

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

STEFFANY RINCON PETERS

**Análise de Técnicas de Remediação para a Mitigação de Micro e Nanoplásticos em
Oceanos com base na Revisão da Literatura**

São Paulo

2024

Análise de Técnicas de Remediação para a Mitigação de Micro e Nanoplásticos em Oceanos com base na Revisão da Literatura

Versão Corrigida

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Prof.a Carolina Afonso Pinto

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Peters, Steffany

Análise de Técnicas de Remediação para a Mitigação de Micro e Nanoplásticos em Oceanos com base na Revisão da Literatura. / S. Peters -- São Paulo, 2024.

46 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Oceanos 2.Poluição de águas naturais 3.Contaminação 4.Técnicas de remediação 5.Microplásticos e Nanoplásticos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão à minha família por seu constante apoio em todas as decisões que tomei. Um agradecimento especial ao meu companheiro, Gilberto, por seu incentivo na minha busca por novos conhecimentos. Ao meu querido Heitor, que sempre esperava pacientemente por mim para brincar enquanto eu me dedicava aos estudos.

Não posso deixar de mencionar minha amiga Priscila, cuja amizade foi um verdadeiro suporte e fonte constante de estímulo para me dedicar aos estudos.

À Professora Carolina e à tutora Jacqueline, expresso minha sincera gratidão por serem minhas guias na elaboração deste trabalho. Seu apoio e orientação foram fundamentais para o a conclusão desta jornada acadêmica.

RESUMO

Rincon Peters, Steffany. Análise de Técnicas de Remediação para a Mitigação de Micro e Nanoplásticos em Oceanos com base na Revisão da Literatura. 2024. 46 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A preocupação global com a presença crescente de microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) em ecossistema marinho tem impulsionado a pesquisa de métodos eficazes de remoção desses poluentes. Diante disto, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica em publicações científicas relacionadas ao tema e dentre os estudos identificados, dois foram selecionados e analisados com abordagens específicas: o primeiro explorou métodos de identificação e remoção, enquanto o segundo, examinou nanomateriais como adsorventes. O primeiro artigo destacou a eficiência das membranas em técnicas como ultrafiltração (UF), Biorreatores de membranas (MBR) e Tecnologia de Membrana Dinâmica (DM) para serem empregadas no tratamento de águas residuais e remover MPs e NPs com uma maior eficiência. Embora tenham alcançado eficiências notáveis (técnica de membrana de 40 a 99,99%), a análise crítica apontou a necessidade de apresentar mais detalhes sobre as vantagens e desvantagens dessas técnicas, custos de implementação e manutenção. O segundo concentrou-se em nanomateriais, como Metal-Orgânicos (MOFs) e Nanomateriais à base de Carbono (NC), para adsorção de MPs e NPs. Apesar de alcançarem alto desempenho (de 71 a 100%), a análise crítica destacou a necessidade de melhorias em estudos em escala piloto e na síntese de adsorventes seletivos. Ambos os artigos sublinharam a importância de desenvolver técnicas sustentáveis para combater a poluição por MPs e NPs. Em síntese, a busca por soluções de remoção de micro e nanoplásticos está em andamento, com avanços promissores. Contudo, é crucial abordar desafios específicos e realizar análises mais abrangentes para garantir a eficácia, a sustentabilidade e a segurança ambiental desses métodos inovadores.

Palavras chaves: Oceanos. Poluição de águas naturais. Técnicas de Remediação. Microplástico e Nanoplástico.

ABSTRACT

Rincon Peters, Steffany. An Analysis of Remediation Techniques for Mitigating Micro and Nanoplastics in Oceans Based on Literature Review. 2024. 46 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The global concern about the increasing presence of microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs) in the marine ecosystem has driven the research for effective methods to remove these pollutants. In light of this, an extensive literature review was conducted on scientific publications related to the topic. Among the identified studies, two were selected and analyzed with specific approaches: the first explored methods of identification and removal, while the second examined nanomaterials as adsorbents.

The first article highlighted the efficiency of membranes in techniques such as ultrafiltration (UF), Membrane Bioreactors (MBR), and Dynamic Membrane Technology (DM) to be employed in the treatment of wastewater and to remove MPs and NPs with higher efficiency. Although they achieved remarkable efficiencies (membrane technique from 40 to 99.99%), the critical analysis pointed out the need to provide more details on the advantages and disadvantages of these techniques, implementation costs, and maintenance.

The second focused on nanomaterials, such as Metal-Organic Frameworks (MOFs) and Carbon-Based Nanomaterials (NC), for the adsorption of MPs and NPs. Despite achieving high performance (from 71 to 100%), the critical analysis highlighted the need for improvements in pilot-scale studies and in the synthesis of selective adsorbents.

Both articles emphasized the importance of developing sustainable techniques to combat pollution from MPs and NPs. In summary, the search for solutions for the removal of MP and NP is ongoing, with promising advances. However, it is crucial to address specific challenges and conduct more comprehensive analyses to ensure the effectiveness, sustainability, and environmental safety of these innovative methods.

Keywords: Oceans. Natural Waters Pollution. Contamination. Remediation Techniques. Microplastics and Nanoplastics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção anual de plástico desde 1950_____	15
Figura 2. O Ciclo de vida do plástico. _____	16
Figura 3. Tempo de degradação de resíduos plásticos em oceanos _____	17
Figura 4. Plástico na superfície do oceano _____	18
Figura 5. Ciclo do plástico quando descartado incorretamente nos oceanos _____	18
Figura 6. Número de publicações relacionadas à poluição por plástico, levando em consideração seu tamanho e os ambientes impactados. _____	22
Figura 7. Publicações anuais relativas à faixa de tamanho de partículas plásticas. _____	22
Figura 8. Categorias das metodologias aplicadas para a remoção de MP e NP. _____	26
Figura 9. Processo básico de tratamento de esgoto. _____	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Alguns artigos relevantes sobre o tema encontrados _____	23
Tabela 2 Artigos selecionados para a elaboração do presente trabalho. _____	25
Tabela 3-Técnicas por membranas e nanomateriais apresentadas neste trabalho _____	36

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. JUSTIFICATIVA	13
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1. Plásticos: Origens, Estruturas e Classificações	13
4.2.Ciclo de Vida de Materiais Plásticos	15
4.1.2 A Degradação de Materiais Plásticos em Ambiente Marinho	16
4.3 Micro e Nanoplásticos: Definição	17
4.3.1 Micro e Nanoplástico: Mau Descarte e os Impactos na Vida Marinha e na Saúde Humana	18
4.4 Medidas Legais para a Redução da Poluição por Resíduos Plásticos	19
5. MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1 Critérios para Seleção da Literatura	21
5.2 Artigos selecionados: Objetivos	24
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6.1 Métodos de Remoção de Micro e Nanoplásticos	26
6.2 Artigos científicos: Os Principais Resultados e Conclusões	27
6.2.1 Artigo 1	28
6.2.2 Artigo 2	30
6.3 Análise crítica sobre os artigos apresentados anteriormente.	33
6.3.1 Análise crítica sobre o Artigo 1	33
6.3.2 Análise crítica sobre o Artigo 2	34

6.4 Visão geral das técnicas apresentadas nos tópicos anteriores	35
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A poluição por plástico nos oceanos é uma ameaça séria ao ecossistema marinho e à saúde humana (BONDAROFF, et al. 2020, CHAE, et al. 2017, THOMPSON et al. 2009), sendo resultado do crescimento exponencial da produção de plástico desde a década de 1950, quando passou de 1,5 milhão de toneladas volumétricas para 390,7 milhões de toneladas volumétricas em 2021 (STATISTA, 2023; GAUR, et al. 2023). O plástico, um polímero derivado do petróleo ou de fontes renováveis, é escolhido por sua versatilidade, durabilidade e custo acessível, tornando-o uma escolha prática para várias aplicações industriais e de consumo (WORM, et al. 2017, THOMPSON et al. 2009). No entanto, essa mesma durabilidade tem consequências negativas, já que o plástico tem um longo período para se decompor, especialmente em ambientes marinhos, resultando em um acúmulo significativo desses resíduos nos oceanos (WEI et. al., 2020).

Estima-se que o volume de plástico nos oceanos varia de 75 a 199 milhões de toneladas, e caso não haja intervenções significativas, a quantidade anual de plástico entrando nos ecossistemas aquáticos poderá triplicar para 23-37 milhões de toneladas até 2040, conforme dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNPE em 2021.

Além disso, a poluição por plásticos no ecossistema marinho não se limita apenas a macroplásticos – visíveis a olho nu, maiores que 5 mm. Ela inclui também microplásticos (MP) – com dimensões menores que 5 mm e, nanoplásticos (NP) – com dimensões menores de 1 µm. MP e NP podem ser classificados como primários, quando produzidos já em dimensões reduzidas, como os aplicados na formulação de cosméticos (esfoliantes) e na indústria têxtil para a produção de roupas sintéticas (poliéster), ou secundários, originados da degradação de macroplásticos devido a processos físicos, químicos ou biológicos do ambiente. E um risco que traz o MP e NP para o ecossistema marinho e a saúde humana, é quando estes entram na cadeia alimentar (MOORE 2008, THOMPSON et al. 2009, KOELMANS et al. 2015, OLIVATTO et al. 2018, SHAMS et al. 2021).

Portanto, é essencial explorar maneiras de reduzir o impacto do plástico no meio ambiente marinho e promover alternativas mais sustentáveis para seu uso. Devido a isso, está revisão da literatura tem como objetivo comparar as atuais técnicas de remediação que têm sido estudadas para mitigar MP e NP nos oceanos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão tradicional da literatura existente e completando as lacunas existentes técnicas para mitigação de MP e NP nos oceanos.

2.2 Objetivos Específicos

- i. Realizar um levantamento da literatura científica atual relacionada à técnicas menos aplicadas que possibilitam a redução da presença de MP e NP nos ecossistemas marinhos.
- ii. Avaliar diferentes técnicas e estratégias de mitigação propostas e implementadas globalmente para reduzir a presença de MP e NP nos oceanos.
- iii. Analisar a eficácia das medidas de mitigação existentes, destacando os casos de estudo relevantes e suas implicações práticas.

3. JUSTIFICATIVA

As partículas de MP e NP representam uma ameaça cada vez mais significativa para os ecossistemas marinhos. Suas dimensões reduzidas e onipresença tornam-se extremamente desafiadores de serem detectados e removidos dos oceanos. A mitigação desses poluentes é crucial devido aos impactos adversos que exercem sobre a vida marinha, desde organismos microscópicos até grandes espécies oceânicas, além do riscos à saúde humana. Essas partículas podem ser ingeridas por uma ampla gama de organismos marinhos, causando danos fisiológicos, e têm o potencial de acumular e transportar substâncias tóxicas ao longo da cadeia alimentar. Portanto, o desenvolvimento de técnicas para a redução e mitigação de MP e NP é essencial para preservar a saúde dos ecossistemas marinhos e humano, garantindo a sustentabilidade dos recursos oceânicos e protegendo a biodiversidade marinha para as gerações futuras.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Plásticos: Origens, Estruturas e Classificações

A palavra "plástico" tem sua origem no grego "plastikos", que significa "próprio para moldagem" e "capaz de ser moldado em diversas formas" (OXFORD LANGUAGES). Em outras palavras, "plástico" refere-se a um material maleável que pode ser facilmente moldado em diversas formas e tamanhos.

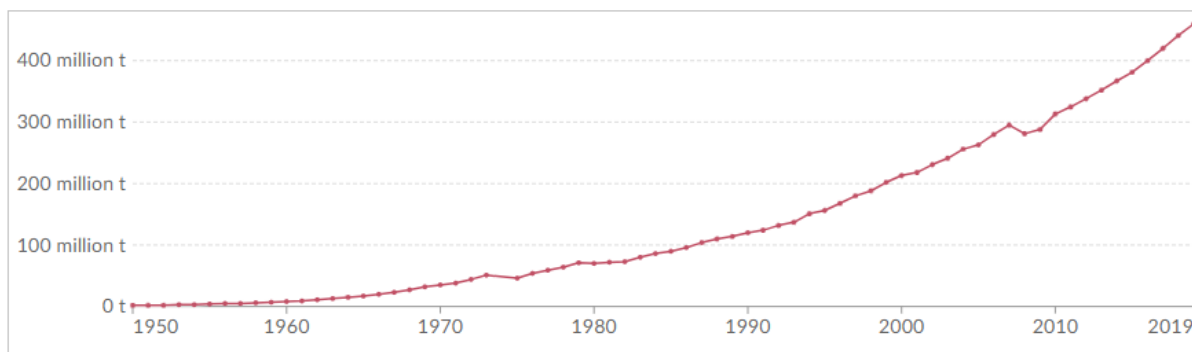
Alexander Parkes, John Wesley Hyatt e Leo Hendrik Baekeland são figuras notáveis na história da evolução dos materiais plásticos. Alexander Parkes é conhecido por sua inovação em 1856, o Parkesine, um dos primeiros plásticos semissintéticos, feito a partir de celulose. John Wesley Hyatt, por sua vez, inventou a celuloide em 1869, um marco na história dos plásticos devido à sua versatilidade e durabilidade. Leo Hendrik Baekeland, em 1907, criou a baquelite, o primeiro polímero sintético, que encontrou ampla aplicação em diversas indústrias (ANDERSON, 1991; MOSSMAN, 2017). Esses três pioneiros desempenharam papéis cruciais na fundação e desenvolvimento da indústria de plásticos.

Os plásticos podem ser de origem natural, semi-sintética ou sintética, provenientes de fontes como derivados de petróleo ou de fontes renováveis, como por exemplo, a cana-de-açúcar, óleo de soja ou a celulose. Eles pertencem à família dos polímeros, macromoléculas compostas por repetições de unidades químicas simples chamadas monômeros, unidas por reações de polimerização (MOSSMAN, 2017; PIATTI; RODRIGUES, 2005). Existe uma variedade de tipo de plásticos, como por exemplo, polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET), poli (metil metacrilato) (PMMA) (PIATTI; RODRIGUES, 2005). Além disso, os materiais poliméricos são classificados em termoplásticos e termofixos, sendo que os termoplásticos podem se transformar em líquido viscoso quando aquecidos e, endurecem quando resfriados, devido suas ligações serem secundárias, enquanto os termofixos possuem ligações cruzadas, que não podem ser revertidas que tornam a reciclagem um processo desafiador (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

4.1.1 Produção e Consumo do Plástico

Ao longo dos últimos 70 anos, o plástico tornou-se essencial no nosso cotidiano, proporcionando praticidade e versatilidade inigualáveis. A produção de plástico teve um aumento expressivo de 1,5 milhões de toneladas em 1950, para atualmente esse número ultrapassa as 450 milhões de toneladas (RITCHIE et al. 2019), ou seja, a demanda global por plástico atingiu níveis sem precedentes, impulsionada por setores variados, como embalagens, construção, saúde e eletrônicos. Esse aumento reflete a dependência da sociedade moderna em relação a esse material versátil. A Figura 1 ilustra esse crescimento na produção de produtos usando materiais plásticos.

Figura 1. Produção anual de plástico desde 1950
PRODUÇÃO GLOBAL DE PLÁSTICO
(Esses dados refere-se a produção anual de resinas poliméricas e fibras)



Fonte: Our World in Data based em Geyer et al. (2017) e OECD Global Plastics Outlook.
Disponível em: <https://slides.ourworldindata.org/plastic-pollution/#/2>

A demanda crescente e o consumo desenfreado de plástico têm levantado questões cruciais sobre sustentabilidade, responsabilidade ambiental e a necessidade premente de mudanças.

4.2 Ciclo de Vida de Materiais Plásticos

O ciclo de vida do plástico se inicia desde a extração dos recursos naturais até o seu descarte final, em cada fase, pode deixar marcas no meio ambiente e na sociedade (REMEDI; ZANIN, 2000). Como citado acima, a primeira parte do processo inicia-se com a extração de matérias-primas como petróleo, gás ou fontes renováveis, que são então transformados em resinas plásticas por meio de complexos processos industriais (PIATTI; RODRIGUES, 2005). A Figura 2 ilustra de forma sintetizada as etapas do ciclo de vida de materiais plásticos.

Figura 2. O Ciclo de vida do plástico.



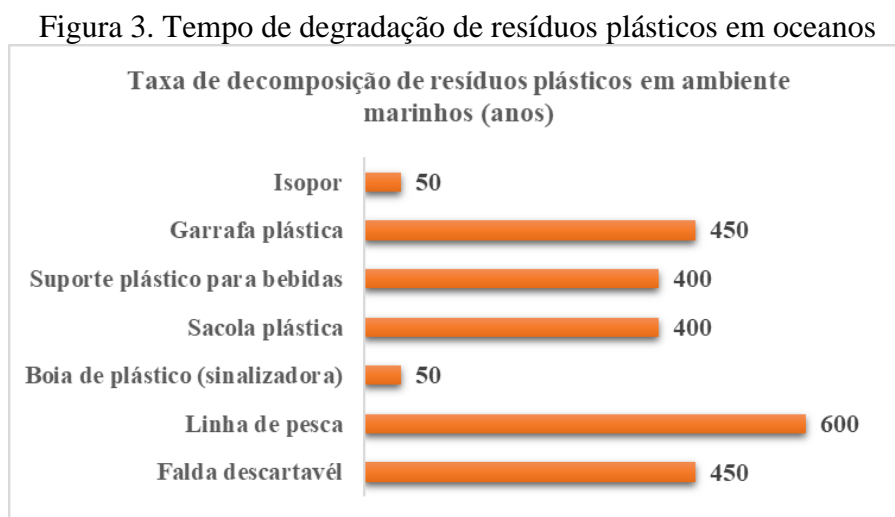
Fonte: portaldoprofessor.mec.gov.br *apud* ifsul.edu.br/matriz/conteúdo/disciplinas

Em seguida, a segunda etapa é marcada pela produção dos produtos plásticos, que abrange uma ampla variedade, desde embalagens, roupas, equipamentos eletrônicos e até cosméticos (THOMPSON et al. 2009, OLIVATTO et al. 2018). Na terceira etapa entra o consumo e o descarte, e nessa etapa desafio surge no descarte. Neste estágio, o plástico, muitas vezes, é mal direcionado, resultando em poluição e degradação ambiental terrestres e marinhos.

4.2.1 A Degradação de Materiais Plásticos em Ambiente Marinho

Os polímeros sintéticos, ao contrário de materiais naturais, como a madeira e o papel, são conhecidos por sua notória resistência à decomposição. A degradação de polímeros é desencadeada por reações químicas destrutivas, podendo ocorrer tanto por processos químicos quanto físicos, como por exemplo, influências ambientais, como a exposição à luz ultravioleta (UV), elevação da temperatura, vento, presença de umidade e ação de agentes químicos, resultando em uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos (COSTA et al., 2016, PAÇO et al., 2017). O tempo de decomposição desses materiais varia

consideravelmente, dependendo das condições ambientais e do tipo de polímero, sendo que algumas literaturas referem um intervalo de 20 a 600 anos em ambiente marinho para alguns produtos plásticos (RITCHIE; ROSER (2018)), como apresenta a Figura 3.



Fonte: Adaptado de RITCHIE; ROSER (2018).

A acumulação de resíduos de poliméricos no meio ambiente marinho não apenas ameaça a biodiversidade, mas também afeta negativamente a saúde humana (THOMPSON et al. 2009).

4.3 Micro e Nanoplásticos: Definição

Por definição, microplásticos (MPs) são partículas de plásticos com um diâmetro tipicamente inferior a 5 milímetros e, os nanoplásticos (NPs) são partículas ainda menores, medindo menos de 0,0001 milímetros (MOORE 2008, KOELMANS et al. 2015, RITCHIE, 2018).

Tanto MPs quanto os NPs, podem ser classificados em duas categorias, os que são produzidos a partir de processos primários ou secundários. No processo primário, o material plástico já é produzido com tamanho reduzido, como por exemplo, fibras, pellets, micro e nanoesferas para aplicação em cosméticos, creme dental e detergentes (RITCHIE, 2018, THAWADI, 2020). Já a categoria de processos secundários, são MPs e NPs que se formam a partir da decomposição de produtos plásticos maiores (macroplásticos). Por exemplo, a

exposição à luz solar, oxigênio e microrganismos desencadeia um processo gradual de fragmentação, transformando o plástico em pequenas partículas (JAHNKE et al. 2017, RITCHIE, 2018, Al-THAWADI, 2020).

4.3.1 Micro e Nanoplástico: Mau Descarte e os Impactos na Vida Marinha e na Saúde Humana

De acordo com uma pesquisa conduzida por MORALES-CASELLES et al. (2021), aproximadamente 80% dos resíduos plásticos presentes nos oceanos têm origem em atividades terrestres, enquanto os restantes 20% são provenientes de práticas marítimas, como pesca e descarte de embarcações. Os resíduos provenientes de atividades terrestres alcançam os oceanos por meio do vento, aterros sanitários inadequados ou galerias de águas pluviais durante as chuvas (CÓZAR, et al. 2017).

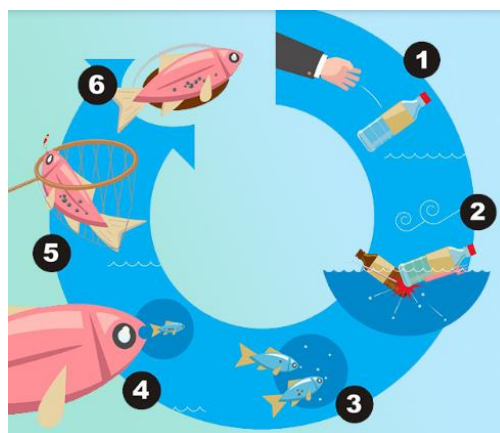
Os MPs e NPs são reconhecidos como os polímeros mais impactantes nos ecossistemas aquáticos (Figura 4 e 5). Sua dimensão reduzida facilita a entrada na cadeia alimentar, resultando em potenciais efeitos adversos na saúde da vida marinha, conforme indicado em estudos anteriores (BONDAROFF, et al. 2020; THOMPSON et al. 2009).

Figura 4. Plástico na superfície do oceano



Fonte: ALEX MUSTARD/ WWF. Disponível em: Impacts Of Plastic Pollution In The Oceans On Marine Species, Biodiversity And Ecosystems

Figura 5. Ciclo do plástico quando descartado incorretamente nos oceanos



Fonte: Rafael Paz. Disponível em: <https://www.gaceta.unam.mx/microplasticos-un-riesgo-creciente-para-la-salud/>

Uma característica notável das MPs e NPs é sua capacidade de adsorver componentes tóxicos, como poluentes orgânicos persistentes, pesticidas e produtos químicos industriais, incluindo metais potencialmente tóxicos. Esse fenômeno ocorre devido à grande área superficial dessas partículas (CHAE et al. 2017; SANA et al. 2020). Essa propriedade as transforma em veículos de transporte para substâncias. Quando essas partículas estão presentes no ecossistema marinho, há o risco de serem absorvidas pelos organismos, impactando órgãos, tecidos, induzindo bloqueio intestinal e/ou tecidual até mesmo a funcionalidade celular (CHAE et al. 2017, NOMURA, 2017, SANA et al. 2020). Esse processo resulta em impactos nocivos ou letais, contribuindo significativamente para danos à saúde dos organismos marinhos e impactos negativos na qualidade da água (REVEL et al., 2018, SANA et al. 2020).

A contaminação por MP e NP em seres humanos ocorre predominantemente pela ingestão de alimentos e água contaminados por MPs e NPs, além da inalação ou contato com produtos de uso pessoal (SANA et al. 2020). Isso pode resultar em danos diretos ou indiretos à regulação interna do organismo. Além disso, as partículas plásticas podem ser adsorvidas por grandes proteínas, contribuindo para modificações no sistema imunológico do intestino e inflamação adjacente (POWELL et al. 2007, REVEL et al., 2018, SANA et al. 2020).

4.4 Medidas Legais para a Redução da Poluição por Resíduos Plásticos

É um desafio global e a conscientização sobre a importância da gestão responsável de plásticos e a redução de seu uso são fundamentais para mitigar os impactos negativos nos ambientes terrestres e marinhos.

Para combater os impactos ambientais proveniente do resíduo plástico, cerca de 69 organizações em 35 países se reuniram para se comprometer voluntariamente para implementar medidas de gestão a fim de reduzir o impacto negativo causado pelos resíduos plásticos (COSTA, 2018). A seguintes medidas estão listadas abaixo:

- a) Preventivas - podem abranger reutilização, redução na fonte, reciclagem e várias ações de gestão terrestre;
- b) Remoção - inclui monitoramento de detritos e iniciativas de limpeza;
- c) Mitigação - engloba o descarte de resíduos e o desenvolvimento de regulamentações para despejo;

d) Educacionais - abrangem campanhas de conscientização e abordagens econômicas/incentivos.

A ferramenta legal é um recurso crucial na luta contra os problemas ambientais marítimos causados por micro e nanopartículas de plástico. No entanto, a falta de padronização nas metodologias de avaliação e a ausência de instrumentos legais para limitar esses resíduos nos oceanos comprometem a eficácia na redução desse impacto no ambiente marinho (CAIXETA, et al., 2018).

As atuais leis brasileiras não estabelecem de maneira eficaz valores seguros para a saúde relacionados a todos os resíduos plásticos, destacando a necessidade de uma abordagem mais abrangente. Em relação aos padrões estabelecidos, a Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dezembro de 2009, que trata das águas subterrâneas, define um limite máximo de 5 µg/L para o policloreto de vinila (PVC) . Já a Resolução CONAMA Nº 430, de 13/05/2011, relacionada ao lançamento de efluentes, estabelece padrões máximos de lançamento para o Estireno, fixando-o em 0,07 mg/L.

A Lei nº 12.305/2010, que foi um marco, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, contribui para a gestão desses resíduos e, por conseguinte, para a mitigação da poluição causada pelo plástico.

Em 2019, a Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo aprovou a Lei Nº 17.110/2019, proibindo o fornecimento de canudos plásticos em estabelecimentos. Além de São Paulo, outros estados, como Acre, Paraíba, Espírito Santo e Santa Catarina, também promulgaram leis proibindo o fornecimento de canudos plásticos (ZAREMBA, 2020). Essas iniciativas destacam a crescente preocupação e ação legislativa em diferentes partes do país para lidar com a problemática dos resíduos plásticos.

Um outro fato que indica um crescimento da preocupação com resíduos MP e NP nos oceanos no Brasil, é o projetos de lei que está em andamento no Congresso Nacional para abordar questões relacionadas ao plástico, em setembro de 2022, o Senado apresentou o Projeto de Lei 2524/2022, que visa promover a reutilização e reciclagem, estabelecendo também um conteúdo mínimo de material reciclado para embalagens. O projeto também propõe, um prazo para a eliminação das microesferas de plástico em produtos de higiene e cosméticos (SENADO FEDERAL, 2022).

À medida que a conscientização global sobre a crise dos resíduos plásticos cresce, espera-se que mais leis sejam aprovadas em um curto tempo, e que mais países implementem

e fortaleçam suas legislações para proteger os oceanos e garantir um futuro mais sustentável para o planeta.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

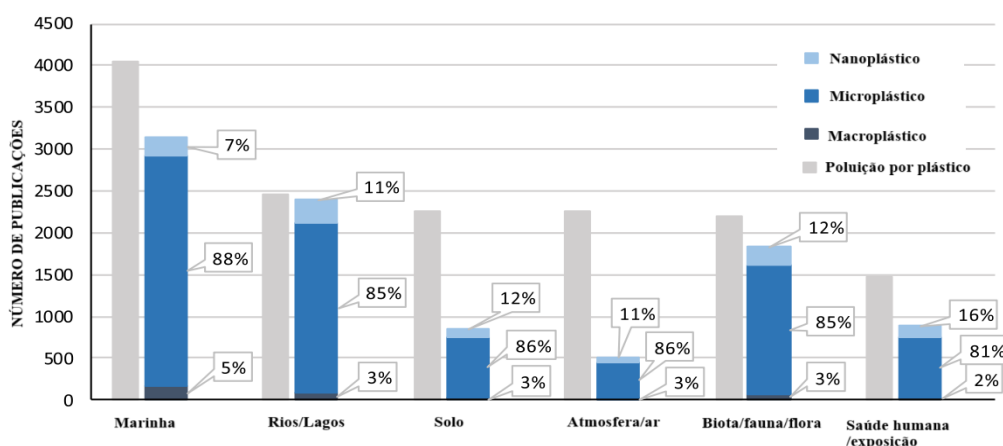
5.1 Critérios para Seleção da Literatura

A abordagem metodológica utilizada neste estudo foi uma revisão da literatura, por meio de pesquisa exploratória e descritiva. O objetivo foi reunir informações atualizadas sobre técnicas com potencial para a mitigação de MP e NP nos oceanos (ambiente aquático), utilizando uma abordagem qualitativa e econômica.

Foi realizada uma análise focada em identificar recursos potenciais para a remediação de resíduos plásticos em águas, buscando explorar diferentes estratégias disponíveis para este fim. Além disso, a análise quantitativa foi complementada por uma análise para avaliar a viabilidade das técnicas abordadas.

Nos últimos anos, a crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes da presença de micro e nanopartículas de plástico gerou um aumento significativo no interesse da comunidade científica por técnicas de mitigação desses poluentes. Em resposta a essa preocupação, houve um notável aumento no volume de trabalhos publicados na literatura científica, todos abordando a temática sobre os efeitos negativos de resíduos plásticos no meio ambiente e sobre possíveis técnicas de remediação promissoras. Conforme evidenciado pela pesquisa conduzida por ALLEN et al. (2022), os autores destacam um aumento significativo de publicações científicas entre 2011 e 2021. Observa-se que a maior quantidade de publicações está relacionada à poluição em ambiente marinho, conforme evidenciado pela Figura 6.

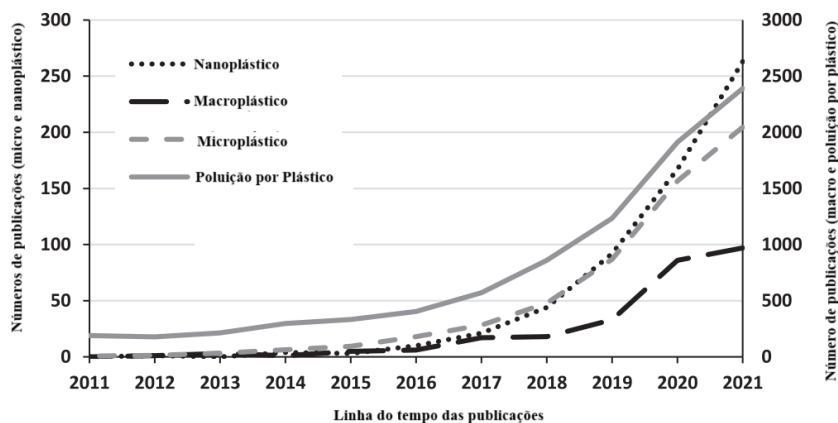
Figura 6. Número de publicações relacionadas à poluição por plástico, levando em consideração seu tamanho e os ambientes impactados.



Fonte: Adaptado de ALLEN et al. 2022.

Na Figura 7, são apresentados dados coletados por ALLEN et al. (2022), comparando publicações relacionadas às dimensões dos resíduos plásticos.

Figura 7. Publicações anuais relativas à faixa de tamanho de partículas plásticas.



Fonte: Adaptado de ALLEN et al. 2022

Diante desse cenário, foram selecionados artigos publicados a partir de 2018, ano o qual tem um aumento exponencial de trabalhos publicados na temática “micro e nanoplástico”. Os artigos científicos selecionados para este levantamento foram coletados em fontes, incluindo a base de dados do Portal de Periódicos da CAPES e Google Acadêmico. Essa busca foi realizada utilizando palavras-chave específicas relacionadas ao tema, tais como: microplásticos, nanoplásticos, técnicas de mitigação, remediação micro e nano plásticos nos oceanos,

remediação de micro e nano plásticos em águas, remoção de micro e nanoplásticos em águas, custos, e os mesmo termos foram usados em inglês. Nessa pesquisa, resultou 1747 publicações, onde a maioria das publicações em inglês são de revistas científicas e em português, teses, dissertações etc. Com isso, foi adicionado mais uma termo (em português e em inglês) na pesquisa “Eficiente”. Esses termos foram essenciais para a delimitação da pesquisa, permitindo a identificação de estudos relevantes que abordam estratégias promissoras para lidar com a problemática dos poluentes plásticos nos ecossistemas marinhos, na Tabela 1, apresenta-se alguns dos artigos encontrados.

Tabela 1- Alguns artigos relevantes sobre o tema encontrados

Título Original	Tradução para português	Autores
Identification and removal of micro- and nano-plastics: Efficient and cost-effective methods.	“Identificação e remoção de micro e nanopartículas de plástico: Métodos eficientes e economicamente viáveis”	Aayushi Kundu, Nagaraj P. Shetti, Soumen Basu, Kakarla Raghava Reddy, Mallikarjuna N. Nadagouda, Tejraj M. Aminabhavi.
Current status of microplastics and nanoplastics removal methods: Summary, comparison and prospect	“Estado atual dos métodos de remoção de microplásticos e nanopartículas de plástico: Resumo, comparação e perspectiva”	Qingrun Liu, Yulun Chen, Zhe Chena, Fangwei Yang, Yunfei Xiea,b,c, Weirong Ya.
Removal of nanoplastics in water treatment processes: A review	“Remoção de nanopartículas de plástico nos processos de tratamento de água: Uma revisão.”	M. Keerthana Devi, N. Karmegam, S. Manikandan, R. Subbaiya, Hocheol Songi, Eilhann E. Kwon, Binoy Sarkar, Nanthi Boland, Woong Kim, Jörg Rinklebe, M. Govarthan.
Challenges and opportunities for microplastic and nanoplastic removal	“Desafios e oportunidades para a	Didier Roberta, Paul Henri Allea, Nicolas Kellera,

from industrial wastewater	remoção de microplásticos nanopartículas de plástico de águas residuais industriais.”	de Marie-Antoinette Dzuilab, and Patricia Garcia-Munˆozc
Nanomaterials-based adsorbents for remediation of microplastics and nanoplastics in aqueous media: A review	“Adsorventes baseados em nanomateriais para remediação de microplásticos nanopartículas de plástico em meios aquosos: Uma revisão.”	Muhammad Sajid , Ihsanullah Ihsanullah , Muhammad Tariq Khan , e Nadeem Baig. 2023

Assim, foram selecionadas duas publicações que fazem uma revisão da literatura de duas técnicas distintas, as quais foram selecionadas, por apresentar resultados de estudos atuais relacionados as técnicas e apresentando também, as suas eficiências na remoção e remediação de MP e NP em ambiente aquáticos de cada uma das técnicas.

Com isso, o presente trabalho, avaliou cada publicação, discutindo os resultados apresentados, eficiência de métodos, possíveis ausência de informações e conclusões.

5.2 Artigos selecionados: Objetivos

Na Tabela 2 são apresentados os títulos e autores dos artigos que foram discutidos neste trabalho.

Tabela 2 Artigos selecionados para a elaboração do presente trabalho.

Nº	Título Original	Título traduzido	Autores
1	Identification and removal of micro- and nano-plastics: Efficient and cost-effective methods.	“Identificação e remoção de micro e nanopartículas de plástico: Métodos eficientes e economicamente viáveis”	Aayushi Kundu, Nagaraj P. Shetti, Soumen Basu, Kakarla Raghava Reddy, Mallikarjuna N. Nadagouda, Tejraj M. Aminabhavi. 2021
2	Nanomaterials-based adsorbents for remediation of microplastics and nanoplastics in aqueous media: A review.	“Adsorventes baseados em nanomateriais para remediação de microplásticos e nanopartículas de plástico em meios aquosos: Uma revisão”	Muhammad Sajid , Ihsanullah Ihsanullah , Muhammad Tariq Khan, Nadeem Baig. 2023

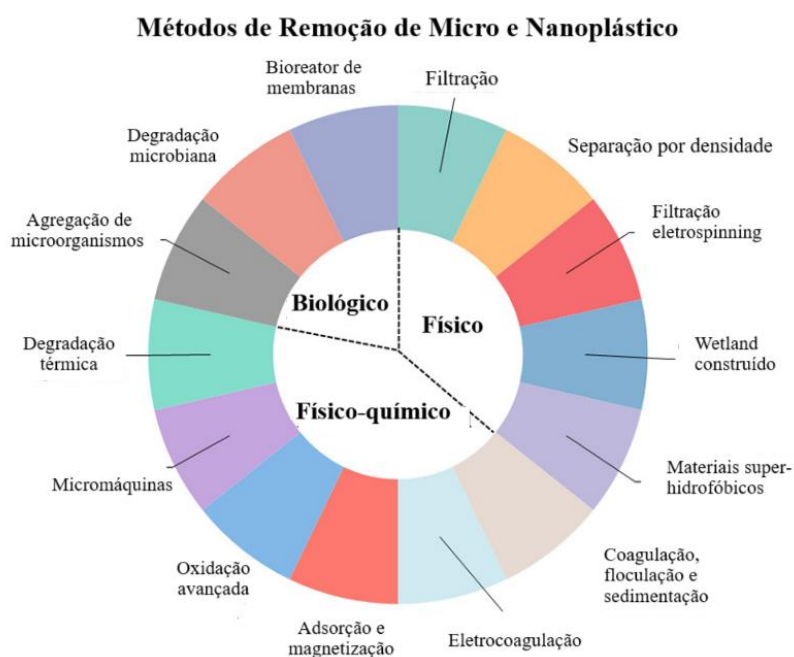
- **Artigo 1:** Nessa revisão da literatura, os autores abordam métodos de amostragem para água, sedimentos e biota. Diversas técnicas de identificação são discutidas de maneira crítica. Os efeitos prejudiciais causados por MPs e NPs também são abordados criticamente, juntamente com processos de tratamento eficientes e economicamente viáveis, incluindo tecnologias de membrana, visando a remoção de partículas plásticas de várias fontes para mitigar a poluição ambiental e a avaliação de riscos associados.
- **Artigo 2:** Nessa revisão, os autores oferecem uma breve visão geral das fontes e do transporte de MP e NP, suas propriedades físico-químicas, seu impacto nos ecossistemas aquáticos e sua toxicidade para os humanos. Por fim, aborda as aplicações de adsorventes baseados em nanomateriais para a remoção de MP e NPs de ambientes aquosos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Métodos de Remoção de Micro e Nanoplásticos

A remoção total de MP e NP do oceano é impossível, contudo, estudos apontam que o descarte desses resíduos nos oceanos pode ser contínuo (diminuído) a partir de técnicas mais eficientes nas Estações de Tratamento de Águas Residuais (esgoto) (ETEs) (ROBERT et al. 2022, KUNDUN et al. 2021). Uma remediação eficiente de MP e NP para os ambientes marinhos significaria muito para o futuro do nosso ecossistema. Diversos métodos estão sendo explorados para mitigar essa crescente ameaça aos ambientes aquáticos. A Figura 8 ilustra as categorias das técnicas utilizadas para a remoção de micro e nanopartículas de plástico no meio ambiente.

Figura 8. Categorias das metodologias aplicadas para a remoção de MP e NP.



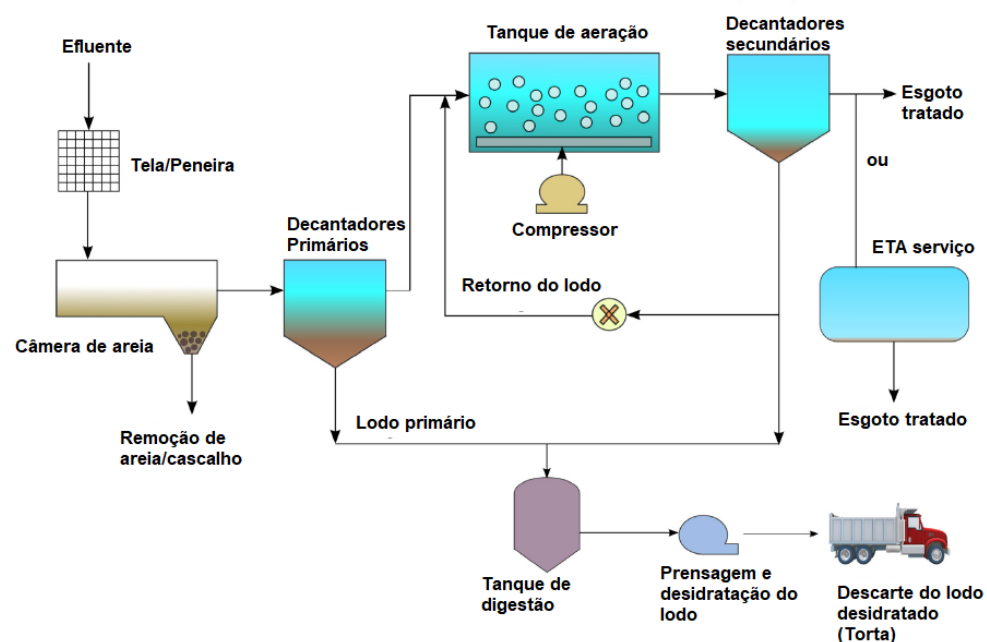
Fonte: Adaptado de LIU et al (2022).

Entre os mais comuns métodos de remoção, destacam-se as abordagens físicas, como a filtragem e separação, que visam retirar as partículas de plástico diretamente da água, essas técnicas são amplamente usadas nas estações de tratamento de águas residuais (esgoto) (ETEs) (LIU et al. 2022). Métodos físico-químicos, como a utilização de agentes de degradação ou

adsorventes específicos para MP e NP, têm sido investigados para facilitar a remoção desses poluentes. Além de, técnicas biológicas, incluindo o uso de microrganismos e organismos filtradores, como membranas, têm despertado interesse devido à sua capacidade potencial de degradar ou absorver micro e nanopartículas de plástico (LIU et al (2022), KUNDU et al. (2021)).

A Figura 9 ilustra um processo básico de uma estação de tratamento de água residual (ETE).

Figura 9. Processo básico de tratamento de esgoto.



Fonte: Adaptado de HANIF et al. 2022

6.2 Artigos científicos: Os Principais Resultados e Conclusões

No presente tópicos são apresentadas informações, literaturas discutidas e citadas pelos autores de cada artigo científico selecionado para o presente trabalho, juntamente com análises e conclusões obtidas por cada um deles.

6.2.1 Artigo 1

No Artigo 1, os autores conduzem uma revisão bibliográfica abordando métodos de identificação e remoção de MP e NP no ecossistema aquático. Para o presente trabalho, o foco está nos métodos de remoção e remediação. Desta forma, são apresentados apenas os resultados e conclusões pertinentes a esse tema específico.

A técnica com maior ênfase no Artigo 1 é baseada no método de membranas, no qual, os autores analisam diferentes estudos relacionados a configurações do método, eficiência da retenção de MP e NP.

Vantagens do uso das técnicas de membranas citadas pelos autores:

“operações baseadas em membranas podem substituir a maioria das tecnologias tradicionais de uso intensivo de energia devido à sua baixa necessidade de energia, versatilidade, facilidade de operação, boa estabilidade, controle simples e possibilidade de aumento de escala.”

- a. **Ultra filtração (UF):** é operado sob baixa pressão (1–10 bar), utiliza membranas assimétricas com poros de 1–100 nm. É uma técnica que tem sido explorada para ser acoplada à coagulação, no intuito de tornar mais eficaz o processo de separação. Alguns estudos visam a aplicação no tratamento secundário da ETE e outros no terceiro estágio. KUNDU et al. (2021), cita um estudo realizado por MA et al. (2019), que investigou a remoção de polietileno (PE) usando coagulante à base de Fe via UF, mostrando que a eficácia de remoção foi inicialmente baixa, mas melhorou significativamente (de 13 a 90,99 %) com a adição de poliacrilamida aniônica (PAM). A combinação de coagulação e UF demonstrou ser mais eficaz na remoção de MPs, como PE, em comparação com o uso isolado dessas técnicas. Ma et al. (2019) também estudou o uso de sais à base de Al, que resultou uma melhora na eficiência quando comparado ao processo isolado da coagulação (40%), contudo, essa eficiência foi observada só com uma dosagem elevada (15 nM) de sal a base de Al, porém, a formação de incrustações na membrana foi observada em doses elevadas. A conclusão é que a abordagem combinada de coagulação e UF é recomendada para a remoção eficiente de MPs em aplicações de tratamento de águas residuais.

- b. Biorreator de membrana (MBR):** técnicas avançadas de tratamento de águas residuais que integram a catalisação suportada por catalisadores biológicos (enzimas ou bactérias) com métodos de separação baseados em membranas, como microfiltração ou ultrafiltração (JUDD, 2016). Os MBRs simplificam o processo de filtração iniciando a biodegradação da matéria orgânica na presença de bactérias ou enzimas, possibilitando a separação eficiente de MPs da água residual. Pesquisas de Talvitie et al. (2017) propuseram abordagens para alcançar até 99,9% de rejeição de MPs usando MBRs, potencialmente substituindo métodos convencionais de coagulação-precipitação (no tratamento secundário). Contudo, a desvantagem deste estudo é que foram considerados somente MPs com tamanhos $> 20 \mu\text{m}$. Lares et al. (2018) compararam a eficiência de uma estação de tratamento de águas residuais municipal na Finlândia, revelando que o MBR teve uma eficiência de remoção superior (99,4%) em comparação com o processo geral de lodo ativado convencional (98,3%). Outro estudo de Lv. et al. (2019) em uma estação de tratamento de águas residuais em larga escala no leste da China mostrou que o MBR removeu 99,5% dos MPs influentes.
- c. Membrana Dinâmica (DM):** tratamento atrativo para diversas formas de águas residuais, incluindo urbanas, superficiais, industriais e lodo. Essa tecnologia se baseia na formação de uma camada dinâmica de membrana (DM), atuando como uma barreira secundária criada por filtros de membrana e contaminantes presentes na água residual. A formação da DM depende de diferentes parâmetros relacionados à membrana, à matéria depositada, pressão operacional e velocidade de fluxo transversal (Ma et al. 2019). A eficiência da DMT foi comprovada em estudos que demonstraram a remoção bem-sucedida de MPs, como por exemplo, Li et al. (2018) que alcançou cerca de 90% de remoção para MPs com tamanho de partícula inferior a $90 \mu\text{m}$, ou Pizzichetti et al. (2020) que avaliaram a eficácia de membranas para remoção de MPs em um sistema de baixo custo, adequado ao tratamento de resíduos doméstico. Ao analisar a remoção de MPs, especialmente poliamida e poliestireno ($20\text{--}300 \mu\text{m}$), foram testadas membranas a base de policarbonato, acetato de celulose e politetrafluoroetileno, todas com poros de $5 \mu\text{m}$. Os resultados indicaram eficiências de remoção de massa superiores a 94% para ambos os tipos de MPs, destacando que o acetato de celulose foi a membrana ideal para implementação em tratamento de resíduos domésticos.

d. Estudos relacionados à remoção de NP: O estudo de Wang et al., (2020) abordou a eficiente remoção de NPs de poliestireno da água usando uma membrana eletrofiada de baixa pressão com carga superficial ajustada. Três tipos de membranas modificadas (M, M0, e M+), com propriedades aprimoradas, foram sintetizadas para exibir cargas negativas, neutras e positivas, respectivamente. Essa técnica mostrou eficácia na remoção de NPs de poliestireno (50 nm), sendo a membrana M+ a mais eficiente, com uma remoção de 89% do efluente. Um estudo conduzido por Busse et al. (2020) destacou a fracionamento bem-sucedida de NPs de diversos tamanhos usando um filtro de celulose de 2,5 µm. Hernandez et al. (2017) utilizaram um método de filtração sequencial com membranas de diferentes tamanhos de poro para a separação de NPs de polietileno. Além disso, Gigault et al. (2017) desenvolveram um método eficaz de fracionamento por fluxo de campo assimétrico para separar NPs de poliestireno em faixas de tamanho coloidal, demonstrando alta resolução na discriminação de subfrações.

Conclusão dos autores: *“Para remover MPs e NPs das águas residuais, é necessário utilizar plenamente processos avançados de membrana para explorar métodos ambientalmente positivos, como ultrafiltração, tecnologia de membrana dinâmica, osmose reversa, filtros de disco de membrana e biorreatores de membrana. O MBR também pode ser uma abordagem promissora entre esses processos, com uma remoção de 99% dos MPs. Técnicas, incluindo a fraccionação de fluxo de campo, também foram discutidas para a remoção de NPs”.*

6.2.2 Artigo 2

No Artigo 2, Sajid et al. conduz uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de nanomateriais como adsorventes para MP e NP. De acordo com os autores, alguns nanomateriais possuem extensas áreas superficiais e alta porosidade, características altamente desejáveis na adsorção de poluentes. Esses materiais demonstram não apenas alta reatividade e capacidade de sorção, mas também outras propriedades fundamentais que os tornam uma escolha central na ciência da separação. Os autores enfocam uma abordagem específica, visando fornecer *insights* críticos sobre essa técnica.

- a. Metal-orgânicas (MOFs):** são materiais que se destacam no processo de separação devido a propriedades físico-químicas como áreas superficiais ultrasensíveis, estruturas porosas e adaptabilidade pela seleção adequada de íons metálicos e ligantes orgânicos. Vários MOFs, especialmente os baseados em ZIF, têm sido utilizados para adsorção de MPs em meios aquosos (LI et al. 2021, DU et al. 2017). Em um estudo de WAN, et al. 2022, ZIF-67 ($[\text{Co}(\text{MeIm})_2]_n$) alcançou uma eficiência de remoção de 92,1% para MPs de poliestireno (PS) sob condições ideais. MOFs em forma de pó podem ser instáveis, sendo preferível utilizá-los com substratos como aerogéis ou espumas. Um estudo conduzido por You, et al. 2021 empregou aerogel de madeira à base de ZIF-8 ($[\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$) para remover poli(1,1-difluoroetileno) e PS, alcançando eficiências de remoção de 91,4% e 85,8%, respectivamente, devido a interações eletrostáticas. Chen et al. 2020 utilizaram MOF à base de espuma de zircônio para remover suspensões de MPs em água simulada e água do mar, obtendo eficiência de remoção de até $95,5 \pm 1,2\%$ e mantendo alto desempenho em reciclagem e filtragem em experimentos em grande escala.
- b. Nanomateriais a base de carbono (NC):** Investigados devido à síntese fácil, alta área superficial, sítios ativos abundantes, hidrofobicidade e funcionalização adaptável a contaminantes, os NC são explorados no tratamento de águas residuais para a remoção de MPs e NPs. No estudo de Tang et al. (2021), removeram completamente PE, PET e PA (5 g/L) em 5 horas, com capacidades máximas de adsorção de 1650, 1400 e 1100 mg/g, respectivamente. O adsorvente foi regenerado termicamente, mantendo propriedades magnéticas e de adsorção, com eficiência de remoção de 80% após 4 ciclos, atribuída a interações hidrofóbicas na adsorção de PE e PET. Cinzas modificadas (CM) com íons de ferro, foram utilizadas no estudo de Zhao et al. 2022, para a remoção de NP de PS. Demonstrando uma capacidade de adsorção de 82,8–89,9 mg/g em pH 5–7. No estudo conduzido por Zhou et al. 2022, um compósito de carbono bimetálico (Cu-Ni) foi sintetizado pelo método hidrotérmico e utilizado para remover nanoplásticos de poliestireno (PS) da água. Quando a dosagem de CuNi@C aumentou de 0,1 g/L para 0,3 g/L, a eficiência de remoção de NP de PS (10 mg/L) aumentou de 32,72% para 99,18%.
- c. Nanomateriais de origem biológica:** Materiais renováveis como esponjas de quitina com óxido de grafeno, aerogéis inspirados em corais, biochar de biomassa e esponjas de proteínas vegetais são explorados para a remoção segura e reutilizável de MPs de meios

aquosos. A quitina, um polissacarídeo presente no esqueleto de invertebrados, é fortalecida com óxido de grafeno para melhorar resistência e eficácia na remoção de MPs, alcançando eficiência de 71,6% a 92,1% a 1 mg/L no estudo de Sun, et al 2019. A ampla presença de MPs em recifes de corais motiva a criação de aerogéis inspirados em corais, compostos por quitosana, polidopamina (PDA - MCS) e nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4 . A PDA demonstra forte aderência, mas a dificuldade de recuperação é superada pela inclusão de Fe_3O_4 , alcançando eficiência de até 91,6% (ZENG, et al. 2022). Biochar magnético (MBC) de Mg/Zn mostra eficiências de remoção de até 99,46% para microesferas de PS (WANG, et al. 2021). Esponjas de proteínas de aveia revelam eficiência de remoção de até 85%, indicando seu potencial como material sustentável para a remediação de MPs em condições aquáticas (Z. WANG, et al. 2021).

- d. Hidróxidos e óxidos duplos lamelares:** são excelentes materiais inorgânicos com composição estrutural ajustável (ZHANG, et al. 2021). Eles consistem em camadas de hidróxido metálico carregadas positivamente e ânions carregados negativamente, além de moléculas de água dentro das camadas para equilibrar a carga global. Apresentam excelente estabilidade térmica, capacidade de troca de ânions e estruturas internas ajustáveis. Durante o tratamento térmico, os HDLs perdem seus ânions intercalares e moléculas de água, convertendo-se em um novo material funcional conhecido como óxidos duplos lamelares (ODLs) (LV, et al. 2018). ODLs podem ser submetidos a uma solução ânion desejada para intercalar esses ânions nas estruturas resultantes dos HDLs. Ambos os materiais baseados em HDLs e ODLs podem ser usados para remover MPs, pois já demonstraram seu potencial na adsorção de poluentes orgânicos (SAJUD, et al. 2016, ZHU, et al. 2020). A complexação entre ligações metal-oxigênio e MPs pode facilitar a remoção de MPs. G@LDO foi usado para remover PS; a eficiência de remoção foi $\geq 80\%$ em $\text{pH} = 3-11$; cerca de 60% de PS foi removido em $\text{pH} = 1$ e 13 (PENG, et al. 2022).
- e. Materiais nanomagnéticos:** As nanopartículas de Fe_3O_4 são amplamente utilizadas na ciência da separação devido ao seu comportamento magnético, que permite fácil separação após a aplicação (SAJID, et al. 2019). As nanopartículas de Fe_3O_4 podem magnetizar eficientemente vários tipos de MPs por meio da absorção superficial. A remoção de MPs

em água de rio, esgoto doméstico e água do mar foi de $81,33 \pm 16,17 \%$, $82,28 \pm 5,77 \%$ e $80,56 \pm 17,35 \%$, respectivamente (SHI, et al 2022).

Conclusão: “...A adsorção pode ser uma das tecnologias promissoras para a remoção de MPs de meios aquosos, principalmente devido à sua simplicidade operacional, alta eficiência de remoção, flexibilidade na escolha de adsorventes e baixo custo. Adsorventes baseados em nanomateriais têm mostrado excelente desempenho na remoção de MPs da água. A maioria dos estudos foi conduzida em escala laboratorial, utilizando águas residuais simuladas ou água do mar. Apesar do excelente desempenho na remoção de soluções aquosas, em alguns casos, a presença de MAT (matéria orgânica natural) e ânions reduziu significativamente a eficiência de remoção de MPs. Embora os materiais baseados em nanomateriais estejam surgindo para a remediação adsorvente de MPs, esses estudos ainda estão em estágio inicial e requerem aprimoramento em vários aspectos, como a síntese de adsorventes seletivos para MPs e experimentação em escala piloto usando um sistema de fluxo contínuo. Os adsorventes com estabilidade mecânica e química em uma ampla faixa de pH são preferíveis. Além disso, adsorventes reutilizáveis podem oferecer benefícios em termos de impactos ambientais e econômicos.”

6.3 Análise crítica sobre os artigos apresentados anteriormente.

6.3.1 Análise Crítica sobre o Artigo 1

O artigo "Identification and removal of micro- and nano-plastics: Efficient and cost-effective methods" oferece uma revisão abrangente sobre métodos de identificação e remoção de MPs e NPs em ambientes aquáticos. A ênfase do artigo recai sobre os métodos de remoção, com destaque para técnicas baseadas em membranas, como ultrafiltração (UF), reatores de membrana biológica (MBR) e tecnologia de membrana dinâmica (DMT).

É positivo observar a abordagem abrangente do artigo, que revisa várias técnicas e destaca a eficácia das tecnologias baseadas em membranas na remoção de MPs e NPs. No entanto, nota-se uma lacuna significativa no fornecimento de informações detalhadas sobre as vantagens e desvantagens específicas do uso dessas membranas.

Embora os autores mencionem as vantagens das operações baseadas em membranas, como a baixa necessidade de energia, versatilidade e facilidade de operação, eles não abordam questões críticas relacionadas ao uso dessas tecnologias. A ausência de uma análise mais aprofundada sobre aspectos econômicos, impactos ambientais, vida útil das membranas,

manutenção e possíveis desafios associados ao descarte de membranas usadas podem limitar a compreensão global do leitor sobre a implementação prática dessas técnicas.

Além disso, o artigo menciona estudos que destacam a eficácia de técnicas específicas, como a combinação de coagulação e UF para remoção de MPs, MBR para tratamento de águas residuais municipais e DMT para diversas formas de águas residuais. No entanto, mais uma vez, falta uma discussão mais detalhada sobre as limitações e desafios específicos enfrentados por cada técnica, o que poderia informar melhor o leitor sobre a viabilidade e aplicabilidade dessas abordagens em diferentes cenários.

A falta de uma análise mais profunda das desvantagens específicas de cada técnica de membrana pode deixar os leitores com uma compreensão limitada dos potenciais obstáculos que podem surgir durante a implementação dessas tecnologias no tratamento de águas contaminadas por MPs e NPs.

Além disso, a conclusão dos autores destaca a necessidade de utilizar plenamente processos avançados de membrana, sem fornecer uma discussão mais aprofundada sobre as possíveis limitações dessas abordagens. Uma análise crítica mais abrangente que considere não apenas a eficiência de remoção, mas também aspectos práticos e desafios operacionais, teria fortalecido a conclusão e proporcionado uma visão mais equilibrada sobre a aplicabilidade dessas técnicas.

Em síntese, enquanto o artigo oferece uma revisão informativa sobre métodos de identificação e remoção de MPs e NPs, a falta de uma análise mais detalhada das vantagens e desvantagens específicas das técnicas de membranas limita a compreensão abrangente do leitor sobre a implementação prática dessas técnicas no tratamento de águas residuais contaminadas.

6.3.2 Análise Crítica sobre o Artigo 2

O artigo "Nanomaterials-based adsorbents for remediation of microplastics and nanoplastics in aqueous media: A review" conduzido por Sajid et al. oferece uma visão abrangente e informativa sobre o uso de nanomateriais como adsorventes na remediação de MPs e NPs em meios aquosos. A revisão destaca várias classes de nanomateriais e seus respectivos desempenhos, proporcionando uma compreensão aprofundada das tecnologias emergentes nesse campo.

A análise do artigo revela a eficácia de metal-orgânicas (MOFs), nanomateriais à base de carbono (NC), nanomateriais de origem biológica, hidróxidos e óxidos duplos lamelares, e materiais nanomagnéticos na adsorção de MPs e NPs. O destaque para o uso de MOFs, como ZIF-67, e NC, como cinzas modificadas, mostra a diversidade de opções disponíveis, cada uma com suas vantagens específicas, como alta porosidade, áreas superficiais significativas e adaptabilidade a diferentes condições.

A revisão também aponta para desafios e limitações, destacando a necessidade de estudos mais aprofundados em escala piloto e a consideração de fatores como a presença de matéria orgânica natural e ânions, que podem afetar a eficiência de remoção. A ênfase na estabilidade mecânica e química dos adsorventes em uma ampla faixa de pH ressalta a importância da durabilidade desses materiais para uma aplicação prática.

A conclusão do artigo destaca a promissora natureza da adsorção como uma tecnologia para a remoção de MPs em meios aquosos, enfatizando a simplicidade operacional, alta eficiência e baixo custo associados a adsorventes baseados em nanomateriais. No entanto, é ressaltado que, apesar dos avanços promissores, ainda há desafios a serem superados, como a necessidade de adsorventes seletivos específicos para MPs e a condução de experimentos em escala piloto.

Em resumo, o artigo fornece uma revisão valiosa sobre o estado atual da utilização de nanomateriais como adsorventes na remediação de MPs e NPs em águas, destacando tanto os avanços alcançados quanto as áreas que necessitam de maior pesquisa e desenvolvimento.

6.4 Visão geral das técnicas apresentadas nos tópicos anteriores

Ambas as abordagens têm o potencial de contribuir significativamente para a remoção de MPs e NPs em águas residuais. As técnicas de membranas destacam-se pela eficiência em remoção de MP e NP no tratamento de efluentes (de 40 a 99,99%), além da sua versatilidade, enquanto a adsorção por nanomateriais é notável por sua alta eficiência de remoção (de 71,6 a 100%), além de ser uma opção de uso para alguns resíduos que estão relacionados com poluição ambiental, como as cinzas de carvão. Contudo foi apresentado os desempenhos apenas em escala laboratorial.

A escolha entre essas abordagens dependerá das condições específicas do meio a ser aplicado, dos custos associados (implementação e manutenção) e das considerações ambientais

(se durante o processo pode ocorrer contaminações por outros componentes, durante a manutenção ou após a vida útil dos materiais).

Integrar essas técnicas em abordagens híbridas pode representar o futuro promissor no alto desempenho na remoção de MP e NP em sistema aquoso, otimizando as vantagens de cada método para obter resultados mais eficazes e sustentáveis.

Na Tabela 3 estão apresentadas todas as técnicas e suas eficiências abordadas nos artigos discutido no presente trabalho.

Tabela 3-Técnicas por membranas e nanomateriais apresentadas neste trabalho

Técnica	Eficiência de remoção/absorção	Referência
Ultrafiltração (UF) + coagulação	40 % - 90,99%	MA et al. (2019)
Biorreatores com membranas (MBR)	99,4 - 99,99%	Talvitie et al. (2017), Lares et al. (2018) e Lv. et al. (2019)
Membrana dinâmica (DMT)	90 - >94%	Li et al. (2018) Pizzichetti et al. (2020)
Membrana eletroafiada	89%	Wang et al. (2020)
ZIF-67	92,1 %	WAN, et al. 2022
ZIF-8@Aerogel	85,8 - 91,4%	You, et al. 2021
Nanomateriais a base de carbono	100%	Tang et al. 2021
Cinzas modificadas com íons de ferro	82,8 - 89,9 mg/g	Zhao et al. 2022
CuNi@C	99,18 %	Zhou et al. 2022
Esponjas à base de quitina	71,6 - 92,1 %	Sun, et al 2019

Esponja de Quitina-Óxido de Grafeno.	72,4 - 89,8	Zheng et al. 2022
PDA-MCS	92,3 - 94,3 %	J. Wang, et al. 2021
MBC, Mg-MBC, Zn-MBC	94,81, 98,75 e 99,46%	Z. Wang, et al. 2021
Esponja à base de proteína de aveia	85%	Peng, et al. 2022
G@LDO	> 80%	Tiwari, et al. 2020
Zn-Al LDH	100	Shi, et al. 2022
Nano-Fe ₃ O ₄	>80 em águas reais	Edo, et al. 2020

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma revisão de estudos científicos relacionada às técnicas não comuns que possibilitam a redução da presença de MP e NP nos ecossistemas marinhos. Diante do levantamento de publicações sobre o tema, foram selecionados dois estudos que fazem uma revisão da literatura de duas técnicas distintas, apresentando suas eficiências na remoção e remediação de MP e NP em ambiente aquáticos.

Diante dos estudos avaliados, a utilização de membranas e adsorção por nanomateriais, conforme discutido nos artigos analisados, revela avanços significativos no campo da remediação de poluentes de MP e NP em ecossistema aquáticos como mares e oceanos. As técnicas de membranas, destacou-se pela eficiência de separação de MP e NP (de 40 a 99,99%) e versatilidades. O que se pode dizer o mesmo para a técnica de adsorção por nanomateriais, que também apresentou uma alta eficiência de remoção (de 71,6 a 100%). Contudo, ambos os métodos enfrentam desafios específicos, como a possível formação de incrustações nas membranas e os potenciais impactos ambientais associados aos nanomateriais.

Além disso, é crucial notar a necessidade de análises mais abrangentes nos estudos apresentados, incluindo uma avaliação mais detalhada das vantagens, desvantagens e custos associados às técnicas propostas. A consideração desses aspectos proporcionaria uma visão mais holística e embasada sobre a viabilidade e sustentabilidade desses métodos no tratamento de resíduos plásticos em dimensões menores.

Em última análise, diante dos desafios ambientais crescentes relacionados à presença de MP e NP em nossos ecossistemas marinho, a busca contínua por soluções inovadoras e sustentáveis é crucial. A integração de técnicas eficientes, a consideração cuidadosa dos impactos ambientais e a conscientização pública, e novas lei são fundamentais para avançar na preservação de nossos recursos hídricos e na mitigação dos danos causados por esses poluentes emergentes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-THAWADI, S. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Challenges and Threats to Aquatic Organisms. Arab J Sci Eng 45, 4419–4440 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04402-z>.
2. ANDERSON, K. J. MRS Bulletin , Volume 16 , Issue 7 , Julho 1991 , pp. 58.
3. BONDAROFF, T.P., COOKE, S. The impact of Covid-19 on marine plastic pollution. Ocean Asia (2020).
4. CAIXETA, D., CAIXETA, F. C., & MENEZES FILHO, F. (2018). NANO E MICROPLÁSTICOS NOS ECOSSISTEMAS: IMPACTOS AMBIENTAIS E EFEITOS SOBRE OS ORGANISMOS. ENCICLOPEDIA BIOSFERA, 15(27). Recuperado de <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/607>
5. CALLISTER, W. J., RETHWISCH, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10 Edição. Editora Wiley. 2009.
6. CHAE, Y., AN, Y.-J., Effects of micro- and nanoplastics on aquatic ecosystems: Current research trends and perspectives, Marine Pollution Bulletin (2017).
7. CONAMA. Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 30 dez. 2009.
8. CONAMA. Resolução CONAMA No 430/2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 16 mai. 2011.

9. CÓZAR, A., MARTÍ, E., DUARTE, C. M., GARCÍA-DE-LOMAS, J., VAN SEBILLE, E., BALLATORE, T. J., EGUÍLUZ, V. M., IGNACIO GONZÁLEZ-GORDILLO, J., PEDROTTI, M. L., ECHEVARRÍA, F., TROUBLÈ, R., IRIGOIEN, X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Sci. Adv.* 3, e1600582 (2017).

10. COSTA, J. P. SANTO, P. S. M., DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T. (Nano)plastics in the environment – Sources, fates and effects. *Science of the Total Environment*, v. 566–567, p. 15-26, 2016.

11. GAUR, K. SIROHI, R, BHAT, M. I, GAUTAM, K., SHARMA, P., SRIVASTA, J. K., PANDEY, A. A review on the effect of micro- and nano-plastics pollution on the emergence of antimicrobial resistance. *Chemosphere*. Volume 311, Parte 1, (2023).

12. HANIF, M . A., IBRAHIM,N., DAHALAN, F. A., ALI, U. F. M., HASAN, M. JALIL, U. F. Microplastic and nanoplastic: Recent literature studies and patents on their removal from aqueous environment. *Science of the Total Environment* 810 (2022) 152115.

13. JAHNKE, A., ARP, H. P. H., ESCHER, B. I., GEWERT, B., GOROKHOVA, E., KÜHNEL, D., OGONOWSKI, M., POTTHOFF, A., RUMMEL, C., SCHMITT-JANSEN, M., TOORMAN, E., MACLEOD, M. Reducing Uncertainty and Confronting Ignorance about the Possible Impacts of Weathering Plastic in the Marine Environment.

14. JUDD, S. J. The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology, *Chem. Eng. J.* 305 (2016) 37–45, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.141>.

15. KOELMANS, A.A., BESSELING, E., SHIM, W.J.: Nanoplastics in the aquatic environment: critical review. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*, pp. 325–340 (2015)

16. KUNDUN, A., SHETTI, N. P., Basu, S., Reddy, K. R., Nadagouda, M. N., Aminabhavi, T. M. Identification and removal of micro- and nano-plastics: Efficient and cost-effective methods. *Chemical Engineering Journal* 421 (2021) 129816
17. LI, L., XU, G., YU, H., XING, J. Dynamic membrane for micro-particle removal in wastewater treatment: performance and influencing factors, *Sci. Total Environ.* 627 (2018) 332–340.
18. LIU, Q., CHEN, Y., CHEN, Z., YEANG, F., XIE, Y., YAO, W. Current status of microplastics and nanoplastics removal methods: Summary, comparison and prospect. *Science of The Total Environment*. Volume 851, Part 1, 10 December 2022, 157991
19. MA, B., XUE, W., DING, Y., HU, H. LIU, C., QU, J. Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment, *J. Environ. Sci. (China)* 78 (2019) 267–275, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.006>.
20. MORALES-CASELLES, C., VIEJO, J., MARTÍ, E., GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, D., PRAGNELL-RAASCH, H., GONZÁLEZ-GORDILLO, J. I., MONTERO, E., ARROYO, G.M., HANKE, G., SALVO, V. S., BASURKO, O. C., MALLOS, N., LEBRETON, L., ECHEVARRÍA, F., VAN EMMERIK, T., DUARTE, C. M., GÁLVEZ, J. A., VAN SEBILLE, E., GALGANI, F., GARCÍA, C. M., ROSS, P. S., BARTUAL, A., IOAKEIMIDIS, C., MARKALAIN, G., ISOBE, A., CÓZAR, A., 2021. An in shore–offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. *Nat Sustain* 4 (6), 484–493
21. MOORE, C.J.: Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. *Environ. Res.* 108, 131–139 (2008).
22. MOSSMAN, S. Early plastics: perspectives 1850-1950. *Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG.*): 89 (2017).
23. NOMURA, S. Recent developments in cokemaking technologies in Japan. *Fuel Processing Technology*. Volume 159, May 2017, Pages 1-8

24. OLIVATTO, G. P., CARREIRA, R., MONTAGNER, C. C. Microplastics: Contaminants of global concern in the Anthropocene. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 6, p. 1968–1989, 2018.
25. PAÇO, A., DUARTE, K.; COSTA, J. P.; SANTOS, P. S.. M.; PEREIRA, R.; PEREIRA, M. E.; FREITAS, NA. C. DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T. A. P. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *Science of The Total Environment*, v. 586, p. 10-1515, 2017.
26. PIATTI, T. M. RODRIGUES, R. A. F. Plásticos : características, usos, produção e impactos ambientais. Maceió : EDUFAL, 2005. 51p. : il. - (Conversando sobre ciências em Alagoas).
27. PIZZICHETTI, A.R.P., PABLOS, C., ALVAREZ-FERN´ANDEZ, C., REYNOLDS, K., STANLEY, S., MARUGAN, J. Evaluation of membranes performance for microplastic removal in a simple and low-cost filtration system, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* (2020) 100075
28. REMEDIO, M.; ZANIN, M. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PRODUTOS PLÁSTICOS: ESTADO DA ARTE. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14., 2000, São Pedro - SP. Anais 56501.
29. REVEL, M., CHANTÊL, A., MOUNEYRAC, C. Micro(nano)plastics: A threat to human health?. *Current Opinion in Environmental Science & Health* Volume 1, February 2018, Pages 17-23
30. RITCHIE, H., SAMBORSKA, V., ROSER, M. Plastic Pollution. *Our World in Data* (2019). Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. Acessado em: 05 de Novembro de 2023.

31. SAJID, M., IHSANULLAH I., KHAN, M. T., BAIG, N. Nanomaterials-based adsorbents for remediation of microplastics and nanoplastics in aqueous media: A review
32. SANA, S. S., DOGIPARTHI, L. K., GANGADHAR, L., CHAKRAVORTY, A., ABHISHEK, N. Effects of microplastics and nanoplastics on marine environment and human health. ENVIRONMENTAL POLLUTANTS AND THE RISK OF NEUROLOGICAL DISORDERS. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020.
33. SENADO FEDERAL. Projeto de Lei nº 2524, de 2022. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/154790>. Acessado em: Novembro, 2023.
34. SHAMS, M., ALAM, I. MAHBUB, M. S. Plastic pollution during COVID-19: Plastic waste directives and its long-term impact on the environment. Environmental Advances. Volume 5, October 2021.
35. Statista, 2023: <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>. Acessado em Outubro, 2023.
36. TANG, Y., ZHANG, S. SU, Y. WU, D., ZHAO, Y., XIE, B. Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes, Chem. Eng. J. 406 (2021), 126804, <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126804>.
37. THOMPSON, R.C.; MOORE, C.J.; VOM SAAL, F.S.; SWAN, S.H. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 364(1526), 2153–2166 (2009).
38. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi (2021).

39. WANG, R., ZHANG, L., CHEN, B., ZHU, X. Low-pressure driven electrospun membrane with tuned surface charge for efficient removal of polystyrene nanoplastics from water, *J. Memb. Sci.* 614 (2020) 118470, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118470>.
40. WEI, R., TISO, T., BERTILING, J., O'CONNOR, K., BLANK, L. M., BORNSCHEUE, U. T. Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling. *Nature Catalysis* 3, 867–871 (2020).
41. WORM, B., LOTZE, H. K., JUBINVILLE, I., WILCOX, C. & JAMBECK, J. Plastic as a Persistent Marine Pollutant. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 42, 1–26 (2017).
42. ZAREMBA, J. Em um ano, canudos de plásticos são proibidos em 8 Estados. *Folha de São Paulo*. 2020. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2020/01/em-um-ano-canudos-de-plastico-sao-proibidos-em-8-estados-e-no-df.shtml>. Acessado em: 10 de Novembro de 2023.
43. ZHAO, H., HUANG, X., WANG, L., ZHAO, X., YAN, F., YANG, Y., LI, G., GAO, P., JI, P. Removal of polystyrene nanoplastics from aqueous solutions using a novel magnetic material: Adsorbability, mechanism, and reusability, *Chem. Eng. J.* 430 (2022), 133122, <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.133122>.
44. ZHOU, G., HUANG, X., XU, H., WANG, Q., WANG, M., WANG, Y., LI, Q., ZHANG, Y., YE, Q., ZHANG, J. Removal of polystyrene nanoplastics from water by Cu Ni carbon material: The role of adsorption, *Sci. Total Environ.* 820 (2022), 153190, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153190>.
45. Busse, K., Ebner, I., Humpf, H.U., Ivleva, N., Kaeppler, A. , B.E. Oßmann, D. Schymanski, Comment on “Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea”, *Environ. Sci. Technol.* 53 (2020) 12300–12310, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03182>.
46. Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., O. Setälä, Solutions to microplastic pollution – removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater

- treatment technologies, *Water Res.* 123 (2017) 401–407, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
47. Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpää, M. Sillanpää, M. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology, *Water Res.* 133 (2018) 236–246, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>.
 48. Lv, X. Dong, Q., Zuo, Z., Liu, Y., Huang, X., Wu, W.M.. Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies, *J. Clean. Prod.* 225 (2019) 579–586, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.321>
 49. J. Gigault, H. El Hadri, S. Reynaud, E. Deniau, B. Grassl, Asymmetrical flow field flow fractionation methods to characterize submicron particles: application to carbon-based aggregates and nanoplastics, *Anal. Bioanal. Chem.* 409 (2017) 6761–6769, <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0629-7>.
 50. Y.J. Chen, Y. Chen, C. Miao, Y.R. Wang, G.K. Gao, R.X. Yang, H.J. Zhu, J.H. Wang, S.L. Li, Y.Q. Lan, Metal–organic framework-based foams for efficient microplastics removal, *J. Mater. Chem. A Mater.* 8 (2020) 14644–14652, <https://doi.org/10.1039/D0TA04891G>.
 51. L.M. Hernandez, N. Yousefi, N. Tufenkji, Are there nanoplastics in your personal care products? *Environ. Sci. Technol. Lett.* 4 (2017) 280–285, <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00187>.
 52. H. Wan, J. Wang, X. Sheng, J. Yan, W. Zhang, Y. Xu, Removal of Polystyrene Microplastics from Aqueous Solution Using the Metal-Organic Framework Material of ZIF-67, *Toxics*. 10 (2022) 70, <https://doi.org/10.3390/toxics10020070>
 53. D. You, Y. Zhao, W. Yang, Q. Pan, J. Li, Metal-Organic framework-based Wood Aerogel for Effective Removal of Micro/Nano plastics, *Chemical Research in Chinese*

- Universities 2021 38:1. 38 (2021) 186–191. <https://doi.org/10.1007/S40242-021-1317-X>.
54. Y.J. Chen, Y. Chen, C. Miao, Y.R. Wang, G.K. Gao, R.X. Yang, H.J. Zhu, J.H. Wang, S.L. Li, Y.Q. Lan, Metal–organic framework-based foams for efficient microplastics removal, *J. Mater. Chem. A Mater.* 8 (2020) 14644–14652, <https://doi.org/10.1039/D0TA04891G>.
 55. G. Peng, M. Xiang, W. Wang, Z. Su, H. Liu, Y. Mao, Y. Chen, P. Zhang, *Engineering*
 56. 3D graphene-like carbon-assembled layered double oxide for efficient microplastic removal in a wide pH range, *J. Hazard. Mater.* 433 (2022), 128672, <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.128672>.
 57. P. Sirajudheen, N.C. Poovathumkuzhi, S. Vigneshwaran, B.M. Chelaveettil, S. Meenakshi, Applications of chitin and chitosan based biomaterials for the adsorptive removal of textile dyes from water — A comprehensive review, *Carbohydr. Polym.* 273 (2021), 118604, <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.118604>.
 58. N. Baig, M. Ihsanullah, T.A. Sajid, Saleh, Graphene-based adsorbents for the removal of toxic organic pollutants: A review, *J. Environ. Manage.* 244 (2019) 370–382, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.047>.
 59. C. Sun, Z. Wang, H. Zheng, L. Chen, F. Li, Biodegradable and re-usable sponge materials made from chitin for efficient removal of microplastics, *J. Hazard. Mater.* 420 (2021), 126599, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126599>.