



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – UFG
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – EECA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
- PPGEAS

JORDANA FERNANDES COSTA

**Efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplástico
envelhecido por luz ultravioleta (UV)**

GOIÂNIA

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Jordana Fernandes Costa

3. Título do trabalho

Efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplástico envelhecido por luz ultravioleta (UV)

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Javier Cuba Teran, Professor do Magistério Superior**, em 04/11/2024, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jordana Fernandes Costa, Discente**, em 06/11/2024, às 06:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4935818** e o código CRC **23EA01B6**.

Referência: Processo nº 23070.055863/2024-71

SEI nº 4935818

Jordana Fernandes Costa

Efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplástico envelhecido por luz ultravioleta (UV)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Ambiental e Sanitária (PPGEAS), da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), da Universidade Federal de Goiás (UFG) como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário

Orientador: Prof. Dr Francisco Javier Cuba Terán

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Costa, Jordana Fernandes

Efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplástico
envelhecido por luz ultravioleta (UV) [manuscrito] / Jordana
Fernandes Costa. - 2025.

LI, 51 f.: il.

Orientador: Prof. Francisco Javier Cuba Terán.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. microplástico. 2. surfactante. 3. coagulação química. I. Terán,
Francisco Javier Cuba, orient. II. Título.

CDU 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **03/2024** da sessão de Defesa de Dissertação de **Jordana Fernandes Costa**, que confere o título de Mestre(a) em **Engenharia Ambiental e Sanitária**, na área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Ao/s **quatro dias do mês de novembro de dois mil e vinte e quatro**, a partir da(s) **15 horas**, por meio de **videoconferência pelo link: <https://meet.google.com/nva-bnmt-cxg>**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "**Efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplástico envelhecido por luz ultravioleta (UV)**". Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Francisco Javier Cuba Teran (EECA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Humberto Carlos Ruggeri Júnior (EECA/UFG)**, membro titular interno, e Professor(a) Doutor(a) **Thiago Augusto Mendes (IFG)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) aprovada pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Francisco Javier Cuba Teran**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **quatro dias do mês de novembro de dois mil e vinte e quatro**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Javier Cuba Teran, Professor do Magistério Superior**, em 19/11/2024, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Humberto Carlos Ruggeri Junior, Professor do Magistério Superior**, em 19/11/2024, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **THIAGO AUGUSTO MENDES, Usuário Externo**, em 20/11/2024, às 18:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jordana Fernandes Costa, Discente**, em 25/03/2025, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4977850** e o código CRC **81C78676**.

Referência: Processo nº 23070.055863/2024-71

SEI nº 4977850

RESUMO

COSTA, J. F. **Efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplástico envelhecido por luz ultravioleta (UV)**. 51 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária – Escola de Engenharia Civil e Ambiental - EECA. Universidade Federal de Goiás - UFG, 2024.

O microplástico é um polímero presente em diversos materiais utilizados no cotidiano, como cosméticos e produtos de limpeza. Devido ao seu descarte inadequado, ele é encontrado em grande quantidade em águas naturais e residuárias. Já os surfactantes são utilizados principalmente para fabricação de detergentes, sendo considerado um dos principais poluentes encontrados no esgoto. Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa é identificar como os surfactantes LAS e Tween-20 influenciam na remoção por coagulação química dos microplásticos envelhecidos por oxidação por luz UV. A remoção com o surfactante Tween-20 apresentou eficiência superior a 90%. Já a remoção com o LAS apresentou remoção de 56,15% para a concentração de 140 mg L⁻¹ de surfactante, devido ao seu caráter aniônico e o sistema entrar em repulsão eletrostática. A estrutura do microplástico foi caracterizada apresentando alterações após a oxidação e a coagulação química com os surfactantes, através da redução da transmitância nas ondas apresentadas no FTIR, instabilidade na suspensão coloidal apresentada pelo PZ, redução da dimensão das partículas coloidais e aumento das partículas agregadas sedimentadas com maiores irregularidades e microporos.

Palavras-chave: microplástico, surfactante, coagulação química.

ABSTRACT

COSTA, J. F. **Effects of surfactants on the chemical coagulation of aged microplastics by ultraviolet (UV)**. 51 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária – Escola de Engenharia Civil e Ambiental - EECA. Universidade Federal de Goiás - UFG, 2024.

Microplastic is a polymer present in various materials used in everyday life, such as cosmetics and cleaning products. Due to its inadequate disposal, it is found in large quantities in natural and wastewater. Surfactants are mainly used to manufacture detergents and are considered one of the main pollutants found in sewage. Therefore, the main objective of this research is to identify how the surfactants LAS and Tween-20 influence the removal by chemical coagulation of aged microplastics by oxidation using UV light. Removal with the surfactant Tween-20 showed efficiency greater than 90%. The removal with LAS showed a removal of 56.15% for a concentration of 140 mg L⁻¹ of surfactant, due to its anionic character and the system entering into electrostatic repulsion. The structure of the microplastic was characterized by presenting changes after oxidation and chemical coagulation with surfactants, through the reduction of transmittance in the waves presented in the FTIR, instability in the colloidal suspension presented by the PZ, reduction in the size of the colloidal particles and an increase in the aggregated particles sedimented, with greater irregularities and micropores.

Keywords: microplastic, surfactant, chemical coagulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Macromoléculas - polímeros. | 13 |
| Figura 2 - Cadeia produtiva da indústria do plástico..... | 15 |
| Figura 3 - Molécula de surfactante: partes polares e apolares..... | 19 |
| Figura 4 - Surfactante aniônico - Alquilbenzeno Linear Sulfonato (LAS). | 19 |
| Figura 5 - Surfactante não iônico – Tween-20. | 20 |
| Figura 6 - Representação esquemática do teste de coagulação em laboratório – Jar Test. | 24 |
| Figura 7 - Representação esquemática dos ensaios de coagulação com os surfactantes..... | 25 |
| Figura 8 – Ensaio de coagulação dos microplásticos envelhecidos com o LAS, com as concentrações variando de 20 a 300 mg.L ⁻¹ | 26 |
| Figura 9 – Microplástico pristino e após envelhecimento com luz UV. | 29 |
| Figura 10 - Eficiência de remoção para microplástico pristino e envelhecido variando as concentrações de coagulante Al ₂ SO ₄ 3 com pH 5..... | 30 |
| Figura 11 - Eficiência de remoção para microplástico pristino e envelhecido variando o pH com o coagulante Al ₂ SO ₄ 3 com 4,25 mg/L. | 30 |
| Figura 12 - Efeito dos surfactantes na turbidez inicial. | 31 |
| Figura 13 - Efeito dos surfactantes na remoção de microplásticos envelhecidos. | 32 |
| Figura 14 - Representação esquemática do efeito do LAS na coagulação de microplásticos.. | 33 |
| Figura 15 - Representação esquemática do efeito do Tween-20 na coagulação de microplásticos. | 34 |
| Figura 16 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier do microplástico. | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 17 - PZ do microplástico. | 36 |
| Figura 18 - Granulometria das amostras com os surfactantes com concentrações de 20 mg L ⁻¹ e 300 mg L ⁻¹ antes da coagulação química..... | 37 |
| Figura 19 - Granulometria das amostras com os surfactantes com concentrações de 20 mg L ⁻¹ e 300 mg L ⁻¹ após da coagulação química. | 37 |
| Figura 20 - Microscopia eletrônica de varredura dos microplásticos pristino – (a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 70 vezes; (c): aumento de 500 vezes; (d): aumento de 1.500 vezes. | 39 |
| Figura 21 - Microscopia eletrônica de varredura dos microplásticos envelhecidos por luz UV – (a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 110 vezes; (c): aumento de 500 vezes; (d): aumento de 1.500 vezes. | 40 |
| Figura 22 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras de microplásticos envelhecidos e surfactante LAS após a coagulação química – (a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 70 vezes; (c): aumento de 80 vezes; (d): aumento de 85 vezes..... | 41 |
| Figura 23 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras de microplásticos envelhecidos e surfactante Tween-20 após a coagulação química – (a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 60 vezes; (c): aumento de 60 vezes; (d): aumento de 60 vezes. | 42 |
| Figura 24 - EDS para os microplásticos - (a): microplástico pristino, (b): microplástico envelhecido, (c): microplástico envelhecido e LAS após a coagulação e, (d): microplástico envelhecido e Tween-20 após a coagulação..... | 43 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| °C | Graus Celsius |
| C | Carbono |
| CAM | Central de Análises de Multiusuários |
| cm | Centímetros |
| CRTI | Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação |
| DQO | Demanda química de Oxigênio |
| EDS | Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X |
| EECA | Escola de Engenharia Civil e Ambiental |
| EUA | Estados Unidos da América |
| ETE | Estação de Tratamento de Esgoto |
| FTIR | Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier |
| H | Hidrogênio |
| kV | Quilovolts |
| L | Litro |
| LAB | Alquilbenzeno Linear |
| LAS | Alquilbenzeno Linear Sulfonato |
| mg | Miligrama |
| mL | Mililitro |
| mm | Milímetro |
| mV | Milivolts |
| µm | Micrometro |
| MEV | Microscopia eletrônica de varredura |
| NTU | Unidade Nefelométrica de Turbidez |
| NAFTA | Estados Unidos da América, Canadá e México |
| O | Oxigênio |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PE | Polietileno |
| PEAD | Polietileno de alta densidade |
| PEBD | Polietileno de baixa densidade |
| PEG | Polietilenoglicol |

| | |
|-----|-------------------------------|
| PET | Polietileno tereftalato |
| pH | Potencial hidrogeniônico |
| PP | Polipropileno |
| PS | Poliestireno |
| PVC | Policloreto de vinila |
| PZ | Potencial zeta |
| rpm | Rotações por minuto |
| UFG | Universidade Federal de Goiás |
| UV | Ultravioleta |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 | Objetivos Específicos..... | 12 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 13 |
| 3.1 | Polímeros | 13 |
| 3.2 | Microplásticos..... | 15 |
| 3.3 | Surfactantes | 18 |
| 3.4 | Processo de Tratamento: Coagulação e floculação | 21 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 23 |
| 4.1 | Obtenção e envelhecimento dos microplásticos..... | 23 |
| 4.2 | Coagulação Química | 23 |
| 4.3 | Caracterização dos microplásticos..... | 26 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 29 |
| 5.1 | Obtenção e envelhecimento dos microplásticos..... | 29 |
| 5.2 | Coagulação Química | 29 |
| 5.3 | Efeitos dos surfactantes na coagulação química..... | 31 |
| 5.4 | Caracterização do microplástico..... | 34 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 44 |

1 INTRODUÇÃO

A crescente presença de microplásticos no ambiente tem gerado preocupações significativas devido aos potenciais impactos na saúde humana e no meio ambiente. Os microplásticos são partículas plásticas menores que 5 mm, que podem ser geradas diretamente ou formadas a partir da fragmentação de plásticos maiores (BROWNE et al., 2011). Esses poluentes foram encontrados em diferentes ecossistemas e, mais recentemente, dentro do corpo humano, sendo detectados até em placentas humanas (RAGUSA Et al., 2021), o que levanta importantes questionamentos sobre suas consequências para a saúde.

A principal rota de entrada dos microplásticos no corpo humano ocorre pela ingestão de alimentos e bebidas contaminados, como água engarrafada, frutos do mar e peixes (Emenike et al., 2023). Essas partículas, ao serem ingeridas, podem causar doenças gastrointestinais, desregulação endócrina e até mesmo toxicidade, dependendo da natureza química dos plásticos e dos poluentes associados que os microplásticos podem transportar (Cao et al., 2021). Além disso, existem outras vias de exposição importantes, como a inalação em ambientes fechados e áreas urbanas com ventilação inadequada, onde as concentrações de microplásticos no ar são mais elevadas (EMENIKE et al., 2023) e o contato com a pele, embora menos estudado, pode causar reações cutâneas como inflamações e alergias, especialmente em indivíduos com predisposições a problemas dérmicos (LIU et al., 2023).

Outro problema alarmante é a capacidade dos microplásticos de transportar contaminantes, como metais pesados, que podem se acumular nos tecidos humanos (CAO et al., 2021). Isso agrava os efeitos dos microplásticos, já que eles podem agir como vetores de substâncias tóxicas. Estudos indicam que a presença desses materiais em estações de tratamento de esgoto (ETEs) é persistente, pois os processos de tratamento convencionais, como coagulação e floculação, são ineficientes para a remoção total dessas partículas (PRAMANIK et al., 2021). Embora algumas ETEs consigam remover até 90% dos microplásticos presentes na água, muitas partículas ainda acabam retornando aos corpos hídricos ou permanecendo em águas potáveis (BAYARKHUU et al., 2022).

Os efeitos ambientais dos microplásticos também são preocupantes. O descarte inadequado de resíduos plásticos, agravado pelo aumento do uso de produtos plásticos durante a pandemia da

COVID-19, como máscaras e luvas descartáveis, resultou em um aumento sem precedentes de microplásticos no ambiente. Estudos já indicam que esses materiais estão poluindo ecossistemas aquáticos e afetando a vida marinha (JIANG et al., 2023). Além disso, a degradação de microplásticos no ambiente, acelerada pela luz UV e por processos de oxidação, leva à liberação de compostos orgânicos, aumentando ainda mais os riscos ambientais (LIU et al., 2023).

Embora os microplásticos já sejam amplamente estudados, existem lacunas significativas no conhecimento sobre os impactos a longo prazo na saúde humana e nos ecossistemas. A remoção eficiente dos microplásticos em ETEs e outras formas de mitigação ainda carecem de maior desenvolvimento e implementação, especialmente em países com infraestrutura inadequada.

O presente estudo pretende contribuir para a literatura científica ao investigar as formas de remoção de microplásticos, focando nos impactos de surfactantes no processo de coagulação, e como esses poluentes afetam a eficiência dos tratamentos de água residuárias. Ao abordar as lacunas existentes sobre a eficiência desses tratamentos, espera-se que este estudo possa oferecer ideias para melhorar a remoção de microplásticos, contribuindo para a mitigação desse poluente emergente.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é analisar a interferência dos surfactantes na coagulação química de microplásticos envelhecidos após o processo de oxidação por luz ultravioleta (UV).

2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Avaliação dos principais parâmetros para a coagulação química do microplástico após o envelhecimento por luz UV;
- b) Análise dos efeitos dos surfactantes LAS (Alquilbenzeno Linear Sulfonato) e Tween-20 na coagulação química de microplástico após o envelhecimento por luz UV;
- c) Caracterização do microplástico pristino, envelhecido por luz UV e após a coagulação química com os surfactantes.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

No terceiro capítulo, que trata do referencial teórico, o objetivo é apresentar os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa sobre os efeitos dos surfactantes na coagulação química de microplásticos envelhecidos por luz UV. Este capítulo irá explorar os conceitos essenciais sobre polímeros, microplásticos, surfactantes e os processos de coagulação e floculação. Esses conceitos fornecem o alicerce para compreender como os microplásticos e os surfactantes interagem e quais são as implicações desses processos na remoção dessas partículas de sistemas aquáticos.

Ao longo dos subitens, será discutida a estrutura química dos polímeros e microplásticos, suas características e impactos ambientais, bem como as propriedades e classificações dos surfactantes. Em seguida, o capítulo abordará o processo de tratamento de águas por coagulação e floculação, explicando o funcionamento desses métodos e sua aplicabilidade na remoção de partículas de microplásticos em diferentes cenários, especialmente na presença de surfactantes.

Esta base teórica será essencial para a análise dos resultados experimentais apresentados nos capítulos subsequentes, permitindo uma discussão crítica sobre a eficiência dos processos de coagulação em diferentes condições.

3.1 Polímeros

Os polímeros são macromoléculas, que são unidas por ligações covalentes que se repetem ao longo da cadeia (SPINANCÉ, 2004). Segundo Mano et al (1999), a maior parte dos polímeros industriais no Brasil são destinados ao mercado de plástico, sendo possível que os materiais se fundem por aquecimento e solidifiquem por resfriamento, em um processo reversível, conforme a Figura 1.

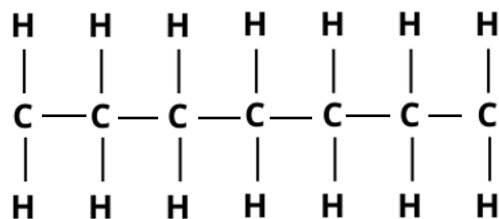


Figura 1 - Macromoléculas - polímeros.

Fonte: Autor, 2024.

Eles são classificados como termoplásticos (plásticos) ou termorrígidos (borrachas e fibras). E podem ser caracterizados de acordo com seu tamanho, estrutura química, interações intramoleculares e intermoleculares e origem (naturais e sintéticos). Os termoplásticos podem ser classificados de acordo com a dimensão de suas partículas:

- Macrolásticos: ≥ 5 mm,
- Microplásticos: < 5 mm, e
- Nanoplásticos: $< 0,1$ μm .

A produção de polímeros foi impulsionada durante a Segunda Guerra Mundial, em que o termoplástico polietileno (PE) foi utilizado por ter propriedades isolantes e de fácil processabilidade, e a poliamida para a indústria têxtil, devido à dificuldade ao mercado de sedas (OLIVATTO et al., 2018 e RABELLO et al., 2013). A partir disso, os polímeros sintéticos foram desenvolvidos e em função de diversas características vantajosas, como alta durabilidade, leveza, transparência, maleabilidade, impermeabilidade e baixo custo, eles tornaram-se presentes em todos os setores da sociedade moderna atual (MANO et al., 1999).

A nafta é a principal matéria prima para a produção dos plásticos. Ela é um dos materiais derivados do processo de refino do petróleo bruto, uma mistura complexa de diversos hidrocarbonetos com diferentes temperaturas de ebulição (OLIVATTO et al., 2018).

A indústria de primeira geração é responsável pelo refino da nafta, que dá origem aos principais monômeros utilizados para a produção do plástico. Já a indústria de segunda geração produz as resinas poliméricas ou ‘pellets’. E a indústria de terceira geração, conhecida como Transformados de Plásticos, é responsável pela moldagem e confecção dos utensílios de plásticos. Essa última fase geralmente recebe a contribuição de aditivos químicos, para aprimorar características como forma, textura, cor e resistência, conforme Figura 2 (PEREIRA, 2014).



Figura 2 - Cadeia produtiva da indústria do plástico.
Fonte: Adaptado Olivatto (2018).

De acordo com Andrady (2017), estima-se que a produção anual de resinas termoplásticas seja superior a 300 milhões de toneladas, em que 26% são produzidos pela China, 20% pela Europa e 19% pelo bloco econômico NAFTA (Estados Unidos da América - EUA, Canadá e México). Já o Brasil produz cerca de 2,4%, principalmente as resinas dos polímeros PE, PP (Polipropileno), PVC (Policloreto de vinila), PET (Polietileno tereftalato) e materiais para construção civil (OLIVATTO et al., 2018).

Sendo que os materiais com maiores destaque no consumo mundial são o PEAD (Polietileno de alta densidade), PEBD (Polietileno de Baixa Densidade), PP, PVC, PET e PS (Poliestireno). (OLIVATTO et al., 2018).

A indústria tem estudado o uso do plástico verde, produzido a partir da cana de açúcar. Ele possui características físicas semelhantes ao plástico comum, porém apesar de ser produzido de uma fonte renovável e ser considerado 100% reciclável, ele não é biodegradável, causando impactos ambientais semelhantes ao plástico comum. Já os plásticos 100% biodegradáveis representam cerca de 1% da produção total de plásticos sintéticos, devido ao alto custo quando comparado com o plástico comum (CARPENTER et al., 1972).

3.2 Microplásticos

Os microplásticos são pequenas partículas termoplásticas, variando de 0,1 μm a 5 mm. Eles podem ser caracterizados por dois tipos: primário e secundário. O primário é produzido na dimensão de microplástico, e é utilizado principalmente para abrasivos industriais em jato de areia e microesferas para cosméticos (ONU, 2019). O secundário é formado pela fragmentação de macrolásticos, que são grandes pedaços de plástico usados em diversos produtos do dia a

dia, como garrafas, sacolas e embalagens. Além disso, os microplásticos podem ser desenvolvidos a partir de ‘pellets’ plásticos, microesferas presentes em cosméticos e produtos de limpeza, ou ainda de fibras sintéticas liberadas durante a lavagem de roupas, entre outros (YIN et al., 2019).

A grande utilização desse material tornou-se preocupante devido a geração de resíduos e seu descarte inadequado. No início da década de 1970, foram encontrados os primeiros pequenos detritos de plástico no oceano (CARPENTER et al., 1972) e com isso, muitas pesquisas foram desenvolvidas para verificar a influência desse material no meio ambiente. De acordo com Browne et al., (2011), os microplásticos são encontrados nas linhas costeiras dos seis continentes em uma quantidade maior em áreas mais adensadas.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2019), os microplásticos foram encontrados em águas marinhas e águas residuárias, sendo que as partículas menores são mais encontradas, derivadas de fragmentos e fibras, e que os tipos mais encontrados são PET e PP.

A pandemia causada pelo COVID-19 também contribuiu com o aumento da poluição por microplásticos, devido ao aumento significativo da utilização de máscaras e luvas descartáveis (EMENIKE et al., 2023). Uma forma possível para controlar esse aumento seria o uso de máscaras reutilizáveis e/ou biodegradáveis. Mas os efeitos da grande utilização desses itens e do descarte inadequado serão vistos no futuro com uma poluição prejudicial ao ecossistema e ao ser humano (JIANG et al., 2023).

A ONU (2019) também indica que 90% dessas partículas são removidas em ETEs e que esse resultado pode ser mais eficiente combinado com tratamentos terciários, como filtração. Porém, é importante considerar que o tratamento de água potável e águas residuárias não é possível e otimizado em muitos países.

De acordo com Pramanik et al (2021), são necessários processos mais complexos para a remoção de mais de 90% dessas partículas, como a ultrafiltração e microfiltração. Já Elkhatib et al (2021) indica que com a eletrocoagulação é possível remover cerca de 96,5% em amostras de águas residuárias. Bayarkhuu et al (2022) e Zhang et al (2020) indicam a coagulação, a sedimentação e a filtração por membranas como forma eficiente de remover essas partículas.

Além disso, os microplásticos encontrados em águas residuárias passaram por processos de fragmentação e deformação causados por irradiação solar, ventos, chuvas e outros fatores

causados pelo meio ambiente. Conforme descrito por Liu et al. (2023), o envelhecimento dos microplásticos por oxidação induzida pela luz UV imita os efeitos do envelhecimento natural, uma vez que ambos os processos promovem a degradação das cadeias poliméricas. Esse envelhecimento resulta em uma maior vulnerabilidade à cloração, processo em que os microplásticos oxidativamente alterados liberam substâncias orgânicas em quantidades significativamente maiores que as liberadas pelos microplásticos prístinos, ou seja, aqueles que ainda não passaram por processos de alteração. A liberação de mais do que o dobro dessas substâncias pode ter implicações ambientais graves, contribuindo para a contaminação dos ecossistemas aquáticos e afetando diretamente a fauna marinha, que pode absorver ou ingerir esses poluentes. Além disso, a degradação acelerada dos microplásticos sugere que eles podem sofrer transformações químicas mais intensas, resultando em novos compostos que podem ser tóxicos ou persistir no ambiente por períodos prolongados, aumentando os riscos de bioacumulação.

As resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) não estabelecem controle específico para partículas de plásticos, como os microplásticos, que hoje são amplamente reconhecidos como uma importante ameaça à vida marinha e à saúde humana. No cenário global, diversos países e organizações internacionais já implementam regulamentos mais rigorosos para controlar a presença desses materiais, dada a crescente preocupação com o impacto ambiental e a bioacumulação nos ecossistemas. Em contraste, a legislação brasileira restringe apenas a presença de flutuantes, deixando uma lacuna em relação às partículas menores que, apesar de quase invisíveis a olho nu, possuem efeitos devastadores. Isso evidencia a necessidade de harmonizar as políticas nacionais com as melhores práticas globais, para que o Brasil também contribua para mitigar essa crise ambiental.

Em 2019, a ONU concluiu que há poucos estudos dos impactos da ingestão desses detritos na saúde humana e que não há como confirmar o risco de toxicidade.

Os microplásticos podem entrar em contato com o corpo humano por ingestão de alimentos, inalação pelas vias aéreas e pela pele. Além disso, as partículas podem transportar metais pesados e outros poluentes através de interações em meios aquosos e sólidos, sendo necessário determinar os efeitos no organismo humano (CAO et al., 2021).

A ingestão de microplástico se dá por diversos alimentos, principalmente por água em garrafas plásticas, frutos do mar e peixes, e pode causar doenças gastrointestinais, desregulação

endócrina e toxicidade (EMENIKE et al., 2023). De acordo com Sharma et al (2024), as atividades de avicultura envolvendo materiais plásticos contribuem para a dispersão desse material, e assim a ingestão de produtos avícolas se torna uma grande preocupação, devido à dificuldade dos estudos de transferência dos microplásticos para os organismos.

Conforme apresentado por Liu et al (2024), quatro tipos de microplásticos foram encontrados em artérias no corpo humano, com o PET em maior quantidade (cerca de 74%). Já conforme Ragusa et al (2021), partículas de microplásticos foram encontradas em placentas humana trazendo grande debate sobre as possíveis consequências para o feto e para a gravidez.

Ambientes fechados, sem ventilação natural, apresentam maior concentração de microplásticos no ar e essa inalação pode causar doenças respiratórias e cardíacas. Já os microplásticos em contato com a pele podem causar irritações, alergias e inflamações dérmicas (EMENIKE et al., 2023). Um estudo realizado por Fadare e colaboradores (2021) com os países da África indicou que a África do Sul é o país com maior concentração de microplásticos em sais.

Com isso, torna-se cada vez mais necessário o estudo de técnicas eficientes para remoção desse material nos efluentes.

3.3 Surfactantes

Os surfactantes são moléculas anfipáticas constituídas de uma porção hidrofóbica e uma porção hidrofílica (NITSCHKE et al., 2002). Eles podem ser classificados de acordo com a cadeia polar, em: iônico (aniônico ou catiônico), não-iônico ou anfotérico.

Podem ser encontrados em duas formas: unímeros (monômeros) ou micelas. Os tensoativos livres em meio aquoso são denominados unímeros, já quando presentes em maiores concentrações (50 ou mais unímeros), as partes hidrofóbicas se agregam no processo de micelização, tornando-se uma estrutura mais estável que os unímeros (MANIASSO, 2001; RIZZATI et al., 2009).

As micelas podem ser normais ou reversas. As normais são formadas em meio aquoso, em que a parte hidrofílica é apontada para fora. Já as micelas reversas são formadas em meio oleoso, e a parte hidrofílica é apontada para dentro, e a parte hidrofóbica para fora, como apresenta a Figura 3.

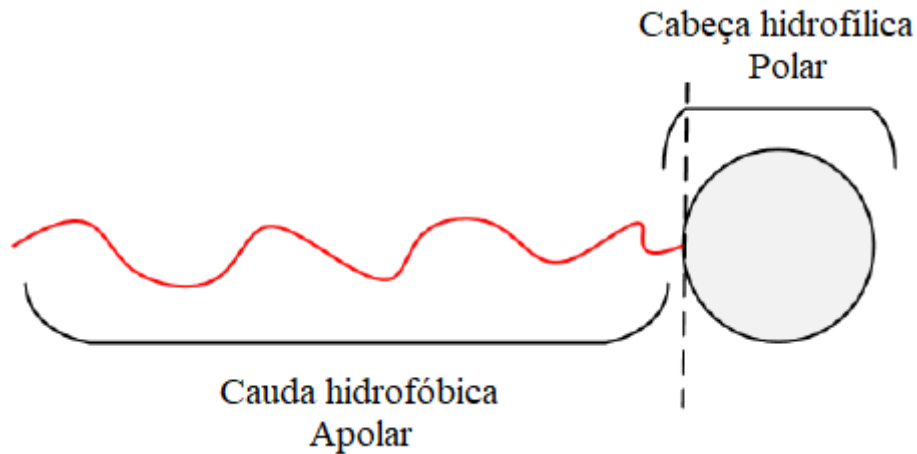


Figura 3 - Molécula de surfactante: partes polares e apolares.
Fonte: Adaptado de Cartes e Pereira (2016).

Um exemplo de surfactante aniônico é o LAS (Linear Alkylbenzene Sulfonate), que é empregado na fabricação de detergentes industriais, sendo produzido a partir da sulfonação do Alquilbenzeno Linear (LAB), conforme Figura 4 (GARDINGO, 2010).

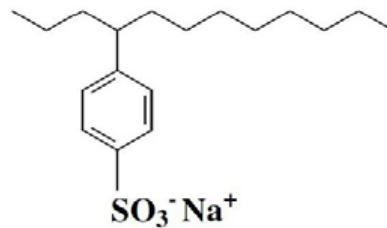


Figura 4 - Surfactante aniônico - Alquilbenzeno Linear Sulfonato (LAS).
Fonte: Adaptado Róz e contribuintes, 2012.

Segundo Melo (2018), a presença de LAS em águas naturais altera a capacidade de autodepuração, devido a formação de espumas. E já para Penteado e contribuintes (2006), o aumento da dureza da água e do comprimento da cadeia alquílica resultam em maior adsorção de LAS no lodo produzido em estações de tratamento de água residual, que influencia no destino, na biodisponibilidade e toxicidade do tensoativo.

Um exemplo de surfactante não iônico é o Tween-20 (Tensoativo Hidrofílico Polisorbato), que é bastante utilizado como emulsificador em atividades científicas, farmacológicas e domésticas e em detergentes, como apresenta a Figura 5.

Já a remoção de óleos e graxas, através de processos de flotação e separação por densidade, atinge uma eficiência de 30%, indicando que processos físico-químicos específicos para esses poluentes estão sendo empregados (RIBEIRO et al., 2022).

Por outro lado, a remoção de surfactantes é limitada, alcançando apenas 8%. Isso se deve ao fato de que os surfactantes, sendo compostos químicos com alta estabilidade e solubilidade, resistem aos tratamentos convencionais. Assim, o processo de tratamento utilizado na ETE não é completamente eficaz na degradação ou remoção desses compostos. Para melhorar a eficiência na remoção de surfactantes, técnicas adicionais, como processos de oxidação avançada (por exemplo, ozonização ou uso de peróxido de hidrogênio) e tratamento por membranas, poderiam ser consideradas (RIBEIRO et al., 2022). A Tabela 1 apresenta o resumo das tecnologias e a eficiência de remoção.

Tabela 1: Poluentes e Tecnologias de Remoção.

| Poluente | Tecnologia de Remoção | Eficiência de Remoção (%) |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| Óleos e graxas | Flotação por ar dissolvido, separação por densidade | 30% |
| DQO (Demanda Química de Oxigênio) | Tratamento biológico (lodo ativado) | 73% |
| Surfactantes | Tratamento convencional (físico-químico e biológico) | 8% |

Fonte: RIBEIRO et al., 2022.

Esse estudo evidencia a necessidade de melhorias no tratamento de surfactantes, especialmente diante do aumento de consumo de materiais de limpeza durante a pandemia de COVID-19, que levou a um maior lançamento dessas substâncias nos efluentes residuários. Com isso, a inclusão de tecnologias mais avançadas e específicas para a degradação desses compostos é essencial para garantir a proteção dos corpos hídricos e a sustentabilidade ambiental.

3.4 Processo de Tratamento: Coagulação e floculação

Os processos de tratamentos podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos. Os físicos apresentam aplicação de força física, como gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração. Já nos processos químicos, a remoção se dá devido a adição de produtos químicos ou reações químicas, como precipitação, coagulação, adsorção e

desinfecção. E os processos biológicos são por meio de atividade biológica, como desnitrificação e remoção da matéria orgânica carbonácea (VON SPERLING, 1995).

A coagulação é um processo de desestabilização das partículas suspensas e/ou coloidais realizada por ações físicas e reações químicas entre o coagulante, a água e as partículas coloidais presentes. O objetivo principal consiste em elevar significativamente a velocidade de sedimentação do aglomerado de partículas a ser formado pela adição do coagulante (LIBÂNIO, 2010).

Os agentes coagulantes podem ser naturais ou sintéticos. Eles são adicionados na primeira etapa da coagulação, chamada mistura rápida, que ocorre em intervalos de segundo. A segunda etapa, chamada de mistura lenta, ocorre em maior tempo, cerca de 15 a 20 minutos, com a redução da velocidade da mistura a fim de formarem agregados de maior tamanho. Já a terceira etapa ocorre a floculação ou sedimentação, nos quais os flocos formados são separados pela ação da gravidade (VON SPERLING, 1995).

Com isso, para melhorar a eficiência do tratamento é indicado a utilização do equipamento *Jar Test* para a definição da dosagem correta do coagulante, velocidade e tempo de agitação e sedimentação.

Para a verificação do êxito da coagulação, a mobilidade eletroforética ou eletroforese e o potencial zeta (PZ) podem ser utilizados como forma de dimensionar a carga superficial das partículas coloidais (SKAF et al., 2020).

4 METODOLOGIA

Após o desenvolvimento da revisão bibliográfica relacionada aos temas da pesquisa, os ensaios foram divididos da seguinte forma: obtenção dos microplásticos, coagulação química e caracterização dos microplásticos, que serão descritos a seguir.

4.1 Obtenção e envelhecimento dos microplásticos

Um dos plásticos mais comuns e utilizados na indústria têxtil e na construção civil é o PE (GEYER et al., 2017), e por isso foi utilizado pela pesquisa. O material foi obtido a partir do fabricante Bianquímica, em formato de microesferas para cosméticos com dimensão de 0,6 mm, e assim caracterizado como microplástico. Para simular o envelhecimento atmosférico, as microesferas de PE foram submetidas a oxidação em uma câmara de madeira fechada com uma lâmpada de 15 W de potência a uma distância de 30 cm por um período de 30 dias (LIU et al., 2023).

4.2 Coagulação Química

A coagulação química foi realizada por meio de experimentos no equipamento *Jar Test*, produzido pelo fabricante Policontrol Floc Control II. Os ensaios foram executados no Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) na Universidade Federal de Goiás - UFG.

Conforme descrito por Xia et al (2020), foi utilizada água deionizada para maior eficiência dos experimentos. O coagulante utilizado foi o $Al_2(SO_4)_3$, pois conforme indicado por Ma et al (2019), os coagulantes com alumínio possuem maior eficiência para remoção de PEs do que os coagulantes com ferro. Ele foi obtido do fabricante Perfyl Tech Química. E para ajuste do pH foram utilizadas soluções de NaOH 0,1 M ou HCL 0,1 M.

As velocidades de rotação consideradas nos experimentos do *Jar Test* foram 400 rpm (rotações por minuto) por 1 minuto durante a mistura rápida e, para a mistura lenta 100 rpm por 15 minutos. Após isso, foram considerados 30 minutos para a sedimentação das partículas (OLIVEIRA et al., 2023).

Os ensaios foram realizados em duas etapas principais:

- otimização para a definição do pH inicial e concentração do coagulante; e
- microplásticos envelhecidos com surfactantes.

A etapa inicial foi realizada em duplicata com microplásticos prístinos e envelhecidos, variando o pH de 4,0 a 6,0 e a concentração de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ de 2,5 até 6,0 mg L^{-1} (OLIVEIRA et al., 2023), como apresenta a Figura 6.

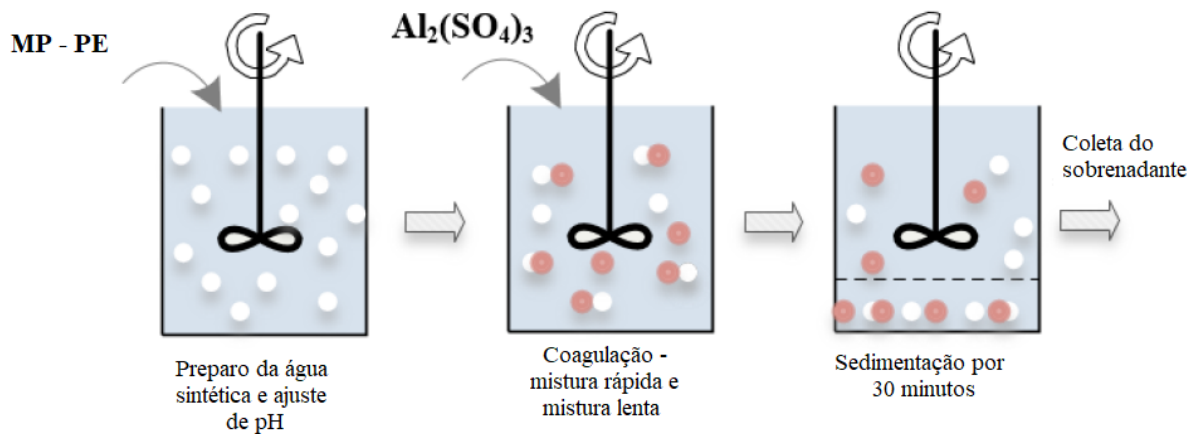


Figura 6 - Representação esquemática do teste de coagulação em laboratório – Jar Test.
Fonte: Oliveira et al., 2023.

Após a sedimentação, 50 mL de amostras foram coletadas de cada jarro com auxílio de uma seringa e armazenados para a caracterização das amostras e análise da turbidez.

Já a segunda etapa do experimento (Figura 7), foi realizada em triplicata da seguinte forma:

- Seis jarros com microplásticos envelhecidos ($0,4 \text{ g.L}^{-1}$) com Tween-20 com concentrações de 20, 80, 140, 200, 260 e 300 mg.L^{-1} ; e
- Seis jarros com microplásticos envelhecidos ($0,4 \text{ g.L}^{-1}$) com LAS com concentrações de 20, 80, 140, 200, 260 e 300 mg.L^{-1} .

As concentrações de surfactantes foram determinadas de 20 mg L^{-1} , pois geralmente ocorrem em estações de tratamento de esgoto domésticos, a 300 mg L^{-1} , pois podem ser encontradas em efluentes industriais (OLIVEIRA et al., 2023 e BIZUKOJC-LIWARSKA et al., 2005).

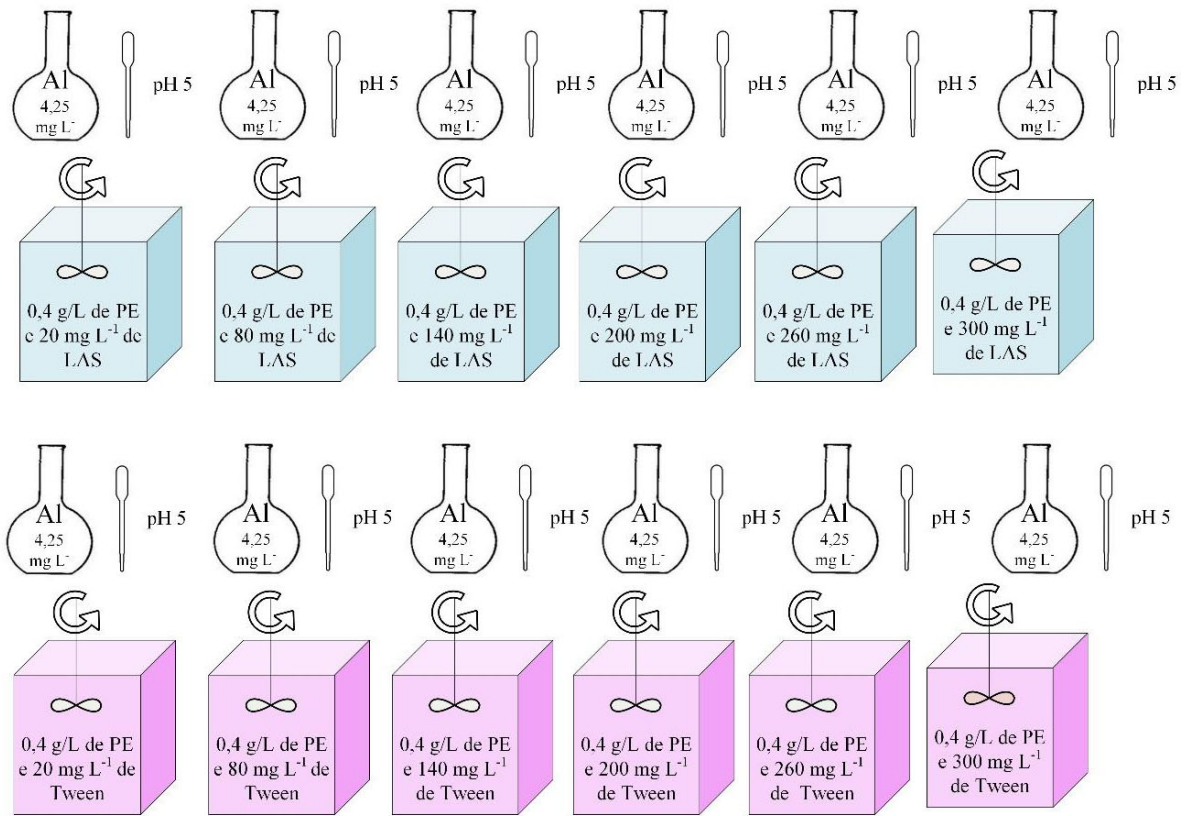


Figura 7 - Representação esquemática dos ensaios de coagulação com os surfactantes.
Fonte: Oliveira et al., 2023.

Para análise da eficiência da remoção das partículas foram realizadas as medições de turbidez das amostras coletadas, antes e depois da coagulação, por meio do turbidímetro PoliControl AP2000 (LAPOINTE et al. 2020, SKAF et al., 2020 e OLIVEIRA et al., 2023). O pH e a temperatura das amostras também foram aferidos pelo pH-metro Akso AK90, como forma de controlar a prevalência das espécies hidrolisadas do $Al_2(SO_4)_3$.

A Figura 8 apresenta fotos durante a mistura rápida dos microplásticos envelhecidos com o LAS, indicando uma maior formação de espuma nos jarros 4, 5 e 6, pois apresentam maior concentração de surfactante.

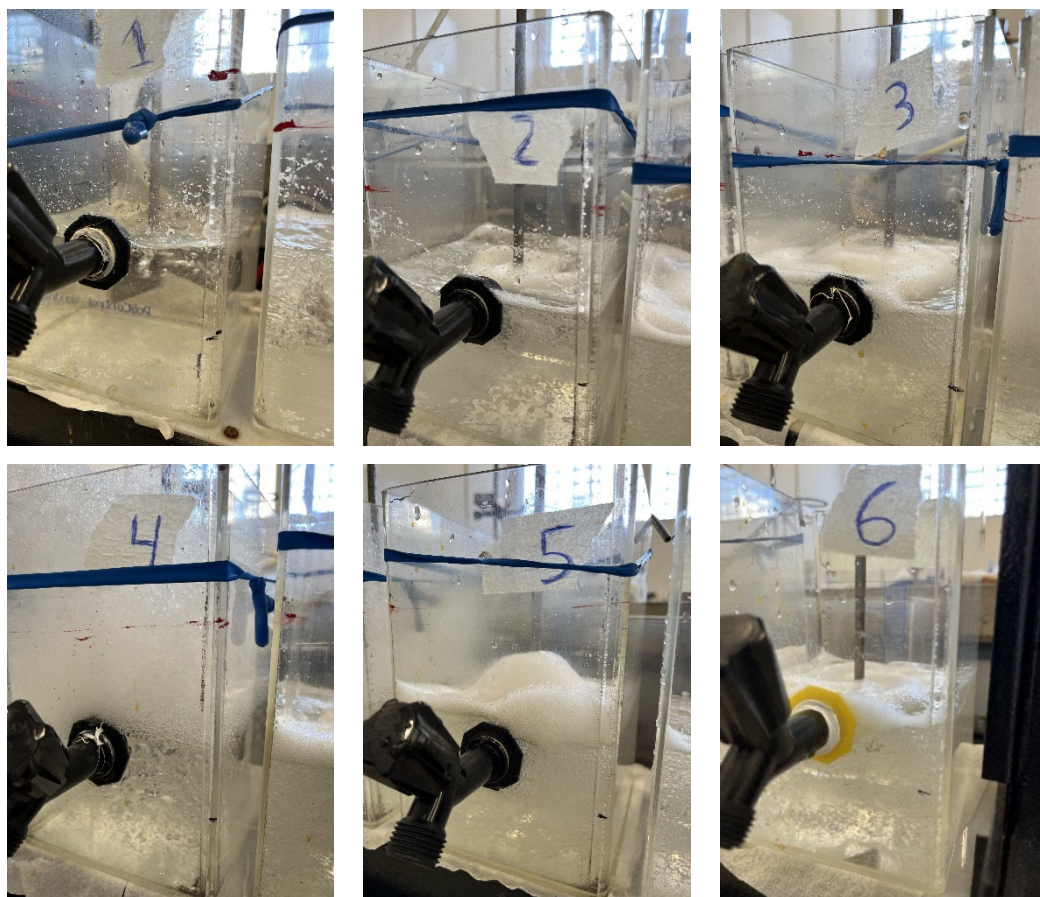


Figura 8 – Ensaio de coagulação dos microplásticos envelhecidos com o LAS, com as concentrações variando de 20 a 300 mg.L⁻¹.
Fonte: Autor, 2024.

4.3 Caracterização dos microplásticos

As partículas de microplásticos foram caracterizadas em três etapas principais apresentadas a seguir, com o objetivo de apresentar e verificar propriedades específicas desse material:

- conforme obtidas inicialmente, chamadas de microplástico pristino;
- após o envelhecimento pela luz UV; e
- após os ensaios de coagulação química com os surfactantes LAS e Tween.

Os ensaios de FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) e PZ foram realizados na Central de Análises de Multiusuários (CAM) do Instituto de Química da UFG. Durante a análise do FTIR para a visualização dos microplásticos, as amostras foram colocadas em placa de petri e secas em estufa a temperatura de 60°C (grau Celsius) por 24 horas e resfriadas em dessecador. As amostras secas foram misturadas com Brometo de potássio (KBr) com concentração de 5% em massa e prensado para formar pequenos discos. E assim, por meio

do espectrofotômetro PerkinElmer – modelo Spectrum 400, na faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1} , oito varreduras foram realizadas para cada leitura, como forma de identificar nos interferogramas, as bandas associadas às ligações intermoleculares antes e depois do envelhecimento dos microplásticos e da coagulação química com o LAS e Tween.

Já o PZ avalia os mecanismos atuantes no processo de coagulação através do espalhamento de luz eletroforético para partículas, moléculas e superfícies, além de analisar a massa molecular por espalhamento da luz estática (XIA et al., 2020). Esse ensaio foi realizado utilizando o equipamento Zetasizer Nano ZS.

Os ensaios de granulometria foram realizados como forma de determinar a dimensão das partículas e a distribuição conforme o tamanho das mesmas. Eles foram realizados no granulômetro a laser - equipamento Microtrac Flex 10.6.2 localizado no Laboratório de Geotecnia (LabGeo) da UFG.

Os ensaios de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X) foram realizados no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), localizado na UFG, com o objetivo de caracterizar as propriedades morfológicas e químicas das amostras analisadas. O ensaio de MEV foi conduzido para obter imagens detalhadas da superfície das amostras, permitindo uma análise precisa das suas estruturas em escala micrométrica e nanométrica, o que é fundamental para identificar características como forma, tamanho e distribuição de partículas. O recobrimento das amostras com ouro foi necessário para garantir a condução de eletricidade e evitar o acúmulo de carga durante o processo. Além disso, o ensaio de EDS foi realizado para determinar a composição elementar das amostras, identificando os elementos químicos presentes e suas proporções. Essa combinação de técnicas é essencial para uma análise completa tanto da estrutura física quanto da composição química das amostras, fornecendo informações cruciais para avaliar seu desempenho em aplicações específicas ou identificar eventuais contaminantes ou falhas.

O ensaio de EDS (Espectroscopia por Dispersão de Energia) foi realizado para identificar e quantificar a composição elementar das amostras. Esse método é fundamental para determinar quais elementos químicos estão presentes nas superfícies analisadas e em que proporções, sendo especialmente útil em estudos que envolvem materiais heterogêneos ou complexos. O recobrimento com carbono foi necessário para aumentar a condutividade das amostras, permitindo uma análise mais precisa no microscópio eletrônico. Através dessa técnica, foi

possível obter um perfil detalhado da distribuição e concentração de elementos, o que é essencial para entender as propriedades físico-químicas e o comportamento dos materiais sob diferentes condições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a elaboração da metodologia das três etapas principais dos ensaios, os resultados foram analisados e discutidos, como serão descritos a seguir.

5.1 Obtenção e envelhecimento dos microplásticos

Conforme descrito, o PE com dimensão que o caracteriza como microplástico foi disposto em uma camada fina e submetido a luz UV por 30 dias para simular o envelhecimento atmosférico. Esse procedimento resultou em partículas com uma coloração mais amarelada em comparação àquelas obtidas inicialmente, conforme apresenta a Figura 9.



Figura 9 – Microplástico pristino e após envelhecimento com luz UV.
Fonte: Autor, 2024.

5.2 Coagulação Química

A primeira parte dos ensaios de coagulação química foi conduzida com o objetivo de determinar as condições ideais de operação, especificamente o pH mais adequado e a concentração ótima do coagulante sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Para isso, foram realizados testes preliminares, onde diferentes valores de pH e dosagens de coagulante foram avaliados quanto à sua eficácia na remoção de partículas suspensas e coloidais presentes na água. Os resultados dessas análises são apresentados nas Figuras 10 e 11, que ilustram o comportamento do sistema de coagulação

sob as variadas condições experimentais, permitindo identificar os parâmetros que resultaram na maior eficiência do processo.

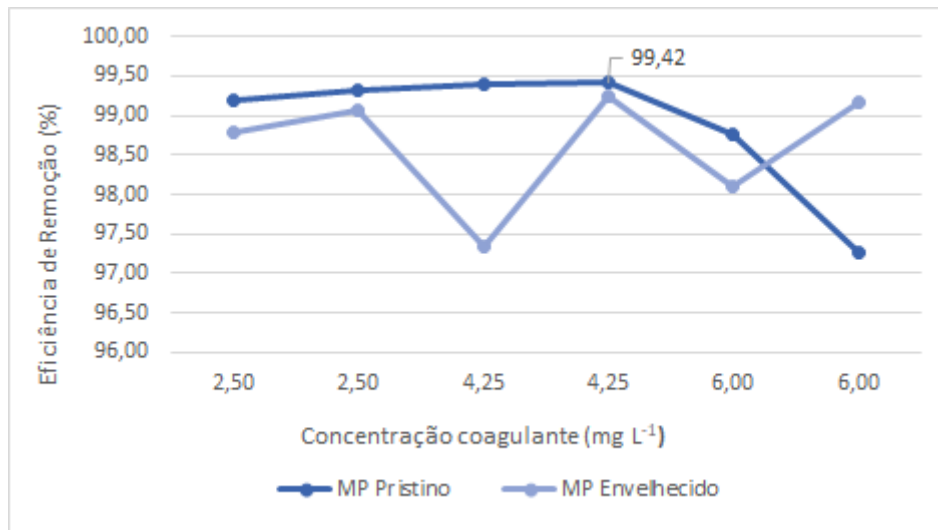


Figura 10 - Eficiência de remoção para microplástico pristino e envelhecido variando as concentrações de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ com pH 5.
Fonte: Autor, 2024.

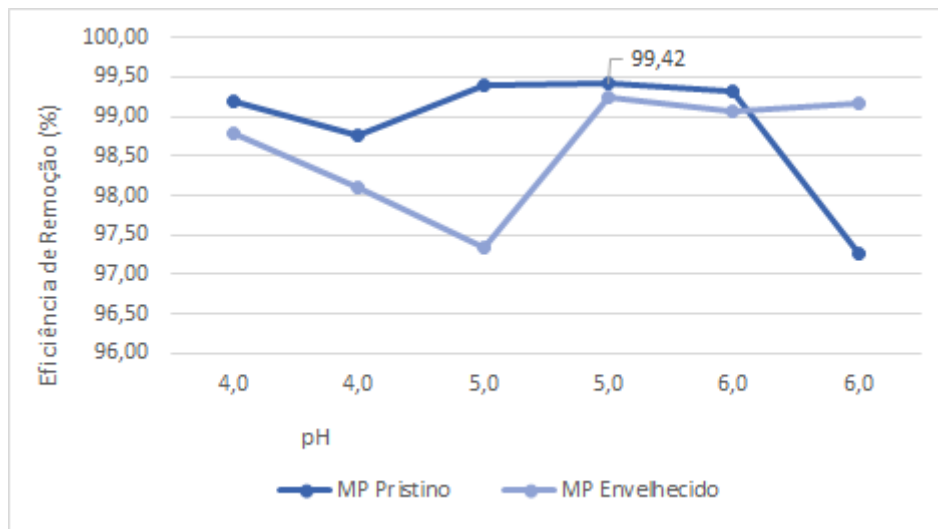


Figura 11 - Eficiência de remoção para microplástico pristino e envelhecido variando o pH com o coagulante $Al_2(SO_4)_3$ com 4,25 mg/L.
Fonte: Autor, 2024.

Infer-se das figuras 10 e 11, que o que apresentou maior eficiência para a remoção dos microplásticos pristino e envelhecido foi o ensaio 4 com uma remoção de 99,42%. Com isso, os melhores fatores para remoção dos microplásticos são com o coagulante com concentração de 4,25 mg L⁻¹ e pH em 5,0 (OLIVEIRA et al., 2023). Ressalta-se que segue a característica descrita por Skaf et al (2020), em que para maiores concentrações de alumínio em coagulantes, ocorre a redução da eficiência da remoção de microplástico pristino.

5.3 Efeitos dos surfactantes na coagulação química

Para a análise dos efeitos dos surfactantes, a turbidez foi determinada antes e após a coagulação química dos microplásticos. A medição do pH também foi efetuada para o controle do mesmo em regiões em que existe a prevalência de espécies hidrolisadas.

A Figura 12 ilustra a turbidez inicial aferida para as amostras com microplásticos envelhecidos e os surfactantes - LAS e Tween-20.

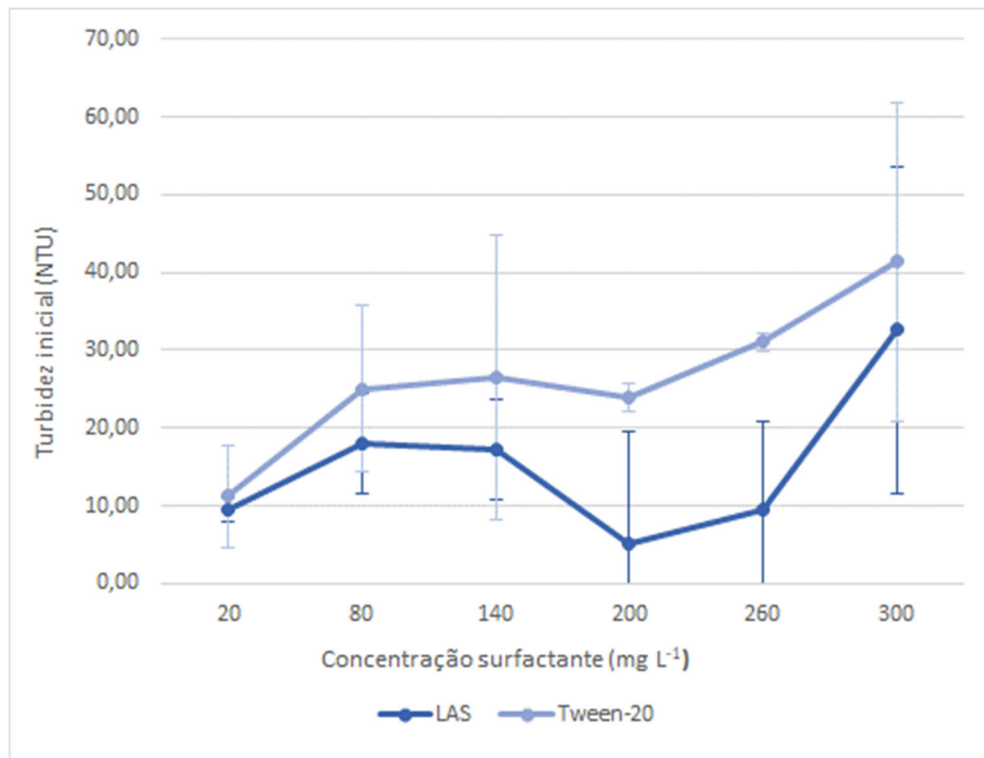


Figura 12 - Efeito dos surfactantes na turbidez inicial.
Fonte: Autor, 2024.

Os resultados da Figura 12 mostram um aumento gradativo da turbidez inicial dentro da faixa de concentrações trabalhadas, conforme o aumento da concentração do surfactante. A maior turbidez foi observada na concentração de 300 mg L⁻¹ de surfactante, atingindo 32,55 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez) para a amostra contendo LAS e 41,33 NTU para a amostra contendo Tween-20. Contudo, é importante destacar que esses valores referem-se à faixa de concentração testada, e não se sabe se concentrações maiores poderiam resultar em uma maior diminuição da turbidez devido a possíveis efeitos de saturação ou outras interações. Conforme Oliveira (2023), os surfactantes aumentam a turbidez devido ao incremento na quantidade de partículas em suspensão, causado pela instabilidade nas cargas polares.

Após a coagulação química e a sedimentação, a eficiência da remoção dos microplásticos envelhecidos foi determinada a partir da turbidez final, como apresenta a Figura 13.

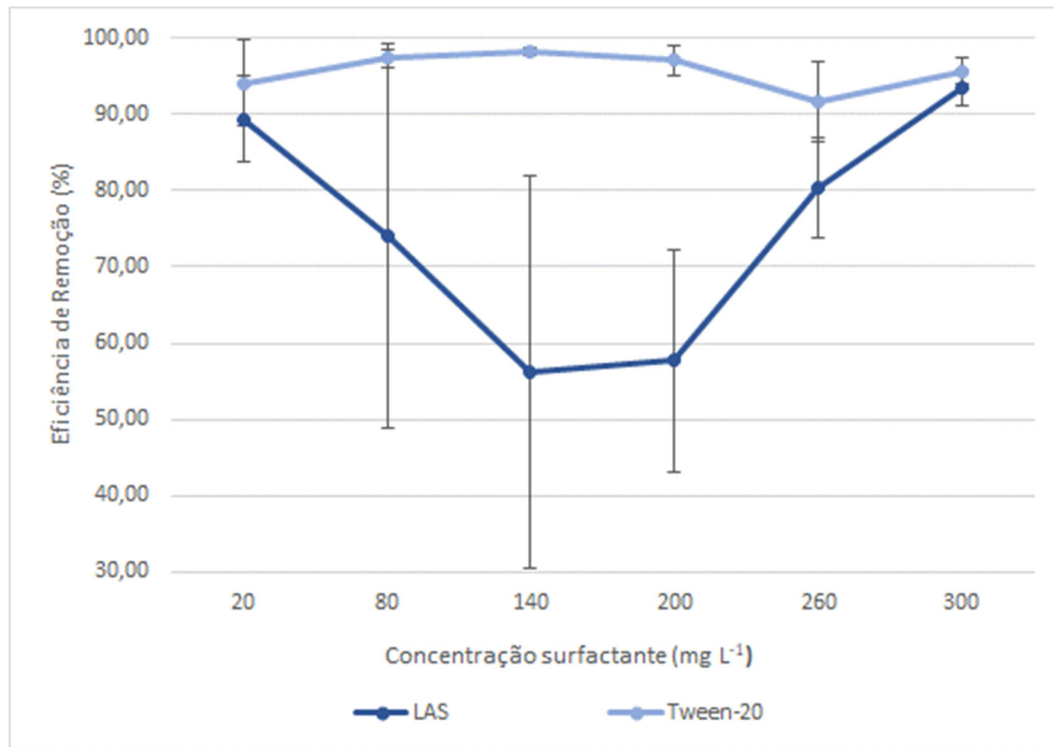


Figura 13 - Efeito dos surfactantes na remoção de microplásticos envelhecidos.
Fonte: Autor, 2024.

Conforme Figura 13, a eficiência da remoção dos microplásticos envelhecidos na presença de Tween-20 permanece acima de 90%, sendo que apresenta menor valor, de 91,67%, para a concentração de 260 mg L⁻¹. Porém, com o surfactante LAS adicionado nas amostras, a eficiência de remoção diminui consideravelmente, com menor remoção, de 56,15%, para concentração de 140 mg L⁻¹.

A redução da eficiência da remoção de microplásticos prístinos na presença de surfactantes iônicos e não iônicos foi destacada em diversos estudos, como os de Xia et al. (2020) e Li et al. (2022). Essa redução está diretamente relacionada às características anfífilas dos surfactantes, conforme apontado por Oliveira et al. (2023). Os surfactantes possuem uma estrutura composta por uma parte hidrofílica (afinidade com a água) e uma parte hidrofóbica (repelente à água). Essa dualidade permite que eles se associem tanto a contaminantes hidrofóbicos quanto hidrofílicos, formando uma espécie de camada ao redor das partículas de microplásticos.

Essa camada estabiliza os microplásticos em suspensão, dificultando sua aglomeração e, conseqüentemente, a sedimentação. Normalmente, o processo de sedimentação é facilitado pela

agregação das partículas, que se tornam suficientemente grandes e pesadas para decantar. No entanto, na presença de surfactantes, essas partículas permanecem dispersas, uma vez que os surfactantes criam uma barreira física e eletrostática ao redor das partículas, prevenindo que elas se aglutinem. Essa estabilização das partículas em suspensão compromete os processos de tratamento de efluentes que dependem da sedimentação, como a coagulação e a floculação, reduzindo assim a remoção eficiente dos microplásticos.

A maior interferência do LAS deve-se a sua característica aniônica, que devido a ionização do grupo sulfônico pode ter sido adsorvido na superfície dos microplásticos envelhecidos (LI e contribuintes, 2022), causando uma repulsão eletrostática (XIA et al., 2020). Sendo que, essa repulsão reduz a partir do aumento da concentração de LAS devido ao efeito de inversão de carga (OLIVEIRA et al., 2023).

Já a presença do Tween-20 gerou menos interferência, pois, não apresenta carga em seu grupo polar, formando uma camada flexível de polietilenoglicol (PEG) quando adsorvido na superfície dos microplásticos, como uma estrutura do tipo micela, indicando que a resistência estérica tende a tornar o microplástico furtivo no processo de coagulação (XIA et al., 2020 e OLIVEIRA et al., 2023). A Figura 14 e a Figura 15 apresentam a representação esquemática desses possíveis mecanismos indicados.

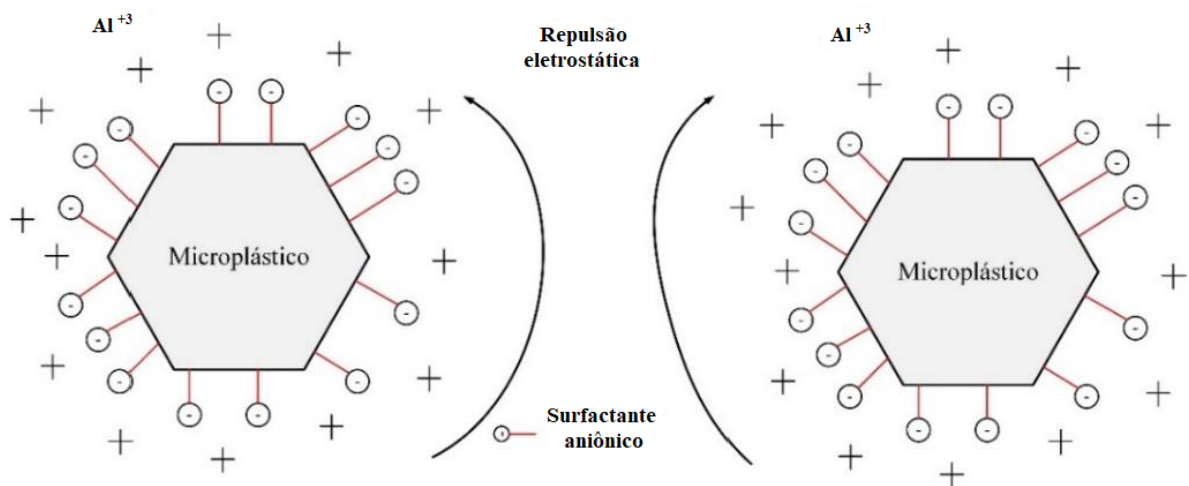


Figura 14 - Representação esquemática do efeito do LAS na coagulação de microplásticos.
Fonte: Adaptado de Xia et al., 2020 e Oliveira et al., 2023.

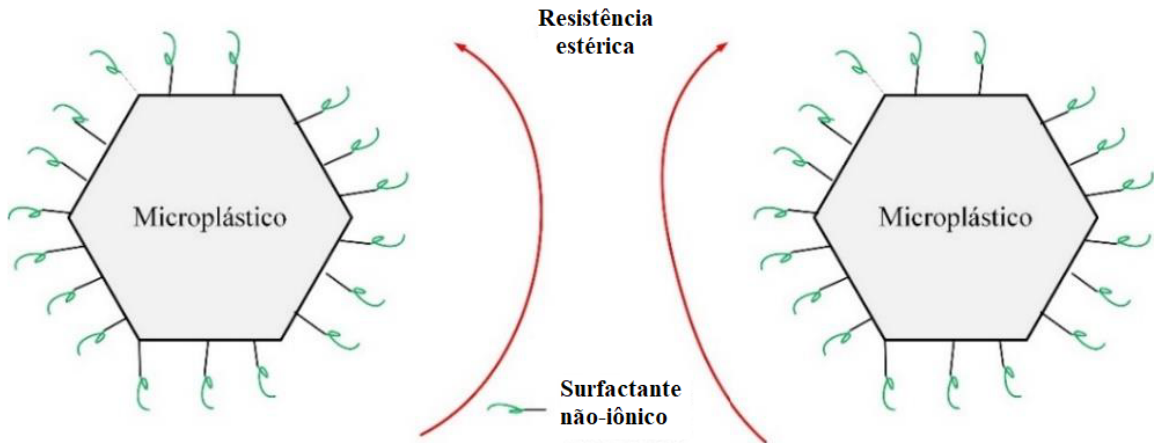


Figura 15 - Representação esquemática do efeito do Tween-20 na coagulação de microplásticos.
Fonte: Adaptado de Xia et al., 2020 e Oliveira et al., 2023.

5.4 Caracterização do microplástico

Os espectros de infravermelho do microplástico PE são apresentados na Figura 16, para a identificação dos grupos funcionais presentes.

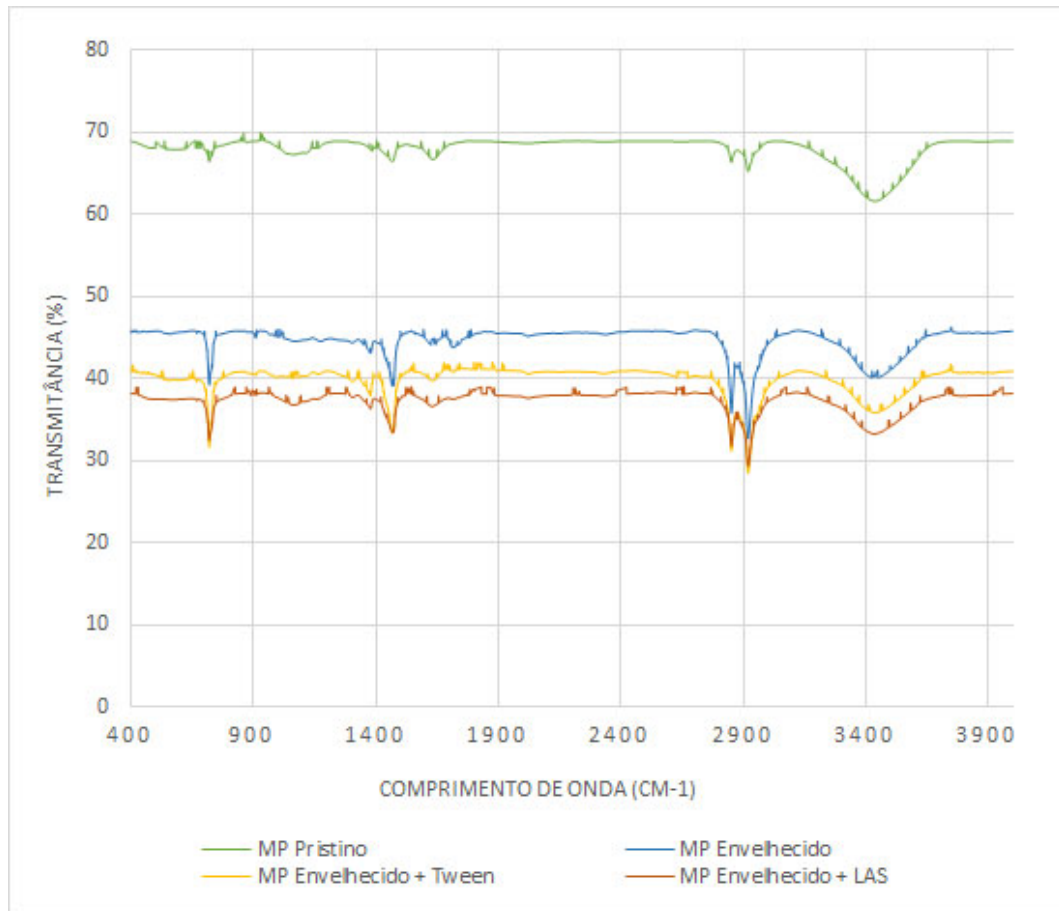


Figura 16 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier do microplástico.
Fonte: Autor, 2024.

O espectro FTIR do microplástico pristino apresentou um pico em 3.430 cm^{-1} , associado ao estiramento C-H, conforme descrito por Li et al. (2022). No entanto, ao analisar o microplástico envelhecido na presença de surfactantes, houve uma significativa redução da transmitância em todas as faixas de comprimento de onda, indicando uma alteração na composição química da superfície do microplástico, como observado por Zafar et al. (2023). Para esses microplásticos envelhecidos, os picos mais agudos no espectro FTIR deslocaram-se para a região de 2.910 cm^{-1} , atribuídos à presença dos grupos metileno (CH_2) e metil (CH_3), segundo Jia et al. (2020). Além disso, foi identificada uma mudança relevante nas bandas de absorção entre 700 cm^{-1} e 1.500 cm^{-1} , o que está relacionado ao estiramento CH no anel benzênico, como observado por Potapova et al. (2014).

Essas mudanças no espectro indicam uma modificação química nos microplásticos causada pela interação com os surfactantes, o que interfere diretamente nos processos de remoção de microplásticos. A alteração nos grupos funcionais e a redução da transmitância podem afetar a estabilidade das partículas em suspensão, tornando-as menos suscetíveis aos métodos convencionais de tratamento, como coagulação e floculação, ao alterar suas propriedades físico-químicas. Dessa forma, os surfactantes não apenas desestabilizam as partículas em suspensão, mas também modificam sua estrutura superficial, tornando o tratamento mais ineficaz.

A avaliação do PZ foi realizada para analisar a suspensão coloidal presente no líquido. De acordo com Li et al (2022), quando o PZ está próximo de zero, a suspensão é caracterizada como instável, e quando negativa ou positiva a solução é estável. A Figura 17 apresenta os resultados dos ensaios de PZ para as amostras de microplástico.

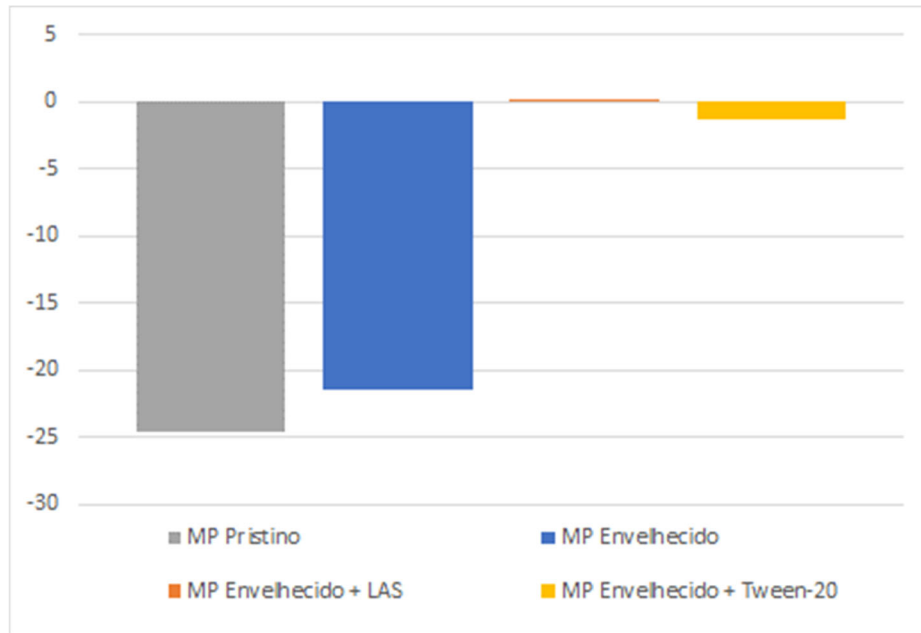


Figura 17 - PZ do microplástico.
Fonte: Autor, 2024.

Como apresenta a Figura 17, o PZ para o microplástico pristino e para o microplástico envelhecido foi negativo (-24,6 mV e -21,5 mV, respectivamente), caracterizando uma suspensão coloidal estável. Já na presença dos surfactantes LAS e Tween-20, ambas as amostras apresentaram valores próximos de zero (0,19 mV e -1,38 mV, respectivamente). Essa instabilidade causada pelos surfactantes deve-se a repulsão eletrostática e a resistência estérica dos sistemas.

Conforme descrito por Li et al (2022), o PZ positivo e próximo a 0 indica uma baixa remoção de turbidez devido à reversão de carga e posterior estabilização, conforme apresentado no tópico anterior para a remoção de microplástico envelhecido na presença de LAS.

A repulsão estérica que ocorre no sistema na presença de Tween-20 impõe uma dispersão ao sistema, devido à dificuldade de aproximação das partículas, pois os grupos ionizáveis se dissociam em fase líquida e os íons provenientes somam o efeito estérico. Porém, a partir das espécies hidrolisadas com o Tween-20, é formada a camada protetora - PEG.

Os ensaios de granulometria foram realizados antes e após a coagulação química com LAS e Tween-20 em concentrações de 20 mg L⁻¹ e 300 mg L⁻¹, como forma de apresentar a redução das dimensões das partículas, indicando a eficiência na remoção dos microplásticos. Os resultados são apresentados na Figura 18 e na Figura 19:

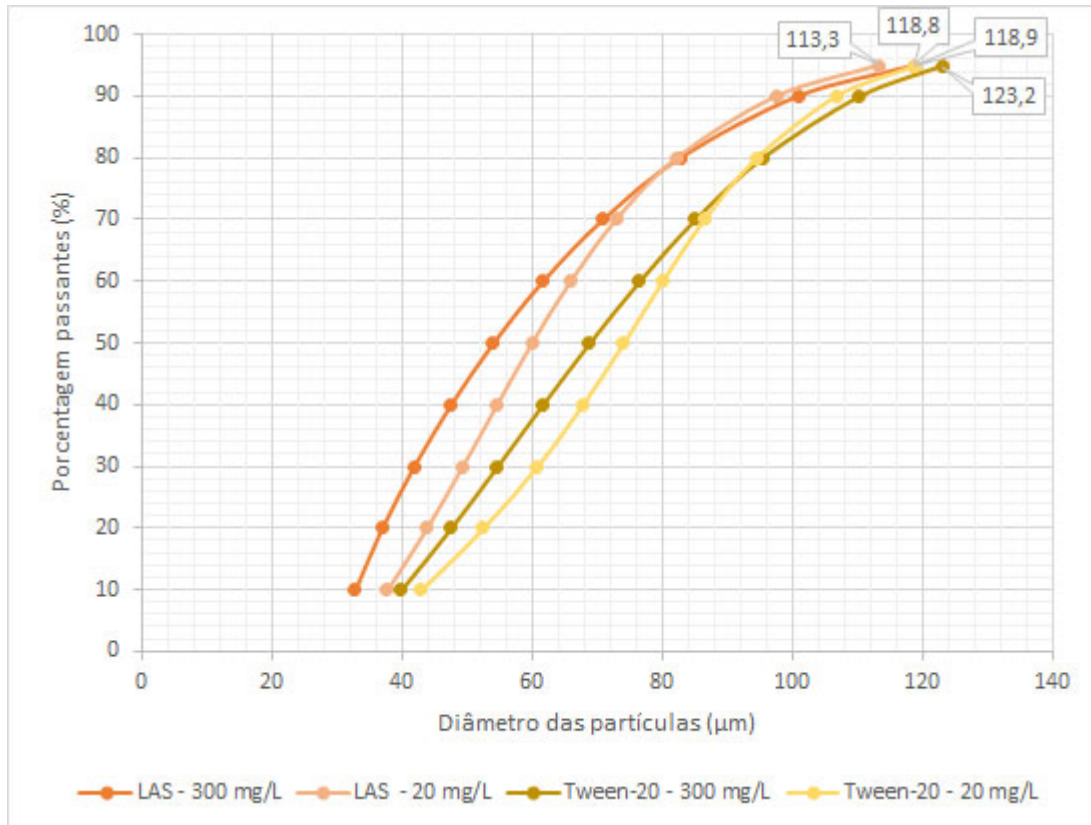


Figura 18 - Granulometria das amostras com os surfactantes com concentrações de 20 mg L⁻¹ e 300 mg L⁻¹ antes da coagulação química.
Fonte: Autor, 2024.

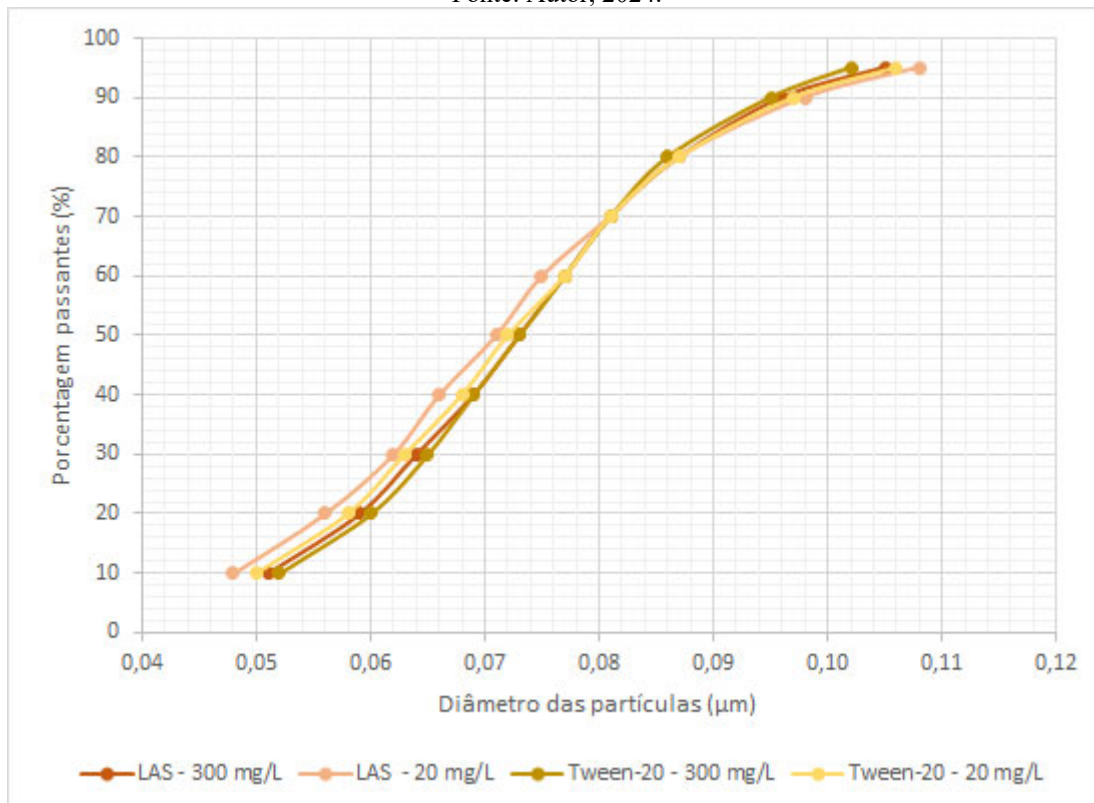


Figura 19 - Granulometria das amostras com os surfactantes com concentrações de 20 mg L⁻¹ e 300 mg L⁻¹ após da coagulação química.
Fonte: Autor, 2024.

A Figura 18 indica que 95% das partículas nas amostras antes da coagulação química possuem diâmetros variando de 0,11 mm a 0,12 mm, e que as partículas são maiores conforme o aumento da concentração de surfactantes.

Já a Figura 19 apresenta que 95% das partículas são menores que 0,11 μm após a coagulação química. Com isso, nota-se que ocorreu grande redução das dimensões das partículas. Conforme Xue et al (2021), o aumento da concentração de coagulante (cerca de 50 mg L⁻¹) aumenta a remoção de partículas menores, chegando a uma eficiência de 85,2% para microesferas de 6 μm .

Já Prokopova et al. (2021), indica que uma remoção de 80% dos microplásticos em uma coagulação química é capaz de reduzir as partículas maiores, mas para a redução de partículas menores que 5 μm é ideal que outro método de tratamento seja combinado a coagulação.

Os ensaios de MEV e EDS foram realizados a fim de caracterizar as alterações da morfologia dos microplásticos prístinos, envelhecidos e após a coagulação.

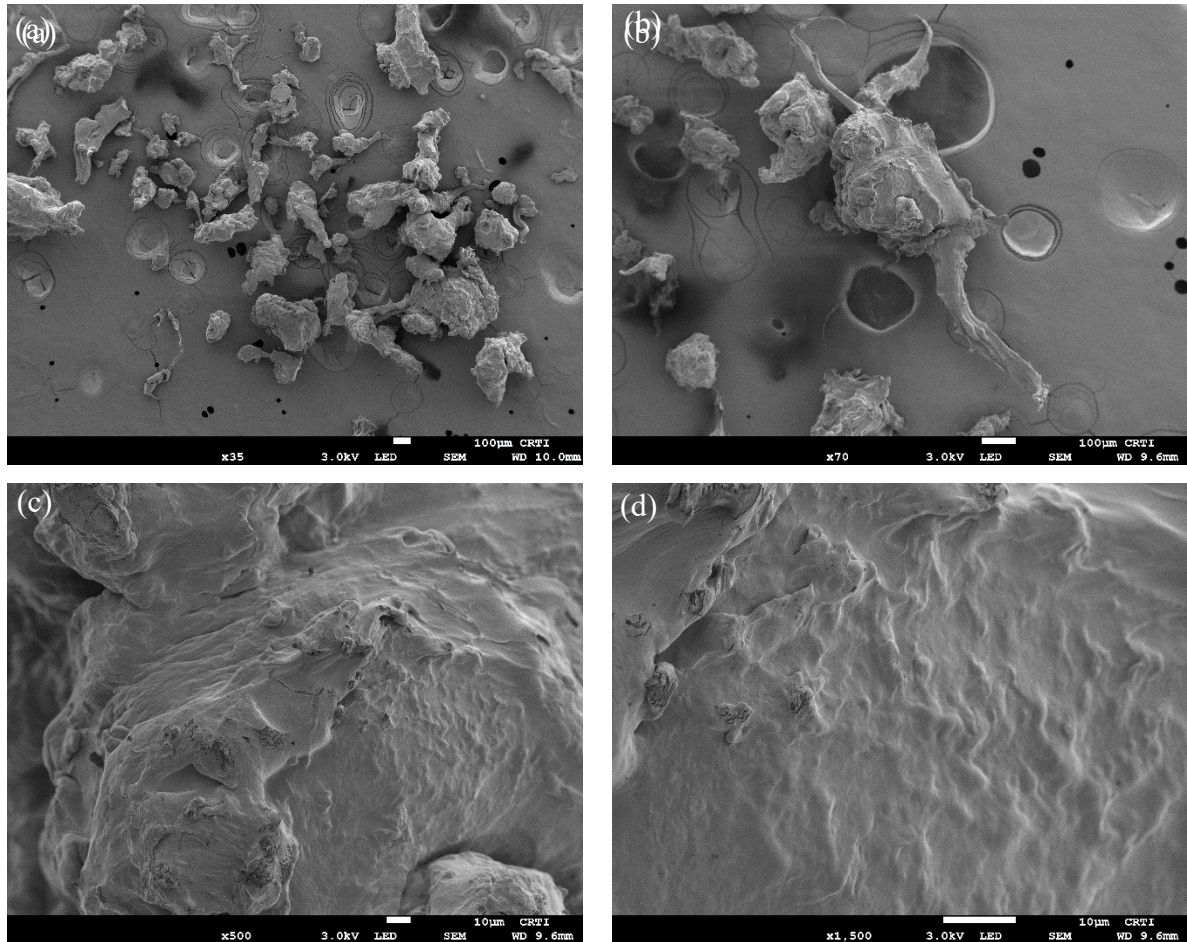


Figura 20 - Microscopia eletrônica de varredura dos microplásticos prístino –
(a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 70 vezes; (c): aumento de 500 vezes; (d): aumento de 1.500 vezes.
Fonte: Autor, 2024.

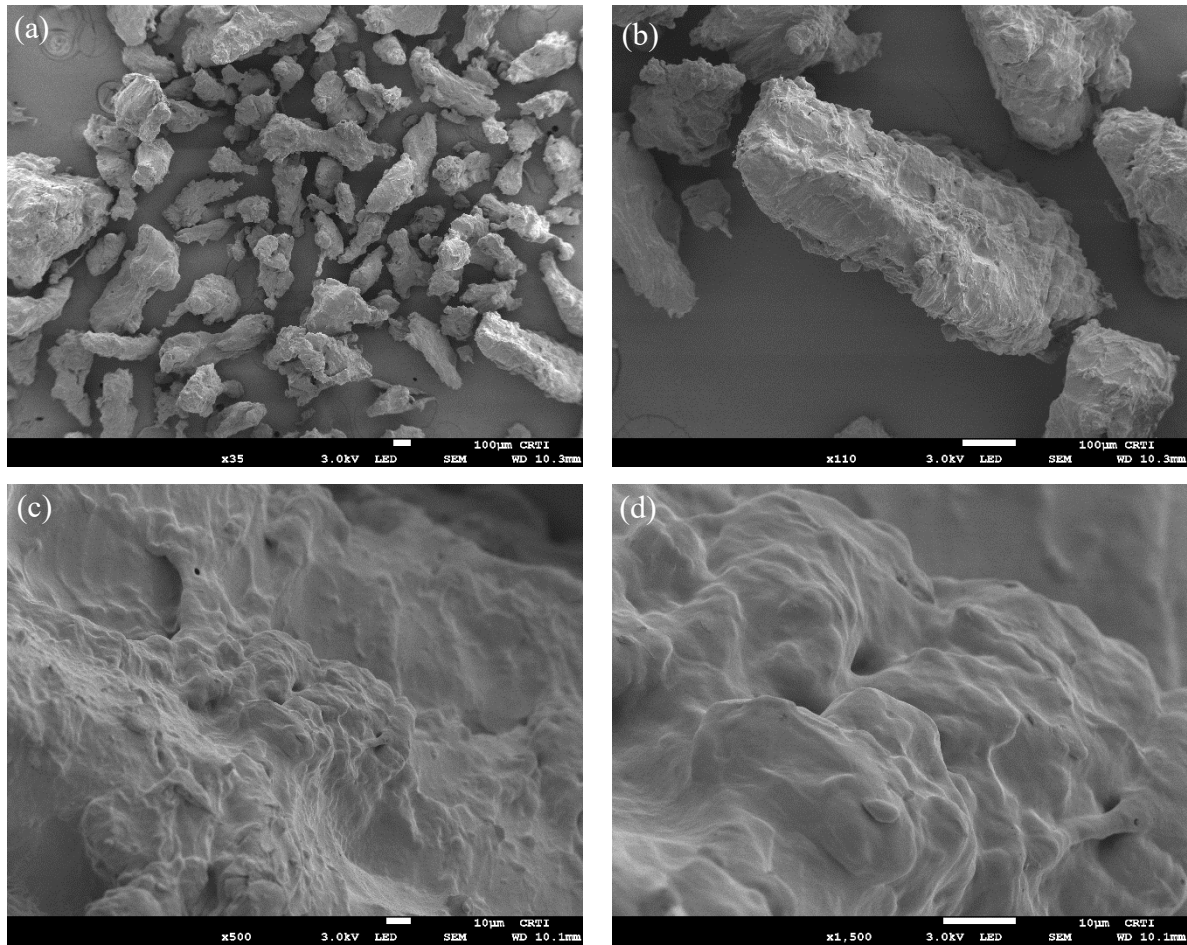


Figura 21 - Microscopia eletrônica de varredura dos microplásticos envelhecidos por luz UV – (a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 110 vezes; (c): aumento de 500 vezes; (d): aumento de 1.500 vezes. Fonte: Autor, 2024.

A Figura 20 e a Figura 21 ilustram a diferença entre as partículas de microplásticos prístino e após a oxidação por luz UV, sendo que os microplásticos prístino apresenta uma superfície mais rugosa com um aspecto ondulado e regular. Já os microplásticos envelhecidos apresentam uma superfície com características mais irregulares e porosas. Como descrito por Kim et al (2023), os microplásticos são alterados estruturalmente e fisicamente sob intemperismo. Por isso, é possível notar a diferença da morfologia, além da alteração visual da cor para amarelo claro (GUAN et al., 2022).

A Figura 22 e a Figura 23 ilustram a microscopia eletrônica de varredura para as amostras de microplástico envelhecido com LAS ou Tween-20 após a coagulação.

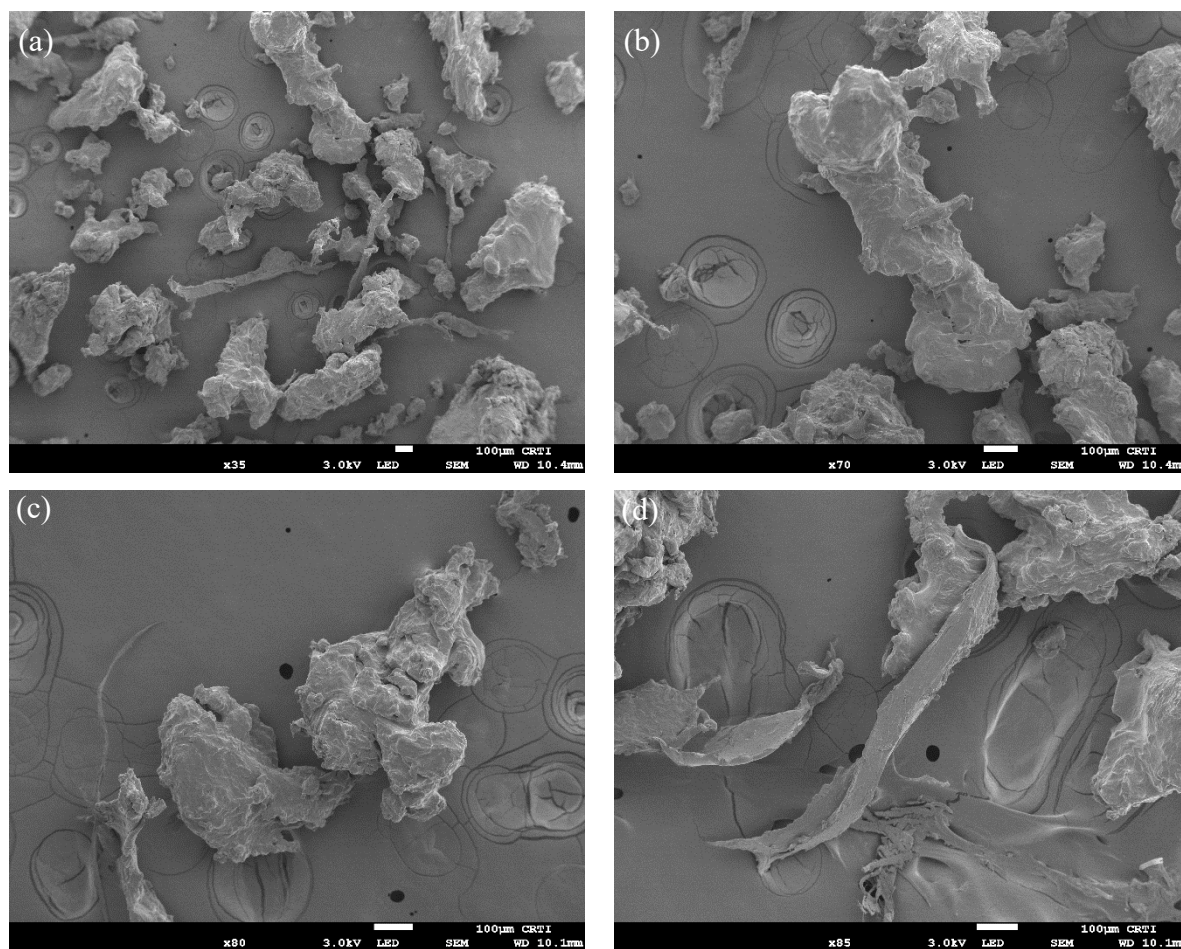


Figura 22 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras de microplásticos envelhecidos e surfactante LAS após a coagulação química –

(a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 70 vezes; (c): aumento de 80 vezes; (d): aumento de 85 vezes.

Fonte: Autor, 2024.

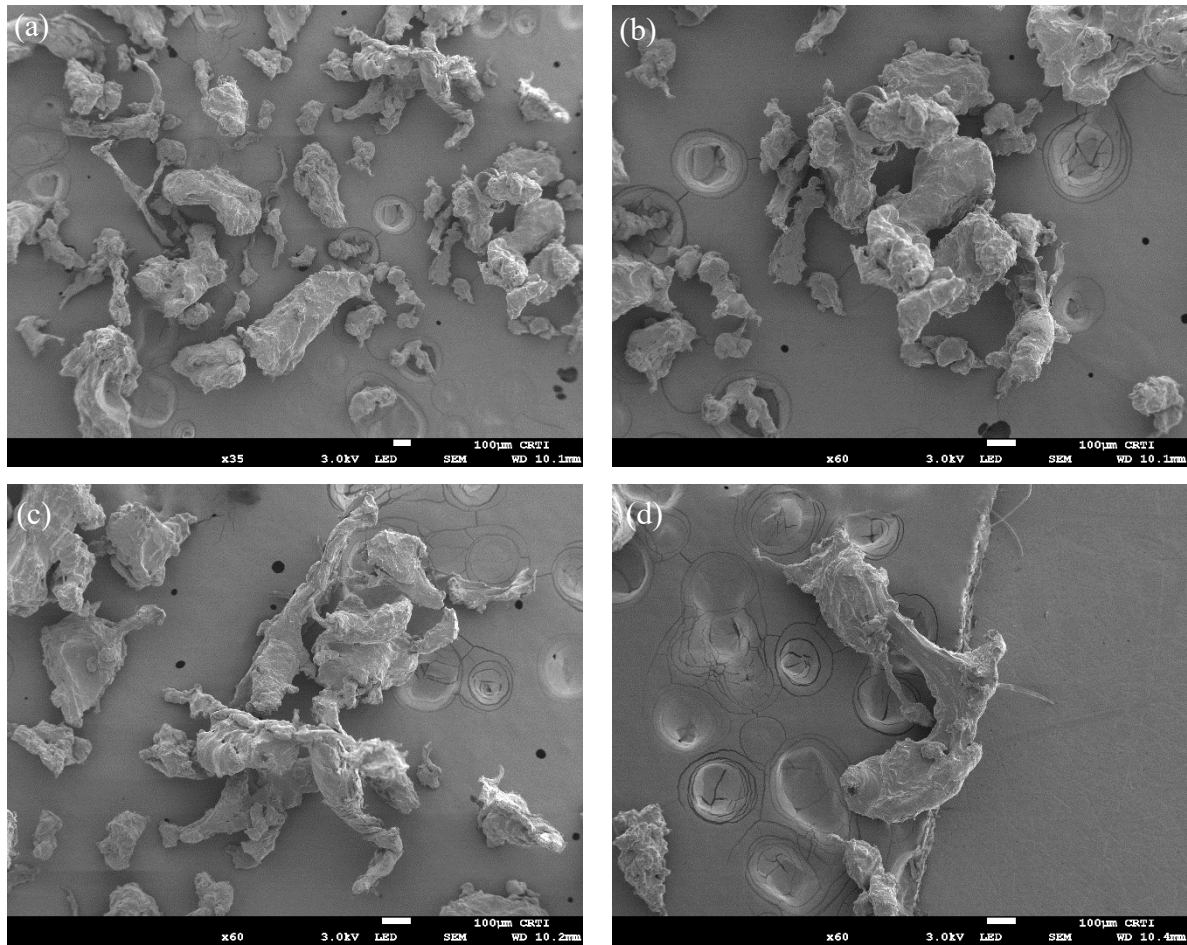


Figura 23 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras de microplásticos envelhecidos e surfactante Tween-20 após a coagulação química –
(a): aumento de 35 vezes; (b): aumento de 60 vezes; (c): aumento de 60 vezes; (d): aumento de 60 vezes.
Fonte: Autor, 2024.

Percebe-se que as partículas de microplásticos envelhecidos após a coagulação química se agregaram. Porém, a amostra com o surfactante Tween-20 apresenta as partículas mais agregadas e com dimensões maiores devido a resistência estérica, o que pode ter levado a uma melhor sedimentação. Já a amostra com o surfactante LAS apresenta as partículas mais distantes e menos agregadas, que corrobora com os demais resultados apresentados. Conforme também observado por He et al (2023), após a coagulação química, ocorreu um aumento de microporos nas partículas devido a corrosão, que pode desencadear um aumento de adsorção de contaminantes e partículas suspensas.

A Figura 24 ilustra o EDS, que indica que a cadeia polimérica dos microplásticos permaneceu com o Carbono (C) como composto principal, seguido pelo Oxigênio (O) em todas as amostras.

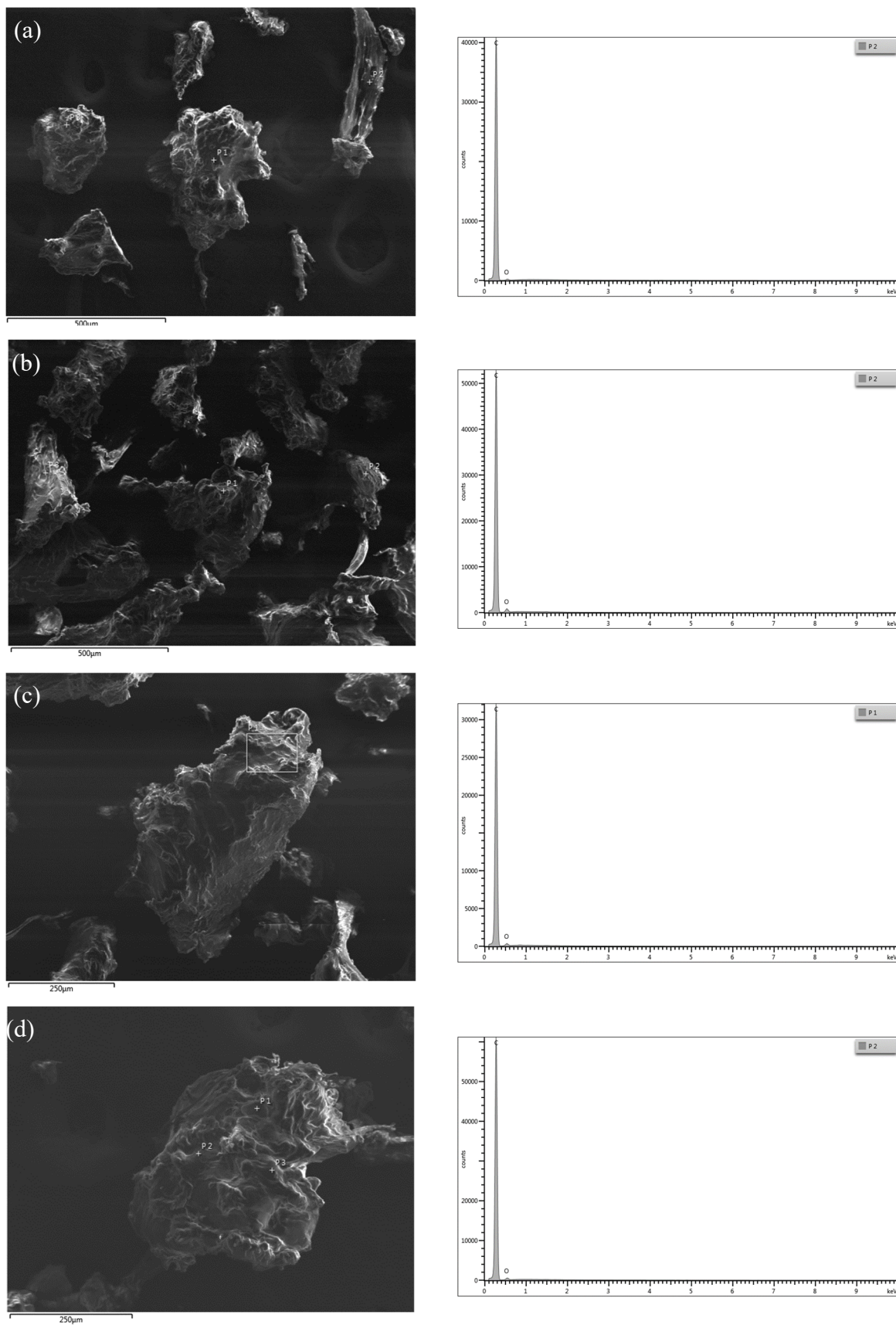


Figura 24 - EDS para os microplásticos - (a): microplástico pristino, (b): microplástico envelhecido, (c): microplástico envelhecido e LAS após a coagulação e, (d): microplástico envelhecido e Tween-20 após a coagulação.

Fonte: Autor, 2024.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que a remoção dos microplásticos envelhecidos na presença de surfactantes apresentou variações significativas na eficiência dos processos de coagulação química. A remoção dos microplásticos envelhecidos foi menor na presença de LAS com concentração de 140 mg L^{-1} , com uma redução de turbidez de apenas 56,15%, atribuída à repulsão eletrostática causada pela ionização do grupo sulfônico, que inibe a formação de flocos eficientes. Em contrapartida, a presença de Tween-20, resultou em uma melhor eficiência de remoção, atingindo valores superiores a 90%, evidenciando que o efeito do surfactante não iônico favoreceu a agregação e a sedimentação dos microplásticos, devido à sua resistência estérica.

Outro fator significativo observado foi o aumento da turbidez inicial das amostras contendo surfactantes, com maior impacto nas amostras que continham 300 mg/L de LAS e Tween-20, onde os valores de turbidez alcançaram 32,55 NTU e 41,33 NTU, respectivamente. Esses resultados corroboram estudos prévios que demonstram que a presença de surfactantes pode aumentar a instabilidade de partículas coloidais, dificultando a remoção dos microplásticos envelhecidos.

Os resultados apresentados pelo PZ e pelo FTIR também indicam a baixa eficiência da remoção de turbidez devido à reversão de carga e posterior estabilização, com um PZ de 0,19 mV na amostra com LAS e uma grande redução da transmitância nas ondas apresentadas no FTIR, indicando que os microplásticos envelhecidos por luz UV possuem características mais irregulares, com alterações estruturais e morfológicas.

A caracterização morfológica indica que as partículas de microplásticos se agregam após a coagulação química, sendo que a amostra com Tween-20 possui agregados com maiores dimensões devido a resistência estérica, indicando uma melhor sedimentação e eficiência da remoção de partículas.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a eficiência da remoção de microplásticos é limitada na presença de surfactante aniônico, sendo necessária a combinação de tratamentos adicionais para melhorar a eficiência, como a filtração por membranas. As características anfífilas dos surfactantes demonstram ser um desafio adicional na remoção dos microplásticos, pois possibilitam a interação com outros contaminantes, afetando negativamente o processo de coagulação.

Este estudo reforça a necessidade de mais investigações sobre os impactos de diferentes tipos de surfactantes no tratamento de efluentes, bem como a necessidade de regulamentação específica para microplásticos nos efluentes, considerando o aumento no uso desses materiais em produtos de limpeza e higiene.

Futuras pesquisas devem focar na combinação de tratamentos de coagulação com processos de filtração e eletrocoagulação para melhorar a remoção dessas partículas e avaliar os efeitos a longo prazo desses tratamentos na qualidade da água e na saúde humana. Além disso, a caracterização da toxicidade dessas partículas para o ambiente e os organismos aquáticos continua sendo uma lacuna crítica que deve ser abordada para garantir a segurança dos ecossistemas.

REFERÊNCIAS

- ANDRADY, A. L. **The plastic in microplastics: A review.** Marine Pollution Bulletin – Vol. 119, Issue 1, 2017. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.01.082.
- BAYARKHUU, B.; BYUN, J. **Optimization of coagulation and sedimentation conditions by turbidity measurement for nano- and microplastic removal.** Chemosphere, Vol. 306, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135572.
- BROWNE, M. A.; CRUMP, P.; NIVEN, S. J.; TEUTEN, E. L.; TONKIN, A.; GALLOWAY, T.; THOMPSON, R. C. **Accumulations of microplastics on shorelines worldwide: sources and skins.** Environmental Science & Technology, 2011. DOI: 10.1021/es201811s.
- BIZUKOJC-LIWARSKA, E.; BIZUKOJC, M. **Digital image analysis to estimate the influence of sodium dodecyl sulphate on activated sludge flocs.** Process Biochemistry, Vol. 40, 2005. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.07.020
- CAO, Y.; ZHAO, M.; MA, X.; SONG, Y.; ZUO, S.; LI, H.; DENG, W. **A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans.** Science of The Total Environment, Vol. 788, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147620.
- CARPENTER, E. J.; SMITH, K. L. **Plastics on the Sargasso sea surface.** Science – Vol. 175, Issue 4027, 1972. DOI: 10.1126/science.175.4027.1240.
- CARTES, P.; PEREIRA, J. C. **Emulsions as templates agents using in elaboration of porous materials.** Revista Ingeniería UC, v. 23, n. 3, p. 308-318, 2016.
- ELKHATIB, D.; OYANEDEL-CRAVER, V.; CARISSIMI, E. **Electrocoagulation applied for the removal of microplastics from wastewater treatment facilities.** Separation and Purification Technology, Vol. 276, 2021. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118877.
- EMENIKE, E. C.; OKORIE, C. J.; OJEYEMI, T.; EGBEMHUNGHE, A.; IWUOZOR, K. O.; SALIU, O. D.; OKORO, H. K.; ADENIYI, A. G. **From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health.** Helyon, Vol. 9, Issue 10, E20440, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20440.

FADARE, O. O.; OKOFFO, E. D.; OLASEHINDE, E. F. **Microparticles and microplastics contamination in African table salts**. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 164, 2021. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112006.

GARDINGO, M. F. **Tratamento de águas e efluentes contendo surfactantes através do sistema peróxido de hidrogênio/hipoclorito**. 2010, 80 f. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia dos Materiais - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GEYER, R.; JAMBERCK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever made**. *Science Advances*, Vol. 3, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.

GUAN, Y.; GONG, J.; SONG, B.; LI, J.; FANG, S.; TANG, S.; CAO, W.; LI, Y.; CHEN, Z.; YE, J.; CAI, Z. **The effect of UV exposure on conventional and degradable microplastics adsorption for Pb (II) in sediment**. *Chemosphere*, Vol. 286, 2022.

HE, W.; CHEN, X.; XU, C.; ZHOU, C.; LUO, J. **Effect of microplastic aging degree on filter cake formation and membrane fouling characteristics in ultrafiltration process with pre-coagulation**. *Separation and Purification Technology*, Vol. 310, 2023. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123221.

JIA, H.; WU, H.; WEI, X.; HAN, Y.; WANG, Q.; SONG, J.; JIAJUN, D.; YAN, H.; LIU, D. **Investigation on the effects of ALOOH nanoparticles on sodium dodecylbenzenesulfonate stabilized o/w emulsion stability for EOR**. *Colloids and Surfaces A*, v. 603, p. 1-9, n. 125278, 2020. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125278.

JIANG, H.; LUO, D.; WANG, L.; ZHANG, Y.; WANG, H.; WANG, C. **A review of disposable facemasks during the COVID-19 pandemic: A focus on microplastics release**. *Chemosphere*, Vol. 312, Part 1, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137178.

KERWIN, B. A. **Polysorbates 20 and 80 Used in the Formulation of Protein Biotherapeutics: Structure and Degradation Pathways**. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 97, n. 8, p. 2924-2935, 2008. DOI: 10.1002/jps.

KIM, H.; ASHIM, J.; PARK, S.; KIM, W.; JI, S.; LEE, S.; JUNG, Y.; JEONG, S.; LEE, S.; KIM, H.; LEE, Y.; KWON, M. K.; HWANG, J.; SHIN, J. M.; LEE, S.; YU, W.; PARK, J.; CHOI, S. **A preliminary study about the potential risks of the UV-weathered**

microplastic: The proteome-level changes in the brain in response to polystyrene derived weathered microplastics. *Environmental Research*, Vol. 233, 2023. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116411.

LAPOINTE, M.; FARNER, J.; HERNANDEZ, L. M.; TUFENKJI, N. **Understanding and Improving Microplastics Removal during Water Treatment: Impact of Coagulation and Flocculation.** *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 14, p. 8719-8727, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c00712.

LI, J.; DAGNEW, M.; RAY, M. B. **Effect of coagulation on microfibers in laundry wastewater.** *Environmental Research*, Vol. 212, Part D, 2022. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113401.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIU, Z.; YOU, X. **Recent progress of microplastic toxicity on human exposure base on in vitro and in vivo studies.** *Science of The Total Environment*, Vol. 903, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166766.

LIU, S.; WANG, C.; YANG, Y.; DU, Z.; LI, L.; ZHANG, M.; NI, S.; YUE, Z.; YANG, K.; LI, X.; YANG, Y.; QIN, Y.; LI, J.; YANG, Y.; ZHANG, M. **Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS).** *Journal of Hazardous Materials*, Vol 469, 2024. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133855.

MA, B.; XUE, W.; HU, C.; LIU, H.; QU, J.; LI, L. **Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment.** *Chemical Engineering Journal*, Vol. 359, 2019. DOI: 10.1016/j.cej.2018.11.155.

MANIASSO, N. **Ambientes Micelares em Química Analítica.** *Química Nova*, v. 24, n. 1, p. 87-93, 2001.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros.** 2ª Edição. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo – SP, 1999.

MELO, T. B. **Ecotoxicidade de efluente sintético contendo alquilbenzeno linear sulfonado (LAS) proveniente do tratamento por eletrocoagulação**. Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. **Biosurfactantes: propriedades e aplicações**. Química Nova, Vol. 25, nº 5, 772-776, 2002

OLIVATTO, G. P.; CARREIRA, R.; TORNISIELO, V. L.; MONTAGNER, C. C. **Microplásticos: Contaminantes de Preocupação Global no Antropoceno**. Revista Virtual de Química, ISSN 1984-6835, 2018.

OLIVEIRA, T. L.; BACELAR, J. M.; TERAN, F. J. C.; CUBA, R. M. F.; PORTO, V. H. S. F. **Chemical Coagulation applied for the removal of polyethylene and expanded polystyrene microplastics**. Journal of Ecological Engineering, Vol. 24, 2023. DOI: 10.12911/22998993/171525

OLIVEIRA, T. L. **Efeito do Tween-20 e Alquilbenzeno Sulfonato Linear na Coagulação de Microplástico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2022.

PENTEADO, J. C. P.; SEOUD, O. A. E.; CARVALHO, L. R. F. **Alquilbenzeno sulfonato linear: uma abordagem ambiental e analítica**. Química Nova, v. 29, n 5, p. 1038-1046, 2006.

PEREIRA, F. C. **Microplástico no ambiente marinho: mapeamento de fontes e identificação de mecanismos de gestão para minimização da perda de pellets plásticos**. Dissertação de mestrado - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2014.

PRAMANIK, B. K.; PRAMANIK, S. K.; MONIRA, S. **Understanding the fragmentation of microplastics into nano-plastics and removal of nano/microplastics from wastewater using membrane, air flotation and nano-ferrofluid processes**. Chemosphere, Vol. 282, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131053.

PROKOPOVA, M.; NOVOTNA, K.; PIVOKONSKA, L.; CERMAKOVA, L.; CAJTHAML, T.; PIVOKONSKY, M. **Coagulation of polyvinyl chloride microplastics by ferric and aluminium sulphate: Optimisation of reaction conditions and removal mechanisms**. Journal

of Environmental Chemical Engineering, Vol. 9, Issue 6, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106465.

POTAPOVA, E.; JOLSTERA, R.; HOLMGREN, A.; GRAHN, M. **The Effect of Inorganic Ions on Dodecylbenzenesulfonate Adsorption onto Hematite: an ATR-FTIR Study.** Journal of Surfactants and Detergents, v. 17, p. 1027-1034, 2014. DOI: 10.1007/s11743-014-1576-3.

RABELLO, M.; DE PAOLI, M. A. **Aditivação de Termoplásticos**, 1ª Edição, Artliber: São Paulo, 2013.

RAGUSA, A.; SVEATO, A.; SANTACROCE, C.; CATALANO, P.; NOTARSTEFANO, V.; CARNEVALI, O.; PAPA, F.; RONGIOLETTI, M. C. A.; BAIOTTO, F.; DRAGHI, S.; D'AMORE, E.; RINALDO, D.; MATTA, M.; GIORGINI, E. **Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta.** Environment International, Vol. 146, 2021. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106274.

RIBEIRO, M. P.; BOTARI, A. **Evaluation of effluent post-treatment by slow filtration and adsorption with activated carbon produced from spent coffee grounds in surfactant removal in sewage treatment.** Ambiente & Água, v. 17, n. 1, 2022. DOI :10.4136/ambi-agua.2756

RIZZATTI, I. M.; ZANETTE, D. R.; MELLO, L. C. **Determinação potenciométrica da concentração micelar crítica de surfactantes: uma nova aplicação metodológica no ensino de química.** Química Nova, v. 32, n. 2, p. 518-521, 2009.

RÓZ, A. L.; LEITE, F. L.; FERREIRA, M.; OLIVEIRA JR, O. N. **Nanoestruturas: Princípios e Aplicações.** 1ª Ed, Brasil, 2015.

SKAF, D. W.; PUNZI, V. L.; ROLLE, J. T.; KLEINBERG, K. A. **Removal of micron-sized microplastic particles from simulated drinking water via alum coagulation.** Chemical Engineering Journal, Vol. 386, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123807.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, v.01. Minas Gerais: ABES, 1995.

SHARMA, P.; VIDYARTHI, V. K. **Impact of microplastic intake via poultry products: Environmental toxicity and human health.** Journal of Hazardous Materials Advances. Vol. 14, 2024. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100426.

SPINANCÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. **A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros.** Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, 2004.

XIA, Y.; XIANG, X.; DONG, K.; GONG, Y.; LI, Z. **Surfactant stealth effect of microplastics in traditional coagulation process observed via 3-D fluorescence imaging.** Science of The Total Environment, Vol. 729, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138783.

XUE, J.; PELDSZUS, S.; DYKE, M. I.; HUCK, P. M. **Removal of polystyrene microplastic spheres by alum-based coagulation-flocculation-sedimentation (CFS) treatment of surface waters.** Chemical Engineering Journal, Vol. 422, 2021. DOI: 10.1016/j.cej.2021.130023.

YIN, L.; JIANG, C.; WEN, X.; DU, C.; ZHONG, W.; FENG, Z.; LONG, Y.; MA, Y.. **Microplastic Pollution in surface water of urban lakes in Changsha, China.** Environmental Research and Public Health, v.16, n.1650, 2019.

ZAFAR, R.; ARSHAD, Z.; CHOI, N. E.; LI, X.; HUR, J. **Unravelling the complex adsorption behavior of extracellular polymeric substances onto pristine and UV-aged microplastics using two-dimensional correlation spectroscopy.** Chemical Engineering Journal, Vol. 470, 2023. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144031.

ZHANG, Y.; DIEHL, A.; LEWANDOWSKI, A.; GOPALAKRISHNAN, K.; BAKER, T. **Removal efficiency of micro- and nanoplastics (180 nm–125 µm) during drinking water treatment.** Science of The Total Environment, Vol. 720, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137383.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU). **Microplastics in drinking-water.** ISBN 978-92-4-151619-8, Switzerland, 2019.