v.7, n.4, 2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

BIORREMEDIAÇÃO DE MICROPLÁSTICOS COM PARTICIPAÇÃO DE MICRORGANISMOS: ESTUDO DE REVISÃO

BIOREMEDIATION OF MICROPLASTICS WITH THE PARTICIPATION OF MICROORGANISMS - REVIEW STUDY

BIORREMEDIACIÓN DE MICROPLÁSTICOS CON LA PARTICIPACIÓN DE MICROORGANISMOS - ESTUDIO DE REVISIÓN

Luísa Helena dos Santos Oliveira[1], Gabriela Rocha[2]

e747725
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i4.7725

PUBLICADO: 04/2026

RESUMO

O uso de plásticos se intensificou por causa das suas propriedades como leveza e durabilidade, porém, devido ao seu descarte inadequado tem gerado grandes problemas ambientais. Entre os principais poluentes derivados desse material estão os microplásticos (MPs), presentes em praticamente todos os ecossistemas aquáticos, os MPs afetam a biota marinha e a saúde humana por meio da bioacumulação e a biomagnificação. A biorremediação é uma das alternativas para a mitigação da poluição por MPs, utilizando microrganismos capazes de degradar polímeros sintéticos em compostos menos tóxicos. O presente trabalho tem como foco verificar as vantagens e desvantagens do uso de biorremediação com um estudo bibliográfico. Apesar dos avanços, a biodegradação ainda apresenta limitações relacionadas à taxa de degradação e à formação de subprodutos intermediários, porém, com o desenvolvimento e o aprimoramento de estratégias biotecnológicas baseadas em biorremediação pode ser um caminho promissor e ecologicamente viável para reduzir o impacto dos microplásticos nos ecossistemas marinhos e proteger a saúde ambiental e humana.

PALAVRAS-CHAVE: Plásticos. Microplásticos. Biorremediação. Degradação. Fungos. Bactérias.

ABSTRACT

The use of plastics has intensified due to their properties such as lightness and durability. However, improper disposal has led to significant environmental problems. Among the main pollutants derived from this material are microplastics (MPs), which are present in virtually all aquatic ecosystems. MPs affect marine biota and human health through bioaccumulation and biomagnification. Bioremediation is one of the alternatives for mitigating MPs pollution, utilizing microorganisms capable of degrading synthetic polymers into less toxic compounds. This study focuses on examining the advantages and disadvantages of using bioremediation through a bibliographic review. Despite advancements, biodegradation still presents limitations related to the rate of degradation and the formation of intermediate by-products. However, the development and enhancement of biotechnological strategies based on bioremediation can be a promising and ecologically viable path to reduce the impact of microplastics on marine ecosystems and protect environmental and human health.

KEYWORDS: *Plastics. Microplastics. Bioremediation. Degradation. Fungi. Bacteria.*

[1] Docente no curso de Engenharia Ambiental e Urbana do Centro de Engenharia, Ciências Sociais e Modelagem (CECS), Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André-SP, Brasil.
[2] Bacharel em Engenharia Ambiental e Urbana, Centro de Engenharia, Ciências Sociais e Modelagem (CECS), Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André-SP, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

RESUMEN
El uso de plásticos se ha intensificado debido a sus propiedades, como la ligereza y la durabilidad. Sin embargo, su eliminación inadecuada ha generado importantes problemas ambientales. Entre los principales contaminantes derivados de este material se encuentran los microplásticos (MPs), presentes en prácticamente todos los ecosistemas acuáticos. Los MPs afectan a la biota marina y a la salud humana mediante la bioacumulación y la biomagnificación. La biorremediación es una de las alternativas para mitigar la contaminación por MPs, utilizando microorganismos capaces de degradar polímeros sintéticos en compuestos menos tóxicos. Este estudio se centra en examinar las ventajas y desventajas de la biorremediación mediante una revisión bibliográfica. A pesar de los avances, la biodegradación aún presenta limitaciones relacionadas con la velocidad de degradación y la formación de subproductos intermedios. No obstante, el desarrollo y la mejora de estrategias biotecnológicas basadas en la biorremediación pueden ser una vía prometedora y ecológicamente viable para reducir el impacto de los microplásticos en los ecosistemas marinos y proteger el medio ambiente y la salud humana.

PALABRAS CLAVE*: Plásticos. Microplásticos. Biorremediación. Degradación. Hongos. Bacterias.*

INTRODUÇÃO

O plástico é um material polimérico sintético ou semissintético, caracterizado por sua alta maleabilidade, durabilidade, leveza e versatilidade, capaz de ser moldado sob calor ou pressão em infinitas formas. Embora substâncias naturais moldáveis existissem, o plástico artificial moderno teve marcos fundamentais, começando com a criação do celuloide por John Wesley Hyatt em 1870, mas o grande salto ocorreu em 1907-1909 com o químico belga Leo Baekeland, que criou a "baquelite", o primeiro plástico 100% sintético e comercializável, baseado na polimerização de fenol e formaldeído. Do ponto de vista de sua composição, a grande maioria dos plásticos modernos é produzida a partir de subprodutos do petróleo, gás natural e carvão, principalmente a nafta, que, por meio de processos químicos de craqueamento e polimerização, transforma monômeros em longas cadeias de polímeros.

O uso de plásticos se deu após o fim da Segunda Guerra Mundial, trazendo diversos benefícios à sociedade fazendo parte do cotidiano, podendo ser encontrado em diversos tipos de materiais, como no interior de carros, em brinquedos, roupas, sacolas plásticas e principalmente na embalagem de alimentos garantindo a sua conservação (Carvalho, 2023). Por meio de suas características como durabilidade, leveza, rigidez e baixo custo, o plástico se torna um material versátil, podendo ser utilizado para melhorar a performance de produtos e reduzir custos. Portanto, tem inúmeras aplicações e usos diferentes tendo assim grande importância em diversos âmbitos (Pompêo *et al.,* 2022).

Devido à sua altíssima durabilidade, o descarte inadequado de plásticos gera poluição persistente, principalmente nos oceanos, onde sacolas plásticas e microplásticos são responsáveis pela morte de milhares de aves marinhas e tartarugas anualmente, além de entrarem na cadeia alimentar, em que a taxa de produção mundial de plásticos é maior que a maioria dos materiais sintéticos produzidos pela indústria (Pompêo *et al.,* 2022).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Consequentemente, houve o aumento do seu descarte, sendo estes descartados ou tratados incorretamente, gerando poluição ao meio ambiente. De acordo com Queiroz (2022) estima-se que apenas 6% do que é produzido é destinado às reciclagem, enquanto os 94% são destinados a aterros sanitários ou liberados no meio ambiente, sendo que, os rios são considerados a principal fonte de poluição por microplástico, pois transportam esses contaminantes advindos do ambiente terrestre até o ambiente marinho.

Por outro lado, a indústria do plástico é um motor econômico global, movimentando bilhões de dólares, gerando milhões de empregos diretos e impulsionando a economia em diversos setores, com o desenvolvimento crescente de tecnologias de reciclagem química e mecânica.

Os microplásticos possuem um diâmetro entre 0,1 mm e 5 mm e podem ser divididos em duas categorias que são definidas de acordo com a sua origem, como primária, que são aqueles produzidos intencionalmente como micropartícula e incorporado aos produtos, como cosméticos, produtos de higiene pessoal, tintas e produtos de limpeza, sendo que a principal via de contaminação de corpos hídricos desse tipo de microplástico é a partir de efluentes domésticos e industriais (Queiroz, 2022), representando entre 15% a 31% destes nos oceanos. A outra categoria são os microplásticos secundários, que são originados através do desgaste e/ou fragmentação de outros resíduos plásticos maiores, pois ao estarem expostos eles sofrem sucessivas fragmentações por causa do intemperismo ambiental gerando partículas cada vez menores. Estes contabilizam de 69% a 81% dos microplásticos encontrados nos oceanos (Pompêo *et al.,* 2022).

Não há um único país que tenha "inventado" o microplástico, pois ele surge tanto de forma primária (fabricado pequeno) quanto secundária (fragmentação). No entanto, os Estados Unidos são amplamente considerados pioneiros na introdução de microesferas de plástico em produtos de consumo. A partir da década de 1970 e com grande expansão nos anos 80 e 90, indústrias nos EUA começaram a substituir ingredientes naturais abrasivos (como cascas de nozes ou sementes) por polietileno (PE) e polipropileno (PP) em esfoliantes faciais, sabonetes líquidos, cremes dentais e produtos de limpeza, por serem mais baratos e oferecerem uma sensação suave na pele.

A utilização de microplásticos no Brasil seguiu a tendência global da indústria de cosméticos e higiene pessoal, chegando através da importação de produtos e da adoção das mesmas formulações por multinacionais instaladas no país, intensificando-se entre as décadas de 1990 e 2000. A partir disso, microesferas de polietileno tornaram-se comuns em sabonetes, géis de banho e esfoliantes faciais.

O Brasil enfrenta desafios com a poluição por microplásticos, com cerca de 80% dos resíduos plásticos não reciclados em 2018, contribuindo para o vazamento de materiais para os

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

oceanos. Atualmente, há movimentações para proibir o uso desses materiais em produtos de higiene, seguindo a tendência de regulação internacional para combater a contaminação ambiental.

A primeira vez que os microplásticos foram detectados foi em 1970 e os seus efeitos podem ser mais graves dos que os observados em partículas maiores, devido ao seu tamanho diminuto e grande área superficial, sendo os mesmos biodisponíveis para uma grande quantidade de organismos aquáticos, segundo Castañeda, citado por Kirsten (2022), já que os microplásticos são capazes de interagir e absorver diversas substâncias tóxicas que podem ser liberadas no meio ambiente, dentre elas os ftalatos, monômeros residuais, retardadores de chama, biocidas, hidrocarbonetos poli aromáticos, entre outros, segundo Rochman, citado por Kirsten (2022). Além disso, tem a capacidade de absorver metais, como o chumbo, sendo a mesma afetada por agentes externos, como a radiação ultravioleta. Outro fator importante, é que o microplástico pode liberar compostos químicos que são os componentes usados em plásticos, como o bisfenol A, éteres difenílicos polibromados, tetrabromobisfenol-A e ftalatos, podendo ser observado em alimentos aquecidos em recipientes de plásticos e em produtos alimentícios (Pompêo *et al.,* 2022). No oceano, a presença de plástico está amplamente disseminada ao longo das linhas costeiras, no gelo marinho do Ártico, tanto na superfície quanto no fundo do mar. Calcula-se que aproximadamente 268.940 toneladas de partículas plásticas estejam à deriva nos oceanos, com 92,4% delas sendo microplásticos. Isso significa que a poluição plástica está globalmente disseminada, com sua presença em todo o oceano (Nobre, 2022). Uma das soluções encontradas para reduzir ou eliminar esses resíduos no oceano é utilizando a biorremediação com microrganismos, como fungos e bactérias, já que possuem capacidade de degradar esses compostos, sendo uma estratégia eficaz para enfrentar a questão da poluição de microplástico em ambientes marinhos.

O microplástico presente nos ambientes marinhos não é apenas uma preocupação isolada, mas sim um agente que interage profundamente com o ecossistema marinho. Ao agir como uma "esponja", ele absorve e libera uma variedade de substâncias químicas, influenciando diretamente a qualidade da água e do sedimento, bem como a saúde dos organismos que habitam esses ambientes. Por exemplo, sua presença na camada superficial da água pode interferir na penetração da luz solar, afetando assim a fotossíntese do fitoplâncton, que é responsável por uma grande parte da produção de oxigênio na Terra (Nobre, 2022). Esses efeitos se amplificam ao longo da cadeia alimentar marinha. Microplásticos menores, por exemplo, têm maior probabilidade de se associarem às algas, prejudicando sua capacidade de realizar a fotossíntese e causando danos estruturais. Em organismos como bivalves, o acúmulo de microplásticos é observado em diversas partes do corpo após a exposição, resultando em processos inflamatórios e danos à membrana celular.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Além disso, a interação entre microplásticos e mudanças climáticas agrava ainda mais os impactos nos ecossistemas marinhos. Estudos demonstraram que organismos como ouriços-do-mar e peixes são particularmente vulneráveis a esse conjunto de estressores, o que resulta em redução do crescimento, deformidades e mudanças no comportamento de predação. Esses problemas têm implicações não apenas para a saúde dos ecossistemas marinhos, mas também para a saúde humana. Segundo Von Moos, citado por Nobre (2022), a biomagnificação e a bioacumulação de microplásticos em organismos de níveis tróficos superiores significa que, eventualmente, essas partículas acabam sendo ingeridas por humanos através da cadeia alimentar, representando um risco potencial para a saúde humana.

Assim, pode-se concluir que, os microplásticos ocasionam diversos malefícios ao sistema aquático de diferentes maneiras, contribuindo para o desequilíbrio ecossistêmico e, portanto, entender a interação entre microplásticos e o ambiente marinho é crucial não apenas para proteger a vida marinha, mas também para proteger a saúde humana e o equilíbrio dos ecossistemas globais.

Uma maneira eficiente de diminuir esses impactos é através do uso da biorremediação desse material com o uso de microrganismos, pois é uma estratégia biotecnológica promissora que tem como proposta remover ou degradar esse contaminante de forma eficiente e sustentável, podendo eliminar por completo ou transformar em produtos menos tóxicos, sendo uma metodologia verde em que se utiliza microrganismos de maneira controlada e que não causa desequilíbrios ecológicos. Ademais, essa tecnologia é um pilar crucial para o desenvolvimento sustentável: ODS 6 (Água Limpa e Saneamento): Degradação de microplásticos em corpos hídricos e estações de tratamento; ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis): Desenvolvimento de plásticos biodegradáveis (incorporando esporos bacterianos) e reciclagem enzimática; ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima): Potencial de transformar resíduos em subprodutos valiosos ou bioplásticos, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa da produção de plástico virgem e, ODS 14 (Vida na Água): Ação direta contra o acúmulo de 85% de resíduos plásticos nos oceanos.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a utilização e efeitos de microplásticos nos oceanos através de levantamento bibliográfico e a utilização de processos de biorremediação como possível tratamento, identificando tanto os microrganismos com maior capacidade de degradação desse material.

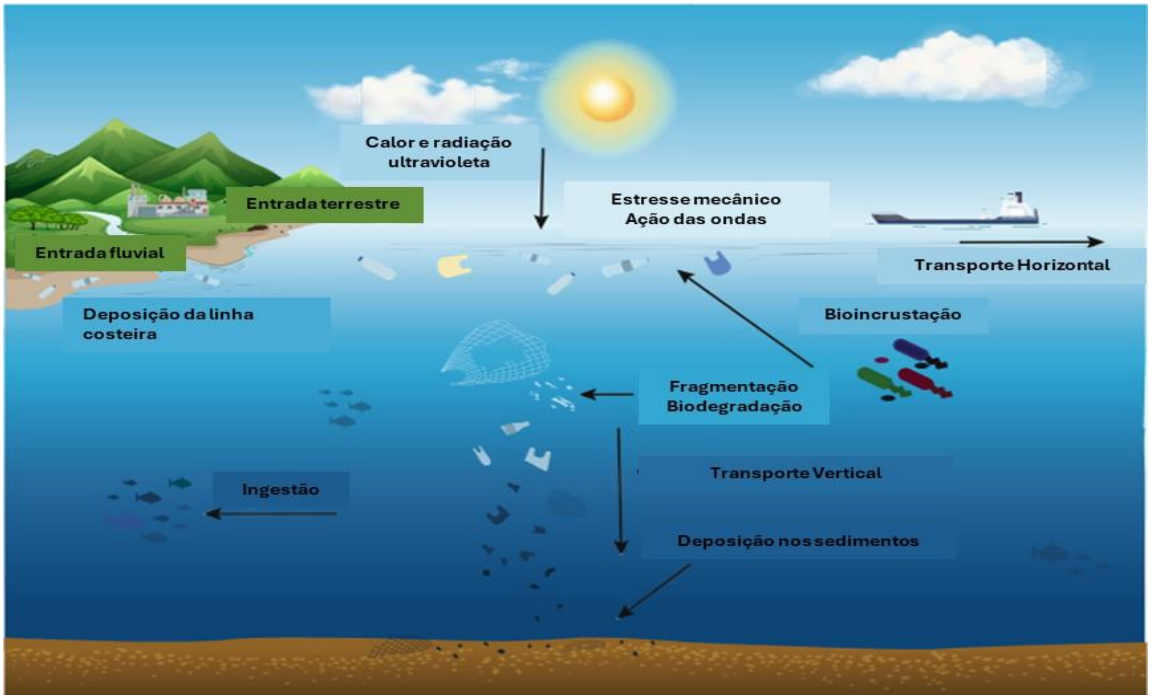
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Microplástico

Os microplásticos (MPs) são provenientes da quebra de grandes detritos plásticos, devido à exposição à atividade de animais e microrganismos, bem como à degradação por processos naturais e chegam aos oceanos de várias formas, uma delas é através do descarte inadequado de resíduos e a outra é no processo de tratamento de águas residuais, pois os mesmos não podem ser removidos por processos utilizados nas estações de tratamento de água, já que essas partículas passam por todo o processo de tratamento praticamente inalteradas, e assim chegam aos oceanos e demais corpos aquáticos. Conforme a Figura 1, é possível observar maneiras como o plástico pode chegar nos oceanos e o potencial destino dos detritos.

Figura 1. Como os plásticos podem chegar aos oceanos como destino final



Fonte: VAKSMAA *et al.,* 2021.

Para que o processo de biorremediação ocorra da melhor maneira é fundamental avaliar a estrutura, a morfologia, as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos polímeros para verificar o melhor tipo de tratamento e quais são as limitações e dificuldades nesse processo (Peixoto, 2017).

A estrutura química pode ser composta por repetições de um único componente químico ligadas covalentemente, formando um arcabouço homogêneo, os homopolímeros; ou por

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

diferentes unidades monoméricas covalentemente unidas, compondo um mosaico molecular, os copolímeros; e podem ser divididos em sete tipos básicos de acordo com sua composição e características, como polietileno tereftalato (PET), polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC), polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e outros, sendo que o plástico de maior produção e consumo mundial é o PE (Correia, 2022). Na Figura 1 se encontram as principais moléculas de polímero encontradas no ambiente marinho e onde são utilizadas.

A inércia e a alta resistência desses produtos se justificam pela elevada massa molecular, alto grau de compactação da molécula e por sua natureza altamente hidrofóbica, fatores que interferem na disponibilidade da molécula ao ataque microbiano (Hadad *et al.,* 2005). Quanto menores e mais repetitivos forem os monômeros, mais intensa é a cristalização da molécula, portanto menos biodegradável ela se torna. Para viabilizar o processo de biorremediação pode ser feito um pré-tratamento em que há a modificação da superfície do material, podendo alterar as propriedades físicas e químicas do polímero para favorecer o ataque microbiano (Peixoto, 2017).

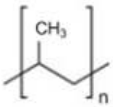
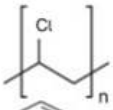
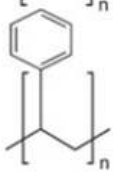
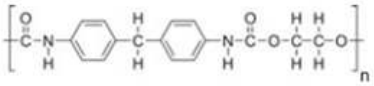
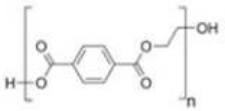
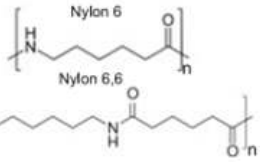
1.2. Consequências do microplástico nos oceanos

O microplástico, de acordo com Lisiane De Brida, leva em torno de 400 anos para ser completamente degradado e a sua grande quantidade em ambientes marinhos afetam negativamente todos os seres vivos em aspectos ambientais, econômicos e sociais e se caracteriza como um problema, dada a importância dos oceanos para a vida no planeta terra.

O MP pode ser ingerido por animais que vivem nos oceanos levando à uma bioacumulação na cadeia alimentar, podendo afetar o crescimento, a reprodução e causar lesões nos órgãos internos e ao bloqueio do trato gastrointestinal dos animais desse ambiente de Brida (2023). Por exemplo, nas tartarugas o microplástico afeta a capacidade digestiva, causa desnutrição e diminui a capacidade de movimento destes animais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Moléculas de polímero de plástico recorrentes em ambientes marinhos

Polímero	Abreviação	Unidade repetitiva	Demanda	Código de reciclagem
Polietileno	PE		Embalagens, construção civil e agricultura	 02 HDPE 04 LDPE
Polipropileno	PP		Embalagens, setor doméstico e automotivo	 05
Policloreto de vinila	PVC		Construção Civil	 03
Poliestireno	PS		Embalagens, materiais de laboratório	 06
Poliuretano	PU		Construção civil, setor elétrico e eletrônico	 07 Others
Poli (tereftalato de etileno)	PET		Embalagens	 01
Poliamida	PA		Setor automotivo, elétrico e eletrônico	 PA

Fonte: VAKSMAA *et al.,* 2021.

Aproximadamente 267 espécies de organismos marinhos são afetadas por MPs no mundo. É importante levar em consideração que esses animais podem ser ingeridos pelos humanos como forma de alimento, portanto, o MP também pode estar presente nesses organismos (Queiroz *et al.,* 2022). Um recente estudo detectou a presença do microplástico no sangue humano, em que esses poluentes chegam ao organismo através do consumo de alimentos e água contaminados e até mesmo podendo ser inalados (Frascarelli *et al.,* 2022), sendo que, alguns desses materiais pode conter elementos químicos nocivos em sua composição, como aditivos e corantes, que impactam ainda mais o ambiente, e consequentemente, a saúde humana.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os MPs, de acordo com a literatura, têm a capacidade de adsorver e transportar substâncias tóxicas, persistentes e bioacumuláveis presentes em pequenas quantidades em ambientes aquáticos, quando estão em ambientes contaminados e de se vincular a grandes quantidades de produtos químicos e patógenos bacterianos, provenientes, por exemplo, de águas de lastro ou esgotos, desempenhando um papel crucial como vetores potenciais no transporte desses elementos no ambiente aquático. Essa capacidade pode estar associada à sua morfologia irregular, hidrofobicidade e elevada área superficial, sendo que os MPs podem potencializar a condição de vetores de poluentes persistentes/emergentes. Exemplos destes contaminantes são os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, hidrocarbonetos derivados do petróleo, pesticidas organoclorados, diversos fármacos e outros. Alguns desses compostos são adicionados no processo de fabricação de plásticos, outros são absorvidos ou adsorvidos pelos MPs (Pômpeo *et al.,* 2022). Alguns estudos demonstraram que tais aditivos químicos e poluentes absorvidos pela superfície de contato do microplástico podem ser lixiviados e transportados para tecidos internos de organismos marinhos que os consomem (Nobre, 2022).

De acordo com Goswami (2021), citado por Gordiano (2022, p. 32), - um impacto potencial é a agregação de drogas farmacêuticas com os microplásticos, resultando na redução da concentração de clorofila e influenciando a taxa de crescimento do fitoplâncton. Pode ocorrer também o deslocamento do fitoplâncton para outras regiões do oceano através dos MPs, podendo causar uma invasão de espécies e um desequilíbrio que ainda não se sabe ao certo as consequências (Marques *et al.,* 2020).

O microplástico em ambientes marinhos tende a se comportar como uma “esponja” interagindo com o meio, liberando e absorvendo substâncias que podem gerar impactos em diferentes matrizes ambientais, como a água e o sedimento e aos organismos a eles associados (Nobre *et al.,* 2022). Outro fator importante é a influência que ele tem no sequestro de carbono realizado pelo oceano, sendo que a existência dessas partículas na camada superficial da água pode gerar impactos na penetração da luz solar, interferindo na fotossíntese e no desenvolvimento do fitoplâncton, pois estes organismos dependem do CO_2 dissolvido na água para conduzir seus processos fisiológicos e desempenham um papel crucial na produção de cerca de 80% do oxigênio da Terra (Nobre *et al.,* 2022).

Os efeitos dos microplásticos (MPs) na cadeia trófica variam conforme os estágios de vida e os organismos envolvidos. Os microplásticos menores têm maior probabilidade de se associarem às algas, prejudicando a fotossíntese e causando danos estruturais, levando à obstrução do organismo em 24 horas após a exposição inicial (Queiroz, 2022). Já em organismos bivalves, verifica-se o acúmulo de MPs através da ingestão nas brânquias, glândula digestiva e lisossomos do mexilhão após exposição, resultando em processos inflamatórios e danos à membrana lisossômica (Nobre *et al.,* 2022).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A susceptibilidade que os ecossistemas marinhos possuem aos múltiplos estressores, incluem os efeitos dos microplásticos (MPs) associados às mudanças climáticas. Estudos evidenciam que organismos como ouriços-do-mar e peixes são afetados pelo aumento da temperatura e exposição a MPs, resultando em redução do crescimento, deformidades e confusão na predação. A biomagnificação e bioacumulação de MPs em organismos de níveis tróficos superiores gera grande impacto na cadeia alimentar e na saúde humana, pois ao ingerirem os MPs há o acúmulo das partículas no músculo, principalmente na parte posterior. Se partículas não forem excretadas, ficam acumuladas e disponíveis para os consumidores destas espécies, portanto, os humanos acabam ingerindo essas partículas (Nobre *et al.,* 2022).

Os microplásticos no oceano servem como superfícies para colonização microbiana. Um estudo abordou a composição das comunidades microbianas encontradas na superfície de microplásticos, conhecidas como "plastisfera", onde dentre os microrganismos encontrados, destaca-se as bactérias do gênero *Vibrio*. Esses microrganismos são amplamente conhecidos por sua presença em ambientes aquáticos e sua capacidade de colonizar superfícies inertes, como microplásticos. Algumas espécies, como *Vibrio parahaemolyticus* e *Vibrio vulnificus*, são patogênicas para humanos e podem representar um risco à saúde pública devido à disseminação de doenças através de fragmentos plásticos contaminados (Oberbeckmann *et al.,* 2020).

1.3. Biorremediação

A biorremediação é o uso de organismos, como plantas e microrganismos para remover ou reduzir poluentes no ambiente, processo em que converte compostos complexos em moléculas menores e mais simples ou em substâncias ambientalmente menos perigosas; nesse processo, os microrganismos realizam a metabolização do contaminante e após digeri-lo, o converte em gases inócuos como o CO2 e em água, liberando-os no local que está sendo tratado.

As moléculas orgânicas de difícil degradação podem ter diversas origens, como natural, sintetizadas pelo metabolismo biológico, ou sintéticas, produzidas por tecnologias industriais, além de estranhas ao ambiente natural, podendo ser denominada como xenobióticos, que ocasionam efeitos nocivos e mutagênicos aos organismos vivos, podendo gerar a eliminação seletiva de indivíduos e acarretar modificações na estrutura ecológica e funcional da comunidade biológica. Um exemplo de xenobióticos são os plásticos já que não fazem parte do conjunto de moléculas produzidas pelo metabolismo evolutivo que propicia a vida na Terra (Gaylarde *et al.,* 2005).

O processo de biorremediação tem dois tipos diferentes de metodologia, a primeira é o uso de microrganismos autóctones - microrganismos do próprio ambiente - ou introduzidos no meio, podendo ser geneticamente modificados ou em estado nativo. A implementação dessa tecnologia é complexa: primeiro é necessário realizar o estudo do ambiente, caracterizar e quantificar o poluente e avaliar a natureza biológica, geológica, geofísica e hidrológica do local

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

contaminado. Essas avaliações são feitas em laboratório, realizando testes de bioestimulação, pela adição de nutrientes e surfactantes, e os testes de bioaumentação, que são a adição de culturas de microrganismos biodegradadores ou mediadores. Com base nos resultados desses testes é escolhida a técnica mais adequada para o local de estudo e, após isso, são aplicados testes em campo para verificar a eficiência. Além disso, a biorremediação pode ser realizada no local da contaminação ou em outro local. O in situ é o tratamento feito no local da contaminação ou poluição, já no ex situ, é retirado o material contaminante do local de origem, sendo o mesmo tratado em um lugar longe do sítio de contaminação, de acordo com Idowu (2021) citado por Silva (2022).

Vários fatores podem influenciar na capacidade do microrganismo de biodegradar uma molécula, como fatores físicos em que a natureza física da matriz onde o composto é encontrado, podendo ser solo, água e entre outros, a temperatura e a luz. Por exemplo, em ambientes com temperaturas baixas, há a redução do metabolismo do microrganismo, reduzindo assim a taxa de degradação do poluente. Outro fator são os químicos que influenciam na taxa de degradação do poluente, podendo acelerar ou reduzir, como a composição química do local, o pH, umidade, teor de oxigênio dissolvido, a composição e estrutura química do poluente e o potencial redox do meio (Gaylarde *et al.,* 2005).

O terceiro fator é o biológico, pois é necessário ter a presença de uma população de microrganismos capaz de metabolizar a molécula original e seus produtos de degradação, em que os xenobióticos podem ser biodegradados por microrganismos que possuam enzimas que são capazes de catabolizar moléculas específicas ou pela ação conjunta de vários microrganismos diferentes, em que cada um vai atuar individualmente em diferentes etapas no processo. A troca de material genético que podem ocorrer entre microrganismos na natureza constituem um outro fator que contribui para o potencial biodegradador de uma comunidade já que favorecem a disseminação de genes, e, consequentemente, a disseminação potencial de enzimas relacionadas ao metabolismo catabólico de uma molécula xenobiótica (Gaylarde *et al.,* 2005).

Os xenobióticos com estruturas químicas semelhantes a compostos naturais têm grande chances de ser reconhecidos pelos sítios ativos da enzima do microrganismo, podendo assim serem quimicamente modificados ou podem ser utilizados como fonte nutritiva para o microrganismo, sendo utilizado para o seu metabolismo construtivo e energético.

As características físico-químicas e nutricionais do meio externo e o compartimento intracelular microbiano estão estritamente relacionados, mesmo que um sistema microbiano tenha todos os requisitos bioquímicos e genéticos necessários para a degradação de um xenobiótico, se as características físico-químicas e componentes nutricionais do meio não condizem com as necessidades metabólicas do microrganismo, a biodegradação não ocorrerá (Gaylarde *et al.,* 2005).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.4. Vantagens e limitações do processo de biorremediação

Essa biotecnologia é uma alternativa viável e ecologicamente mais adequada para o tratamento de ambientes contaminados com moléculas orgânicas de difícil degradação e metais tóxicos, devido à utilização do próprio metabolismo microbiano como sede do processo degradativo de materiais. Além disso, comparando com outros métodos, a biorremediação é mais econômica, principalmente para áreas extensas e pode ser aplicada em larga escala.

Outra vantagem é que nesse processo as substâncias perigosas são biodegradadas ao invés de apenas transferir o contaminante de um meio para outro como em outras metodologias e possui maior sucesso no tratamento de resíduos que são classificados como difíceis de serem degradados.

Em relação aos fatores limitantes da biorremediação, temos que a poluição geralmente envolve vários compostos com diferentes classes químicas e não existem microrganismos capazes de degradar todos os compostos, principalmente os sintetizados pelos humanos, portanto, é necessário fazer uma seleção de diferentes microrganismos com metabolismo específicos para cada poluente, portanto, é um processo complexo de desenvolver (Gaylarde *et al.,* 2005).

A concentração do poluente também pode ser um fator limitante, já que em baixas concentrações os microrganismos podem não produzir as enzimas necessárias e quando as concentrações estão muito altas pode haver a inibição da ação dos microrganismos. Além disso, o processo de biodegradação é mais provável acontecer quando a estrutura química do xenobiótico é semelhante à estrutura de moléculas naturais, porém, pode haver poluentes incompatíveis com o processo implementado (Pompêo *et al.,* 2022).

O processo pode ser longo, pois a taxa de biorremediação pode ser muito baixa e alguns compostos são adsorvidos pelo solo, água ou sedimentos rapidamente diluindo-se abaixo do nível exigido para a ativação da biodegradação, porém, pode permanecer em concentrações acima da desejável.

A biorremediação *In-situ*, por exemplo, depende de várias variáveis ambientais, como temperatura e pH que irão influenciar no processo. Portanto, é um método difícil já que precisa de um controle ambiental e precisa de monitorações constantes, o que eleva o custo do tratamento (Gaylarde *et al.,* 2005).

1.5. Biorremediação por bactéria

Diversas bactérias, como espécies de *Pseudomonas*, *Burkholderia*, microrganismos quimiolitotróficos e *Clostrium*, têm a capacidade intrínseca de metabolizar uma ampla variedade de substâncias tóxicas, transformando-as em produtos menos prejudiciais ou até mesmo em compostos inofensivos. A biorremediação feita por bactéria pode ser feita por várias maneiras, por

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

exemplo na síntese de surfactantes, em que algumas bactérias são capazes de produzir surfactantes, que são compostos que ajudam a solubilizar e dispersar poluentes, facilitando sua degradação por outras bactérias ou processos químicos.

Através da formação de biofilmes que são comunidades microbianas aderidas a uma superfície, podem ajudar na degradação de contaminantes, proporcionando um ambiente favorável para as bactérias envolvidas na biorremediação ou através da biorremediação aeróbica ou anaeróbica. No primeiro caso, as bactérias degradam os contaminantes na presença de oxigênio utilizando enzimas para quebrar as moléculas dos poluentes em componentes mais simples, como dióxido de carbono e água. Já no processo anaeróbico, as bactérias realizam processos metabólicos que não requerem oxigênio para decompor os poluentes (Matto *et al.,* 2014)

A bactéria *Ideonella sakaiensis* 201-F6 foi descoberta em 2016 e foi verificado que ela é capaz de degradar o poli (tereftalato de etileno) (PET), usando o plástico como fonte de energia e fonte de carbono, produzindo 2 enzimas capazes de hidrolisar o PET (Yoshida *et al.,* 2016). Ambas as enzimas são capazes de converter o PET em monômeros benignos ao meio ambiente, a primeira enzima é a PETase, uma enzima do tipo α/β-hidroxilase que converte o PET em mono-(2-hidroxietil) tereftalato (MHET) e a segunda enzima MHETase que hidroliza MHET em tereftalato e etilenoglicol (Palm et al., 2019). O intermediário resultado da quebra hidrolítica volta para a célula do *I. sakaiensis* 206-F6T e é posteriormente hidrolisado pela segunda enzima MHETase, que quebra esse intermediário produzido em 2 monômeros, ácido tereftálico (TPA) e etilenoglicol (EG) (Silva *et al.,* 2022).

Outras bactérias que fazem a biodegradação do polietileno, são: *Bacillus brevis*, *Shewanella putrefaciens*, *Aspergillus glaucus*, *Penicillium simplicissimum*, além de diferentes candidatos dos gêneros *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Corynebacterium*, *Micrococcus*, *Moxarella*, *Rhodococcus*, *Staphylococcus* e *Streptomyces* (Silva *et al.,* 2022). Nesse processo de biodegradação do polietileno há a adesão dos microrganismos ao substrato, além da secreção de enzimas que promovam modificações estruturais na molécula de polietileno, a fim de torná-la passível de assimilação (Peixoto, 2013). Estudos sugerem que, na ausência de fontes de carbono, micróbios podem adotar mecanismos para aumentar a hidrofobicidade de suas células, o que ajuda na fixação do polietileno. Enzimas específicas, como peroxidases, lacases, e alcano hidroxilases, têm sido associadas a essa modificação do polietileno, e são encontradas em microrganismos capazes de biodegradação. Além disso, as depolimerases estão sendo estudadas como agentes potenciais na quebra desses polímeros (Peixoto, 2013).

A bactéria *Bacillus megaterium* é um microrganismo amplamente distribuído no meio ambiente e conhecido por sua robustez e alta capacidade de adaptação, em se destacando por sua versatilidade metabólica e capacidade de secreção de enzimas hidrolíticas que atuam na

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

quebra de polímeros complexos (Meng *et al.,* 2021). Seu potencial na degradação de poliestireno reside na produção de enzimas que facilitam a quebra do polímero em compostos menores, permitindo sua assimilação pela bactéria. Além disso, estudos sugerem que a interação entre biofilmes microbianos e polímeros pode acelerar a degradação do plástico ao criar um microambiente favorável para a atividade enzimática, tornando esse microrganismo um candidato promissor para a biorremediação (Meng *et al.,* 2021). Outras espécies do mesmo filo, como as espécies *Bacillus subtilis* e *Bacillus cereus* também demonstraram potencial na biodegradação de poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET) por meio da secreção de cutinases e lipases, que promovem a clivagem das ligações éster dos polímeros (Eukanayka *et al.,* 2022), sendo que a *Bacillus cereus* tem capacidade de formar flocos microbianos e secretar enzimas extracelulares que podem atuar na degradação de polímeros.

O estudo que abordou a composição das comunidades microbianas encontradas na superfície de microplásticos citado na análise da biorremediação por fungos, identificou alguns grupos na “plastisfera” capazes de degradar microplásticos, com os gêneros *Pseudoalteromonas* e *Alteromonas* que dominam as comunidades microbianas encontradas nos microplásticos e são frequentemente relatados e conhecidos por secretar enzimas hidrolíticas, que podem degradar compostos orgânicos complexos, incluindo plásticos biodegradáveis (Oberbeckmann *et al.,* 2020). Algumas espécies desses gêneros mostraram potencial para decompor polímeros sintéticos. Os *Bacteroidetes*, são microrganismos que desempenham um papel importante na decomposição de material orgânico e que são frequentemente encontrados em biofilmes de superfícies inertes. O gênero *Flavobacterium* tem sido identificado em plásticos oceânicos e sugerido como um possível degradador de polímeros devido à sua capacidade de secretar enzimas hidrolíticas (Oberbeckamnn *et al.,* 2020). E por último, o filo *Actinobacteria* que inclui várias espécies com potencial para degradar compostos complexos. O gênero *Rhodococcus*, por exemplo, já demonstrou capacidade de metabolizar hidrocarbonetos e pode estar envolvido na decomposição de microplásticos (Oberbeckamnn *et al.,* 2020).

Outro gênero amplamente estudado são as bactérias do gênero *Pseudomonas*, como as *Pseudomonas aeruginosa* e *Pseudomonas putida*, mostraram-se eficientes na degradação de polímeros sintéticos como polietileno (PE) e poliuretano (PU). Essas bactérias produzem enzimas como hidrolases e oxidases, que fragmentam os plásticos em compostos menores (Ekanayaka *et al.,* 2021).

1.6. Biorremediação por fungos

Os fungos são eficazes na biorremediação devido à sua habilidade de secretar uma variedade de enzimas que podem quebrar uma ampla gama de substâncias tóxicas, esse processo pode ocorrer de diversas formas, já que esses microrganismos produzem uma variedade

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de enzimas, como peroxidases e oxidases, que são capazes de quebrar as ligações químicas dos contaminantes, transformando-os em compostos menos tóxicos ou até mesmo em componentes inofensivos. Podem também realizar o processo de bioacumulação, onde têm a capacidade de absorver metais pesados do solo ou da água e acumulá-los em seus tecidos tornando-os menos tóxicos. O fungos podem ser utilizados também em conjunto com as plantas, processo chamado fitorremediação, onde esses colonizam as raízes das plantas e ajudam na degradação de contaminantes do solo, enquanto as plantas absorvem os poluentes e os translocam para suas partes aéreas, onde podem ser removidos ou degradados mais facilmente (Martins, 2023).

Além de excelentes biorremediadores de uma variedade de compostos, os fungos são capazes de degradar compostos sintéticos; por exemplo, poluentes orgânicos persistentes (POPs), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (compostos BTEX) e pesticidas (Zeghal *et al.,* 2021). Por causa da sua versatilidade e capacidade de degradar compostos complexos indicam que a biodegradação de plásticos no meio ambiente pode ser uma característica metabólica potencial de alguns fungos.

Também produzem uma ampla gama de enzimas que têm potencial para quebrar as ligações químicas dos polímeros plásticos, por exemplo a peroxidase de manganês (MnP) e a lignina peroxidase (LiP), que são comumente associadas à degradação da lignina. Essas enzimas catalisam reações de oxidação-redução, envolvendo radicais livres, transformando diversos compostos em produtos oxidados ou polimerizados.

As espécies do gênero *Aspergillus* spp são conhecidas por sua versatilidade metabólica e capacidade de degradar poliuretano (PU) e polietileno de alta densidade (HDPE). Elas produzem enzimas hidrolíticas e oxidativas, como peroxidases e cutinases, que promovem a quebra dos polímeros sintéticos (Zeghal *et al.,* 2021), como por exemplo, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* e *Aspergillus terreus* que produzem lacases e peroxidases que auxiliam na degradação de plásticos como PU e PET. Esses fungos podem colonizar superfícies plásticas e facilitar sua fragmentação (Zeghal *et al.,* 2021).

Outro representante amplamente estudado é o *Zalerion maritimum*, fungo filamentoso encontrado em ambientes marinhos, especialmente em sedimentos costeiros. Estudos recentes apontam que esse fungo possui enzimas capazes de atuar na degradação de polímeros sintéticos, facilitando a fragmentação e mineralização dos microplásticos (Ekanayaka *et al.,* 2022). Seu mecanismo de degradação baseia-se na produção de enzimas extracelulares, como peroxidases e cutinases, que promovem a oxidação e hidrólise das cadeias poliméricas, tornando os fragmentos plásticos mais susceptíveis à degradação microbiana subsequente (Zeghal *et al.,* 2021). Foi verificado que o *Z. matimum* cresce na presença de microplásticos com base nas modificações observadas nas variações de massa, bem como nos resultados de FTIR (Espectroscopia no infravermelho) e Ressonância Magnética Nuclear. Dessa forma, é possível constatar que o fungo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

passou a utilizar o material polimérico como nutriente. Além disso, esses dados corroboram com tal conclusão, visto que a redução observada no conteúdo de lipídios e proteínas, acompanhada de aumento na concentração de carboidratos, ocorreu em maior proporção nos fungos não expostos aos microplásticos.

Os gêneros *Penicillium* e *Fusarium* são fungos amplamente estudados devido à sua capacidade de biodegradar compostos orgânicos complexos, incluindo polímeros sintéticos como os plásticos. Sua eficácia na degradação de plásticos decorre da produção de diversas enzimas extracelulares, como lacases, sendo estas envolvidas na oxidação de compostos orgânicos complexos; peroxidases - associadas à degradação de lignina e polímeros; e cutinases que atuam na quebra das ligações químicas dos polímeros. *Penicillium* spp são fungos filamentosos amplamente distribuídos no solo e em ambientes aquáticos, que produzem enzimas oxidativas que degradam materiais orgânicos complexos, sendo alguns membros do gênero utilizados na indústria farmacêutica, incluindo a produção de antibióticos (como a penicilina). Esse fungo demonstrou eficiência na degradação de poliuretano (PU) e polietileno (PE), secretando cutinases e esterases que quebram as cadeias poliméricas (Zeghal *et al.,* 2021).

O gênero *Fusarium* inclui espécies como *Fusarium solani*, que demonstraram ser eficientes na degradação de poliésteres e poliuretanos. É um fungo filamentoso encontrado em solos, matéria orgânica em decomposição e ambientes aquáticos, sendo algumas espécies fitopatogênicas, enquanto outras possuem aplicações biotecnológicas e produzem uma ampla gama de enzimas degradativas, incluindo lignina peroxidases e manganês peroxidases. A ação desse fungo ocorre por meio da secreção de lipases e proteases, que quebram as cadeias poliméricas, tornando-as mais suscetíveis à degradação microbiana subsequente (Ekanayaka *et al.,* 2022).

Os fungos do filo *Zygomycota* spp, particularmente do gênero *Mucor*, atuam na degradação de polietileno e polipropileno por meio da produção de enzimas ligninolíticas, como manganês peroxidase e lacase (Ekanayaka *et al.,* 2022). Essas enzimas promovem a oxidação dos plásticos e facilitam sua fragmentação. Já a levedura *Rhodotorula* mucilaginosa demonstrou a capacidade de incorporar carbono derivado do polietileno em sua biomassa, sugerindo um processo de degradação parcial (Zeghal *et al.,* 2021). O estudo analisou a capacidade de *Cladosporium pseudocladosporioides* e *Thermomyces insolens* de degradar polímeros plásticos, focando-se principalmente em sua colonização de resíduos plásticos marinhos e no impacto de suas enzimas na estrutura química dos polímeros. Foram empregadas técnicas analíticas como cromatografia, espectroscopia infravermelha (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar as modificações nos plásticos após a exposição aos fungos (Zeghal *et al.,* 2021).

Desta forma, os fungos têm sido amplamente estudados devido à versatilidade metabólica desses microrganismos. Segundo Zeghal *et al.,* (2021), diversas espécies fúngicas apresentam

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

potencial para degradar plásticos complexos. Apesar disso, há desafios e necessidades de aprofundamento sobre esse tipo de biodegradação e a de otimização dos processos e avaliação dos impactos ambientais da degradação fúngica de plásticos (Ekanayaka *et al.,* 2022).

1.7. Biorremediação por consórcios microbianos

Como os microrganismos não possuem todas as enzimas necessárias para metabolizar por completo um xenobiótico é importante utilizar vários tipos de microrganismos para a biorremediação, pois ao empregar uma combinação de microrganismos, cada um vai atuar em uma etapa específica do processo de biorremediação, maximizando a eficiência da degradação. Por exemplo, enquanto um microrganismo pode iniciar o processo de quebra do xenobiótico, outro pode atuar na transformação dos produtos intermediários, e assim por diante, até que a molécula seja completamente mineralizada.

Para esse processo ocorrer é necessário avaliar a capacidade metabólica de cada microrganismo que será utilizado, sendo que a diversidade metabólica é definida pelo número, tipo e taxa de utilização de um conjunto de substratos pela comunidade microbiana, que é consequência da diversidade genética, dos efeitos ambientais na expressão gênica e das interações ecológicas entre as diferentes populações (Almeida *et al.,* 2021), sendo assim, diferentes espécies desempenham papéis específicos na degradação de xenobióticos.

Nesse método é importante ressaltar o co-metabolismo que é uma transformação metabólica e ocorre quando um composto é parcialmente degradado pela ação de uma ou mais enzimas sem que o produto resultante contribua para a sobrevivência do microrganismo. O produto do co-metabolismo, muitas vezes, pode servir de substrato para transformações enzimáticas de outras espécies microbianas, promovendo uma colaboração sinérgica entre diferentes espécies microbianas possibilitando a degradação completa do xenobiótico (mineralização), (Almeida *et al.,* 2021).

Estudos apontam que a formação de biofilmes sobre microplásticos pode acelerar sua degradação, pois favorece a concentração de enzimas e substratos, aumentando a eficiência da degradação microbiana. Dentre os gêneros bacterianos mais estudados para esse fim, destacam-se *Bacillus* e *Pseudomonas*, que demonstraram alta capacidade de adesão a plásticos como polietileno de baixa densidade (PEBD) (Correia, 2022).

1.8. Técnicas de estudo da biorremediação por microrganismos

A avaliação da eficácia da biorremediação de plásticos por microrganismos demanda o uso de técnicas integradas, capazes de detectar desde alterações estruturais nos polímeros até a comprovação da mineralização completa da matéria plástica. Os principais métodos identificados

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

nos estudos analisados incluem abordagens espectroscópicas, morfológicas, bioquímicas e moleculares.

Uma das técnicas mais empregadas é a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), que permite identificar mudanças na composição química do plástico. A FTIR atua detectando a vibração de ligações químicas específicas entre átomos nas moléculas do polímero. Quando ocorre a ação de microrganismos, essas ligações podem ser rompidas ou modificadas, resultando em picos distintos no espectro de absorção infravermelho. Por exemplo, a diminuição das bandas associadas a grupos funcionais como ésteres, álcoois ou metilenos pode indicar processos de oxidação, quebra de cadeias ou formação de novos compostos (Vaksmaa *et al.,* 2021).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) complementa essas análises ao possibilitar a visualização direta da superfície dos plásticos em alta resolução. Por meio dessa técnica, é possível observar alterações morfológicas provocadas pela ação microbiana, como fissuras, rugosidades, buracos e zonas de erosão, o que evidencia a degradação física do material. Além disso, pode-se verificar o crescimento de biofilmes microbianos aderidos ao substrato polimérico, o que sugere colonização ativa e possível atividade enzimática local (Roager, 2019).

Outra técnica amplamente empregada é a respirometria, usada para quantificar a produção de dióxido de carbono (CO_2) durante o processo de biodegradação. Esse método se baseia no princípio de que, ao metabolizar o plástico, os microrganismos convertem os átomos de carbono dos polímeros em CO_2. A medição do CO_2 acumulado ao longo do tempo permite avaliar a taxa de mineralização do material, sendo uma forte evidência da degradação completa (Ekanayaka *et al.,* 2022). A análise pode ser feita em sistemas fechados com absorventes de CO_2 ou por técnicas modernas de cromatografia gasosa.

As análises bioquímicas têm papel fundamental na identificação de enzimas extracelulares produzidas pelos microrganismos durante o processo de degradação. Enzimas como laccases, peroxidases, cutinases e monooxigenases atuam promovendo reações de oxidação e quebra das cadeias poliméricas. Essas enzimas podem ser detectadas por ensaios colorimétricos, zimogramas, ou por análise do perfil de expressão enzimática, permitindo correlacionar a presença de determinadas enzimas com a eficiência do processo de biorremediação (Fontes *et al.,* 2018; Martins, 2020).

Além disso, a espectrofotometria UV-Vis é utilizada para monitorar a formação ou desaparecimento de compostos intermediários solúveis durante a degradação, como ácidos carboxílicos e aldeídos. Esta técnica fornece uma medida indireta do progresso da degradação química, através de alterações na absorvância em determinados comprimentos de onda. Já a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) é particularmente útil para identificar os produtos da degradação, especialmente compostos voláteis ou de baixo peso

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

molecular que resultam da biotransformação dos polímeros. Essa técnica fornece uma "assinatura" dos subprodutos formados, permitindo inferir a rota metabólica seguida pelos microrganismos durante o processo (Ekanayaka *et al.,* 2022)

A nível molecular, o sequenciamento do RNA ribossomal 16S é frequentemente empregado para identificar as espécies bacterianas presentes nos consórcios microbianos que colonizam os plásticos. Essa técnica permite caracterizar a composição e diversidade da microbiota degradadora, fornecendo dados importantes sobre os gêneros ou linhagens com maior potencial enzimático (Oberbeckmann, 2020). Em alguns casos, também se utilizam análises de metatranscriptômica para verificar a expressão de genes codificadores de enzimas degradativas.

Contudo, mesmo com o uso combinado dessas técnicas, persistem desafios importantes. Uma limitação recorrente é a dificuldade em comprovar se a degradação detectada é realmente completa, com conversão total do plástico em CO_2 e biomassa, ou se há apenas uma fragmentação física em partículas menores, como micro ou nanoplásticos, que continuam a representar risco ambiental (Vaksmaa *et al.,* 2021). Esse fator destaca a necessidade do uso de abordagens integradas e de longo prazo para a avaliação robusta da biorremediação.

2. MÉTODOS

O método empregado neste estudo foi uma revisão bibliográfica abrangente, desenvolvida com o objetivo primordial de garantir a confiabilidade e a qualidade técnica e científica do trabalho. Esta abordagem foi estruturada para realizar uma análise crítica e sintetizada das evidências disponíveis na literatura existente sobre a biorremediação de microplásticos, com especial ênfase na utilização de microrganismos, como fungos e bactérias, como agentes de degradação.

Para a condução desta revisão bibliográfica, foram adotadas estratégias metodológicas onde inicialmente, realizou-se uma busca sistemática por artigos científicos em diversas bases de dados reconhecidas, incluindo o Google Acadêmico, *Web of Science*, Scopus e o Portal de Periódicos da Capes. Esta pesquisa foi conduzida por meio de uma cuidadosa combinação de termos e palavras-chave relevantes, como "biorremediação de microplásticos", "degradação microbiana de plásticos", "fungos degradadores de plásticos" e "bactérias na biodegradação de polímeros", buscando abranger todas as publicações pertinentes ao tema em questão.

Além da busca nas bases de dados, foram realizadas consultas nas referências bibliográficas dos 14 artigos selecionados, bem como em revisões sistemáticas e metanálises previamente publicadas, com o intuito de identificar estudos adicionais de relevância para o escopo do trabalho.

A seleção dos artigos foi conduzida levando em consideração a análise dos títulos, resumos e palavras-chave, seguida de uma leitura integral dos textos selecionados. A avaliação da pertinência e contribuição de cada estudo para os objetivos do trabalho foi realizada

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

considerando a qualidade metodológica, a originalidade e a relevância dos resultados apresentados. Além disso, foi estabelecido que os artigos escolhidos deveriam ser revisados por pares, apresentar estudos laboratoriais sobre a degradação microbiana de plásticos e que abordam técnicas de análise e identificação de microrganismos degradadores.

Foi estabelecido como critério de inclusão a priorização de estudos publicados nos últimos 10 anos, com o intuito de incorporar os dados mais recentes e atualizados sobre a biorremediação de microplásticos. Considerando a natureza global do problema dos microplásticos, a maioria dos artigos selecionados estava disponível em inglês, refletindo a predominância dessa língua na comunicação científica internacional. Para a inclusão foram utilizados com critérios metologia clara e pesquisas que descreviam mecanismos de degradação e metodologias envolvidas, microrganismos presentes, tipos de plásticos degradados, além das condições ambientais.

Para a exclusão de artigos para o presente trabalho foram estabelecidos os seguintes critérios: artigos com pouca relevância para a temática principal, estudos que não apresentavam metodologia clara e trabalhos que não exploravam mecanismos bioquímicos da degradação.

2.1. Análise e interpretação de dados

Os artigos selecionados foram organizados em categorias temáticas, permitindo uma análise comparativa dos métodos de biorremediação empregados. Os principais aspectos investigados incluíram: tipos de plásticos degradados (ex.: polietileno, polipropileno, PET); microrganismos envolvidos no processo (ex.: *Ideonella sakaiensis, Bacillus cereus, Zalerion maritimum*); condições ambientais que favorecem a biodegradação (pH, temperatura, presença de nutrientes) e técnicas analíticas utilizadas na caracterização da degradação (FTIR, espectrometria de massa, análise respirométrica).

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise qualitativa, utilizando-se métodos de síntese e interpretação robustos. Essa abordagem analítica permitiu a identificação de padrões, tendências e lacunas de conhecimento na literatura, bem como a extração de informações relevantes e significativas para o desenvolvimento do presente estudo.

Ademais, a validação dos resultados foi realizada por meio da comparação e análise de diferentes estudos, bem como consenso entre os pesquisadores envolvidos, a fim de garantir a confiabilidade e a solidez dos achados científicos apresentados.

A abordagem adotada permitiu uma visão abrangente e detalhada sobre a biorremediação de microplásticos, fundamentando a discussão com base nas melhores evidências disponíveis, conforme o quadro abaixo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 1. Síntese das publicações utilizadas para os resultados e discussão após processo de análise

AUTOR-ANO/ REGIÃO DE PUBLICAÇÃO	OBJETIVO	PRINCIPAIS RESULTADOS
VAKSMAA *et al.,* 2021/ Noruega	Apresenta uma visão geral da biodegradação de plásticos no ambiente marinho, abordando os microrganismos degradadores de plástico identificados e potenciais, onde capacidades metabólicas e enzimáticas são destacadas em relação à valorização de seu potencial no futuro.	Pesquisas nesta área ainda não estão suficientemente avançadas e os principais organismos e enzimas precisam ser identificados. Um candidato promissor para futuras aplicações biotecnológicas é a Ideonella sakaiensis 201-F6, capaz de degradar plásticos e crescer no carbono derivado do plástico. As enzimas PETase e MHETase, que medeiam a degradação do PET e resultam na liberação de ácido tereftálico e etilenoglicol (EG), foram caracterizadas; no entanto, a degradação do PET é um processo muito lento.
VAKSMAA *et al.,* 2023/ Noruega	Acompanhar o destino do carbono derivado do plástico em ecossistemas marinhos por espectrometria de massa de íons secundários em nanoescala (nanoSIMS).	Com o auxílio de análises de isótopos estáveis, fornecem provas inequívocas de que o fungo *Rhodotorula mucilaginosa* utiliza carbono derivado do polietileno para incorporação celular e ganho de energia. A capacidade de *R. mucilaginosa* de utilizar carbono derivado de plástico na presença de outros substratos de carbono com alto rendimento energético também indica que a degradação fúngica do plástico pode, de fato, ocorrer no ambiente natural. Nossos resultados confirmam que a foto-oxidação inicial do plástico é um processo fundamental para torná-lo disponível para a subsequente degradação microbiana.
SHEN *et al.,* 2021/ China		Processo de biodegradação de plásticos biodegradáveis (PBs) e fatores que o influenciam, sendo estes processos de biodegradação de PBs controlados por muitos fatores: microrganismos, condições de degradação e os próprios PBs. Essas condições podem nem sempre ser viáveis em condições de campo. O fornecimento de matérias-primas, os custos de investimento e operacionais e a gestão eficaz dos resíduos de PBs também podem afetar direta ou indiretamente a ampla aplicação de PBs.
MENG *et al.,* 2021/ Malásia	Estudo visa caracterizar sua capacidade de biodegradação do PS por B*acillus megaterium* e sugerir novas aplicações para essa cepa.	Bioprocesso sinérgico utilizando *Bacillus megaterium* com um consórcio de microrganismos selecionados para tratar resíduos de PS em nosso ambiente, e a extração de uma enzima específica para a degradação do PS a partir da cepa de *Bacillus megaterium*, visando um entendimento mais profundo da degradação enzimática.
HOSSAIN *et al.,* 2024/ Malásia	Utilizar a bactéria floculante benéfica *Bacillus cereus* SHBF2, isolada de uma fazenda de aquicultura, na redução de partículas de MP (PE, PP e PS) em seu ambiente	A bactéria formadora de flocos **B. cereus** SHBF2, utilizada na aquicultura, demonstrou grande potencial para ser usada como uma bactéria eficiente na degradação de microplásticos em sistemas de cultivo biofloc, visando garantir uma produção aquícola sustentável e ecológica.
OBERBECKMANN *et al.,* 2020/ Alemanha	Revisão, a partir da literatura atual, de novas análises comparativas e de considerações sobre a adaptação microbiana à degradação de plásticos, que as interações entre microrganismos e partículas de microplástico devem ter efeitos bastante limitados nos ecossistemas oceânicos.	Microplásticos no oceano representam substâncias recalcitrantes para microrganismos, insuficientes para sustentar o metabolismo procariótico e que provavelmente não serão degradadas microbiologicamente em um período de tempo relevante para a sociedade humana. Como não podemos remover os microplásticos do oceano, ações proativas em relação à pesquisa de alternativas ao plástico e estratégias para impedir que o plástico chegue ao meio ambiente devem ser tomadas prontamente
ZEGHAL *et al.,* 2021/ Noruega	Mini-revisão resume as informações disponíveis sobre as interações entre plástico e fungos em ambientes marinhos. Abordam	Resume o conhecimento atual sobre as interações entre fungos marinhos e degradadores de plástico (PMD, na sigla em inglês); ou seja, a capacidade dos fungos de colonizar plásticos e cepas específicas conhecidas por degradar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

	(i) a diversidade atualmente conhecida de fungos que colonizam detritos plásticos marinhos e fornecemos (ii) uma visão geral dos métodos aplicados para investigar o papel dos fungos na degradação do plástico, destacando suas vantagens e desvantagens.	plásticos, bem como os avanços e dificuldades metodológicas no estudo dessas interações. Investigar a interação entre fungos marinhos e PMD é um campo de pesquisa emergente e promissor, considerando o alto potencial de degradação de plásticos por diversas cepas fúngicas.
EKANAYAKA *et al*., 2022/ China	Primeiro artigo da série sobre fungos degradadores de plástico. Apresenta um resumo da produção global atual de plástico e do acúmulo de resíduos plásticos na natureza além de uma lista de todos os fungos degradadores de plástico registrados até o momento, com base na literatura disponível, e são feitos comentários referentes aos principais grupos fúngicos.	Resultados confirmam que os fungos degradadores de plástico são encontrados em onze classes nos filos fúngicos *Ascomycota* (*Dothideomycetes*, *Eurotiomycetes*, *Leotiomycetes*, *Saccharomycetes* e *Sordariomycetes*), *Basidiomycota* (*Agaricomycetes, Microbotryomycetes, Tremellomycetes, Tritirachiomycetes* e *Ustilaginomycetes*) e *Mucoromycota* (*Mucoromycetes*). A classificação taxonômica dos táxons de fungos degradadores de plástico é brevemente discutida. Os *Eurotiomycetes* incluem o maior número de degradadores de plástico no reino Fungi.
CAI *et al.,* 2023/ China	Examinar a viabilidade de plásticos biodegradáveis, com ênfase particular nas pesquisas mais recentes sobre as funções de diversos microrganismos e suas enzimas na biodegradação de plásticos sintéticos. Também são apontados os desafios existentes na degradação microbiana e os métodos correspondentes. Além disso, é dada ênfase ao mecanismo de biodegradação, à capacidade e eficácia de degradação das enzimas microbianas e, por fim, à importância do pré-tratamento para a biodegradação.	A maioria dos estudos sobre a biodegradação de PAEs utiliza bactérias, como *Pseudomonas* , *Arthrobacter* , *Rhodococcus* , *Bacillus* , *Mycobacterium* , *Delfia* e *Gordoni*. A degradação microbiana de PAEs ocorre por meio da hidrólise da ligação éster para produzir monoéster, que se decompõe para produzir ácido ftálico (PA) e álcool, e, por fim, produz ácido de cadeia curta, que participará do ciclo de Krebs.
WANG *et al.,* 2016/ China	Classificam o comportamento dos microplásticos em comportamentos físicos (migração, sedimentação e acumulação), comportamentos químicos (degradação e adsorção) e biocomportamentos (ingestão, translocação e biodegradação), e apresentam uma discussão mais aprofundada sobre seus mecanismos comportamentais para melhor compreender seus impactos no ambiente marinho.	A distribuição e o destino dos microplásticos no ambiente marinho dependem da densidade, tamanho, forma e composição química dos microplásticos, bem como dos fatores ambientais (principalmente a velocidade do vento e das correntes oceânicas). Se a densidade do microplástico for menor que a da água regional, os microplásticos permanecem suspensos na corrente oceânica (ondas superficiais) e são propensos à distribuição horizontal devido à velocidade do vento e das correntes oceânicas. Se a densidade do microplástico for maior que a da água regional ou se sua densidade aumentar devido à bioincrustação e à formação de agregados, ele afundará até o fundo do habitat marinho. Uma vez afundados, os microplásticos podem se acumular no sedimento marinho ou serem redistribuídos pela corrente de fundo ou pela bioturbação. Portanto, prever o destino dos microplásticos marinhos é um desafio e requer a atenção de pesquisadores para preencher a lacuna de conhecimento, especificamente sobre o impacto ecotoxicológico dos microplásticos no ambiente marinho. É necessário investigar o mecanismo de sorção de microplásticos e poluentes químicos por organismos marinhos, bem como

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

		seu modo de interação, avaliar a rota de transferência desses contaminantes ao longo da cadeia alimentar e investigar o risco dos microplásticos para organismos marinhos e para os seres humanos.
GAYLARDE *et al.*/ Brasil	O artigo discute as abordagens práticas de biorremediação, incluindo técnicas *in situ* (no local) e *ex situ* (fora do local), além de fatores que influenciam a eficiência, como a disponibilidade de nutrientes, pH e oxigênio	Abordagem futurista inclui a concepção de biorreatores de grande escala equipados com microrganismos degradadores de plástico, inspirados nos sistemas biológicos utilizados no tratamento de águas residuais, onde a matéria orgânica é removida por meio de processos microbianos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análises dos resultados para biorremediação por bactérias

A *Ideonella sakaiensis* foi identificada como um microrganismo altamente eficiente na degradação do polietileno tereftalato (PET), um dos polímeros plásticos mais utilizados globalmente. O estudo destaca que esta bactéria produz uma enzima específica, denominada PETase, capaz de catalisar a hidrólise do PET em ácido tereftálico e etilenoglicol, que podem ser posteriormente metabolizados como fontes de carbono e energia. A cepa *Ideonella sakaiensis* secreta as enzimas PETase e MHETase, que degradam o plástico PET, e a enzima artificial PETase combinada (Vaksmaa *et al.,* 2021) com MHETase melhora significativamente a eficiência da degradação como mostrado na Figura 3.

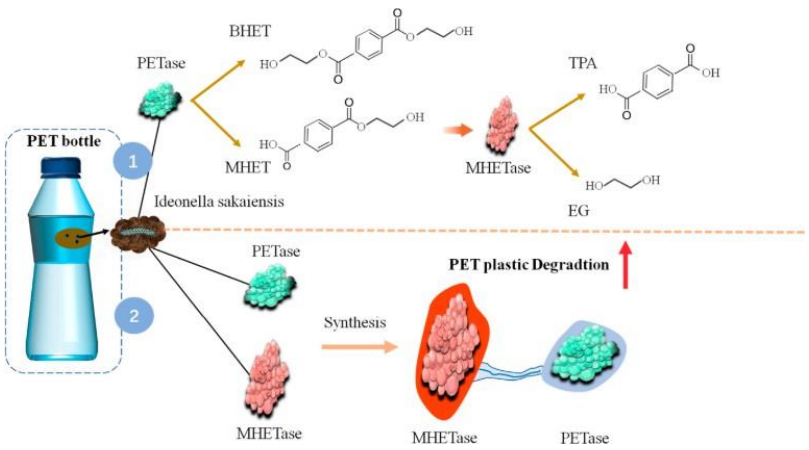
Vaksmaa *et al.,* (2021) enfatiza que a PETase apresenta alta especificidade para a degradação do PET e que sua estrutura molecular permite uma interação eficiente com a superfície do polímero, acelerando a degradação. Os testes laboratoriais mostraram que, em condições controladas, *Ideonella sakaiensis* pode degradar uma fina camada de PET em poucas semanas, o que é significativamente mais rápido do que os processos naturais de degradação desse material no ambiente.

Já os resultados obtidos com *Bacillus megaterium* conduzido por Meng *et al.,* (2021) demonstrou a capacidade desses microrganismos em degradar poliestireno (PS) por meio de diferentes abordagens experimentais. Os principais achados incluem a viabilidade do *Bacillus megaterium* ao utilizar poliestireno como fonte de carbono foi confirmada pelo ensaio de redução de 2,3,5-trifeniltetrazólio cloreto (TTC). A conversão de TTC em trifenil formazano (TPF) indicou intensa atividade metabólica da bactéria, sugerindo que ela pode metabolizar compostos derivados da degradação do poliestireno. Além disso, por meio da microscopia eletrônica de varredura (FESEM) revelou modificações estruturais na superfície do poliestireno após a exposição ao *Bacillus megaterium*, sendo observado maiores degradações na superfície do filme de PS em cultura de 30 dias do que na cultura de 14 dias. As áreas danificadas foram destacadas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

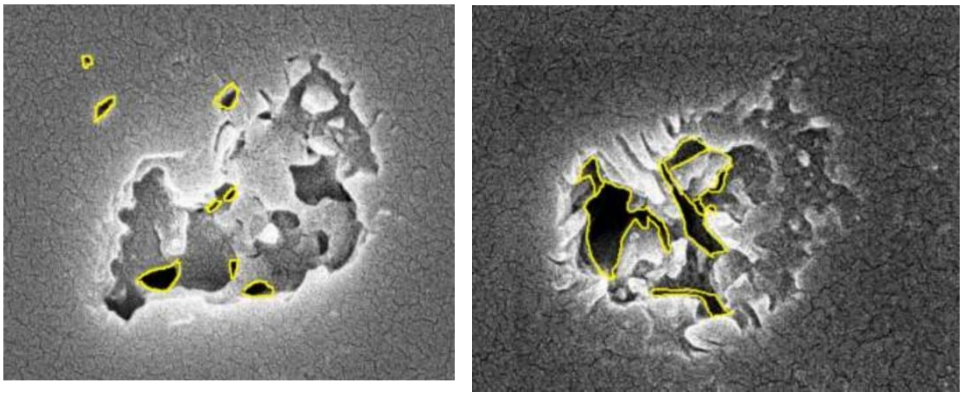
em amarelo na Figura 4, sendo que a porcentagem de corrosão superficial encontrada em cultura de 30 dias (1,5%) foi o dobro da encontrada em cultura de 14 dias (0,64%).

Figura 3. Enzimas envolvidas na degradação do PET secretadas pela *Ideonella sakaiens*



Fonte: SHEN *et al*., 2021.

Figura 4. Imagens FESEM de alterações morfológicas de superfície em filme PS tratado após incubação com *Bacillus megaterium* por 14 dias e 30 dias, respectivamente



Fonte: Meng *et al.* (2021).

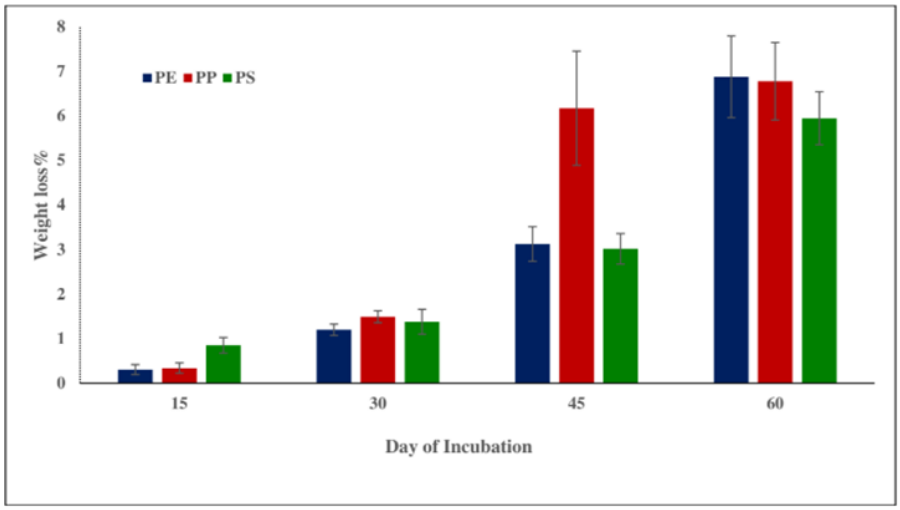
A pesquisas de Meng *et al.,* (2021) detectaram mudanças químicas pela espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), evidenciando alterações nas bandas espectrais do poliestireno, particularmente nas ligações C-H e C=O. Essas mudanças indicam a quebra parcial da estrutura polimérica, corroborando a ação biodegradadora da bactéria. Também se destacou que o *Bacillus megaterium* forma biofilmes sobre a superfície do poliestireno, o que favorece o contato prolongado entre a bactéria e o polímero. Esse fenômeno potencializa a degradação ao longo do tempo e sugere um mecanismo adaptativo para a utilização do plástico

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

como fonte de carbono. Embora o estudo não tenha feito uma comparação direta com outras bactérias biodegradadoras de plásticos, os resultados indicam que o *Bacillus megaterium* possui um relevante potencial para biorremediação de poliestireno. Trabalhos adicionais são recomendados para otimizar as condições de degradação e avaliar sua aplicabilidade em larga escala.

Para *Bacillus cereus* os experimentos demonstraram que possui uma capacidade significativa de biodegradação dos microplásticos analisados. Durante os testes laboratoriais, observou-se uma redução substancial na massa dos microplásticos ao longo do tempo, indicando degradação ativa. A degradação variou conforme o tipo de plástico: o Polietileno (PE) apresentou a maior taxa de degradação, com uma perda de massa de 6,87 ± 0,92% após 60 dias de incubação; Polipropileno (PP): apresentou uma taxa de degradação de 6,77 ± 0,87% no mesmo período e Poliestireno (PS) teve a menor taxa de degradação, com 5,94 ± 0,94% de redução de massa após 60 dias (Hossain *et al.,* 2024), conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5. Perda de peso (%) de PE, PP e PS em diferentes dias de incubação (15º, 30º, 45º e 60º DOI). Os valores são expressos como valor ± DP



Fonte: Hossain *et al.,* 2024.

As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) revelaram alterações na superfície dos polímeros, com sinais visíveis de erosão e formação de sulcos, sugerindo degradação enzimática. Já pela Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC) indicaram modificações químicas nos polímeros, com a quebra de ligações químicas características dos plásticos analisados. E por fim, a análise dos metabólitos gerados demonstrou a presença de intermediários da degradação,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

como hidrocarbonetos menores, sugerindo que *Bacillus cereus* é capaz de converter polímeros complexos em moléculas mais simples passíveis de metabolismo (Hossain *et al.,* 2024).

Estudos mostraram que *Pseudomonas aeruginosa* tem a capacidade de degradar polietileno de baixa densidade (PEBD) e outros plásticos, atuando por meio das seguintes estratégias: produção de enzimas específicas em que foram identificadas alcano-hidroxilases, monooxigenases e peroxidases, que facilitam a oxidação inicial da superfície do polímero, tornando-o mais suscetível à degradação. e a formação de biofilmes aderidos às partículas plásticas em que a bactéria se adere à superfície do plástico, criando um microambiente favorável para a ação enzimática. Após 30 dias de incubação, observou-se uma perda de aproximadamente 8,5% da massa inicial do polímero e análises feitas por FTIR indicaram mudanças nas ligações químicas do PEBD, sugerindo processos de oxidação e quebra das cadeias poliméricas. Além disso, através de testes bioquímicos indicaram que Pseudomonas aeruginosa utiliza os produtos intermediários da degradação do plástico como fonte de carbono para crescimento bacteriano (Hossain *et al.,* 2021).

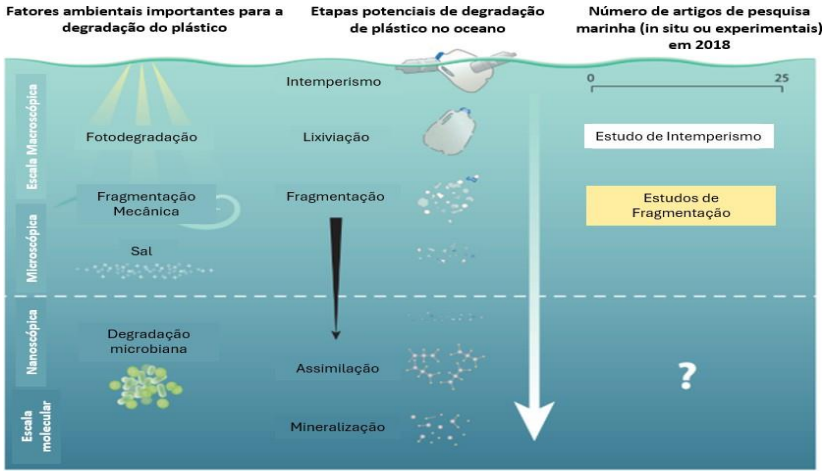
O mesmo trabalho abordou também sobre a *Pseudomonas putida* que demonstrou uma ampla capacidade de degradação de polímeros, principalmente poliestireno (PS) e poliuretano (PU), através da produção de enzimas oxidativas e hidrolíticas, identificando a ação de laccases, ureases e lipases, que promovem a quebra das cadeias poliméricas de PS e PU. Após 45 dias de incubação, foram observadas rachaduras e cavidades microscópicas na superfície dos polímeros, evidenciadas por microscopia eletrônica de varredura (SEM) e houve uma perda de 12% da massa do PU e 10% da massa do PS ao final do experimento. Através das análises por FTIR mostraram a diminuição de bandas características de ligações C-H e C=O, indicando oxidação e degradação parcial dos polímeros. Além disso, houve a conversão de monômeros derivados da degradação em biomassa, onde a bactéria utilizou os produtos da degradação como fonte de energia, promovendo crescimento celular significativo ao longo do experimento (Hossain *et al.,* 2021).

A análise taxonômica revelou que espécies do gênero *Flavobacterium* estavam presentes nos biofilmes formados sobre microplásticos, sugerindo uma forte afinidade por essas superfícies, a bactéria foi encontrada em maior abundância nos microplásticos de polietileno (PE), indicando possível preferência pelo substrato devido a sua composição química. Já os estudos de microscopia eletrônica mostraram a formação de biofilmes densos compostos por Flavobacterium, o que sugere seu potencial na modificação da superfície do plástico e as análises de espectroscopia FTIR indicaram mudanças nas ligações químicas do polímero, sugerindo a ação enzimática da bactéria (Oberbeckmann, 2020). Porém, a pesquisa ressalta que os biofilmes formados em microplásticos podem proteger as partículas da fotodegradação - processo de alteração de materiais devido à ação da luz, especialmente à luz solar - na superfície do oceano

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ou aumentar sua densidade relativa para densidade acima da água do mar, o que leva à sedimentação de microplásticos e consequentemente proteção contra fotodegradação. Em combinação, essas mudanças nas propriedades do plástico mudam os fatores que determinam predominantemente a degradação potencial do plástico de forças físico-químicas para atividade microbiana (Oberbeckmann, 2020). Como consequência, as maiores taxas de remineralização de polímeros sintéticos são esperadas na faixa de tamanho de microplásticos menores, conforme a Figura 6.

Figura 6. Fatores ambientais importantes que podem potencialmente catalisar diferentes etapas de degradação do plástico no oceano



Fonte: Oberbeckmann & Labrenz, 2020.

3.2. Análises dos resultados para biorremediação por fungos

Os experimentos com *Aspergillus* spp. avaliaram sua capacidade de degradar polietileno (PE) e poliuretano (PU). Os fungos foram cultivados em meio mínimo contendo fragmentos de plástico como única fonte de carbono. Após um período de incubação, foram realizadas análises de perda de massa do material, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar alterações na superfície do plástico. A degradação foi confirmada por mudanças na estrutura química do polímero, com a formação de novos grupos funcionais, como carbonilas e hidroxilas, indicativos de oxidação e fragmentação da cadeia polimérica. A *Aspergillus flavus* apresentou maior eficiência na degradação de polietileno de alta densidade (HDPE), enquanto Aspergillus niger foi mais eficaz na degradação de polietileno de baixa densidade (LDPE) e PU (Zeghal *et al.,* 2021). A presença de enzimas extracelulares, como cutinases e laccases, foi detectada nos meios de cultura, sugerindo um papel central desses compostos na degradação dos plásticos e por meio da microscopia

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eletrônica revelou a formação de biofilmes sobre as superfícies dos polímeros, favorecendo a degradação localizada (Zeghal *et al.,* 2021).

Os experimentos com *Zalerion maritimum* demonstraram que esse fungo é altamente eficiente na degradação de polietileno (PE), sendo um dos organismos mais promissores para essa função, pois o fungo foi capaz de reduzir significativamente a massa do polietileno em 7 dias de incubação, quando cultivado em meio mínimo contendo apenas o plástico como fonte de carbono. A FTIR e ressonância magnética nuclear (NMR) detectaram modificações na estrutura química do PE, com a formação de novas ligações químicas relacionadas à degradação oxidativa, sendo observada uma significativa redução da cristalinidade do polietileno, indicando que o fungo consegue atuar sobre a estrutura do polímero e facilitar sua fragmentação. Com a microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou extensas alterações morfológicas na superfície do plástico, incluindo fissuras, erosão e formação de cavidades, sugerindo um ataque enzimático direto ao material e a secreção de enzimas como peroxidases e esterases foi detectada, indicando que esses biocatalisadores podem estar envolvidos no processo de degradação (Zeghal *et al.,* 2021).

A capacidade de degradação de polímeros pelo gênero *Penicillium* foi testada utilizando diferentes tipos de plásticos, incluindo polietileno (PE) e poliuretano (PU). Espécies como *Penicillium simplicissimum* e *Penicillium oxalicum* demonstraram eficiência na degradação de PE, especialmente quando submetidas a longos períodos de incubação, sendo que após 30 dias de exposição, a análise por FTIR revelou o surgimento de grupos carbonila e hidroperóxido na estrutura do polietileno, indicando processos de oxidação e fragmentação molecular (Zeghal *et al.,* 2021).

A degradação do PU por *Penicillium griseofulvum* foi confirmada pela liberação de intermediários solúveis identificados por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), sugerindo a quebra da cadeia polimérica em moléculas menores. Apesar de eficaz, a taxa de degradação de PE por *Penicillium spp.* foi inferior à de *Zalerion maritimum*, indicando uma menor eficiência relativa desse gênero na biotransformação de plásticos (Zeghal *et al.,* 2021).

Já os estudos envolvendo *Fusarium spp.* demonstraram que esse grupo fúngico é capaz de degradar diferentes polímeros plásticos, com destaque para polietileno (PE) e polietileno tereftalato (PET). *Fusarium oxysporum* e *Fusarium solani* foram testados contra fragmentos de PET e PE em meio mínimo, resultando na detecção de compostos intermediários de degradação por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS). A degradação de PET foi evidenciada pela formação de ácido tereftálico (TPA) e etilenoglicol, principais produtos da hidrólise do polímero (Zeghal *et al.,* 2021).

O Fusarium redolens demonstrou capacidade de colonizar superfícies plásticas em ambientes marinhos e degradar PE, embora a taxa de degradação tenha sido relativamente baixa. A análise microscópica revelou danos superficiais na estrutura dos plásticos, com

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

evidências de fissuração e adesão fúngica, indicando um potencial papel desse gênero na biodegradação de polímeros em ambientes naturais (Zeghal *et al.,* 2021).

Assim como o Penicillium, o fungo *Cladosporium pseudocladosporioides* foi identificado como parte da comunidade microbiana associada a biofilmes em resíduos plásticos marinhos. Ele demonstrou uma capacidade significativa de colonizar superfícies plásticas, promovendo modificações estruturais nesses materiais, sendo detectado em biofilmes formados sobre PE e PU após semanas de incubação em ambientes marinhos simulados. Houve alteração na estrutura química do plástico ao analisarem por FTIR, tendo a presença de novos grupos funcionais, como as carbonilas e as hidroxilas indicando processos de oxidação e possível fragmentação do polímero.

Através da microscopia eletrônica mostrou danos estruturais ao PE, sugerindo degradação inicial facilitada por enzimas extracelulares e por meio de testes enzimáticos indicaram a presença de lacases e peroxidases, conhecidas por seu papel na degradação de polímeros recalcitrantes (Zeghal *et al.,* 2021).

O fungo *Thermomyces insolens* foi testado quanto à sua capacidade de degradar plásticos, com foco na sua produção de enzimas hidrolíticas e oxidativas, particularmente aquelas envolvidas na degradação de poliésteres e poliuretano. *T. insolens* demonstrou capacidade de degradar poliésteres sintéticos, como poliuretano termoplástico (TPU), evidenciada pela redução da massa do material em até 10% após 30 dias de incubação e ensaios enzimáticos revelaram a atividade significativa dessas enzimas, que desempenham um papel fundamental na quebra das ligações éster presentes em plásticos biodegradáveis. Por meio da cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) identificou subprodutos solúveis derivados do TPU, sugerindo que a hidrólise do polímero foi bem-sucedida e por meio da microscopia eletrônica foi identificado alterações morfológicas na superfície do plástico, sendo encontrado fissuras e erosões, indicando um ataque enzimático direto ao polímero (Zeghal *et al.,* 2021).

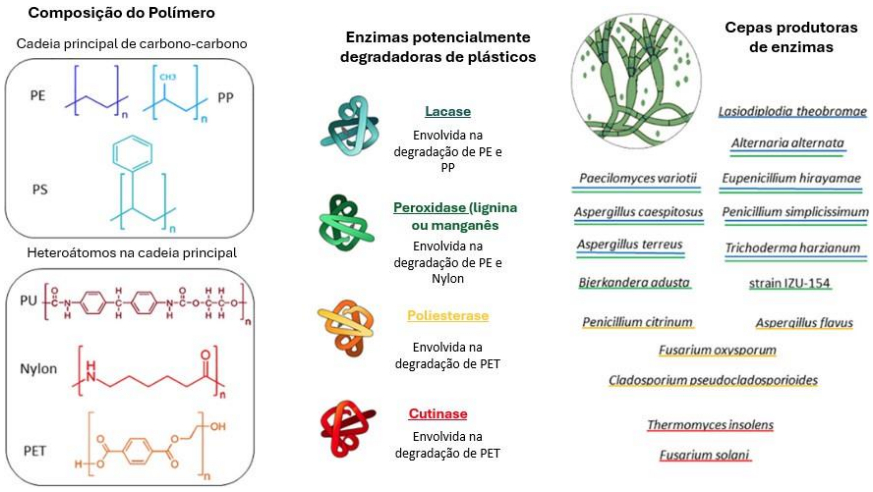
Na Figura 5 observa-se os principais plásticos encontrados no ambiente marinho e as enzimas fúngicas e grupos de fungos potencialmente envolvidos na degradação dos plásticos envolvidos. Os fungos produtores de lacase estão sublinhados em azul, os fungos sublinhados em verde são os fungos produtores de peroxidase, em amarelo indica fungos produtores de poliéster e em vermelho os fungos produtores de cutinase.

Os fungos *Zygomycota spp.* demonstraram potencial para degradar diversos tipos de plásticos, sendo que polímeros biodegradáveis polihidroxibutirato (PHB) e policaprolactona (PCL) foram rapidamente degradados devido à ação de enzimas hidrolíticas, resultando em uma significativa redução da massa plástica em até 30% após 60 dias de incubação. Já em plásticos mais resistentes, como polietileno de alta densidade (HDPE) e PET, apresentaram degradação mais lenta e limitada, com modificações químicas detectadas por FTIR, mas sem uma redução

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

significativa na massa dentro do período experimental. Já em análises por MEV mostraram que mesmo em plásticos de difícil degradação, como policloreto de vinila (PVC) e polietileno de baixa densidade (LDPE), houve fragmentação da superfície, tornando os polímeros mais suscetíveis à degradação posterior por outros organismos ou processos ambientais (Ekanayaka *et al.,* 2022).

Figura 7. Resumo dos principais plásticos encontrados no ambiente marinho e as enzimas produzidas pelos fungos



Fonte: Zeghal *et al.,* 2021.

Os experimentos realizados demonstraram que *R. mucilaginosa* pode utilizar fragmentos de polietileno tratado com UV como fonte de carbono, ainda que com uma taxa relativamente baixa de assimilação. Os principais achados incluem a incorporação de carbono derivado de polietileno onde a levedura foi incubada com PE marcado com carbono-13 (^{13}C) e, após o experimento, análises isotópicas confirmaram a assimilação do carbono plástico pelas células fúngicas. A conversão do polietileno em CO_2 indicou uma taxa de degradação de 3,8% ao ano para o substrato inicial fornecido, evidenciando um metabolismo ativo, ainda que lento e a *R. mucilaginosa* foi encontrada colonizando resíduos plásticos flutuantes no oceano, sugerindo que essa levedura pode contribuir para a degradação natural de microplásticos em ecossistemas marinhos (Ekanayaka *et al.,* 2022). Comparada a outros microrganismos estudados, *R. mucilaginosa* mostrou menor eficiência na degradação de plásticos, mas sua capacidade de colonizar plásticos marinhos indica um papel potencial na fragmentação e mineralização de microplásticos em longo prazo (Ekanayaka *et al.,* 2022).

Os microplásticos representam uma ameaça significativa ao meio ambiente, especialmente aos ecossistemas aquáticos. Esses polímeros sintéticos de dimensões reduzidas são originados tanto de fontes primárias, como cosméticos e produtos de higiene, quanto de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

fontes secundárias, resultantes da degradação de plásticos maiores. Os resultados encontrados nos estudos analisados indicam que os microplásticos afetam negativamente organismos aquáticos ao interferirem na alimentação, reprodução e fisiologia. Muitos desses polímeros absorvem contaminantes orgânicos persistentes, aumentando sua toxicidade. Além disso, a degradação dos microplásticos pode liberar monômeros e aditivos químicos, impactando ainda mais os ecossistemas (Gaylarde *et al.,* 2005).

A fragmentação ocorre devido a processos físicos, químicos e biológicos, que tornam os microplásticos persistentes e difíceis de remover do ambiente. Através da pesquisa de Geyer, Jambeck e Law (2017) foi possível verificar que a produção plástica mundial chegou a marca dos 6,3 milhões de toneladas e que desse total somente 9% são de fato reciclados, sendo cerca de 79% descartadas em aterros ou diretamente no meio ambiente. Uma das maneiras utilizadas para tirar esses materiais do oceano é através do estudo de Santos (2017), a de redes de pescas onde estes microplásticos são direcionados a aterros sanitários, porém, esse método serve apenas para remover uma parte e não eliminar a poluição.

Com isso, estudos são feitos para mitigar esse problema e conforme estudado nesse trabalho um dos métodos é a biorremediação, de acordo com os estudos analisados as condições ambientais e fatores abióticos desempenham um papel crucial na dinâmica da degradação e biorremediação dos microplásticos. Por exemplo, a temperatura é um fator determinante, influenciando a taxa de degradação enzimática e a atividade microbiana. Estudos demonstram que temperaturas mais elevadas aceleram a degradação, enquanto temperaturas muito baixas podem reduzir a eficiência dos microrganismos degradadores. A salinidade também interfere diretamente na biorremediação, uma vez que microrganismos adaptados a ambientes de alta salinidade possuem mecanismos enzimáticos específicos para degradar plásticos. Entretanto, variações abruptas na salinidade podem comprometer a estabilidade das comunidades microbianas envolvidas no processo (Zeghal *et al.,* 2021).

Outro fator relevante é o pH, que afeta a atividade enzimática e a estabilidade das interações entre os microplásticos e os microrganismos. Ambientes excessivamente ácidos ou alcalinos podem inibir a degradação, enquanto um pH neutro favorece a atividade enzimática. A fotodegradação, fenômeno que envolve a ação conjunta da luz solar e da temperatura, acelera a fragmentação dos polímeros, tornando-os mais suscetíveis à biodegradação. A radiação UV, em particular, contribui para a oxidação dos microplásticos, facilitando sua quebra em fragmentos menores que podem ser mais facilmente metabolizados por microrganismos especializados.

Além desses fatores, o processo de biorremediação é influenciado pela composição química dos polímeros. Os plásticos mais resistentes, como HDPE, apresentam uma taxa de degradação menor do que plásticos mais porosos ou submetidos a pré-tratamento com UV (Zeghal *et al.,* 2021). Além do HDPE, os plásticos como o polietileno (PE) e o poliestireno (PS)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

apresentaram maior resistência à degradação, enquanto o poliéster e o policarbonato foram mais suscetíveis à ação microbiana (Ekanayaka *et al.,* 2022). Esses resultados sugerem que a estrutura química dos polímeros influencia diretamente na taxa de degradação, sendo os materiais com maior rigidez molecular mais difíceis de serem degradados. Os estudos com Bacillus cereus e Bacillus subtilis identificou que o PEBD apresentou uma redução de massa de aproximadamente 6% após 90 dias de incubação, apesar de promissores, esses valores indicam uma taxa relativamente baixa de degradação, sugerindo a necessidade de otimização das condições ambientais para aumentar a eficácia do processo (Hossain *et al.,* 2024).

A degradação dos microplásticos ocorre por meio da ação de enzimas extracelulares, como hidrolases, peroxidases e oxidases, cuja atividade aumenta na presença dos polímeros, evidenciando a adaptação metabólica dos microrganismos para explorar o carbono derivado dos polímeros (Almeida *et al.,* 2021). A espectroscopia FTIR confirmou alterações químicas nos plásticos após a exposição microbiana, enquanto a microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou fissuras e erosão na superfície dos materiais degradados. A eficiência do processo foi maior com exposição prolongada das bactérias aos plásticos, resultando em redução significativa da massa, especialmente nos casos com biofilmes bem desenvolvidos.

Já com os fungos foi comprovado por meio do procedimento laboratorial uma clara relação entre o fungo *Zalerion maritimum* e a degradação de microplásticos. Foi evidenciado que os fungos expostos a microplásticos sem outra fonte de nutrição apresentaram um maior ganho de massa do que aqueles que continham como única fonte de nutrientes do meio de crescimento, podendo concluir que o aumento da biomassa do fungo foi acompanhado de um decréscimo da massa de microplástico. Os dados relatados permitem inferir que os fungos passaram a utilizar os microplásticos como fonte nutritiva e por isso apresentaram maior massa do que aqueles com meio de nutrição restrita (Zeghal *et al.,* 2021).

Os resultados indicam que a *Rhodotorula mucilaginosa* desempenha um papel ativo na degradação do polietileno, evidenciado pela adesão eficiente, fragmentação do polímero e assimilação de carbono derivado do PE. A capacidade dessa levedura de formar biofilmes sobre superfícies plásticas pode ser um fator essencial para a degradação inicial do PE, criando um ambiente favorável para a liberação de enzimas degradativas. Outros fungos que se destacam são *Aspergillus, Fusarium e Penicillium* (Zeghal *et al.,* 2021). Esses fungos têm demonstrado notável eficiência na degradação de polímeros mais resistentes, como Nylon e Polipropileno, por causa da sua capacidade de produção de enzimas como a lignina peroxidase, manganês peroxidase e lacase. Além de possuírem uma grande variabilidade metabólica, que permite ao fungo se ajustar às condições ambientais, como à salinidade em ambientes marinhos e o uso dos plásticos como fonte de nutrientes (Wang *et al.,* 2016).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tanto a degradação feita a partir de bactérias quanto a partir de fungos, os estudos enfatizam que o tempo necessário para uma degradação completa ainda é relativamente longo em comparação com outros processos de degradação natural. Isso sugere a necessidade de otimizar condições experimentais e explorar estratégias para aumentar a taxa de degradação, como o uso de bioengenharia para aprimorar a expressão de enzimas degradativas (Zeghal *et al.,* 2021).

O potencial de bactérias e fungos na biorremediação de plásticos marinhos, mostra que esses microrganismos podem acelerar a degradação dos polímeros no ambiente. No entanto, a taxa de degradação ainda é inferior aos processos convencionais, e até o momento não há aplicação prática para mitigar a poluição plástica em larga escala (Shen *et al.,* 2021). A principal limitação reside na falta de compreensão sobre os microrganismos degradadores naturais e sua atuação, dificultando o desenvolvimento de soluções biotecnológicas eficientes. Além disso, tanto as cepas selvagens quanto as enzimas modificadas precisam apresentar uma taxa de degradação mais elevada para atender às exigências industriais e permitir a produção de compostos reaproveitáveis. Mesmo que essa eficiência seja alcançada, a necessidade de cultivo e produção em larga escala representa outro grande desafio, sendo que a toxicidade dos subprodutos gerados durante a degradação, que podem impactar negativamente os organismos do ecossistema. Dessa forma, a biorremediação deve ser estudada em conjunto com outros métodos de mitigação para alcançar uma solução eficaz e sustentável para a poluição por microplásticos (Shen *et al.,* 2021).

Embora a biodegradação seja uma alternativa promissora, sua aplicação in situ é viável apenas em locais onde a poluição plástica está concentrada, como aterros e baías poluídas, onde seria possível utilizar microrganismos ou enzimas em quantidade suficiente para um efeito significativo. Já no oceano, a dispersão horizontal e vertical dos plásticos, somada à constante movimentação das correntes marinhas, dificulta a aplicação direta dos microrganismos em larga escala. Para abordar esse problema, uma alternativa mais viável poderia ser o uso ex situ desses microrganismos, por meio da recuperação dos plásticos do oceano e posterior digestão enzimática para a extração de monômeros (Oberbeckmann *et al.,* 2020). Uma abordagem futurista inclui a concepção de biorreatores de grande escala equipados com microrganismos degradadores de plástico, inspirados nos sistemas biológicos utilizados no tratamento de águas residuais, onde a matéria orgânica é removida por meio de processos microbianos. As pesquisas futuras devem se concentrar no efeito dos parâmetros físico-químicos em ambientes marinhos sobre os microrganismos degradadores de plástico, bem como nas diferenças entre as vias metabólicas dos degradadores de plástico marinhos e terrestres, a fim de mitigar o acúmulo de plásticos nos oceanos (Gaylarde *et al.,* 2005).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Entretanto, para que a biorremediação seja efetiva, ainda há diversas lacunas científicas a serem preenchidas. Os principais desafios incluem a identificação de novos microrganismos e enzimas com maior potencial de degradação, o aprimoramento das metodologias experimentais para comprovar a conversão completa dos plásticos em subprodutos biodegradáveis e o desenvolvimento de estratégias biotecnológicas para a remoção eficiente desses resíduos do meio ambiente, seria importante explorar estudos em engenharia genética de bactérias para otimizar a produção de enzimas degradadoras (Meng *et al.,* 2020).

Além disso, os estudos sugerem que a associação entre diferentes microrganismos pode aumentar significativamente a eficiência da degradação, uma vez que os metabólitos de uma espécie podem servir como substratos secundários para outra. Dessa forma, o uso de consórcios microbianos surge como uma alternativa promissora para a degradação de plásticos, permitindo uma atuação sinérgica que pode otimizar a remoção desses contaminantes do ambiente.

4. CONSIDERAÇÕES

Através da análise dos trabalhos foi possível evidenciar a utilização da biorremediação como tecnologia promissora na detoxificação de microplásticos, especialmente pelo uso de microrganismos capazes de degradar polímeros plásticos. Bactérias como *Bacillus cereus* e fungos do gênero *Aspergillus* e *Penicillium* têm demonstrado potencial na biodegradação de polietileno, polipropileno e outros plásticos persistentes. Os aspectos positivos dessa abordagem incluem a redução da carga poluente sem necessidade de tecnologias dispendiosas e o menor impacto ambiental em comparação a métodos físico-químicos.

Contudo, ainda existem limitações significativas. A degradação microbiana é geralmente lenta, dependente de condições ambientais específicas e, muitas vezes, ocorre apenas parcialmente. Além disso, os subprodutos da biodegradação ainda precisam ser amplamente estudados quanto à sua toxicidade e destino ambiental. A padronização de métodos laboratoriais e a validação em ambientes naturais são etapas cruciais para que essa tecnologia possa ser aplicada em larga escala com segurança e eficácia.

Portanto, é essencial intensificar os estudos sobre os mecanismos de ação dos microrganismos, a engenharia de cepas com maior capacidade degradativa e a avaliação dos impactos ecotoxicológicos da biorremediação. Paralelamente, deve-se investir em estratégias preventivas, como a redução no consumo de plásticos descartáveis, a substituição por materiais biodegradáveis, o fortalecimento de políticas públicas de gestão de resíduos e a educação ambiental da população.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. R. O. *et al.* Plásticos no ambiente marinho frio: uma revisão sobre o potencial de biodegradação microbiana. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, e49310313642, 2021.

BORGES, Bárbara et al. Microplásticos: uma abordagem introdutória. *In:* POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T. C. B. (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências – USP, 2022. p. 118–133.

CAI, Zeming et al. Biological degradation of plastics and microplastics: a recent perspective on associated mechanisms and influencing factors. **Microorganisms**, Basel, v. 11, n. 7, p. 1661, 2023.

CARVALHO, Joana M. de. **Biorremediação fúngica dos microplásticos no oceano**. 2023. Trabalho acadêmico (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Inconfidentes, Inconfidentes, MG, 2023.

CORREIA, Rodrigo de Moraes Gonçalves. **Biorremediação de microplásticos**: uma revisão sistemática sobre o potencial de biodegradação por biofilmes microbianos. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Tecnológica) – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2022.

EKANAYAKA, Anusha H. *et al.* A review of the fungi that degrade plastic. **Journal of Fungi**, Basel, v. 8, n. 8, p. 772, 2022.

FONTES, B. M. da C. *et al.* Biorremediação de microplásticos com a colaboração do fungo Zalerion maritimum. **Revista UNILUS Ensino e Pesquisa**, v. 15, n. 41, p. 132–140, out./dez. 2018. Disponível em: https://revista.unilus.edu.br/index.php/ruep/article/view/292. Acesso em: 2 fev. 2025.

FONTES, Bruna Maria da Cruz et al. Biorremediação fúngica dos microplásticos no oceano. **Revista UNILUS Ensino e Pesquisa**, Santos, v. 15, n. 41, p. 132–138, out./dez. 2018.

FRASCARELI, Daniele et al. Microplásticos: uma abordagem introdutória. *In:* POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T. C. B. (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências – USP, 2022. p. 162–181.

GAYLARDE, Christine; BELLINASO, Maria; MANFIO, Gilson. Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, *[s. l.]*, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37588/1/Biorremedia%C3%A7%C3%A3oXenobi%C3%B3ticosProvenientes.pdf. Acesso em: 1 mar. 2024.

GORDIANO, Débora da Silva. **Como os microplásticos afetam o fitoplâncton marinho e a produtividade primária dos oceanos? – uma revisão sistemática**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Fortaleza, 2022.

HADAD, D.; GERESH, S.; SIVAN, A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium Brevibacillus borstelensis. **Journal of Applied Microbiology**, Oxford, v. 98, n. 5, p. 1093-1100, 2005.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

HOSSAIN, Shahadat et al. **Biodegradation of polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) microplastics by floc-forming bacteria, Bacillus cereus strain SHBF2 isolated from a commercial aquafarm.** [S. l.]: Research Square, 2024. Preprint. Disponível em: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3742823/v1. Acesso em: 10 fev. 2024.

KIRSTEN, Thiago et al. Microplásticos: uma abordagem introdutória. *In:* POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T. C. B. (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências – USP, 2022. p. 66–87.

MARQUES, Maria et al. Microplásticos: uma abordagem introdutória. *In:* POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T. C. B. (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências – USP, 2022. p. 88–100.

MARTINS, Bruna de Almeida. **Biorremediação e biotransformação como alternativas tecnológicas para remoção de poluentes ambientais e funcionalização de compostos orgânicos**. 2023. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Belo Horizonte, 2023.

MENG, Tan Kian et al. Bacillus megaterium: a potential and an efficient bio-degrader of polystyrene. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, e21190321, 2021.

NOBRE, Caio et al. Microplásticos: uma abordagem introdutória. *In:* POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T. C. B. (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências – USP, 2022. p. 28–42.

OBERBECKMANN, Sonja; LABRENZ, Matthias. Marine microbial assemblages on microplastics: diversity, adaptation, and role in degradation. **Annual Review of Marine Science**, Palo Alto, v. 12, p. 209–232, 2020.

PEIXOTO, J.; SILVA, L. P.; KRÜGER, R. H. Brazilian Cerrado soil reveals an untapped microbial potential for unpretreated polyethylene biodegradation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 324, p. 634–644, 2017.

POMPÊO, Marcelo; RANI-BORGES, Bárbara; PAIVA, Teresa Cristina Brazil de (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências da USP, 2022. ISBN 978-65-88234-11-2.

QUEIROZ, L. G *et al.* Microplásticos: uma abordagem introdutória. In: POMPÊO, M.; RANI-BORGES, B.; PAIVA, T. C. B. (org.). **Microplásticos nos ecossistemas**: impactos e soluções. São Paulo: Instituto de Biociências – USP, 2022. p. 1–7.

ROAGER, Line; SONNENSCHEIN, Eva C. Bacterial candidates for colonization and degradation of marine plastic debris. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 20, p. 11636–11643, 2019.

SHEN, M. *et al.* Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution? **Environmental Pollution**, v. 263, p. 114469, 2020.

SILVA, Clenivaldo Pires da; CHIBITE, Esperança; MOTOYAMA, Michele. Biorremediação: aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. *In:* SILVA, Clenivaldo Pires da (org.). **Biodegradação e biorremediação de plásticos**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2022. cap. 8. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363051848. Acesso em: 10 fev. 2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

VAKSMAA, Annika et al. Microbial degradation of marine plastics: current state and future prospects. *In:* JOSHI, S. J. *et al*. (ed.). **Biotechnology for Sustainable Environment**. Singapore: Springer Nature, 2021. p. 111–136.

VAKSMAA, Annika et al. Polyethylene degradation and assimilation by the marine yeast Rhodotorula mucilaginosa. **ISME Communications**, *[S. l.],* v. 3, n. 67, 2023.

WANG, J. *et al.* The behaviors of microplastics in the marine environment. **Marine Environmental Research**, v. 113, p. 7-17, 2016.

ZEGHAL, Emna et al. The potential role of marine fungi in plastic degradation – a review. **Frontiers in Marine Science**, Lausanne, v. 8, p. 1–12, 2021.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.