

REMOÇÃO DE MICROPLÁSTICO DO MEIO LÍQUIDO POR FLOTAÇÃO COM AR DISSOLVIDO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.15.24.IX-023>

Pollyana Martins Silva (*), Francisco Javier Cuba Terán

* Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Civil e Ambiental. E-mail: pollyanamartinssilva7@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste estudo foi verificar a remoção de microplástico (MPs) do meio líquido por meio da aplicação da técnica de flotação com ar dissolvido (FAD). Os ensaios foram realizados em um flote para determinação das condições ideais de operação, sendo a dosagem de coagulante e as condições operacionais da FAD taxa de recirculação e tempo de flotação. A suspensão analisada era constituída por 2 L de água de abastecimento, 400 mg/L de MPs de PVC, 5 mL/L do surfactante Tween-20, coagulante sulfato de alumínio em dosagens de 2,5 a 6,0 mg/L. O parâmetro utilizado para verificar a remoção de MPs foi a turbidez. As condições ótimas para remoção de MPs foi em dosagem de coagulante de 3,01 mg/L e condições operacionais de FAD, taxa de recirculação de 10% e tempo de flotação de 15 min, obtendo uma turbidez residual de 7,31 NTU.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água, PVC, flote, poluente emergente.

INTRODUÇÃO

Os microplásticos são um problema iminente na atualidade. Apresentam efeitos tóxicos em diferentes animais, na flora e nos seres humanos. Por terem a capacidade de adsorver poluentes orgânicos persistentes (POP) e metais pesados em sua superfície hidrofóbica e serem micropartículas biocumulativas, contribuem para o acúmulo destes contaminantes nos níveis tróficos ao longo das cadeias alimentares e assim alcançam os animais e seres humanos ao serem consumidos e/ou absorvidos (ROJO-NIETO; MONTOTO, 2017).

Na literatura em geral, os MPs são definidos como pequenos fragmentos plásticos, de dimensões inferiores a 5 mm (TALVITIE *et al.*, 2017), podendo ser classificados como primários, os fabricados em dimensões micro, adicionados em produtos do setor de cosméticos, higiene pessoal e secundários, resultantes de degradações físicas (fotodegradação) e químicas (oxidação) de plásticos maiores (ROJO-NIETO; MONTOTO, 2017).

Os efeitos diretos dos MPs aos animais são diversos, podendo causar a morte por subnutrição, obstrução do trato digestivo, diminuição da prole, entre outros. Nos seres humanos, podem causar lesões no sistema respiratório, doenças pulmonares e atravessar membranas celulares (PRATA *et al.*, 2020; ROJO-NIETO; MONTOTO, 2017).

Diferentes autores reportaram a presença dos MPs no corpo humano, placenta humana (RAGUSA *et al.*, 2021), no meio ambiente aquático (SHAHI *et al.*, 2020), em alimentos, bebidas, no meio líquido, ar (PRATA *et al.*, 2020), portanto a remoção dos MPs do meio ambiente é imprescindível.

Com aumento da poluição por MPs e a necessidade em removê-los do meio líquido diferentes técnicas, comumente utilizadas em sistemas de tratamento de águas e efluentes, já foram avaliadas, entre elas tem-se a eletrocoagulação (TERAN *et al.*, 2023), coagulação química e floculação (OLIVEIRA *et al.*, 2023), a filtração rápida, biorreator de membranas, filtros biologicamente ativados e FAD (TALVITIE *et al.*, 2017).

A flotação com ar dissolvido, é uma técnica amplamente utilizada para clarificação de água e recuperação de sólidos (SWART *et al.*, 2022) e que apresenta grande potencial para remoção de MPs devido às características hidrofóbicas destas partículas que induzem sua flutuação (TALVITIE *et al.*, 2017). Essa técnica consiste na introdução de bolhas de ar ao sistema, o ar é dissolvido em pressões altas em uma câmara de saturação e micro-bolhas são formadas à pressão atmosférica. Quando a água saturada com ar é liberada na coluna de flotação, as bolhas formadas aderem aos microplásticos, aumentando a ascensão dessas partículas até a superfície do líquido, sendo o objetivo da FAD diminuir a densidade das partículas plásticas e aumentar a velocidade de ascensão das mesmas (ESFANDIARI; MOWLA, 2021). Ainda, do ponto de vista de sustentabilidade ambiental, a FAD é uma técnica que produz lodo de fácil tratamento por não demandar altas doses de coagulante, quando comparado às técnicas de coagulação/floculação e sedimentação (ESFANDIARI; MOWLA, 2021).

Desta forma, acredita-se que a aplicação da FAD para remoção de MP advindo de PVC apresentará eficiente remoção de partículas em intervalo de tempo compatível com os sistemas de tratamento de água.

OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo verificar a remoção de MPs do meio líquido por meio da aplicação da técnica de flotação com ar dissolvido, avaliando a dosagem de coagulante sulfato de alumínio e as condições ótimas de operação em termos de taxa de recirculação de água saturada e tempo de flotação.

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA/UFG) da Universidade Federal de Goiás (UFG), localizado na cidade de Goiânia.

O microplástico utilizado na presente pesquisa foram partículas obtidas por fragmentação mecânica de um tubo de PVC, comprado em comércio local, utilizando lixadeira elétrica.

Os reagentes utilizados foram de grau analítico e soluções preparadas com água destilada. O coagulante utilizado foi sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) da Perfyl Tech Química. A escolha do ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) se deu por conta do seu uso recorrente em tratamento de água e a baixa massa molecular do precipitado ($\text{Al}(\text{OH})_3$) comparada com a do precipitado de cloreto férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$).

Para ajuste de pH, quando necessário, foram utilizadas soluções de ácido clorídrico (HCl) 0,1 M (Dinâmica Química Contemporânea) e o hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M (Cinética Reagentes e Soluções). Para umectação do MP foi utilizado surfactante não iônico monolaurato de sorbitano de polietilenoglicol (Tween-20) (SWART *et al.*, 2022).

Os experimentos de flotação foram realizados utilizando floteste escala de bancada marca Milan, pesquisa, constituído de uma câmara de pressurização, três jarros de coagulação-floculação-flotação com capacidade volumétrica de 2 L e um conjunto motor-agitador, conforme apresentado na Figura 1.

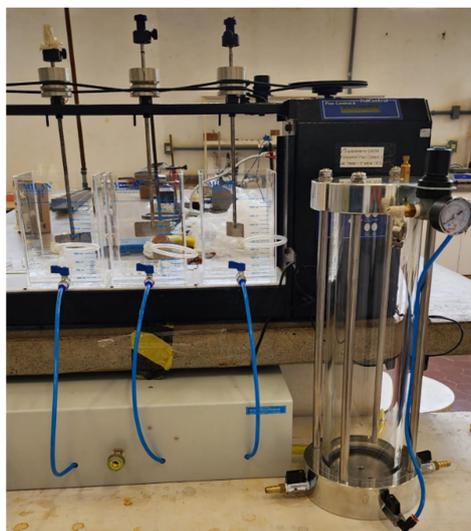


Figura 1: Sistema de flotação utilizado nos ensaios. Fonte: Autores, 2024.

As condições de coagulação, floculação e flotação foram: 1 minuto (400 rpm), 15 minutos (50 rpm) e 5, 10, 15 e 20 minutos (sem rotação) respectivamente. O pH durante os ensaios foi ajustado entre 7,0 e 8,0, essa faixa de pH trabalhada foi escolhida pelos ótimos resultados obtidos nos ensaios testes de pH, que foram feitos na faixa de 3,5 a 5 para evitar a formação de precipitados, tentando desestabilizar as partículas no mecanismo da adsorção e neutralização de carga. Como os resultados não foram satisfatórios partiu-se para a aplicação do mecanismo de varredura com pH na faixa de 7 a 8. As doses de sulfato de alumínio estudadas foram entre 2,5 mg/L e 6,0 mg/L, conforme proposto por de Oliveira *et al.* (2023), por ter resultados satisfatórios de remoção de MPs em pequenas dosagens de coagulante.

As condições operacionais da FAD, sendo taxa de recirculação de água saturada e tempo de flotação, realizados para análise de seus efeitos na remoção de MPs de PVC do meio líquido. Após o ensaio de cada parâmetro estudado, usou o

melhor resultado nos ensaios subsequentes, sendo os primeiros de dosagem de coagulante, seguido de taxa de recirculação e último de tempo de flotação.

As taxas de recirculação trabalhadas foram 5, 10 e 20%, que correspondem a respectivamente a 100, 200 e 400 mL, nos 2 L de cada jarro, onde 5% correspondia a uma altura de 0,7 cm, 10% a 1,4 cm e 20% a 2,8 cm, escolheu esses valores de taxas segundo propõem os autores Di Bernardo *et al.* (2002), que tem que ser igual ou superior a 5%, a taxa mínima recomendada. E os tempos de flotação foram de 5, 10, 15 e 20 min.

A suspensão contendo o MP foi preparada a partir 2 L de água de abastecimento, contendo MP na concentração de 400 mg/L (OLIVEIRA *et al.*, 2023) e 5 mL/L do surfactante Tween-20, adicionado para se ter a umectação dos MPs e evitar sua aderência na paredes dos jarros. Essa concentração equivale a 12% da sua concentração crítica de micela (CMC = 0,06 mM) (SWART *et al.*, 2022).

No término de cada ensaio foram coletadas amostras de cada jarro e medida a turbidez utilizando turbidímetro PoliControl AP2000 para calcular a eficiência do tratamento (Eq. 1).

$$MP_{\text{remoção}} = (T_i - T_f / T_i) * 100\% \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

$MP_{\text{remoção}}$ = eficiência de remoção (%)

T_i = turbidez inicial antes do tratamento (NTU)

T_f = turbidez final depois do tratamento (NTU)

A escolha da turbidez como parâmetro de análise da remoção dos MPs foi definida com base nos resultados de estudos anteriores (SHAHI *et al.*, 2020; SKAF *et al.*, 2020) que mostraram que a turbidez é um parâmetro indicativo da presença e remoção dos MPs.

RESULTADOS

Na Figura 2 são apresentados os resultados da eficiência de remoção dos MPs de PVC em função do pH de coagulação. A eficiência de remoção de MPs foi maior na faixa de pH de 7,0 a 8,0, justificando a escolha de tal faixa para os ensaios. Em pH de 4,09, 4,2 e 7,05 a remoção foi de 72,4, 59, 70,4, e 73,4% respectivamente.

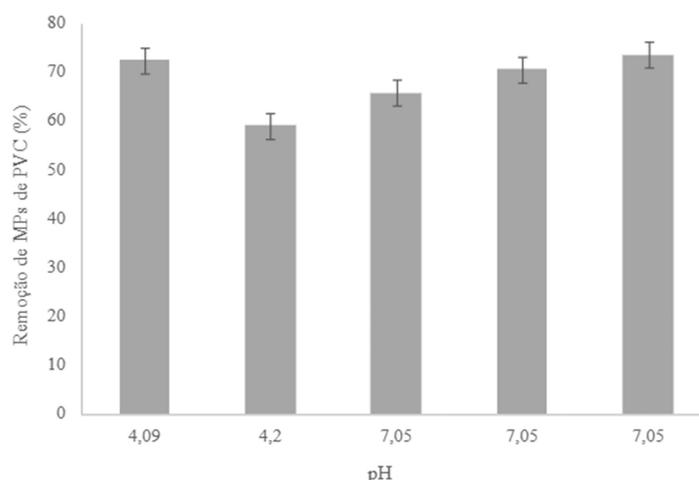
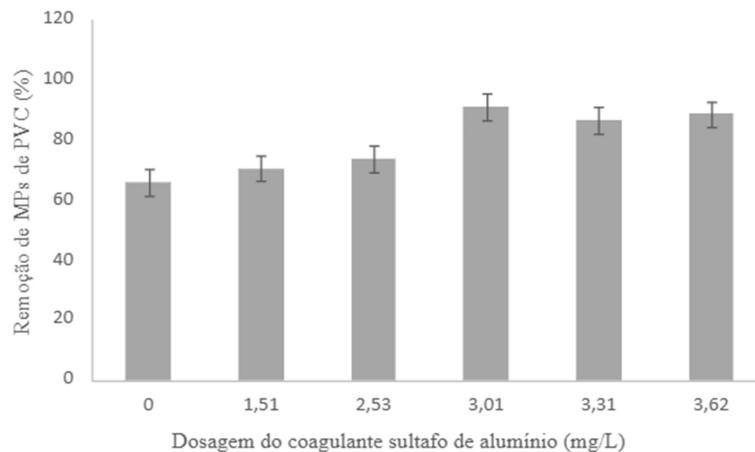


Figura 2: Eficiência de remoção de microplásticos de PVC em faixa de pH. Fonte: Autores, 2024.

Com valores de pH próximos de 7, a dosagem de coagulante que obteve melhor eficiência de remoção de MPs no meio líquido foi a de 3,01 mg/L com 90,9% de eficiência e turbidez residual inicial de 80,05 e final de 7,31 NTU, utilizada nos demais ensaios, como mostra a Figura 3. Em dosagens iniciais de 0, 1,51 e 2,53 mg/L a remoção foi estatisticamente semelhante, porque ao aumentar a dosagem de 1,51 para 2,53 mg/L, quase 70% a mais a remoção passou de 70,4 para 73,4%, um aumento cerca de 5% apenas. Aumentos adicionais de 19% na dosagem de coagulante de 1,51 para 3,01 mg/L, a remoção foi de 73,4 para 90,9%, aumento de mais de 20% na remoção tendo uma diferença significativa estatisticamente dessa dosagens com as anteriores, mas em doses maiores de 3,31 e 3,62 mg/L, mesmo a eficiência diminuindo para 86,5 e 88,3% respectivamente, a porcentagem de remoção não foi expressiva, podendo indicar um erro no equipamento usado.



Nota: pH= 7

Figura 3: Eficiência de remoção de microplásticos de PVC para diferentes dosagens de coagulante. Fonte: Autores, 2024.

Nessa dosagem ótima de coagulante de 3,01 mg/L e em pH em torno de 7, na coagulação o mecanismo predominante é o da varredura, conforme diagrama de solubilidade sulfato de alumínio (DI BERNARDO *et al.*, 2017). Na coagulação por varredura formam-se os precipitados do coagulante sulfato de alumínio, o hidróxido de alumínio (Al(OH)₃(p)), que forma com os MPs uma estrutura estável de ser removida (ESFANDIARI; MOWLA, 2021) com flocos de densidade superior à da água, contribuindo para a o arraste desses flocos pelas bolhas contidas na água saturada sem permitir a sedimentação dos mesmos (LIBÂNIO, 2010).

Diferentes estudos de remoção de microplásticos de meios líquidos que tiveram como etapa a coagulação/floculação, apresentaram dosagens ótimas de coagulantes à base de alumínio e pH de coagulação diferentes entre si e desse estudo, mas a presente pesquisa obteve resultados melhores de remoção de MPs acima de 90% em dosagem menor de coagulante de 3,01 mg/L em comparação a esses estudos, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1. MPs usados, dosagens ótimas de coagulante, pH e eficiência de remoção de MPs em diferentes estudos. Fonte: Autores, 2024.

Autor/Ano	MP usado	Dosagem de coagulante (mg/L)	pH	Eficiência de remoção de MPs (%)
Esfandiari e Mowla (2021)	PE	15	6,0	59,5
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	PE	4,25	5,0	96,81
	EPS	6,0	4,0	96,30
Shahi <i>et al.</i> (2020)	PE	30	7,0	70,7
Skaf <i>et al.</i> (2020)	Microesferas de PE, rayon e poliéster	4,8	6,5	97,0

Segundo apresentado na Tabela 1, os estudos de Oliveira *et al.* (2023) e Skaf *et al.* (2020), tiveram melhor resultado na eficiência de remoção de MPs do meio líquido, por obterem altas eficiências de remoção acima de 95%, usando uma dosagem menor de coagulante a base de alumínio entre 4,25 e 6,0 mg/L, comparado aos estudos de Esfandiari e Mowla (2021) e Shahi *et al.* (2020) que utilizaram altas doses de coagulante, o primeiro 15 mg/L e o segundo 30 mg/L e tiveram remoções inferiores de 59,5 e 70,7% respectivamente.

As discrepâncias dos resultados nos diferentes estudos, ocorrem porque os MPs possuem formas, tamanhos e morfologia superficiais diferentes, que influenciam nos mecanismos de remoção de coagulação e floculação (SHAHI *et al.*, 2020).

Nas condições operacionais da técnica de FAD analisadas, na taxa de recirculação os 10% (200 mL) de água recirculada saturada teve o melhor desempenho na remoção dos microplásticos, como mostra a Figura 4. As taxas de recirculação não tiveram diferença significativa entre elas, em 100 mL (5%) de água recirculada a remoção era de 79,1%, ao aumentar para 200 mL (10%) a remoção aumentou substancialmente de 79,1 para 90,9% um aumento de 15%, mas quando se aumentou para 400 mL (20%), a eficiência tem ligeira queda de cerca de 2% indo para 89%. E esperava-se que em taxa de recirculação maior a eficiência de remoção aumentasse, porque é injetado do tanque de flotação um número maior de bolhas que aumenta a interceptação dos MPs com as bolhas (SWART *et al.*, 2022).

No estudo de Esfandiari e Mowla (2021), a taxa de recirculação foi de 20%, diferente da encontrada na presente pesquisa, mas não é explicado o porquê escolheu esse valor de recirculação para FAD na pesquisa.

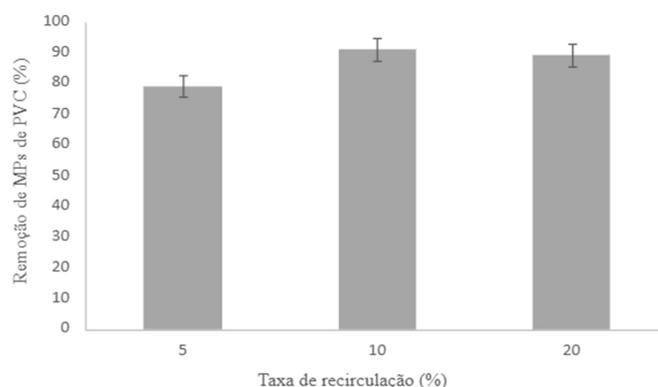


Figura 4: Eficiência de remoção de microplástico de PVC para diferentes taxas de recirculação. Fonte: Autores, 2024.

Nos tempos de flotação estudados, o tempo de 15 min a eficiência de remoção dos MPs foi superior comparado aos demais tempos de 90,9%, como mostra a Figura 5. Anterior a esse tempo ótimo a remoção era de apenas 78,8% para o tempo de 5 min, aumentando em 100% o tempo para 10 min a eficiência aumenta apenas cerca de 4%, de 78,8 para 81,9%, sendo pouco significativo aumentando em 50% o tempo para 15 min a eficiência tem um aumento significativo em 11%, indo de 81,9 para 90,9%, mas ao aumentar o tempo para 20 min a eficiência tem um decaimento de 6%, passando para 85,1% de remoção. O tempo de flotação em outras pesquisas foram de 2 min (SWART *et al.*, 2022) e de 5 min (ESFANDIARI; MOWLA, 2021).

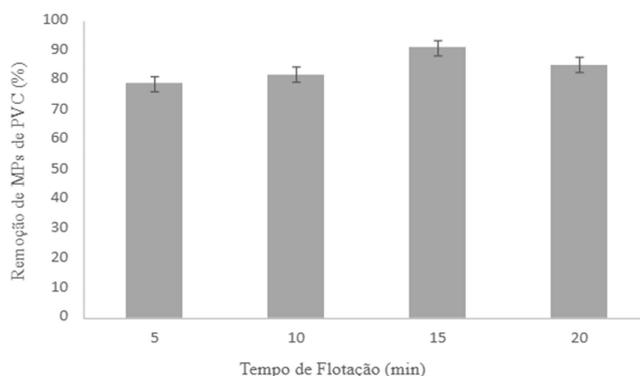


Figura 5: Eficiência de remoção de microplástico de PVC para diferentes tempos de flotação. Fonte: Autores, 2024.

A técnica de FAD aplicada na pesquisa é capaz de remover MPs de meio líquido de forma eficiente, tendo como parâmetro de análise a turbidez residual, porque apresenta elevada taxa de remoção de MPs igual a 90,9%, similar à encontrada em outros estudos, apesar dos resultados divergentes da pesquisa com esses estudos. A exemplo, na pesquisa de Talvitie *et al.* (2017), a FAD removeu 95% dos MPs, já na de Swart *et al.* (2022) reportaram uma remoção de 66% para MPs de PVC e Esfandiari e Mowla (2021) relatam um eficiência de 96,1% de MPs de PE usando coagulante a base de alumínio.

Em contrapartida, esses estudos diferem nos seus objetivos, características e propriedades do meio líquido analisados, dos MPs e das condições operacionais, apesar de utilizar a mesma técnica de FAD para remoção dos MPs, o que torna difícil a comparação entre os estudos (XUE *et al.*, 2021). No estudo de Swart *et al.* (2022), o objetivo era analisar a interação entre os formatos, tamanhos e quantidade de diferentes partículas de microplásticos na flotação, ao aumentar o número de microbolhas injetadas no tanque. Já o de Esfandiari e Mowla (2021), era estudar a eficiência da coagulação combinada com FAD na remoção de MPs de PE de águas cinzas e as interações entre as partículas e bolhas e no de Talvitie *et al.* (2017), analisar a eficiência das tecnologias avançadas de tratamento final em ETAR, de filtro de disco, filtração rápida em areia, FAD e biorreator de membrana, na remoção dos MPs de efluentes.

CONCLUSÃO

A eficiência de remoção de MPs de PVC do meio líquido por FAD, foi estudada quanto às condições ótimas de dosagem de coagulante sulfato de alumínio, taxa de recirculação e tempo de flotação. Os melhores resultados foram dosagem de coagulante de 3,01 mg/L, em pH de coagulação 7 configurando o mecanismo de varredura, taxa de recirculação de 10% (200 mL) e tempo de flotação de 15 min, configurando a técnica usada como meio de remoção eficiente de MPs de meios líquidos acima de 90%. Sugere-se efetuar mais estudos das condições operacionais de FAD na remoção de MPs, dosagens de diferentes coagulantes orgânicos, pH de coagulação, combinação de outras técnicas de remoção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DI BERNARDO, Luiz *et al.* **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos: LDiBe, 2017.
2. DI BERNARDO, Luiz *et al.* **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: RiMa, 2002.
3. ESFANDIARI, Atefeh; MOWLA, Dariush. Investigação da remoção de microplásticos de águas cinzas por coagulação e flotação com ar dissolvido. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 151, p. 341-354, jul. 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.027>.
4. LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3. ed. [S.L.]: Átomo, 2010.
5. OLIVEIRA, Thaynara Lorryne de *et al.* Coagulação Química Aplicada para Remoção de Polietileno e microplásticos de poliestireno expandido. **Journal Of Ecological Engineering**, [S.L.], v. 24, n. 11, p. 163-168, 1 nov. 2023. <http://doi.org/10.12911/22998993/171525>.
6. PRATA, Joana Correia *et al.* Exposição ambiental a microplásticos: Uma visão geral sobre possíveis efeitos na saúde humana. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 702, p. 134455, fev. 2020. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>.
7. RAGUSA, Antonio *et al.* Placenta: primeira evidência de microplásticos na placenta humana. **Environment International**, [S.L.], v. 146, p. 106274, jan. 2021. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>.
8. ROJO-NIETO, Elisa; MARTÍNEZ, Tania Montoto. **Lixo marinho, plásticos e microplásticos: origens, impactos e consequências de uma ameaça global**. [S.L.]: Ecologistas en Acción, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10553/56275>.
9. SHAHI, Nirmal Kumar *et al.* Comportamento de remoção de microplásticos utilizando coagulante de alumínio e seu realce com areia revestida de poliamina. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 141, p. 9-17, set. 2020. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.020>.
10. SKAF, Dorothy W. *et al.* Remoção de partículas de microplástico do tamanho de microns da água potável simulada via coagulação de alumínio. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 386, p. 123807, abr. 2020. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123807>.
11. SWART, Bert *et al.* Interações microbolhas-microplásticos na flotação por ar em batelada. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 449, p. 137866, dez. 2022. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137866>.
12. TALVITIE, Julia *et al.* Soluções para a poluição por microplásticos-Remoção de microplásticos de efluentes de águas residuais com tecnologias avançadas de tratamento de águas residuais. **Water Research**, [S.L.], v. 123, p. 401-407, out. 2017. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>.
13. TERAN, Francisco Javier Cuba *et al.* Análise da Eficiência do Processo de Eletrocoagulação na Remoção de Microplásticos. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo (SP), v. 17, n. 3, p. e03280, 2023. <http://doi.org/10.24857/rgsa.v17n3-027>.
14. XUE, Jinkai *et al.* Remoção de esferas microplásticas de poliestireno pelo tratamento de águas superficiais com coagulação-floculação-sedimentação (CFS) à base de alumínio. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 422, p. 130023, out. 2021. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130023>.