

Remoção do microplástico por meio de flotação por ar dissolvido

Microplastic removal with dissolved air flotation

Remoción de microplástico por medio de flotación por aire disuelto

DOI: 10.54033/cadpedv22n11-089

Originals received: 8/5/2025

Acceptance for publication: 8/29/2025

Geovana Célia Aparecida

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária
Instituição: Universidade Federal de Goiás (UFG)
Endereço: Goiânia, Goiás. Brasil
E-mail: geovanacelia@discente.ufg.br

Francisco Javier Cuba Teran

Doutor em Hidráulica e Saneamento
Instituição: Universidade Federal de Goiás (UFG)
Endereço: Goiânia, Goiás. Brasil
E-mail: paco@ufg.br

Renata Medici Frayne Cuba

Doutora em Hidráulica e Saneamento
Instituição: Universidade Federal de Goiás (UFG)
Endereço: Goiânia, Goiás. Brasil
E-mail: renatafrayne@ufg.br

RESUMO

A contaminação por microplásticos (MPs) representa um dos principais desafios ambientais, afetando ecossistemas aquáticos e podendo oferecer riscos à saúde humana. Este estudo avaliou a eficiência da flotação por ar dissolvido (FAD), associada à coagulação e floculação, na remoção de quatro tipos de MPs: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno (PE), politereftalato de etileno (PET) e poliestireno (PS). Os experimentos foram conduzidos em escala de bancada com flote de 2 L e recirculação de 20%. Três condições foram analisadas: (i) controle, (ii) coagulação com sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e (iii) coagulação associada à poliacrilamida aniônica (PAM). A eficiência foi quantificada pela redução da turbidez. Os resultados mostraram influência do tipo de polímero e da estratégia de tratamento. O PET apresentou a maior remoção (91,3%) com coagulação simples, atribuída à polaridade superficial. O PE obteve melhor desempenho (82,6%) com a adição de PAM, devido à formação de flocos mais

densos. O PEAD manteve elevadas taxas (>80%) em todas as condições, favorecido por sua baixa densidade. O PS foi o menos removido (máx. 66,2%), em razão da hidrofobicidade. Concluiu-se que a FAD combinada a coagulação-floculação é promissora para remover MPs, embora a eficiência dependa das propriedades específicas de cada polímero.

Palavras-chave: Microplástico. Flotação por Ar Dissolvido. Remoção de Poluentes. Coagulação-Floculação.

ABSTRACT

Environmental contamination by microplastics (MPs) has emerged as a major challenge, affecting aquatic ecosystems and posing potential risks to human health. This study evaluated the efficiency of dissolved air flotation (DAF), combined with coagulation and flocculation, for the removal of four types of MPs: high-density polyethylene (HDPE), polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), and polystyrene (PS). Bench-scale experiments were performed using a 2 L floteste unit with a 20% recycle ratio. Three experimental conditions were assessed: (i) control (only MPs in suspension), (ii) coagulation with aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), and (iii) coagulation combined with anionic polyacrylamide (PAM). Treatment efficiency was quantified by turbidity reduction. Results revealed that removal performance depended strongly on polymer type and treatment condition. PET achieved the highest removal (91.3%) under simple coagulation, attributed to its surface polarity. PE performed best (82.6%) when PAM was added, as denser flocs favored particle capture. HDPE consistently showed high removal (>80%) in all conditions, benefiting from its low density that enhanced flotation. In contrast, PS showed the lowest removal (max. 66.2%), explained by its high hydrophobicity that hindered interaction with coagulants. Overall, DAF integrated with coagulation–flocculation proved effective for MP removal; however, its efficiency is strongly dependent on the physicochemical properties of each polymer.

Keywords: Microplastics. Air Dissolved Flotation. Pollutants Removal. Coagulation-Flocculation.

RESUMEN

La contaminación ambiental por microplásticos (MPs) se ha convertido en un desafío crítico, con efectos sobre los ecosistemas acuáticos y riesgos potenciales para la salud humana. Este estudio evaluó la eficiencia de la flotación por aire disuelto (FAD), combinada con coagulación y floculación, en la eliminación de cuatro tipos de MPs: polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno (PE), politereftalato de etileno (PET) y poliestireno (PS). Los experimentos se realizaron a escala de laboratorio en un sistema floteste de 2 L con una tasa de recirculación del 20%. Se evaluaron tres condiciones experimentales: (i) control (solo MPs en suspensión), (ii) coagulación con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y (iii) coagulación combinada con poliácridamida aniónica (PAM). La eficiencia del tratamiento se cuantificó a través de la reducción de la turbidez. Los resultados mostraron que el desempeño dependió del tipo de polímero y de la estrategia de tratamiento. El PET alcanzó la mayor remoción (91,3%) con coagulación simple,

atribuida a su polaridad superficial. El PE obtuvo el mejor rendimiento (82,6%) con la adición de PAM, debido a la formación de flóculos más densos. El PEAD presentó altas eficiencias (>80%) en todas las condiciones, favorecido por su baja densidad. En contraste, el PS mostró la menor remoción (máx. 66,2%), explicada por su elevada hidrofobicidad. En conclusión, la FAD integrada con coagulación-floculación es prometedora para la eliminación de MPs, aunque su eficacia depende de las propiedades fisicoquímicas específicas de cada polímero.

Palabras clave: Microplásticos. Remoción por Aire Disuelto. Remoción de Poluentes. Coagulación-Floculación.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Montagner *et al.* (2021), os microplásticos (MP) são considerados contaminantes de presença global, encontrados em todos os compartimentos ambientais do planeta e originados de fontes diversas, tanto terrestres quanto aquáticas. A complexidade envolvida em avaliar a dimensão e os impactos dessa poluição torna a pesquisa sobre o tema multidisciplinar e ambientalmente desafiadora.

A dispersão ambiental de microplásticos está diretamente vinculada à grande escala de fabricação de plásticos e às falhas na gestão de seus resíduos. Além disso, a absorção progressiva dessas partículas pela fauna marinha e seu acúmulo ao longo da cadeia trófica podem levar a riscos à saúde humana por meio da ingestão de organismos contaminados (Vargas *et al.*, 2022).

De acordo com Alisson (2017), a persistência e mobilidade de polímeros comuns – como polipropileno e poliestireno – intensificam seu impacto negativo em ecossistemas aquáticos. Sua lenta taxa de degradação associada à baixa densidade permite que sejam transportados por correntes oceânicas e permaneçam por longos períodos no ambiente marinho e de água doce.

Conforme destacado em estudos recentes, persiste no Brasil uma necessidade significativa de investigação científica sobre microplásticos, envolvendo desde sua quantificação em diversos ecossistemas até a análise de seu destino ambiental, da eficácia limitada dos sistemas de tratamento de águas e efluentes na remoção desses contaminantes, e dos potenciais impactos ecológicos sobre a fauna nativa exposta (Montagner *et al.*, 2021).

De acordo com Ma *et al.* (2019), os flocos à base de alumínio são carregados positivamente em pH 7,0, eles podem anexar Poliacrilamida (PAM) aniônico carregado negativamente e formar um grande floco que captura partículas de MP.

A flotação por ar dissolvido (FAD) opera através da saturação de água com ar sob pressão, seguida pela formação de microbolhas que se ligam a poluentes, facilitando sua ascensão e remoção superficial por raspagem, sendo amplamente aplicada no tratamento de efluentes e água potável devido à sua eficácia (Lu, 2023).

Dessa forma, este trabalho teve a finalidade de verificar a remoção de MPs do meio líquido por meio da aplicação da técnica de FAD em diferentes MPs.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A contaminação global por microplásticos, devido ao seu acúmulo crescente e efeitos ecossistêmicos, é reconhecida como grave ameaça ambiental (Behera; Das, 2023).

Estudos demonstram que plásticos, sobretudo partículas microplásticas (<5 mm), acumulam-se em todos os oceanos, inclusive em regiões remotas como o Ártico e o Oceano Antártico, e ao longo das costas continentais. Evidências recentes, contudo, indicam que essa contaminação não se limita aos ecossistemas marinhos, estendendo-se também a ambientes de água doce, como lagos e rios (Ivleva, 2017).

Segundo Ali (2023), o desempenho da coagulação na remoção de micro e nanoplásticos (MPs/NPs) é influenciado por fatores relacionados às características das partículas (tamanho, forma, carga, química), aos parâmetros operacionais (tipo/dose de coagulante/floculante, ponto de aplicação) e às condições do meio (pH, salinidade, temperatura, matéria orgânica natural, poluentes, íons).

Tang (2022) destaca que a eficiência da coagulação na remoção de MPs é determinada por fatores internos (características do coagulante e dos próprios

MPs) e fatores externos (condições da qualidade da água e parâmetros operacionais), sendo a dosagem do coagulante, o tamanho do MP e o pH os principais fatores de influência.

Girish *et al.* (2023) ressalta que microplásticos (MPs) apresentam maior desafio à remoção por coagulação que outros contaminantes particulados, devido a propriedades como tamanho diminuto, alta área superficial, baixa densidade, hidrofobicidade e características superficiais distintas.

A coagulação isolada é insuficiente para remoção completa de MPs/NPs, requerendo integração com técnicas complementares. Dentre estas, a FAD destaca-se por remover partículas leves após a coagulação (Ali, 2023).

Polímeros sintéticos, devido a propriedades como leveza, custo acessível e adaptabilidade de fabricação, são amplamente empregados em segmentos industriais diversos — incluindo componentes automotivos, sistemas de tubulação, embalagens, reservatórios químicos e dispositivos médicos (Amjadi; Fatemi, 2021).

O Polietileno (PE) é um plástico que, quando sob um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições, sendo um exemplo de termoplástico. O polietileno é um polímero amplamente utilizado devido às suas características estruturais e propriedades. A versatilidade do polietileno deriva de suas ramificações poliméricas, cujo controle durante a síntese (via teor de comonômeros e distribuição estrutural) define propriedades como densidade e cristalinidade, influenciando diretamente seu uso (Coutinho *et al.*, 2023; Canevarolo, 2002). Ma *et al.* (2019) concluiu que quanto menor o tamanho das partículas de PE, maior a eficiência de remoção.

Os termoplásticos convencionais, poliestireno (PS) e Polietileno de Alta Densidade (PEAD), são polímeros de baixo custo, baixo nível de exigência mecânica, alta produção, facilidade de processamento etc. O PS destaca-se como o primeiro termoplástico a ser produzido em escala industrial. O polietilenotereftalato (PET) é um polímero de alta resistência mecânica (rigidez), boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional. (Canevarolo, 2002; Montenegro e Servaty, 2002).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e procedimentos experimentais adotados neste estudo são descritos a seguir.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados quatro tipos de microplásticos (MPs):

- PEAD (Polietileno de Alta Densidade): foi obtido a partir de um tubo de PEAD, comprado em ferragista local, por fragmentação mecânica, utilizando lixadeira elétrica;
- Polietileno: Material preexistente no laboratório;
- PET (Politereftalato de Etileno): Derivado de garrafas plásticas triturada por fragmentação mecânica, utilizando lixadeira elétrica;
- Poliestireno: Proveniente de cadeiras de festa, submetido a resfriamento com nitrogênio líquido para facilitar a fragmentação;
- Poliacrilamida (PAM): Material preexistente no laboratório.

3.2 REAGENTES E SOLUÇÕES

As soluções foram preparadas utilizando água destilada e matriz de teste utilizou água de abastecimento. O coagulante utilizado foi o Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), com a concentração 30 mg/L, foi produzida uma solução de 1 g de polímero poliacrilamida aniônica (utilizada como auxiliar de coagulação) diluída em 200 mL de água destilada, utilizando 1 mL da solução por jarro.

Devido à sua natureza anfifílica, os surfactantes podem reduzir a tensão interfacial, no trabalho foram utilizadas algumas gotas de surfactante não iônico monolaurato sorbitano de polietilenoglicol (Tween-20) (Weiszhár, 2012).

Os equipamentos incluíram jar test (para agitação controlada), turbidímetro (medição de turbidez) e pHmetro (aferir pH).

Foram utilizados 3 jarros do jar test e as amostras foram preparadas com 400 mg/L de MPs em 2 L de água de abastecimento.

3.3 ENSAIOS

Os experimentos foram conduzidos em um sistema integrado de floteste de bancada (marca Milan), composto por uma câmara de pressurização e três jarros de coagulação-floculação-flotação com capacidade de 2 L cada, acoplados a um motor-agitador de rotação controlável. A câmara de pressurização operou a 6 bar (600 kPa), pressão otimizada para gerar microbolhas de 100 a 300 µm de diâmetro. A taxa de recirculação de água saturada foi fixada em 20% do volume do jarro, correspondendo a 400 mL injetados nos 2 L de cada unidade experimental.

As configurações testadas por MP foram: Jarro 1 (Controle): MPs + água; Jarro 2 (Coagulação): MPs + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; Jarro 3 (Coagulação-floculação): MPs + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + PAM.

O protocolo experimental iniciou com o preparo das amostras: adição de 400 mg/L de MPs em 2 L de água de torneira e tween-20, então foram aferidos turbidez e pH inicial.

A etapa de coagulação-floculação foi realizada nos jarros Milan sob duas fases:

- agitação rápida (400 rpm, 1 min) com adição de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ no Jarro 2 e Jarro 3;
- agitação lenta (50 rpm, 15 min) com injeção de poliacrilamida aniônica exclusivamente no Jarro 3.

A FAD consistiu na injeção de 400 mL de água saturada em cada jarro, seguida de 15 min de repouso para ascensão dos flocos. Por fim, foram aferidos turbidez e pH final e calculando-se a eficiência de remoção pela equação 1;

$$n = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100 \quad (1)$$

onde:

n = eficiência de remoção (%);

Ti = turbidez inicial antes do tratamento (NTU); Tf = turbidez final depois do tratamento

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

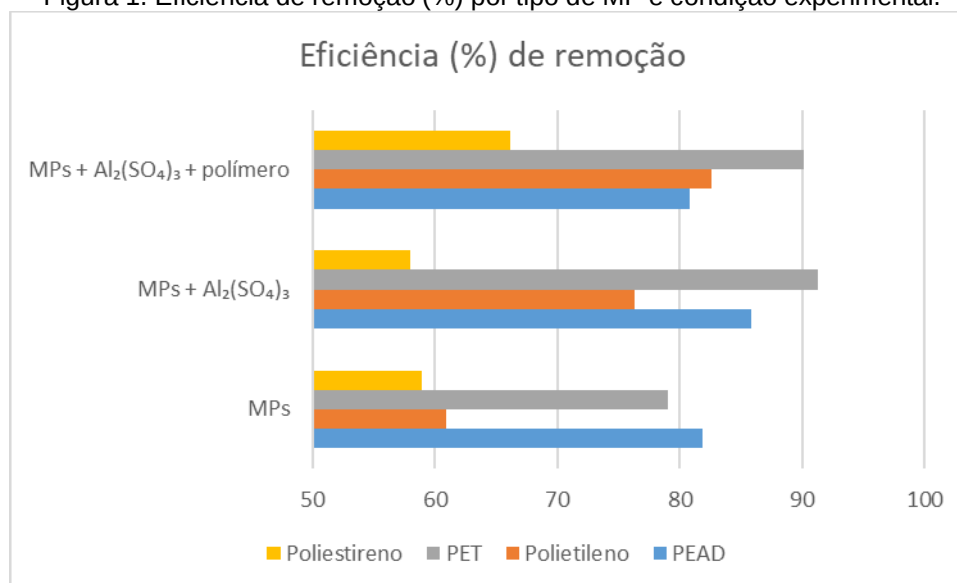
Os resultados da remoção de microplásticos (MPs) por flotação por ar dissolvido (FAD) sob diferentes condições experimentais são apresentados na Tabela 1 e sintetizados no gráfico associado na Figura 1. As eficiências de remoção variaram significativamente conforme o tipo de polímero e o estágio de tratamento, observando o tipo de plástico e as mudanças no pH causadas pelo tratamento.

Tabela 1. Eficiência de remoção (%) por tipo de MP e condição experimental.

Microplástico	MPs (Controle)	MPs + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	MPs + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + PAM
PEAD	81,9	85,8	80,8
Polietileno	60,9	76,3	82,6
PET	79,0	91,3	90,1
Poliestireno	58,9	58,0	66,2

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

Figura 1. Eficiência de remoção (%) por tipo de MP e condição experimental.



Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

Na condição de controle (apenas FAD), PEAD (81,9%) e PET (79,0%) apresentaram remoções naturalmente elevadas devido à baixa densidade e hidrofobicidade moderada, que favoreceram a adesão às microbolhas. Em contraste, PE (60,9%) e PS (58,9%) exibiram desempenho inferior, refletindo desafios inerentes às suas propriedades superficiais.

A coagulação com sulfato de alumínio elevou a eficiência para a maioria dos MPs, com destaque para PET (91,3%) e PE (76,3%), decorrente da neutralização de cargas e formação de pontes de Al^{3+} . O PET beneficiou-se de grupos ésteres polares, enquanto partículas irregulares de PE permitiram maior captura. Excepcionalmente, o PS manteve baixa remoção (58,0%) devido à hidrofobicidade extrema. As alterações de pH foram modestas (Tabela 2 e 3): reduções de 0,5–0,8 unidades em PS e PEAD com coagulante (pH final ~7,0) pela hidrólise ácida, enquanto demais condições mantiveram neutralidade (7,20–8,01).

Tabela 2. pH inicial por tipo de MP e condição experimental.

Microplástico	MPs (Controle)	MPs + $Al_2(SO_4)_3$	MPs + $Al_2(SO_4)_3$ + PAM
PEAD	7,34	7,61	7,66
Polietileno	8,08	8,04	7,98
PET	7,32	7,22	7,9
Poliestireno	7,99	7,82	7,89

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

Tabela 3. pH final por tipo de MP e condição experimental.

Microplástico	MPs (Controle)	MPs + $Al_2(SO_4)_3$	MPs + $Al_2(SO_4)_3$ + PAM
PEAD	7,39	6,92	7,56
Polietileno	7,95	7,93	7,89
PET	7,58	7,3	7,2
Poliestireno	8,01	7,03	7,03

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

No entanto, foi observada baixa eficiência de remoção no processo de coagulação com dosagem convencional para PE. Com a variação das propriedades dos flocos induzida pelo pH da solução ou pela PAM, a eficiência de remoção de PE aumentou, especialmente com a PAM aniônica na presença de uma alta dosagem de sais à base de Al (Ma *et al.*, 2019).

A adição de poliacrilamida aniônica (PAM) na floculação gerou respostas divergentes: beneficiou o PE (82,6%) por formar flocos densos, mas reduziu a eficiência do PEAD (80,8%) por desestabilização eletrostática. O PET manteve alta remoção (90,1%), e o PS registrou ganho marginal (66,2%), reforçando a necessidade de estratégias alternativas para MPs super-hidrofóbicos.

5 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a flotação por ar dissolvido (FAD), quando integrada à coagulação com sulfato de alumínio e/ou floculação com poliacrilamida aniônica (PAM), é eficaz para remoção de microplásticos (MPs) em meio aquoso, porém com eficiência criticamente dependente das propriedades físico-químicas de cada polímero: o PET obteve máxima remoção (91,3%) via coagulação simples, beneficiando-se de sua polaridade superficial; o PE alcançou melhor desempenho (82,6%) com adição de PAM, que favoreceu a formação de flocos densos; o PEAD manteve alta eficiência (>80%) em todas as condições devido à sua baixa densidade, enquanto o PS apresentou remoção limitada ($\leq 66,2\%$) pela extrema hidrofobicidade, reforçando a necessidade de estratégias específicas para MPs de remoção complexa. A técnica mostrou-se promissora, com alterações mínimas de pH, mas demanda ajustes conforme o tipo de MP e esquema de tratamento para melhores resultados.

Os resultados deste trabalho trazem contribuições relevantes tanto para a sociedade quanto para a academia. No âmbito científico, ampliam o entendimento sobre a remoção de microplásticos envelhecidos em processos de tratamento de água, oferecendo subsídios para novas pesquisas e aprimoramento de metodologias na área de engenharia ambiental. Do ponto de vista social, os achados reforçam a importância do desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e eficazes para a remoção de contaminantes emergentes, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos, a formulação de políticas públicas e, consequentemente, para a melhoria da qualidade ambiental e da saúde da população.

Apesar das contribuições alcançadas, esta pesquisa apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Os experimentos foram conduzidos em escala de bancada, o que pode não reproduzir integralmente as condições operacionais de sistemas em escala real. Outro aspecto a destacar é que fatores como a variabilidade natural da qualidade da água, a presença de contaminantes mistos e a influência de parâmetros operacionais adicionais não foram contemplados neste estudo. Tais limitações

indicam a necessidade de investigações futuras em condições mais próximas da realidade, que considerem diferentes matrizes aquosas, escalas maiores de operação e interações múltiplas entre contaminantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que possibilitaram a realização e a publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALI, Imran *et al.* Recent innovations in microplastics and nanoplastics removal by coagulation technique: Implementations, knowledge gaps and prospects. **Water Research**, v. 245, p. 120617, 2023.

ALISSON, Elton. Ambientes marinhos e de água doce no Brasil sofrem com poluição por microplásticos. **INFOCIRM**, v. 29, n. 2, p. 14-15, 2017.

AMJADI, Mohammad; FATEMI, Ali. Comportamento de fluência e modelagem de polietileno de alta densidade (PEAD). **Polymer Testing**, v. 94, p. 107031, 2021.

BEHERA, Shivananda; DAS, Surajit. Impactos ambientais do microplástico e o papel dos micróbios da plastisfera na biodegradação e upcycling do microplástico. **Chemosphere**, v. 334, p. 138928, 2023.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, v. 24, p. 18, 2002.

COUTINHO, Fernanda; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, v. 13, p. 01-13, 2003.

GIRISH, Nandika; PARASHAR, Neha; HAIT, Subrata. Coagulative removal of microplastics from aqueous matrices: recent progresses and future perspectives. **Science of The Total Environment**, v. 899, p. 165723, 2023.

IVLEVA, Natalia P.; WIESHEU, Alexandra C.; NIESSNER, Reinhard. Microplástico em ecossistemas aquáticos. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 56, n. 7, p. 1720-1739, 2017.

LU, Yang *et al.* Microplastic remediation technologies in water and wastewater treatment processes: Current status and future perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 868, p. 161618, 2023.

MA, Baiwen *et al.* Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 359, p. 159-167, 2019.

MONTAGNER, Cassiana C. *et al.* Microplásticos: ocorrência ambiental e desafios analíticos. **Química nova**, v. 44, n. 10, p. 1328-1352, 2021.

MONTENEGRO, Ricardo Sá Peixoto; SERFATY, Moysés Elias. Aspectos gerais do poliestireno. 2002.

TANG, Wenhao *et al.* The removal of microplastics from water by coagulation: A comprehensive review. **Science of the total Environment**, v. 851, p. 158224, 2022.

VARGAS, Julia Gabriela Matos *et al.* Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático. **Química Nova**, v. 45, n. 06, p. 705-711, 2022.

WEISZHÁR, Zsóka *et al.* Ativação do complemento por surfactantes farmacêuticos polietoxilados: Cremophor-EL, Tween-80 e Tween-20. **Revista Europeia de Ciências Farmacêuticas**, v. 45, n. 4, p. 492-498, 2012.