A. Coagulation and dissolved air flotation as a harvesting method for microalgae cultivated in wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, [S. I.], v. 32, p. 100947, 2019.

LEIVISKÄ, T.; SANTOS, S. C. R. *Purifying water with plant-based sustainable solutions: tannin coagulants and sorbents*. Amsterdam: Elsevier, 2023.

LI, Y. Q. et al. Effects of polyvinyl chloride microplastics on the toxicity of nanoparticles and antibiotics to aerobic granular sludge. *Environmental Research*, [S. I.], v. 238, p. 117735, 2023.

LITHNER, D.; LARSSON, Å.; DAVE, G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, [S. I.], v. 409, n. 18, p. 3309–3324, 2011.

LIU, Y. et al. Methods to recover and characterize microplastics in wastewater treatment plants. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, [S. l.], v. 5, p. 100185, 2022.

MARINHO, Y. F. et al. Usage of *Moringa oleifera* residual seeds promotes efficient flocculation of *Tetradesmus dimorphus* biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [S. l.], 2022. DOI: 10.1007/s13399-022-02789-3.

MORUZZI, R. B. et al. Strength assessment of Al-humic and Al-kaolin aggregates by intrusive and non-intrusive methods. *Separation and Purification Technology*, [S. l.], v. 217, p. 265–273, 2019.

MURPHY, F. et al. Wastewater treatment works as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, [S. l.], v. 50, n. 11, p. 5800–5808, 2016.

NDABIGENGESERE, A.; SUBBA NARASIAH, K.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research*, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 703–710, 1995.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Microplastics in drinking-water*. Geneva: WHO, 2019.

PARSAI, T. et al. Implication of microplastic toxicity on functioning of microalgae in aquatic system. *Journal of Hazardous Materials*, [S. l.], v. 439, p. 129626, 2022.

PIVOKONSKÝ, M. et al. Occurrence and fate of microplastics at two different drinking water treatment plants within a river catchment. *Science of the Total Environment*, [S. l.], v. 741, p. 140236, 2020.

POLASEK, P.; WANTENAAR, C. J. The inability of organic coagulants to purify potable water to its best attainable quality. *Water SA*, [S. l.], v. 49, n. 3, p. 311–319, 2023.

QUARTAROLI, L. et al. Microalgae separation in MP-PVC contaminated wastewater using plant-based coagulant over different extraction methods in Bauru, Brazil. *Journal of Environmental Management*, [S. l.], v. 370, p. 121877, 2024.

SAVRIK, Serkan et al. Environmental behavior, toxicity and removal mechanisms of polyvinyl chloride microplastics in aquatic systems. *Science of the Total Environment*, v. 931, p. 172215, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172215.

SCHMID, M.; RATH, D.; DIEBOLD, U. Why and how Savitzky–Golay filters should be replaced. *ACS Measurement Science Au*, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 185–196, 2022.

SINGH, G.; PATIDAR, S. K. *Microalgae harvesting techniques: a review*. London: Academic Press, 2018.

TEIXEIRA, C. M. L. L.; KIRSTEN, F. V.; TEIXEIRA, P. C. N. Evaluation of *Moringa oleifera* seed flour as a flocculating agent for potential biodiesel producer microalgae. *Journal of Applied Phycology*, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 557–563, 2012.

TEIXEIRA, M. S. et al. Tannin-based coagulant for harvesting microalgae cultivated in wastewater. *Science of the Total Environment*, [S. I.], v. 807, p. 150911, 2022.

VARGAS, L. B. et al. Application of a tannin-based coagulant for harvesting *Parachlorella kessleri*. *Aquaculture International*, [S. I.], v. 31, p. 1209–1224, 2023.

VUNAIN, E. et al. Evaluation of coagulating efficiency and pathogen reduction capacity of *Moringa oleifera* seed powder. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [S. I.], v. 7, n. 3, p. 103177, 2019.

WANG, Z.; LIN, T.; CHEN, W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant. *Science of the Total Environment*, [S. I.], v. 700, p. 134520, 2020.

XU, N. et al. Microplastic pollution in offshore sea, rivers and wastewater treatment plants in Jiangsu coastal area, China. *Marine Environmental Research*, [S. I.], v. 188, p. 106083, 2023.

YANG, R. et al. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. *Chemical Engineering Journal*, [S. I.], v. 327, p. 1–13, 2016.

YANG, Z.; HOU, J.; MIAO, L. Harvesting freshwater microalgae with natural polymer flocculants. *Algal Research*, [S. I.], v. 57, p. 102358, 2021.

YU, W. Z.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. Breakage and regrowth of Al-humic flocs. *Environmental Science & Technology*, [S. I.], v. 44, n. 16, p. 6371–6376, 2010.

YU, W. et al. Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. *Water Research*, [S. I.], v. 68, p. 119–126, 2015.

ZHANG, Y. T. et al. Long-term effects of polyvinyl chloride microplastics on anaerobic granular sludge. *Environmental Science & Technology*, [S. I.], v. 54, n. 15, p. 9662–9671, 2020.

ZHAO, C. et al. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: a review. *Journal of Water Process Engineering*, [S. I.], v. 40, p. 101820, 2021.

APÊNDICE A – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL AEMOP 5% PARA FBR R1

Tabela A 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) sem dosagem adicional de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm/min)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			122,20		456		1,53		0,326		0,330		0,223		7,67
1	2,80	2,5	132,80	0,00	483	0,00	1,48	3,66	0,383	0,00	0,387	0,00	0,295	0,00	7,65
2	1,38	5	145,20	0,00	408	10,53	1,14	25,34	0,393	0,00	0,387	0,00	0,274	0,00	7,71
3	0,68	10	107,60	11,95	468	0,00	1,15	24,89	0,349	0,00	0,341	0,00	0,245	0,00	7,70
4	0,45	15	70,10	42,64	365	19,96	0,69	54,67	0,220	32,52	0,217	34,24	0,160	28,25	7,68
5	0,22	30	45,60	62,68	278	39,04	0,16	89,42	0,138	57,67	0,125	62,12	0,086	61,43	7,70
6	0,11	60	19,80	83,80	139	69,52	0,00	100,00	0,066	79,75	0,057	82,73	0,046	79,37	7,69
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm/min)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,80	2,29	116,80	4,42	429	5,92	1,24	18,88	0,362	0,00	0,346	0,00	0,252	0,00	7,81
2.1	1,38	4,56	126,40	0,00	552	0,00	0,53	65,38	0,383	0,00	0,376	0,00	0,275	0,00	7,79
3.1	0,68	9,12	143,90	0,00	772	0,00	0,57	62,57	0,386	0,00	0,385	0,00	0,278	0,00	7,78
4.1	0,45	13,56	105,20	13,91	572	0,00	0,34	77,60	0,293	10,12	0,285	13,64	0,214	4,04	7,77
5.1	0,22	27,27	65,10	46,73	409	10,31	0,85	44,28	0,214	34,36	0,209	36,67	0,144	35,43	7,81
6.1	0,11	53,64	30,20	75,29	204	55,26	0,81	46,90	0,141	56,75	0,126	61,82	0,104	53,36	7,73

Fonte: elaboração própria.

Tabela A 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 73,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			120,9		708		0,986		0,318		0,263		0,196		7,63
1	2,8	2,5	131,4	0,00	830	0,00	0,972	1,42	0,311	2,20	0,285	0,00	0,227	0,00	7,62
2	1,38	5	137,8	0,00	856	0,00	0,977	0,91	0,263	17,30	0,246	6,46	0,181	7,65	7,6
3	0,68	10	84,8	29,86	564	20,34	0,861	12,68	0,221	30,50	0,191	27,38	0,152	22,45	7,56
4	0,45	15	57,9	52,11	344	51,41	0,767	22,21	0,164	48,43	0,143	45,63	0,113	42,35	7,54
5	0,22	30	21,1	82,55	235	66,81	0,628	36,31	0,103	67,61	0,094	64,26	0,069	64,80	7,54
6	0,11	60	17,9	85,19	128	81,92	0,53	46,25	0,047	85,22	0,042	84,03	0,031	84,18	7,56
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	108,5	10,26	754	0,00	1,08	0,00	0,309	2,83	0,282	0,00	0,230	0,00	7,69
2.1	1,38	5	126,4	0,00	764	0,00	1,077	0,00	0,322	0,00	0,284	0,00	0,225	0,00	7,66
3.1	0,68	10	104,6	13,48	622	12,15	1,002	0,00	0,263	17,30	0,238	9,51	0,184	6,12	7,63
4.1	0,45	15	66,5	45,00	392	44,63	0,931	5,58	0,175	44,97	0,151	42,59	0,114	41,84	7,64
5.1	0,22	30	48,5	59,88	287	59,46	0,638	35,29	0,126	60,38	0,115	56,27	0,085	56,63	7,63
6.1	0,11	60	21,4	82,30	175	75,28	0,631	36,00	0,070	77,99	0,064	75,67	0,048	75,51	7,62

Fonte: elaboração própria.

Tabela A 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 183,7 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			106,5		896		1,036		0,280		0,254		0,187		7,69
1	2,8	2,5	129	0,00	892	0,45	0,909	12,26	0,303	0,00	0,28	0,00	0,216	0,00	7,58
2	1,38	5	122,4	0,00	852	4,91	0,868	16,22	0,275	1,79	0,252	0,79	0,184	1,60	7,53
3	0,68	10	91,3	14,27	636	29,02	0,803	22,49	0,252	10,00	0,236	7,09	0,178	4,81	7,49
4	0,45	15	61,6	42,16	422	52,90	0,711	31,37	0,148	47,14	0,145	42,91	0,105	43,85	7,57
5	0,22	30	17,9	83,19	148	83,48	0,508	50,97	0,06	78,57	0,053	79,13	0,036	80,75	7,59
6	0,11	60	10,1	90,52	107	88,06	0,456	55,98	0,026	90,71	0,020	92,13	0,017	90,91	7,56
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	127,5	0,00	826	7,81	0,947	8,59	0,274	2,14	0,249	1,97	0,187	0,00	7,67
2.1	1,38	5	125,5	0,00	820	8,48	0,936	9,65	0,278	0,71	0,254	0,00	0,197	0,00	7,67
3.1	0,68	10	117,6	0,00	740	17,41	0,818	21,04	0,273	2,50	0,245	3,54	0,189	0,00	7,67
4.1	0,45	15	77,1	27,61	552	38,39	0,767	25,97	0,218	22,14	0,195	23,23	0,151	19,25	7,67
5.1	0,22	30	62	41,78	339	62,17	0,757	26,93	0,139	50,36	0,123	51,57	0,095	49,20	7,67
6.1	0,11	60	27,1	74,55	191	78,68	0,720	30,50	0,075	73,21	0,069	72,83	0,052	72,19	7,70

Fonte: elaboração própria.

Tabela A 4 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 367,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			94,2		758		0,774		0,276		0,249		0,174		7,45
1	2,8	2,5	129,7	0,00	726	4,22	1,158	0,00	0,335	0,00	0,302	0,00	0,230	0,00	7,52
2	1,38	5	116,7	0,00	772	0,00	0,889	0,00	0,299	0,00	0,269	0,00	0,198	0,00	7,49
3	0,68	10	82	12,95	548	27,70	0,845	0,00	0,268	2,90	0,257	0,00	0,206	0,00	7,52
4	0,45	15	59	37,37	328	56,73	0,513	33,72	0,156	43,48	0,132	46,99	0,118	32,18	7,50
5	0,22	30	35,5	62,31	202	73,35	0,493	36,30	0,096	65,22	0,077	69,08	0,058	66,67	7,50
6	0,11	60	11,8	87,47	117	84,56	0,364	52,97	0,047	82,97	0,029	88,35	0,024	86,21	7,49
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	136,3	0,00	706	6,86	1,435	0,00	0,310	0,00	0,285	0,00	0,226	0,00	7,60
2.1	1,38	5	143,8	0,00	792	0,00	0,971	0,00	0,315	0,00	0,292	0,00	0,225	0,00	7,59
3.1	0,68	10	129,5	0,00	598	21,11	0,965	0,00	0,298	0,00	0,261	0,00	0,207	0,00	7,61
4.1	0,45	15	119	0,00	610	19,53	0,940	0,00	0,294	0,00	0,256	0,00	0,193	0,00	7,60
5.1	0,22	30	80,4	14,65	436	42,48	0,909	0,00	0,209	24,28	0,183	26,51	0,135	22,41	7,62
6.1	0,11	60	36,5	61,25	196	74,14	0,589	23,90	0,073	73,55	0,060	75,90	0,048	72,41	7,58

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE B – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL AEMOP 5% PARA FBR R2

Tabela B 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) sem dosagem adicional de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			162,00		798,00		1,103		0,36		0,381		0,28		7,6
1	2,80	2,5	453,50	0,00	600,00	24,81	0,868	21,31	0,954	0	0,99	0,00	0,725	0,00	7,59
2	1,38	5	154,40	4,69	520,00	34,84	0,926	16,05	0,303	15,83	0,303	20,47	0,23	17,86	7,61
3	0,68	10	138,40	14,57	525,00	34,21	0,930	15,68	0,305	15,28	0,304	20,21	0,236	15,71	7,6
4	0,45	15	108,00	33,33	399,00	50,00	0,660	40,16	0,255	29,17	0,257	32,55	0,202	27,86	7,63
5	0,22	30	36,40	77,53	170,00	78,70	0,600	45,60	0,096	73,33	0,09	76,38	0,068	75,71	7,63
6	0,11	60	19,40	88,02	101,00	87,34	0,527	52,22	0,05	86,11	0,046	87,93	0,036	87,14	7,64
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,80	2,29	169,70	0,00	452,00	43,36	1,136	0,00	0,366	0	0,776	0,00	0,288	0,00	7,67
2.1	1,38	4,56	182,80	0,00	452,00	43,36	0,831	24,66	0,429	0	0,431	0,00	0,326	0,00	7,63
3.1	0,68	9,12	164,60	0,00	421	47,24	1,018	7,71	0,374	0	0,371	2,62	0,275	1,79	7,65
4.1	0,45	13,56	125,60	22,47	519	34,96	1,030	6,62	0,314	12,78	0,312	18,11	0,223	20,36	7,65
5.1	0,22	27,27	54,30	66,48	256	67,92	1,137	0,00	0,136	62,22	0,138	63,78	0,102	63,57	7,64
6.1	0,11	53,64	26,00	83,95	153	80,83	0,506	54,13	0,075	79,17	0,078	79,53	0,056	80,00	7,71

Fonte: elaboração própria.

Tabela B 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 69 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			215		780		1,163		0,309		0,308		0,236		7,37
1	2,8	2,5	188	12,56	874	0,00	1,049	9,80	0,338	0,00	0,330	0,00	0,252	0,00	7,47
2	1,38	5	179,5	16,51	744	4,62	0,925	20,46	0,355	0,00	0,330	0,00	0,252	0,00	7,47
3	0,68	10	108,5	49,53	564	27,69	0,877	24,59	0,251	18,77	0,245	20,45	0,190	19,49	7,49
4	0,45	15	73,6	65,77	281	63,97	0,765	34,22	0,118	61,81	0,109	64,61	0,080	66,10	7,41
5	0,22	30	33,3	84,51	144	81,54	0,54	53,57	0,052	83,17	0,050	83,77	0,039	83,47	7,39
6	0,11	60	14,7	93,16	103	86,79	0,405	65,18	0,024	92,23	0,023	92,53	0,019	91,95	7,41
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	162,1	24,60	758	2,82	1,05	9,72	0,334	0,00	0,316	0,00	0,253	0,00	7,46
2.1	1,38	5	177,1	17,63	846	0,00	0,975	16,17	0,347	0,00	0,333	0,00	0,264	0,00	7,59
3.1	0,68	10	160,3	25,44	708	9,23	0,952	18,14	0,316	0,00	0,302	1,95	0,234	0,85	7,50
4.1	0,45	15	122,7	42,93	460	41,03	0,906	22,10	0,236	23,62	0,224	27,27	0,186	21,19	7,55
5.1	0,22	30	49,6	76,93	252	67,69	0,739	36,46	0,130	57,93	0,121	60,71	0,097	58,90	7,50
6.1	0,11	60	25	88,37	158	79,74	0,626	46,17	0,058	81,23	0,061	80,19	0,044	81,36	7,51

Fonte: elaboração própria.

Tabela B 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 172,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			201,3		758		1,047		0,384		0,367		0,279		7,36
1	2,8	2,5	181,4	9,89	734	3,17	0,934	10,79	0,353	8,07	0,332	9,54	0,253	9,32	7,42
2	1,38	5	170	15,55	772	0,00	0,884	15,57	0,388	0,00	0,374	0,00	0,288	0,00	7,4
3	0,68	10	122,9	38,95	658	13,19	0,799	23,69	0,298	22,40	0,272	25,89	0,218	21,86	7,4
4	0,45	15	86,2	57,18	464	38,79	0,663	36,68	0,210	45,31	0,200	45,50	0,152	45,52	7,38
5	0,22	30	43,7	78,29	268	64,64	0,477	54,44	0,117	69,53	0,111	69,75	0,085	69,53	7,42
6	0,11	60	21,5	89,32	144	81,00	0,343	67,24	0,056	85,42	0,055	85,01	0,048	82,80	7,45
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	172,4	14,36	718	5,28	0,891	14,90	0,345	10,16	0,335	8,72	0,270	3,23	7,58
2.1	1,38	5	162,6	19,23	788	0,00	0,741	29,23	0,344	10,42	0,329	10,35	0,253	9,32	7,56
3.1	0,68	10	132,5	34,18	670	11,61	0,735	29,80	0,298	22,40	0,280	23,71	0,218	21,86	7,53
4.1	0,45	15	129,8	35,52	600	20,84	0,668	36,20	0,262	31,77	0,259	29,43	0,214	23,30	7,53
5.1	0,22	30	71,6	64,43	364	51,98	0,537	48,71	0,157	59,11	0,149	59,40	0,122	56,27	7,55
6.1	0,11	60	35,6	82,31	207	72,69	0,437	58,26	0,094	75,52	0,088	76,02	0,075	73,12	7,6

Fonte: elaboração própria.

Tabela B 4 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 345 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
			228,7		1080		1,690		0,436		0,432		0,345		7,43
1	2,8	2,5	216,5	5,33	854	20,93	1,246	26,27	0,493	0,00	0,473	0,00	0,369	0,00	7,54
2	1,38	5	228,8	0,00	1086	0,00	1,273	24,67	0,49	0,00	0,467	0,00	0,369	0,00	7,49
3	0,68	10	141,6	38,08	604	44,07	1,078	36,21	0,299	31,42	0,299	30,79	0,234	32,17	7,47
4	0,45	15	90,8	60,30	392	63,70	1,409	16,63	0,206	52,75	0,192	55,56	0,147	57,39	7,48
5	0,22	30	26,6	88,37	162	85,00	0,454	73,14	0,07	83,94	0,063	85,42	0,051	85,22	7,46
6	0,11	60	11,1	95,15	110	89,81	0,541	67,99	0,047	89,22	0,042	90,28	0,034	90,14	7,38
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	250,4	0,00	1026	5,00	1,710	0,00	0,534	0,00	0,509	0,00	0,401	0,00	7,44
2.1	1,38	5	255,4	0,00	988	8,52	1,948	0,00	0,541	0,00	0,526	0,00	0,422	0,00	7,46
3.1	0,68	10	167,7	26,67	700	35,19	1,220	27,81	0,367	15,83	0,355	17,82	0,284	17,68	7,46
4.1	0,45	15	96,6	57,76	392	63,70	0,845	50,00	0,21	51,83	0,198	54,17	0,167	51,59	7,44
5.1	0,22	30	44,0	80,76	203	81,20	0,557	67,04	0,101	76,83	0,091	78,94	0,072	79,13	7,45
6.1	0,11	60	20,2	91,17	121	88,80	0,537	68,22	0,036	91,74	0,038	91,20	0,029	91,59	7,47

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE C – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL STANSG 10% PARA FBR R1

Tabela C 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) sem dosagem adicional de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			94,4		784		0,924		0,309		0,332		0,221		7,56
1	2,8	2,5	93,3	1,17	480	38,78	0,972	0,00	0,299	3,24	0,278	16,27	0,233	0,00	7,33
2	1,38	5	46,9	50,32	173	77,93	0,504	45,45	0,124	59,87	0,1	69,88	0,084	61,99	7,35
3	0,68	10	12,4	86,86	116	85,20	0,280	69,70	0,047	84,79	0,045	86,45	0,028	87,33	7,4
4	0,45	15	10,6	88,77	85	89,16	0,285	69,16	0,034	89,00	0,026	92,17	0,017	92,31	7,37
5	0,22	30	6,6	93,01	75	90,43	0,296	67,97	0,026	91,59	0,024	92,77	0,012	94,57	7,39
6	0,11	60	1,4	98,52	55	92,98	0,243	73,70	0,009	97,09	0,005	98,49	0,002	99,10	7,37
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	78,1	17,27	384	51,02	0,607	34,31	0,204	33,98	0,177	46,69	0,128	42,08	7,61
2.1	1,38	5	36,8	61,02	186	76,28	0,434	53,03	0,110	64,40	0,095	71,39	0,069	68,78	7,61
3.1	0,68	10	11,9	87,39	106	86,48	0,348	62,34	0,040	87,06	0,041	87,65	0,019	91,40	7,66
4.1	0,45	15	10,4	88,98	100	87,24	0,330	64,29	0,040	87,06	0,033	90,06	0,023	89,59	7,58
5.1	0,22	30	7,0	92,58	88	88,78	0,371	59,85	0,036	88,35	0,026	92,17	0,016	92,76	7,59
6.1	0,11	60	1,9	97,99	54	93,11	0,303	67,21	0,023	92,56	0,011	96,69	0,007	96,83	7,66

Fonte: elaboração própria.

Tabela C 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 10,2 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			100,4		804		0,946		0,278		0,262		0,187		7,62
1	2,8	2,5	97,8	2,6	794	1,2	0,993	0,0	0,263	5,4	0,238	9,2	0,169	9,6	7,6
2	1,38	5	26,9	73,2	266	66,9	0,653	31,0	0,079	71,6	0,069	73,7	0,052	72,2	7,57
3	0,68	10	10,6	89,4	107	86,7	0,327	65,4	0,04	85,6	0,036	86,3	0,026	86,1	7,62
4	0,45	15	8,6	91,4	93	88,4	0,298	68,5	0,023	91,7	0,019	92,7	0,018	90,4	7,59
5	0,22	30	4,3	95,7	79	90,2	0,268	71,7	0,019	93,2	0,015	94,3	0,01	94,7	7,6
6	0,11	60	0,5	99,5	57	92,9	0,252	73,4	0,002	99,3	0,003	98,9	0,006	96,8	7,59
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	61,6	38,6	478	40,5	0,635	32,9	0,157	43,5	0,152	42,0	0,12	35,8	7,67
2.1	1,38	5	19,9	80,2	158	80,3	0,412	56,4	0,042	84,9	0,036	86,3	0,024	87,2	7,77
3.1	0,68	10	6,9	93,1	79	90,2	0,362	61,7	0,034	87,8	0,023	91,2	0,016	91,4	7,82
4.1	0,45	15	4	96,0	73	90,9	0,318	66,4	0,016	94,2	0,006	97,7	0,008	95,7	7,72
5.1	0,22	30	3,8	96,2	67	91,7	0,269	71,6	0,019	93,2	0,009	96,6	0,007	96,3	7,7
6.1	0,11	60	1,9	98,1	59	92,7	0,135	85,7	0,013	95,3	0,006	97,7	0,004	97,9	7,69

Fonte: elaboração própria.

Tabela C 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 25,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			98,4		750		0,801		0,254		0,239		0,176		7,63
1	2,8	2,5	98,8	0,0	694	7,5	0,653	18,5	0,251	1,2	0,222	7,1	0,15	14,8	7,46
2	1,38	5	39,4	60,0	330	56,0	0,446	44,3	0,107	57,9	0,11	54,0	0,07	60,2	7,47
3	0,68	10	18,9	80,8	112	85,1	0,381	52,4	0,049	80,7	0,041	82,8	0,032	81,8	7,5
4	0,45	15	11,7	88,1	100	86,7	0,31	61,3	0,029	88,6	0,025	89,5	0,014	92,0	7,55
5	0,22	30	5,4	94,5	74	90,1	0,271	66,2	0,012	95,3	0,013	94,6	0,003	98,3	7,5
6	0,11	60	1,3	98,7	61	91,9	0,235	70,7	0,005	98,0	0	100,0	0	100,0	7,61
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	79,8	18,9	472	37,1	0,538	32,8	0,148	41,7	0,114	52,3	0,102	42,0	7,6
2.1	1,38	5	17,7	82,0	180	76,0	0,337	57,9	0,048	81,1	0,04	83,3	0,027	84,7	7,65
3.1	0,68	10	5	94,9	100	86,7	0,255	68,2	0,014	94,5	0,014	94,1	0,008	95,5	7,63
4.1	0,45	15	4,3	95,6	77	89,7	0,239	70,2	0,019	92,5	0,009	96,2	0,005	97,2	7,62
5.1	0,22	30	1	99,0	61	91,9	0,189	76,4	0,01	96,1	0,005	97,9	0,004	97,7	7,66
6.1	0,11	60	0	100,0	58	92,3	0,169	78,9	0,01	96,1	0,003	98,7	0,001	99,4	7,67

Fonte: elaboração própria.

Tabela C 4 - - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 51 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			102		764		1,045		0,287		0,263		0,207		7,27
1	2,8	2,5	98,6	3,3	614	19,6	0,741	29,1	0,245	14,6	0,233	11,4	0,177	14,5	7,23
2	1,38	5	15,6	84,7	108	85,9	0,163	84,4	0,075	73,9	0,053	79,8	0,048	76,8	7,21
3	0,68	10	9,7	90,5	94	87,7	0,294	71,9	0,019	93,4	0,006	97,7	0,009	95,7	7,21
4	0,45	15	4,1	96,0	72	90,6	0,22	78,9	0,008	97,2	0,005	98,1	0,009	95,7	7,21
5	0,22	30	4,4	95,7	58	92,4	0,041	96,1	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,21
6	0,11	60	3,7	96,4	47	93,8	0,22	78,9	0	100,0	0	100,0	0,007	96,6	7,36
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	49,1	51,9	258	66,2	0,855	18,2	0,183	36,2	0,14	46,8	0,091	56,0	7,39
2.1	1,38	5	32,3	68,3	126	83,5	0,441	57,8	0,035	87,8	0,03	88,6	0,018	91,3	7,41
3.1	0,68	10	7,5	92,6	67	91,2	0,592	43,3	0,016	94,4	0,009	96,6	0,004	98,1	7,42
4.1	0,45	15	1,6	98,4	47	93,8	0,255	75,6	0,012	95,8	0,003	98,9	0	100,0	7,44
5.1	0,22	30	0,7	99,3	46	94,0	0,246	76,5	0,008	97,2	0,001	99,6	0	100,0	7,4
6.1	0,11	60	0,3	99,7	43	94,4	0,19	81,8	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,42

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE D – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE NATURAL STANSG 10% PARA FBR R2

Tabela D 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) sem dosagem adicional de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			159,6		1020		0,799		0,269		0,302		0,208		7,39
1	2,8	2,5	46,5	70,86	254	75,10	0,475	40,55	0,136	49,44	0,122	59,60	0,085	59,13	7,42
2	1,38	5	18,3	88,53	90	91,18	0,312	60,95	0,044	83,64	0,037	87,75	0,031	85,10	7,43
3	0,68	10	13,6	91,48	62	93,92	0,27	66,21	0,031	88,48	0,043	85,76	0,025	87,98	7,40
4	0,45	15	14,3	91,04	71	93,04	0,226	71,71	0,032	88,10	0,029	90,40	0,023	88,94	7,40
5	0,22	30	3,2	97,99	60	94,12	0,241	69,84	0,014	94,80	0,014	95,36	0,008	96,15	7,44
6	0,11	60	2,3	98,56	47	95,39	0,233	70,84	0,010	96,28	0,009	97,02	0,005	97,60	7,54
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	84,0	47,37	303	70,29	0,716	10,39	0,224	16,73	0,204	32,45	0,158	24,04	7,60
2.1	1,38	5	59,7	62,59	171	83,24	0,263	67,08	0,101	62,45	0,094	68,87	0,065	68,75	7,62
3.1	0,68	10	20,3	87,28	97	90,49	0,326	59,20	0,058	78,44	0,058	80,79	0,047	77,40	7,62
4.1	0,45	15	14,0	91,23	84	91,76	0,287	64,08	0,039	85,50	0,045	85,10	0,034	83,65	7,58
5.1	0,22	30	3,2	97,99	60	94,12	0,263	67,08	0,020	92,57	0,012	96,03	0,018	91,35	7,54
6.1	0,11	60	3,0	98,12	60	94,12	0,252	68,46	0,011	95,91	0,007	97,68	0,007	96,63	7,39

Fonte: elaboração própria.

Tabela D 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 10,9 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			157,1		844		1,255		0,377		0,321		0,244		7,47
1	2,8	2,5	138,4	11,9	752	10,9	0,821	34,6	0,238	36,9	0,23	28,3	0,209	14,3	7,47
2	1,38	5	26,8	82,9	128	84,8	0,346	72,4	0,047	87,5	0,037	88,5	0,054	77,9	7,43
3	0,68	10	8	94,9	85	89,9	0,34	72,9	0,022	94,2	0,022	93,1	0,014	94,3	7,43
4	0,45	15	7,7	95,1	86	89,8	0,315	74,9	0,009	97,6	0,011	96,6	0,012	95,1	7,44
5	0,22	30	2,9	98,2	64	92,4	0,293	76,7	0,011	97,1	0,008	97,5	0,008	96,7	7,45
6	0,11	60	0,3	99,8	62	92,7	0,269	78,6	0,007	98,1	0,006	98,1	0,002	99,2	7,47
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	95,6	39,1	598	29,1	0,642	48,8	0,166	56,0	0,169	47,4	0,159	34,8	7,59
2.1	1,38	5	14,3	90,9	124	85,3	0,343	72,7	0,013	96,6	0,034	89,4	0,017	93,0	7,51
3.1	0,68	10	3,3	97,9	79	90,6	0,327	73,9	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,6
4.1	0,45	15	2,7	98,3	74	91,2	0,32	74,5	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,58
5.1	0,22	30	0,2	99,9	66	92,2	0,303	75,9	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,62
6.1	0,11	60	0,2	99,9	66	92,2	0,291	76,8	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,59

Fonte: elaboração própria.

Tabela D 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 27 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			166,5		816		1,843		0,346		0,342		0,273		7,42
1	2,8	2,5	144	13,5	838	0,0	0,734	60,2	0,29	16,2	0,263	23,1	0,216	20,9	7,43
2	1,38	5	55,2	66,8	238	70,8	0,33	82,1	0,079	77,2	0,072	78,9	0,057	79,1	7,5
3	0,68	10	14,5	91,3	88	89,2	0,301	83,7	0,033	90,5	0,028	91,8	0,02	92,7	7,47
4	0,45	15	8,2	95,1	71	91,3	0,239	87,0	0,014	96,0	0,015	95,6	0,014	94,9	7,56
5	0,22	30	2,1	98,7	61	92,5	0,227	87,7	0,008	97,7	0,008	97,7	0	100,0	7,52
6	0,11	60	1,8	98,9	50	93,9	0,154	91,6	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,54
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	101,2	39,2	512	37,3	0,538	70,8	0,157	54,6	0,166	51,5	0,126	53,8	7,43
2.1	1,38	5	29,5	82,3	160	80,4	0,347	81,2	0,049	85,8	0,044	87,1	0,05	81,7	7,52
3.1	0,68	10	3,8	97,7	60	92,6	0,278	84,9	0,001	99,7	0	100,0	0	100,0	7,52
4.1	0,45	15	2	98,8	54	93,4	0,236	87,2	0	100,0	0,002	99,4	0	100,0	7,56
5.1	0,22	30	0	100,0	51	93,8	0,22	88,1	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,54
6.1	0,11	60	0	100,0	47	94,2	0,193	89,5	0	100,0	0	100,0	0	100,0	7,56

Fonte: elaboração própria.

Tabela D 4 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 54,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			125,3		878		1,097		0,333		0,34		0,231		7,34
1	2,8	2,5	110,8	11,6	540	38,5	0,577	47,4	0,206	38,1	0,194	42,9	0,148	35,93	7,36
2	1,38	5	39,4	68,6	111	87,4	0,237	78,4	0,07	79,0	0,055	83,8	0,044	80,95	7,36
3	0,68	10	7,9	93,7	72	91,8	0,049	95,5	0,003	99,1	0	100,0	0	100,00	7,37
4	0,45	15	7,6	93,9	65	92,6	0,058	94,7	0,013	96,1	0,008	97,6	0,004	98,27	7,36
5	0,22	30	6,6	94,7	57	93,5	0,044	96,0	0,011	96,7	0,013	96,2	0,012	94,81	7,36
6	0,11	60	4,6	96,3	51	94,2	0,048	95,6	0	100,0	0,004	98,8	0,002	99,13	7,35
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	87	30,6	514	41,5	0,259	76,4	0,168	49,5	0,167	50,9	0,137	40,69	7,42
2.1	1,38	5	23,8	81,0	74	91,6	0,243	77,8	0,041	87,7	0,04	88,2	0,031	86,58	7,43
3.1	0,68	10	3,2	97,4	60	93,2	0,147	86,6	0,01	97,0	0,007	97,9	0,009	96,10	7,45
4.1	0,45	15	4,9	96,1	62	92,9	0,147	86,6	0,015	95,5	0,016	95,3	0,012	94,81	7,42
5.1	0,22	30	1,1	99,1	56	93,6	0,165	85,0	0,008	97,6	0,008	97,6	0,008	96,54	7,46
6.1	0,11	60	0,7	99,4	54	93,8	0,292	73,4	0,004	98,8	0	100,0	0	100,00	7,43

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE E – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE QUÍMICO INORGÂNICO SSA 5% PARA FBR R1

Tabela E 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) sem dosagem adicional de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			103,7		940		0,775		0,334		0,339		0,240		7,64
1	2,8	2,5	102,3	1,35	209	77,77	0,602	22,32	0,295	11,68	0,302	10,91	0,242	0,00	6,82
2	1,38	5	53,6	48,31	345	63,30	0,510	34,19	0,173	48,20	0,173	48,97	0,123	48,75	6,71
3	0,68	10	11,1	89,30	95	89,89	0,387	50,06	0,051	84,73	0,043	87,32	0,032	86,67	6,74
4	0,45	15	5,6	94,60	70	92,55	0,240	69,03	0,031	90,72	0,027	92,04	0,021	91,25	6,72
5	0,22	30	2,8	97,30	50	94,68	0,222	71,35	0,000	100,00	0,018	94,69	0,013	94,58	6,72
6	0,11	60	1,3	98,75	53	94,36	0,283	63,48	0,015	95,51	0,011	96,76	0,008	96,67	6,73
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	96,1	7,33	520	44,68	0,460	40,65	0,256	23,35	0,238	29,79	0,190	20,83	6,82
2.1	1,38	5	70,5	32,02	421	55,21	0,680	12,26	0,230	31,14	0,219	35,40	0,150	37,50	6,83
3.1	0,68	10	17,0	83,61	82	91,28	0,306	60,52	0,061	81,74	0,048	85,84	0,037	84,58	6,74
4.1	0,45	15	2,8	97,30	77	91,81	0,335	56,77	0,044	86,83	0,036	89,38	0,028	88,33	6,88
5.1	0,22	30	6,2	94,02	77	91,81	0,312	59,74	0,044	86,83	0,039	88,50	0,029	87,92	6,89
6.1	0,11	60	3,8	96,34	55	94,15	0,285	63,23	0,036	89,22	0,026	92,33	0,019	92,08	6,85

Fonte: elaboração própria.

Tabela E 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 12,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			104,0		786		1,2		0,222		0,208		0,147		7,7
1	2,8	2,5	106,3	0,00	836	0,00	0,984	18,00	0,223	0,00	0,206	0,96	0,131	10,88	6,8
2	1,38	5	64,6	37,88	464	40,97	0,601	49,92	0,129	41,89	0,113	45,67	0,082	44,22	6,76
3	0,68	10	22,7	78,17	172	78,12	0,338	71,83	0,028	87,39	0,021	89,90	0,009	93,88	6,83
4	0,45	15	4,3	95,87	108	86,26	0,315	73,75	0,011	95,05	0,006	97,12	0,000	100,00	6,77
5	0,22	30	2,9	97,21	79	89,95	0,288	76,00	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,79
6	0,11	60	1,6	98,46	74	90,59	0,16	86,67	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,77
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	92,0	11,54	696	11,45	0,995	17,08	0,229	0,00	0,210	0,00	0,156	0,00	6,98
2.1	1,38	5	81,5	21,63	616	21,63	0,782	34,83	0,235	0,00	0,219	0,00	0,154	0,00	6,91
3.1	0,68	10	28,7	72,40	229	70,87	0,445	62,92	0,086	61,26	0,075	63,94	0,054	63,27	6,97
4.1	0,45	15	17,1	83,56	149	81,04	0,372	69,00	0,041	81,53	0,034	83,65	0,023	84,35	6,97
5.1	0,22	30	7,9	92,40	112	85,75	0,265	77,92	0,028	87,39	0,024	88,46	0,015	89,80	6,86
6.1	0,11	60	3,2	96,92	89	88,68	0,259	78,42	0,019	91,44	0,013	93,75	0,007	95,24	7,04

Fonte: elaboração própria.

Tabela E 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 31,7 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			99,6		808		1,178		0,281		0,253		0,182		7,74
1	2,8	2,5	103,5	0,00	766	5,20	0,822	30,22	0,286	0,00	0,246	2,77	0,175	3,85	6,91
2	1,38	5	51,7	48,09	410	49,26	0,702	40,41	0,126	55,16	0,114	54,94	0,081	55,49	6,84
3	0,68	10	20,3	79,62	178	77,97	0,347	70,54	0,056	80,07	0,043	83,00	0,026	85,71	6,87
4	0,45	15	8,6	91,37	105	87,00	0,329	72,07	0,032	88,61	0,020	92,09	0,013	92,86	6,79
5	0,22	30	7,4	92,57	96	88,12	0,251	78,69	0,026	90,75	0,013	94,86	0,007	96,15	6,76
6	0,11	60	2,7	97,29	74	90,84	0,162	86,25	0,018	93,59	0,005	98,02	0	100,00	6,82
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	91,5	8,13	732	9,41	0,828	29,71	0,217	22,78	0,189	25,30	0,13	28,57	6,83
2.1	1,38	5	86	13,65	694	14,11	0,807	31,49	0,220	21,71	0,190	24,90	0,149	18,13	6,79
3.1	0,68	10	36,9	62,95	243	69,93	0,456	61,29	0,092	67,26	0,077	69,57	0,057	68,68	6,84
4.1	0,45	15	23,4	76,51	170	78,96	0,424	64,01	0,074	73,67	0,065	74,31	0,046	74,73	6,83
5.1	0,22	30	7,5	92,47	96	88,12	0,319	72,92	0,030	89,32	0,019	92,49	0,013	92,86	6,78
6.1	0,11	60	7	92,97	88	89,11	0,281	76,15	0,027	90,39	0,017	93,28	0,01	94,51	6,81

Fonte: elaboração própria.

Tabela E 4 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 62,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			98,3		1162		0,941		0,301		0,291		0,219		7,33
1	2,8	2,5	96,8	1,53	1160	0,17	0,859	8,71	0,329	0,00	0,304	0,00	0,281	0,00	6,69
2	1,38	5	29,0	70,50	267	77,02	0,475	49,52	0,162	46,18	0,157	46,05	0,124	43,38	6,63
3	0,68	10	12,6	87,18	114	90,19	0,324	65,57	0,084	72,09	0,080	72,51	0,072	67,12	6,63
4	0,45	15	8,9	90,95	107	90,79	0,327	65,25	0,08	73,42	0,074	74,57	0,064	70,78	6,63
5	0,22	30	9,0	90,84	85	92,69	0,262	72,16	0,068	77,41	0,065	77,66	0,056	74,43	6,61
6	0,11	60	1,5	98,47	71	93,89	0,251	73,33	0,054	82,06	0,053	81,79	0,048	78,08	6,62
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	82,7	15,87	958	17,56	0,747	20,62	0,27	10,30	0,268	7,90	0,217	0,91	6,44
2.1	1,38	5	77,0	21,67	912	21,51	0,680	27,74	0,256	14,95	0,253	13,06	0,189	13,70	6,42
3.1	0,68	10	30,9	68,57	210	81,93	0,387	58,87	0,136	54,82	0,128	56,01	0,106	51,60	6,43
4.1	0,45	15	16,6	83,11	129	88,90	0,305	67,59	0,083	72,43	0,084	71,13	0,074	66,21	6,42
5.1	0,22	30	8,9	90,95	88	92,43	0,232	75,35	0,069	77,08	0,075	74,23	0,067	69,41	6,39
6.1	0,11	60	5,6	94,30	54	95,35	0,213	77,36	0,048	84,05	0,050	82,82	0,048	78,08	6,41

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE F – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COAGULANTE QUÍMICO INORGÂNICO SSA 5% PARA FBR R2

Tabela F 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) sem dosagem adicional de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			140,0		802		1,000		0,345		0,358		0,258		7,45
1	2,8	2,5	165,2	0,00	449	44,01	0,971	2,90	0,369	0,00	0,371	0,00	0,275	0,00	6,58
2	1,38	5	76,6	45,29	278	65,34	0,594	40,60	0,168	51,30	0,17	52,51	0,127	50,78	6,45
3	0,68	10	10,7	92,36	82	89,78	0,282	71,80	0,041	88,12	0,041	88,55	0,030	88,37	6,45
4	0,45	15	10,6	92,43	82	89,78	0,276	72,40	0,036	89,57	0,036	89,94	0,025	90,31	6,47
5	0,22	30	3,7	97,36	59	92,64	0,297	70,30	0,023	93,33	0,018	94,97	0,013	94,96	6,47
6	0,11	60	2,9	97,93	51	93,64	0,217	78,30	0,006	98,26	0,003	99,16	0,002	99,22	6,49
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	134,3	4,07	568	29,18	0,862	13,80	0,325	5,80	0,343	4,19	0,259	0,00	6,64
2.1	1,38	5	93,7	33,07	372	53,62	0,702	29,80	0,211	38,84	0,213	40,50	0,162	37,21	6,80
3.1	0,68	10	18,6	86,71	114	85,79	0,314	68,60	0,057	83,48	0,056	84,36	0,043	83,33	6,76
4.1	0,45	15	13,8	90,14	81	89,90	0,263	73,70	0,031	91,01	0,029	91,90	0,026	89,92	6,85
5.1	0,22	30	10,5	92,50	82	89,78	0,278	72,20	0,038	88,99	0,035	90,22	0,023	91,09	6,78
6.1	0,11	60	10,1	92,79	70	91,27	0,269	73,10	0,026	92,46	0,023	93,58	0,017	93,41	6,73

Fonte: elaboração própria.

Tabela F 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 13,1 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			140,6		764		1,424		0,365		0,381		0,385		7,29
1	2,8	2,5	150,4	0,00	770	0,00	0,949	33,36	0,310	15,07	0,322	15,49	0,243	36,88	6,67
2	1,38	5	103,5	26,39	514	32,72	0,781	45,15	0,211	42,19	0,220	42,26	0,178	53,77	6,57
3	0,68	10	28,1	80,01	143	81,28	0,34	76,12	0,024	93,42	0,027	92,91	0,014	96,36	6,63
4	0,45	15	21,5	84,71	114	85,08	0,324	77,25	0,015	95,89	0,020	94,75	0,019	95,06	6,59
5	0,22	30	8,7	93,81	93	87,83	0,263	81,53	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,61
6	0,11	60	0,0	100,00	62	91,88	0,229	83,92	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,55
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.mi0n ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	144,8	0,00	624	18,32	0,866	39,19	0,264	27,67	0,264	30,71	0,214	44,42	6,69
2.1	1,38	5	114,0	18,92	542	29,06	0,826	41,99	0,253	30,68	0,254	33,33	0,197	48,83	6,59
3.1	0,68	10	51,4	63,44	240	68,59	0,654	54,07	0,118	67,67	0,115	69,82	0,086	77,66	6,64
4.1	0,45	15	28,8	79,52	147	80,76	0,413	71,00	0,057	84,38	0,057	85,04	0,040	89,61	6,58
5.1	0,22	30	9,7	93,10	94	87,70	0,34	76,12	0,029	92,05	0,031	91,86	0,024	93,77	6,70
6.1	0,11	60	3,8	97,30	75	90,18	0,243	82,94	0,020	94,52	0,019	95,01	0,014	96,36	6,80

Fonte: elaboração própria.

Tabela F 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 33,3 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			154,2		776		1,105		0,343		0,328		0,247		7,37
1	2,8	2,5	159,8	0,00	768	1,03	0,982	11,13	0,349	0,00	0,332	0,00	0,255	0,00	6,79
2	1,38	5	102,8	33,33	518	33,25	0,707	36,02	0,229	33,24	0,214	34,76	0,166	32,79	6,66
3	0,68	10	50,7	67,12	143	81,57	0,414	62,53	0,121	64,72	0,111	66,16	0,087	64,78	6,73
4	0,45	15	17,1	88,91	127	83,63	0,321	70,95	0,050	85,42	0,040	87,80	0,031	87,45	6,73
5	0,22	30	11,5	92,54	95	87,76	0,251	77,29	0,000	100,00	0,011	96,65	0,011	95,55	6,74
6	0,11	60	6,6	95,72	73	90,59	0,23	79,19	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,72
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	136,6	11,41	628	19,07	0,763	30,95	0,261	23,91	0,262	20,12	0,203	17,81	6,6
2.1	1,38	5	127,1	17,57	600	22,68	0,752	31,95	0,286	16,62	0,267	18,60	0,208	15,79	6,68
3.1	0,68	10	65,2	57,72	283	63,53	0,573	48,14	0,134	60,93	0,127	61,28	0,096	61,13	6,73
4.1	0,45	15	42,8	72,24	201	74,10	0,423	61,72	0,049	85,71	0,064	80,49	0,048	80,57	6,59
5.1	0,22	30	16,1	89,56	103	86,73	0,373	66,24	0,036	89,50	0,033	89,94	0,025	89,88	6,67
6.1	0,11	60	10,9	92,93	84	89,18	0,22	80,09	0,028	91,84	0,023	92,99	0,018	92,71	6,73

Fonte: elaboração própria.

Tabela F 4 - - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 65,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			173,4		890		1,111		0,443		0,465		0,330		7,48
1	2,8	2,5	171,3	1,21	822	7,64	0,972	12,51	0,350	20,99	0,356	23,44	0,279	15,45	6,53
2	1,38	5	56,5	67,42	198	77,75	0,480	56,80	0,121	72,69	0,120	74,19	0,093	71,82	6,45
3	0,68	10	9,7	94,41	83	90,67	0,281	74,71	0,032	92,78	0,030	93,55	0,024	92,73	6,49
4	0,45	15	5,1	97,06	63	92,92	0,187	83,17	0,021	95,26	0,017	96,34	0,015	95,45	6,49
5	0,22	30	5,3	96,94	60	93,26	0,247	77,77	0,039	91,20	0,015	96,77	0,013	96,06	6,46
6	0,11	60	2,0	98,85	54	93,93	0,234	78,94	0,012	97,29	0,008	98,28	0,008	97,58	6,48
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	180,1	0,00	732	17,75	0,875	21,24	0,357	19,41	0,370	20,43	0,282	14,55	6,07
2.1	1,38	5	163,3	5,82	656	26,29	0,924	16,83	0,350	20,99	0,342	26,45	0,273	17,27	6,03
3.1	0,68	10	73,4	57,67	288	67,64	0,481	56,71	0,170	61,63	0,165	64,52	0,131	60,30	5,99
4.1	0,45	15	31	82,12	119	86,63	0,320	71,20	0,075	83,07	0,073	84,30	0,060	81,82	6,04
5.1	0,22	30	14,5	91,64	88	90,11	0,265	76,15	0,036	91,87	0,036	92,26	0,027	91,82	6,01
6.1	0,11	60	8,8	94,93	69	92,25	0,222	80,02	0,020	95,49	0,021	95,48	0,019	94,24	6,08

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE G – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E AEMOP 5% PARA FBR R1

Tabela G 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 73,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			97,1		758		0,997		0,311		0,288		0,214		7,71
1	2,8	2,5	93,1	4,12	716	5,54	0,805	19,26	0,276	11,25	0,259	10,07	0,193	9,81	6,92
2	1,38	5	87,1	10,30	676	10,82	0,676	32,20	0,162	47,91	0,151	47,57	0,089	58,41	6,79
3	0,68	10	47,5	51,08	388	48,81	0,476	52,26	0,066	78,78	0,056	80,56	0,016	92,52	6,86
4	0,45	15	28,2	70,96	277	63,46	0,31	68,91	0,023	92,60	0,012	95,83	0,005	97,66	6,78
5	0,22	30	16,8	82,70	206	72,82	0,297	70,21	0,008	97,43	0,002	99,31	0,004	98,13	6,83
6	0,11	60	11,5	88,16	171	77,44	0,116	88,37	0,004	98,71	0,001	99,65	0,001	99,53	6,93
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	92,3	4,94	736	2,90	0,838	15,95	0,243	21,86	0,227	21,18	0,170	20,56	7,01
2.1	1,38	5	94,4	2,78	784	0,00	0,591	40,72	0,295	5,14	0,280	2,78	0,207	3,27	7,06
3.1	0,68	10	82,5	15,04	674	11,08	0,587	41,12	0,230	26,05	0,224	22,22	0,164	23,36	7,08
4.1	0,45	15	51,9	46,55	420	44,59	0,538	46,04	0,190	38,91	0,166	42,36	0,123	42,52	7,03
5.1	0,22	30	36,3	62,62	303	60,03	0,285	71,41	0,103	66,88	0,083	71,18	0,047	78,04	7,04
6.1	0,11	60	16,2	83,32	182	75,99	0,190	80,94	0,051	83,60	0,059	79,51	0,048	77,57	7,01

Fonte: elaboração própria.

Tabela G 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 183,75 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			97,5		730		1,287		0,248		0,238		0,181		7,65
1	2,8	2,5	96,2	1,33	804	0,00	0,859	33,26	0,247	0,40	0,223	6,30	0,161	11,05	6,95
2	1,38	5	81,0	16,92	474	35,07	0,799	37,92	0,14	43,55	0,129	45,80	0,092	49,17	6,84
3	0,68	10	17,1	82,46	186	74,52	0,448	65,19	0,051	79,44	0,049	79,41	0,028	84,53	6,83
4	0,45	15	9,1	90,67	102	86,03	0,419	67,44	0,024	90,32	0,018	92,44	0,009	95,03	6,81
5	0,22	30	2,9	97,03	84	88,49	0,374	70,94	0,007	97,18	0,007	97,06	0,002	98,90	6,84
6	0,11	60	1,3	98,67	68	90,68	0,337	73,82	0,003	98,79	0,001	99,58	0,000	100,00	6,79
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	102,9	0,00	712	2,47	0,926	28,05	0,273	0,00	0,215	9,66	0,163	9,94	7,04
2.1	1,38	5	95,7	1,85	732	0,00	0,845	34,34	0,247	0,40	0,226	5,04	0,166	8,29	7,00
3.1	0,68	10	81,9	16,00	654	10,41	0,672	47,79	0,192	22,58	0,176	26,05	0,131	27,62	7,01
4.1	0,45	15	76,6	21,44	544	25,48	0,646	49,81	0,181	27,02	0,165	30,67	0,129	28,73	7,05
5.1	0,22	30	39,5	59,49	338	53,70	0,590	54,16	0,109	56,05	0,102	57,14	0,076	58,01	7,05
6.1	0,11	60	25,9	73,44	187	74,38	0,384	70,16	0,083	66,53	0,069	71,01	0,044	75,69	7,01

Fonte: elaboração própria.

Tabela G 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 367,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			106,2		720		1,261		0,275		0,255		0,185		7,61
1	2,8	2,5	104,0	2,07	668	7,22	0,563	55,35	0,272	1,09	0,245	3,92	0,170	8,11	6,97
2	1,38	5	51,9	51,13	338	53,06	0,473	62,49	0,134	51,27	0,114	55,29	0,089	51,89	6,9
3	0,68	10	24,8	76,65	168	76,67	0,315	75,02	0,042	84,73	0,043	83,14	0,028	84,86	7,2
4	0,45	15	6,9	93,50	94	86,94	0,279	77,87	0,02	92,73	0,014	94,51	0,008	95,68	7,14
5	0,22	30	3,9	96,33	78	89,17	0,230	81,76	0,011	96,00	0,011	95,69	0,005	97,30	7,1
6	0,11	60	1,7	98,40	67	90,69	0,166	86,84	0,004	98,55	0,000	100,00	0,000	100,00	7,1
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	105,0	1,13	656	8,89	1,300	0,00	0,249	9,45	0,227	10,98	0,169	8,65	7,2
2.1	1,38	5	103,2	2,82	720	0,00	0,961	23,79	0,257	6,55	0,224	12,16	0,167	9,73	7,21
3.1	0,68	10	75,5	28,91	544	24,44	0,909	27,91	0,22	20,00	0,188	26,27	0,140	24,32	7,17
4.1	0,45	15	72,1	32,11	524	27,22	0,824	34,66	0,193	29,82	0,169	33,73	0,135	27,03	7,15
5.1	0,22	30	42,8	59,70	312	56,67	0,567	55,04	0,119	56,73	0,109	57,25	0,089	51,89	7,15
6.1	0,11	60	23,7	77,68	210	70,83	0,383	69,63	0,068	75,27	0,039	84,71	0,041	77,84	7,16

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE H – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E AEMOP 5% PARA FBR R2

Tabela H 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 69 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			146,8		874		1,169		0,284		0,262		0,207		7,42
1	2,8	2,5	144,8	1,36	744	14,87	0,859	26,52	0,251	11,62	0,242	7,63	0,184	11,11	6,62
2	1,38	5	74,3	49,39	374	57,21	0,809	30,80	0,146	48,59	0,134	48,85	0,110	46,86	6,55
3	0,68	10	17,8	87,87	125	85,70	0,525	55,09	0,055	80,63	0,057	78,24	0,042	79,71	6,68
4	0,45	15	12,4	91,55	107	87,76	0,371	68,26	0,051	82,04	0,044	83,21	0,035	83,09	6,61
5	0,22	30	7,0	95,23	83	90,50	0,305	73,91	0,032	88,73	0,026	90,08	0,020	90,34	6,60
6	0,11	60	2,2	98,50	74	91,53	0,303	74,08	0,020	92,96	0,023	91,22	0,019	90,82	6,60
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	130,4	11,17	684	21,74	0,955	18,31	0,269	5,28	0,244	6,87	0,190	8,21	6,77
2.1	1,38	5	137,4	6,40	670	23,34	0,889	23,95	0,260	8,45	0,238	9,16	0,184	11,11	6,79
3.1	0,68	10	117,9	19,69	594	32,04	0,764	34,64	0,238	16,20	0,213	18,70	0,170	17,87	6,80
4.1	0,45	15	90,6	38,28	426	51,26	0,594	49,19	0,201	29,23	0,183	30,15	0,154	25,60	6,81
5.1	0,22	30	47,0	67,98	246	71,85	0,461	60,56	0,115	59,51	0,108	58,78	0,077	62,80	6,83
6.1	0,11	60	19,9	86,44	131	85,01	0,338	71,09	0,046	83,80	0,039	85,11	0,028	86,47	6,83

Fonte: elaboração própria.

Tabela H 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 172,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			135,1		724		1,093		0,303		0,283		0,211		7,49
1	2,8	2,5	146,9	0,00	716	1,10	0,704	35,59	0,309	0,00	0,289	0,00	0,228	0,00	6,71
2	1,38	5	73,9	45,30	326	54,97	0,591	45,93	0,149	50,83	0,136	51,94	0,107	49,29	6,61
3	0,68	10	28,8	78,68	159	78,04	0,433	60,38	0,056	81,52	0,049	82,69	0,040	81,04	6,65
4	0,45	15	15,8	88,30	105	85,50	0,331	69,72	0,036	88,12	0,030	89,40	0,021	90,05	6,61
5	0,22	30	9,2	93,19	83	88,54	0,281	74,29	0,025	91,75	0,019	93,29	0,012	94,31	6,65
6	0,11	60	3,0	97,78	65	91,02	0,223	79,60	0,020	93,40	0,013	95,41	0,010	95,26	6,58
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	135,6	0,00	718	0,83	1,394	0,00	0,314	0,00	0,281	0,71	0,220	0,00	6,87
2.1	1,38	5	136,8	0,00	712	1,66	1,092	0,09	0,309	0,00	0,290	0,00	0,228	0,00	6,86
3.1	0,68	10	126,4	6,44	644	11,05	0,696	36,32	0,278	8,25	0,251	11,31	0,195	7,58	6,84
4.1	0,45	15	82,9	38,64	456	37,02	0,600	45,11	0,198	34,65	0,168	40,64	0,131	37,91	6,81
5.1	0,22	30	58,2	56,92	264	63,54	0,436	60,11	0,124	59,08	0,107	62,19	0,091	56,87	6,72
6.1	0,11	60	23,7	82,46	144	80,11	0,334	69,44	0,054	82,18	0,047	83,39	0,036	82,94	6,90

Fonte: elaboração própria.

Tabela H 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 345 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			157,8		924		1,226		0,375		0,363		0,268		7,44
1	2,8	2,5	154,3	2,22	826	10,61	0,978	20,23	0,35	6,67	0,335	7,71	0,257	4,10	6,82
2	1,38	5	105,2	33,33	492	46,75	0,872	28,87	0,232	38,13	0,222	38,84	0,174	35,07	6,70
3	0,68	10	33,3	78,90	200	78,35	0,379	69,09	0,079	78,93	0,075	79,34	0,054	79,85	6,71
4	0,45	15	11,2	92,90	91	90,15	0,257	79,04	0,026	93,07	0,026	92,84	0,020	92,54	6,72
5	0,22	30	2,9	98,16	61	93,40	0,200	83,69	0,011	97,07	0,009	97,52	0,006	97,76	6,67
6	0,11	60	1,7	98,92	60	93,51	0,195	84,09	0,011	97,07	0,007	98,07	0,005	98,13	6,65
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	157	0,51	710	23,16	0,938	23,49	0,318	15,20	0,302	16,80	0,233	13,06	6,78
2.1	1,38	5	153,6	2,66	778	15,80	0,917	25,20	0,354	5,60	0,338	6,89	0,257	4,10	6,87
3.1	0,68	10	128,5	18,57	630	31,82	0,869	29,12	0,287	23,47	0,276	23,97	0,220	17,91	6,83
4.1	0,45	15	108,8	31,05	544	41,13	0,595	51,47	0,247	34,13	0,237	34,71	0,183	31,72	6,83
5.1	0,22	30	64,7	59,00	307	66,77	0,507	58,65	0,154	58,93	0,148	59,23	0,117	56,34	6,80
6.1	0,11	60	22,6	85,68	139	84,96	0,382	68,84	0,063	83,20	0,059	83,75	0,049	81,72	6,87

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE I – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E STANSG 10% PARA FBR R1

Tabela I 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 10,2 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			99,5		704		0,955		0,264		0,235		0,201		7,7
1	2,8	2,5	91,6	7,94	658	6,53	0,819	14,24	0,251	4,92	0,221	5,96	0,163	18,91	6,94
2	1,38	5	66,7	32,96	576	18,18	0,561	41,26	0,223	15,53	0,198	15,74	0,145	27,86	6,85
3	0,68	10	20,4	79,50	231	67,19	0,545	42,93	0,082	68,94	0,069	70,64	0,052	74,13	6,87
4	0,45	15	12,2	87,74	175	75,14	0,376	60,63	0,061	76,89	0,044	81,28	0,032	84,08	6,82
5	0,22	30	4,2	95,78	142	79,83	0,281	70,58	0,039	85,23	0,027	88,51	0,018	91,04	6,86
6	0,11	60	0,0	100,00	111	84,23	0,219	77,07	0,026	90,15	0,016	93,19	0,010	95,02	6,94
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	68,1	31,56	632	10,23	0,795	16,75	0,212	19,70	0,199	15,32	0,141	29,85	7,02
2.1	1,38	5	47,6	52,16	432	38,64	0,514	46,18	0,186	29,55	0,163	30,64	0,121	39,80	7,07
3.1	0,68	10	16,2	83,72	200	71,59	0,357	62,62	0,075	71,59	0,059	74,89	0,044	78,11	7,06
4.1	0,45	15	16,0	83,92	168	76,14	0,301	68,48	0,053	79,92	0,041	82,55	0,028	86,07	7,05
5.1	0,22	30	6,0	93,97	139	80,26	0,262	72,57	0,043	83,71	0,029	87,66	0,020	90,05	7,11
6.1	0,11	60	0,0	100,00	111	84,23	0,243	74,55	0,027	89,77	0,016	93,19	0,010	95,02	7,18

Fonte: elaboração própria.

Tabela I 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 25,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			96,0		706		1,064		0,272		0,245		0,176		7,54
1	2,8	2,5	93,8	2,29	654	7,37	0,864	18,80	0,262	3,68	0,243	0,82	0,178	0,00	6,82
2	1,38	5	61,4	36,04	506	28,33	0,772	27,44	0,184	32,35	0,158	35,51	0,117	33,52	6,66
3	0,68	10	29,1	69,69	231	67,28	0,628	40,98	0,084	69,12	0,070	71,43	0,047	73,30	6,67
4	0,45	15	18,6	80,63	187	73,51	0,585	45,02	0,060	77,94	0,047	80,82	0,037	78,98	6,62
5	0,22	30	8,0	91,67	136	80,74	0,333	68,70	0,038	86,03	0,027	88,98	0,018	89,77	6,63
6	0,11	60	2,0	97,92	112	84,14	0,250	76,50	0,027	90,07	0,021	91,43	0,015	91,48	6,74
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	72,9	24,06	634	10,20	0,815	23,40	0,227	16,54	0,203	17,14	0,148	15,91	6,90
2.1	1,38	5	37,9	60,52	344	51,27	0,680	36,09	0,125	54,04	0,109	55,51	0,080	54,55	7,05
3.1	0,68	10	14,5	84,90	154	78,19	0,533	49,91	0,052	80,88	0,044	82,04	0,033	81,25	7,14
4.1	0,45	15	8,7	90,94	134	81,02	0,396	62,78	0,037	86,40	0,029	88,16	0,023	86,93	7,03
5.1	0,22	30	6,1	93,65	118	83,29	0,334	68,61	0,033	87,87	0,024	90,20	0,016	90,91	7,06
6.1	0,11	60	1,1	98,85	93	86,83	0,283	73,40	0,017	93,75	0,014	94,29	0,006	96,59	7,06

Fonte: elaboração própria.

Tabela I 3 - - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 51 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			113,1		858		1,425		0,256		0,249		0,192		7,68
1	2,8	2,5	101,0	10,70	642	25,17	1,076	24,49	0,225	12,11	0,199	20,08	0,120	37,50	6,77
2	1,38	5	90,4	20,07	650	24,24	0,837	41,26	0,212	17,19	0,190	23,69	0,123	35,94	6,83
3	0,68	10	27,4	75,77	226	73,66	0,382	73,19	0,179	30,08	0,134	46,18	0,097	49,48	6,79
4	0,45	15	16,3	85,59	156	81,82	0,299	79,02	0,028	89,06	0,011	95,58	0,000	100,00	6,75
5	0,22	30	7,4	93,46	99	88,46	0,273	80,84	0,022	91,41	0,000	100,00	0,000	100,00	6,91
6	0,11	60	3,9	96,55	74	91,38	0,144	89,89	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,84
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	86,2	23,78	524	38,93	0,908	36,28	0,522	0,00	0,509	0,00	0,454	0,00	7,07
2.1	1,38	5	63,2	44,12	452	47,32	0,821	42,39	0,339	0,00	0,398	0,00	0,414	0,00	7,09
3.1	0,68	10	15,7	86,12	127	85,20	0,416	70,81	0,095	62,89	0,086	65,46	0,070	63,54	7,09
4.1	0,45	15	15,1	86,65	89	89,63	0,101	92,91	0,039	84,77	0,040	83,94	0,030	84,38	7,09
5.1	0,22	30	4,0	96,46	66	92,31	0,048	96,63	0,020	92,19	0,020	91,97	0,025	86,98	7,02
6.1	0,11	60	2,6	97,70	58	93,24	0,033	97,68	0,011	95,70	0,011	95,58	0,009	95,31	6,99

Fonte: elaboração própria.

APÊNDICE J – EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DAS MICROALGAS (%) PARA OS ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO E REFLOCULAÇÃO DOS FLOCOS COM O COMBINAÇÃO DE SSA 5% E STANSG 10% PARA FBR R2

Tabela J 1 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 10 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			155,4		726		0,927		0,270		0,269		0,196		7,44
1	2,8	2,5	137,7	11,39	722	0,55	0,732	21,04	0,227	15,93	0,244	9,29	0,186	5,10	6,68
2	1,38	5	97,3	37,39	526	27,55	0,656	29,23	0,132	51,11	0,133	50,56	0,090	54,08	6,69
3	0,68	10	46,9	69,82	201	72,31	0,402	56,63	0,085	68,52	0,077	71,38	0,057	70,92	6,64
4	0,45	15	30,2	80,57	158	78,24	0,327	64,72	0,061	77,41	0,052	80,67	0,034	82,65	6,61
5	0,22	30	14,8	90,48	110	84,85	0,284	69,36	0,029	89,26	0,023	91,45	0,016	91,84	6,62
6	0,11	60	5,1	96,72	73	89,94	0,226	75,62	0,006	97,78	0,004	98,51	0,000	100,00	6,69
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	113,9	26,71	536	26,17	0,720	22,33	0,172	36,30	0,155	42,38	0,120	38,78	7,04
2.1	1,38	5	87,7	43,56	458	36,91	0,560	39,59	0,148	45,19	0,134	50,19	0,105	46,43	7,02
3.1	0,68	10	24,8	84,04	132	81,82	0,379	59,12	0,047	82,59	0,040	85,13	0,031	84,18	6,99
4.1	0,45	15	15,6	89,96	112	84,57	0,220	76,27	0,034	87,41	0,033	87,73	0,020	89,80	7,00
5.1	0,22	30	6,6	95,75	84	88,43	0,191	79,40	0,014	94,81	0,012	95,54	0,005	97,45	6,99
6.1	0,11	60	2,5	98,39	73	89,94	0,126	86,41	0,010	96,30	0,007	97,40	0,003	98,47	7,02

Fonte: elaboração própria.

Tabela J 2 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 27 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			138,0		752		1,028		0,307		0,295		0,227		7,50
1	2,8	2,5	151,5	0,00	742	1,33	0,745	27,53	0,310	0,00	0,291	1,36	0,229	0,00	6,79
2	1,38	5	87,4	36,67	542	27,93	0,689	32,98	0,197	35,83	0,17	42,37	0,135	40,53	6,67
3	0,68	10	27,5	80,07	141	81,25	0,473	53,99	0,087	71,66	0,071	75,93	0,056	75,33	6,69
4	0,45	15	16,5	88,04	114	84,84	0,395	61,58	0,086	71,99	0,066	77,63	0,052	77,09	6,61
5	0,22	30	11,6	91,59	90	88,03	0,33	67,90	0,082	73,29	0,057	80,68	0,043	81,06	6,61
6	0,11	60	7,1	94,86	72	90,43	0,295	71,30	0,067	78,18	0,046	84,41	0,039	82,82	6,61
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	125,8	8,84	628	16,49	0,74	28,02	0,294	4,23	0,263	10,85	0,201	11,45	6,92
2.1	1,38	5	45,6	66,96	302	59,84	0,403	60,80	0,140	54,40	0,116	60,68	0,093	59,03	6,95
3.1	0,68	10	22,4	83,77	116	84,57	0,402	60,89	0,098	68,08	0,073	75,25	0,062	72,69	6,89
4.1	0,45	15	10,6	92,32	88	88,30	0,275	73,25	0,076	75,24	0,056	81,02	0,044	80,62	6,97
5.1	0,22	30	7,5	94,57	75	90,03	0,249	75,78	0,075	75,57	0,053	82,03	0,041	81,94	6,89
6.1	0,11	60	4,4	96,81	56	92,55	0,242	76,46	0,063	79,48	0,041	86,10	0,034	85,02	6,90

Fonte: elaboração própria.

Tabela J 3 - Eficiência de separação das microalgas (%) com dosagem adicional de 54,5 mg.L⁻¹ de coagulante na refloculação

Floculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
Efluente			174,0		802		1,304		0,276		0,293		0,191		7,44
1	2,8	2,5	154,2	11,38	754	5,99	1,025	21,40	0,270	2,17	0,280	4,44	0,184	3,66	6,72
2	1,38	5	99,2	42,99	436	45,64	0,788	39,57	0,134	51,45	0,135	53,92	0,086	54,97	6,62
3	0,68	10	22,4	87,13	120	85,04	0,487	62,65	0,027	90,22	0,030	89,76	0,018	90,58	6,63
4	0,45	15	11,8	93,22	91	88,65	0,45	65,49	0,010	96,38	0,011	96,25	0,006	96,86	6,57
5	0,22	30	6,5	96,26	70	91,27	0,429	67,10	0,002	99,28	0,003	98,98	0,000	100,00	6,62
6	0,11	60	2,0	98,85	60	92,52	0,500	61,66	0,000	100,00	0,000	100,00	0,000	100,00	6,60
Refloculação															
Ensaio	Velocidade (cm.min ⁻¹)	Tempo (min)	Turbidez (NTU)	Efic._Turbidez (%)	Cor (Pt)	Efic._Cor (%)	DO_254 nm	Efic._DO 254 nm (%)	DO_540 nm	Efic._DO 540 nm (%)	DO_680 nm	Efic._DO 680 nm (%)	DO_750 nm	Efic._DO 750 nm (%)	pH
1.1	2,8	2,5	148,7	14,54	602	24,94	1,004	23,01	0,211	23,55	0,217	25,94	0,149	21,99	6,86
2.1	1,38	5	58,9	66,15	262	67,33	0,757	41,95	0,079	71,38	0,078	73,38	0,056	70,68	6,84
3.1	0,68	10	25,7	85,23	95	88,15	0,551	57,75	0,023	91,67	0,025	91,47	0,014	92,67	6,80
4.1	0,45	15	12,3	92,93	60	92,52	0,531	59,28	0,005	98,19	0,007	97,61	0,001	99,48	6,86
5.1	0,22	30	2,4	98,62	52	93,52	0,478	63,34	0,005	98,19	0,000	100,00	0,000	100,00	6,69
6.1	0,11	60	0,5	99,71	39	95,14	0,456	65,03	0,016	94,20	0,000	100,00	0,000	100,00	6,80

Fonte: elaboração própria.