

PANORAMA MUNDIAL DE PRODUÇÃO DE PLÁSTICO E ESTRATÉGIAS DE DEGRADAÇÃO

Danila Soares Caixeta¹; Eduardo Beraldo de Moraes²

¹ Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Mato Grosso – MT (danilacaixeta@gmail.com). Cuiabá – Brasil

² Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Mato Grosso – MT

Recebido em: 15/02/2022 – Aprovado em: 15/03/2022 – Publicado em: 30/03/2022

DOI: 10.18677/EnciBio_2022A19

trabalho licenciado sob licença [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

RESUMO

A rotina do dia a dia, tem feito com que a população busque cada vez mais praticidade. Contudo, o uso de produtos de uso único, tais como copos, talheres e pratos plásticos, dentre outros produtos a base de polímeros sintéticos como eletrodomésticos, produtos de higiene pessoal, embalagens, etc, tem gerado uma quantidade inestimável de resíduos, que em sua maioria são lançados diretamente no ambiente. A fim de minimizar a geração desses resíduos, pesquisas têm buscado alternativas para substituir os plásticos, reutilizá-los e reciclá-los. Assim, vários países têm proposto leis para sensibilizar e conscientizar a população quanto ao uso indiscriminado de plásticos. Este estudo teve como objetivo evidenciar o panorama mundial de produção de plásticos e políticas e estratégias aplicadas para minimizar o seu uso e impactos no ambiente. Para tal, foi realizada uma revisão de literatura. Em suma, a pesquisa revelou que a produção mundial de plásticos tem se expandido nas últimas décadas, em consequência dos usos múltiplos de produtos a base de polímeros. Avanços nas pesquisas para minimizar os impactos dos plásticos existentes no ambiente, bem como a aplicação de leis para reduzir a produção e consumo são de fundamental importância, visto que os plásticos no ambiente podem causar efeitos diretos e indiretos na saúde. Ademais, técnicas de degradação de microplásticos têm sido amplamente pesquisadas, sendo o processo de biodegradação uma alternativa eficiente e segura.

PALAVRAS-CHAVE: descarte, polímeros, poluição ambiental.

WORLDWIDE OVERVIEW OF PLASTIC PRODUCTION AND DEGRADATION STRATEGIES

ABSTRACT

The daily routine has made the population look for more and more practicality. However, the use of single-use products, such as plastic cups, cutlery and plates, among other products based on synthetic polymers such as household appliances, personal care products, packaging, etc., has generated an inestimable amount of waste, which in its most are launched directly into the environment. In order to minimize the generation of these residues, research has been looking for alternatives to replace plastics, reuse and recycle them. Thus, several countries have proposed laws to sensitize and make the population aware of the indiscriminate use of plastics. This study aims to highlight the global panorama of plastics production and policies and strategies applied to minimize its use and impacts on the environment. To this end, a literature review was carried out. In short, the research revealed that the world production of plastics has expanded in recent decades, as a result of the multiple uses of products based on these polymers. Advances in research to minimize the impacts of existing plastics on the environment, as well as the application of laws to reduce production and consumption, are of fundamental importance, since plastics in the environment can cause direct and indirect effects on health. Furthermore, microplastic degradation techniques have been widely researched, and the biodegradation process is an efficient and safe alternative.

KEYWORDS: disposal, environmental pollution, polymers.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aliado a um estilo de vida cada vez mais descomplicado, tem estimulado o consumo de bens duráveis e não duráveis. Indiscutivelmente, os plásticos têm sido amplamente utilizados na produção de vários itens que fazem parte do cotidiano da sociedade moderna, tais como utensílios domésticos, eletrodomésticos, eletrônicos, produtos de higiene pessoal, brinquedos e outros. A aplicação de produtos à base de plásticos, em vários setores, tem estimulado, a nível mundial, a sua produção, tendo como consequência a geração de resíduos plásticos. Em 2018, no mundo, foram gerados cerca de 250 milhões de toneladas de resíduos plásticos, sendo 70% direcionados para aterros, reciclagem ou unidade de recuperação de energia e, o restante, 30%, descartados de forma inadequada (LIWARSKA-BIZUKOJC, 2021). Golwala *et al.* (2021) citam que aproximadamente 12 bilhões de toneladas métricas de resíduos plásticos serão lançados, anualmente, no ambiente até 2050.

Os resíduos plásticos além de conterem aditivos e subprodutos químicos perigosos, quando disponíveis no ambiente são capazes, ainda, de adsorver contaminantes, tais como produtos químicos orgânicos, metais potencialmente tóxicos, antibióticos e microrganismos, que consequentemente podem causar efeitos diretos ou indiretos nos ecossistemas e organismos. Como consequência, os plásticos podem alterar a funcionalidade dos ecossistemas, incluindo degradabilidade e toxicidade e, ainda, podem ser ingeridos, incorporados e acumulados nos corpos e tecidos de muitos organismos, como minhocas, pássaros, invertebrados de água doce, peixes e ostras (BRADNEY *et al.*, 2019). Os plásticos podem, ainda, contribuir para a disseminação de doenças no ambiente e ter implicações ainda não quantificadas para a saúde humana (MORESCO *et al.*, 2021).

Assim, para que esses resíduos não ocasionem mais prejuízos ao ambiente, um progresso significativo, para enfrentar o amplo uso de polímeros convencionais, tem sido o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis, principalmente de recursos naturais renováveis (MIRI *et al.*, 2022). Ademais, políticas públicas têm incentivado reduzir a produção, reutilizar, reciclar e recuperar, os plásticos convencionais. Entretanto, mesmo havendo alta produção e uso de plásticos, poucos países têm aplicado medidas para minimizar os impactos no ambiente. Este estudo teve como objetivo evidenciar o panorama mundial de produção de plásticos e políticas aplicadas para minimizar o uso.

PROPRIEDADE DOS PLÁSTICOS

A história do plástico remonta a 1907, quando Leo Baekeland, um químico belga, formulou o primeiro polímero sintético, a Baquelita e, desde então, grandes empresas químicas começaram a investir na pesquisa e no desenvolvimento de novos polímeros sintéticos. Desse modo, o policloreto de vinila (PVC) foi introduzido em 1912, o poliestireno (PS) em 1932, o polietileno (PE) em 1933, o tereftalato de polietileno (PET) em 1941 e polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (HDPE) no início dos anos 1950 (ARPIA *et al.*, 2021).

Logo, os plásticos sintéticos foram ganhando espaço, como uma alternativa para a substituição dos escassos recursos naturais, tais como casco de tartaruga, marfim ou ossos de animais (CHEN *et al.*, 2020 b).

Os plásticos representam um grupo de polímeros orgânicos, incluindo materiais sintéticos, semissintéticos ou naturais, sobretudo produzidos por matérias-primas de origem fóssil (petróleo bruto, gás, etc), renovável (soja, amido de arroz, milho, cana-de-açúcar, óleos vegetais, etc) ou base mineral (sal) (ABIPLAST, 2018; PLASTICSEUROPE, 2019). Assim, os principais elementos que compõem os plásticos são o carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, cloro e bromo (BAHL *et al.*, 2021).

De acordo com seus arranjos estruturais, propriedades físicas e aplicações, os plásticos podem ser classificados em homopolímeros ou heteropolímeros, que são derivados, respectivamente, de tipos idênticos ou diferentes de monômeros. Além disso, os plásticos são classificados com base em suas propriedades, como estrutura química do polímero e nas cadeias laterais, podendo ser definidos como termoplásticos que são plásticos não reticulados e recicláveis e termofixos ou duroplásticos, que contêm uma alta densidade de reticulações químicas, não podendo ser recicláveis (SÁNCHEZ, 2020).

Para a obtenção das propriedades funcionais, nos termoplásticos são incorporados alguns aditivos, como plastificantes (ftalatos), retardadores de chama (ácido bórico, retardantes de chama bromados), antioxidantes e estabilizadores de UV (bisfenol A, hidroxitolueno butilado), estabilizadores de calor (cádmio e compostos de chumbo), agentes de deslizamento (amidas de ácidos graxos), agentes de cura (diaminodifenilmetano), biocidas (compostos de arsênio), pigmentos (compostos de cádmio) e outros (SÁNCHEZ, 2020).

Os plásticos podem ser classificados em biodegradáveis e de base biológica, cujo termo está associado a sustentabilidade dos materiais (CHEN *et al.*, 2020 b). Segundo a *European Bioplastics*, um material plástico é definido como um bioplástico se for de base biológica, biodegradável ou apresentar ambas as propriedades (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2018), sendo, portanto, biodegradáveis aqueles degradados por organismos presentes na natureza (CHEN *et al.*, 2020 b).

Os plásticos de base biológica ou bioplásticos indicam que os materiais são derivados de recursos renováveis, podendo ser produzidos a partir de diversas matérias-primas naturais, como vegetais (amido, celulose e pectina), animais e produtos lácteos (quitosana, proteína de soro de leite, gelatina e caseína), produtos de fermentação (polihidroxibutirato e polihidroxivalerato), polissacarídeos (celulose, amido, pectina, quitina), proteínas (glúten, caseína, gelatina), lipídios (animal e óleos vegetais) ou de certas substâncias produzidas por alguns microrganismos (microalgas). Os bioplásticos também podem ser sintetizados quimicamente a partir de substâncias como poli(ácido láctico) (PLA), poli(butileno succinato) (PBS) e poli(hidroxialcanoato) (PHA) (KABIR *et al.*, 2020; ZOUNGRANAN *et al.*, 2020).

Nos processos de produção de bioplásticos, os polissacarídeos, proteínas, lipídios ou as substâncias derivadas de microrganismos podem ser usados isoladamente (biorrecursos convencionais) ou na forma de biorrecursos não convencionais (biorrecursos modificados ou combinados) (ZOUNGRANAN *et al.*, 2020).

Os bioplásticos podem ser classificados em três categorias: I os que possuem origem renovável e não são biodegradáveis, II - os que têm origem renovável e são biodegradáveis; e III - os que possuem origem fóssil e são biodegradáveis (LEAL FILHO *et al.*, 2021).

O grupo de bioplásticos com origem renovável, porém não biodegradáveis inclui polímeros como o bio-polietileno (bio-PE), o bio-poli(tereftalato de etileno) (bio-PET), bio-poliamida (bio-PA), bio-poli(tereftalato de trimetileno) (bio-PTT), o poliuretano (PU), entre outros (ZOUNGRANAN *et al.*, 2020). Dentre os bioplásticos de origem renovável e biodegradáveis exemplificam os polímeros como poli(ácido láctico) (PLA), polihidroxialcanoato (PHA), poli(succinato de butileno) (PBS), compostos de amido, e outros, enquanto que os compostos por polímeros de origem fóssil e biodegradáveis, destacam-se polímeros como o poli(butileno adipatocotereftalato) (PBAT) e policaprolactona (PCL) (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2018).

PRODUÇÃO MUNDIAL DE PLÁSTICOS

Devido as múltiplas características, tais como baixo custo, leveza, durabilidade, versatilidade, dentre outras, a expansão da fabricação do plástico alavancou na década de 1950. Em 2018 foram produzidos, aproximadamente, 359 milhões de toneladas de plásticos em todo o mundo, ficando no topo de produção a Ásia, com um percentual de 51%, seguido de NAFTA (Canadá, México e Estados Unidos) com 18% e em quinto lugar a América Latina com apenas 4% da produção mundial (PLASTICSEUROPE, 2019). Como consequência dos avanços registrados nas últimas décadas, estudos apontam que em 2050 a produção poderá ultrapassar 500 milhões de toneladas (CHEN *et al.*, 2020 b) enquanto Gallo *et al.* (2018) estimam que poderá ser entre 700 e 1800 milhões de toneladas.

Segundo dados da Abiplast (2018), somente no Brasil foram produzidos 6,2 milhões de toneladas de plástico, podendo essa produção alcançar 7 milhões de toneladas em 2023. Com o propósito de atender os diferentes setores, trazendo segurança, higiene, conforto e bem-estar para a sociedade, no mundo são produzidos acima de 300 tipos de plásticos, dos quais cerca de 60 são mais populares, como polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS), poliuretano (PU), resina fenólica, e outros (CHEN *et al.*, 2020 a).

A produção de plásticos está associada a demanda de cada setor e suas finalidades, sendo que o PE é mais comumente utilizado na fabricação de filmes, bolsas, utensílios domésticos, e outros; o PP para produção de embalagens de

alimentos, recipientes para micro-ondas, tubos, etc.; polietileno tereftalato (PET) para embalagens de bebidas; PVC para tubos, blindagens de cabos, embalagens, etc.; PS para embalagens, brinquedos, materiais de construção, produtos elétricos e eletrônicos, etc.; PU para enchimentos em móveis e isolamento de edifícios; e resinas fenólicas para placas de circuito impresso usadas para produtos elétricos e eletrônicos (CHEN *et al.*, 2021).

A Europa corresponde a 80% da demanda de todo o plástico produzido no mundo, sendo aplicados no segmento das embalagens (39,9%), seguido de construções (19,8%), indústria automotiva (9,9%), indústria de eletrônicos (6,2%), produtos de uso pessoal (4,1%), agricultura (3,4%) e outros (16,7%) (PLASTICSEUROPE, 2019). No ano de 2018, o Brasil consumiu 6,6 milhões de toneladas de plástico, com um crescimento de 1,5% comparado ao ano anterior, sendo o PP o polímero mais consumido com 20,3%, seguido do polietileno de alta densidade (PEAD) 13,5%, policloreto de vinila (PVC) 12,6%, polietileno de baixa densidade (PEBD) 11,4%, polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) 11%, politereftalato de etileno (PET) 5,9%, poliestireno (EPS) 2,3% e acetato-vinilo de etileno (EVA) 1,4 (ABIPLAST, 2018).

Por outro lado, a produção de bioplásticos é lenta, embora tenha crescido nas últimas décadas. Segundo Fojt *et al.* (2020) a produção mundial de bioplásticos, em 2017 foi de 2,05 milhões de toneladas, dos quais 42,9% eram biodegradáveis, sendo que 5% corresponde a produção de polibutileno adipato tereftalato (PBAT), 4,9% polibutileno succinato (PBS), 10,3% ácido polilático (PLA), 2,4% polihidroxibutiratos (PHA), 18,8% misturas de amido e 1,5% de outros. De acordo com a *European Bioplastics* (2019), no ano de 2019, foram produzidos 2,11 milhões de toneladas de bioplásticos, sendo 44,5% de base biológica não degradável e 55,5% biodegradável. Dentre os biodegradáveis, a maior porcentagem foi mistura de amido (21,3%), seguido de PLA (13,95%), PBAT (13,4%), PBS (4,3%), PHA (1,2%) e outros (1,4%) (EUROPEAN BIPLASTICS, 2019).

Alguns estudos, estimam-se que em 2022, a produção de bioplástico possa chegar a 2,33 a 2,44 milhões de toneladas (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2019; FOJT *et al.*, 2020). No ano de 2019, a Ásia foi o principal centro de produção, com 45%, seguido da Europa (25%), América do Norte (18%) e América do Sul (12%) (EUROPEAN BIPLASTICS, 2019).

Os bioplásticos têm sido aplicados em vários ramos, como exemplo, no mercado de embalagens (embalagens rígidas e flexíveis), indústria têxtil, produtos automotivos e de transporte, fabricação de brinquedos, na agricultura, na construção civil, em aparelhos médicos, segmento de eletrônicos e outros (SHRUTI; KUTRALAM-MUNIASAMY, 2019). Do mercado total de bioplásticos em 2019, o setor das embalagens continua sendo o maior campo de aplicação, com mais de 53% (1,14 milhão de toneladas) (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2019).

POLÍTICAS SOBRE USO E PRODUÇÃO DE PLÁSTICOS

O alto consumo de produtos a base de polímeros sintéticos, acelerou a produção de plásticos no final do século XIX e como consequência gerou grandes quantidades de resíduos. Contudo, uma pequena parcela desses resíduos é reciclada ou incinerada e sua grande maioria é lançada sem nenhum tipo de tratamento no ambiente (HUANG *et al.*, 2021). De acordo com Steinhort *et al.* (2021) a prevenção de resíduos é definida como qualquer medida tomada antes que uma substância, material ou produto se transforme em resíduo.

Com o propósito de diminuir os impactos ocasionados ao ambiente por esses polímeros e demais resíduos, a gestão é baseada na hierarquia dos quatro Rs, que compreendem reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar. Assim, a melhor forma de evitar a geração de plásticos é reduzir a produção de mercadorias a base de plásticos, por meio da adoção de uso alternativo de materiais, como vidro, papelão ou outros produtos recicláveis ou biodegradáveis, bem como reutilizando plásticos descartados; outra alternativa é a reciclagem, que economiza recursos e energia, além de reduzir a emissão de poluentes e; finalmente o processo de recuperação, que consiste no uso de plásticos para produção de energia ou para a produção de novas matérias-primas (CALERO *et al.*, 2021).

Calero *et al.* (2021) citam que as estratégias mais importantes para a reduzir os resíduos plásticos é o progresso de circularidade, que inclui: redesenhar os plásticos para circularidade, minimizar a perda na pré-produção, estender a responsabilidade ao produtor, proibir o uso de determinados tipos de plásticos de uso simples e apoiar os processos de reciclagem. No que tange ao aspecto de redesenhar os plásticos para a circularidade, um conjunto de normas encontra-se na ISO 14006, que fornece diretrizes para a incorporação do *ecodesign*. Além disso, outras ações podem ser voltadas para a produção de plásticos livres de aditivos tóxicos e o uso de materiais alternativos (CALERO *et al.*, 2021).

A estratégia da União Européia (UE) para os plásticos em uma economia circular estabelece o objetivo de que, até 2030, todas as embalagens de plástico colocadas no mercado da UE sejam reutilizáveis ou recicláveis (STEINHORT *et al.* 2021). Nos Estados Unidos da América (EUA) foram adotadas em 28 estados pelo menos 471 regulamentações locais para uso de sacola, sendo introduzidos 95 projetos de lei em 2019 com o objetivo de proibir totalmente sacolas plásticas e melhorar a reciclagem. Além de sacolas plásticas, o uso de PS foi proibido na cidade de *Hastings-on-Hudson* (estado de Nova York) e em *Vermont* foi restringido o uso de canudos de uso único e recipientes de PS (CONTI *et al.*, 2021).

No ano de 2018, os governos do Canadá, França, Alemanha, Itália, Reino Unido e União Europeia (UE) assinaram durante a reunião do G7, a “Carta do Oceano Plástico”, que tem como objetivo prevenir o desperdício e o uso desnecessário de plásticos, promover a reciclagem e pesquisa de alternativas ao plástico e incentivar campanhas de sensibilização ao lixo marinho (CONTI *et al.*, 2021).

Em 2019, a União Européia aprovou a diretiva 2019/904 para limitar o uso de objetos de plástico de uso único, que compreendem pratos, garfos, facas, colheres e canudos, bem como balões, bastões de balão e cotonetes, no entanto, no que refere a sacolas plásticas, essa diretiva não se aplica. Ademais a diretiva propõe o desenvolvimento tecnológico do tratamento de resíduos, da reciclagem, da pesquisa de alternativas ao plástico, aprimorando a chamada “economia circular” e o conceito de “responsabilidade do fabricante” e, propõe promover campanhas sobre o uso consciente de plásticos. Ressalta-se que países africanos e asiáticos também adotaram medidas para implantação de taxas ou proibições para reduzir o consumo de plásticos (CONTI *et al.*, 2021).

No Brasil, o Estado do Rio de Janeiro foi o primeiro a criar o Projeto de Lei nº 3794/2018, que proíbe a utilização de canudos de plásticos, exceto biodegradáveis, em restaurantes, bares, quiosques, ambulantes, hotéis e similares no âmbito do estado (RIO DE JANEIRO, 2018 a). Em 2018, no município do Rio de Janeiro foi criado o Projeto de Lei nº 1098/2018, que determinou a proibição do uso e fornecimento de copos plásticos descartáveis pelos restaurantes, bares,

lanchonetes, barracas de praia, ambulantes e similares (RIO DE JANEIRO, 2018 b). Outrossim, a Lei Municipal 8006/2018 do Rio de Janeiro estabeleceu que os supermercados ficam proibidos de distribuírem (gratuitamente ou cobrando) sacos ou sacolas plásticas descartáveis, compostos por polietilenos, polipropilenos e/ou similares, devendo substituí-las por sacolas reutilizáveis/retornáveis (RIO DE JANEIRO, 2018c). Em adequação a Lei Municipal 8006/2018, a Lei Estadual nº 8473, de 15 de julho de 2019, dispõe sobre a substituição de sacolas plásticas não recicláveis ou não reutilizáveis, distribuídas pelos estabelecimentos comerciais localizados no Estado do Rio de Janeiro, como forma de colocá-las à disposição do ciclo de reciclagem e proteção do meio ambiente fluminense (RIO DE JANEIRO, 2019).

No município de São Paulo foi sancionada a Lei Municipal nº 17.261, de 13 de janeiro de 2020, que proíbe o fornecimento de copos, pratos, talheres, agitadores para bebidas e varas para balões de plásticos descartáveis aos clientes de hotéis, restaurantes, bares e padarias, entre outros estabelecimentos comerciais (SÃO PAULO, 2020).

No estado de Mato Grosso do Sul foi aprovada a Lei nº 5.372, de 17 de julho de 2019, que dispõe sobre a proibição do fornecimento de canudos de material plástico aos clientes de hotéis, restaurantes, bares, padarias, conveniências, clubes noturnos, salões de dança e eventos musicais de qualquer espécie, entre outros estabelecimentos, e ainda estabelece que canudos de plástico poderão ser substituídos por canudos de papel reciclável, material comestível ou biodegradável (MATO GROSSO DO SUL, 2019).

No Estado de Mato Grosso foi apresentado o Projeto de Lei nº 1017/2020, p qual proíbe a utilização de copos plásticos descartáveis em eventos oficiais ou que pertençam ao calendário oficial do Estado de Mato Grosso, porém o mesmo encontra-se em tramitação na Assembleia Legislativa-MT (MATO GROSSO, 2020).

A aplicação de normativas e regulamentos também tem se expandido para as micropartículas plásticas. No ano de 2014, o estado de Illinois foi a primeira agência governamental a proibir microesferas não biodegradáveis em produtos de cuidados pessoais e desde então países como os EUA, Canadá, China, Nova Zelândia, Coreia do Sul e província de Taiwan adotaram o mesmo procedimento. Além desses, a Islândia assinou um compromisso de proibição, enquanto que a Índia está atualmente considerando futuras restrições (ANAGNOSTI *et al.*, 2021). O governo da Holanda proibiu as microesferas em produtos de cuidados pessoais, como sabonetes, pastas de dente, esfoliantes e géis desde 2015 (CONTI *et al.*, 2021).

Na Europa, a Itália foi o primeiro país a proibir as microesferas de plástico em alguns cosméticos (excluindo sabões e detergentes). A partir de 2018, a Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA) planejou limitar os microplásticos, definidos como polímeros sólidos (partículas e fibras) em produtos comumente usados (CONTI *et al.*, 2021).

No Brasil, foi introduzido o Projeto de Lei nº 6528/2016 que tem como finalidade proibir a manipulação, a fabricação, a importação e a comercialização, em todo o território nacional, de produtos de higiene pessoal, cosméticos e perfumaria que contenham a adição intencional de microesferas de plástico, e dá outras providências, no entanto, o projeto ainda encontra-se em tramitação (BRASIL, 2016). Na mesma situação, encontra-se o Projeto de Lei do Senado nº 263, de 2018, que versa sobre a proibição de distribuição de canudos e sacolas plásticas em estabelecimentos comerciais, bem como a produção de mercadorias de higiene

peçoal e cosméticos esfoliantes, tais como sabão, sabonete e pasta de dente, entre outros, que usam micropartículas plásticas como componentes (BRASIL, 2018).

Indiscutivelmente, muitas barreiras inerentes às estruturas e infraestruturas políticas, econômicas e técnicas impedem uma verdadeira mudança de comportamento em direção à redução dos resíduos plásticos (STEINHORT *et al.*, 2021). No entanto, são necessárias medidas mais holísticas que contemplem todas as embalagens plásticas, especialmente as embalagens descartáveis para alimentos e bebidas (STEINHORT *et al.*, 2021).

DEGRADAÇÃO DOS PLÁSTICOS

O aumento populacional aliado ao consumo de bens duráveis e não duráveis tem gerado uma grande quantidade de resíduos plásticos. A fim de diminuir a quantidade desses resíduos, várias soluções foram propostas, que se enquadram basicamente em três categorias: contenção, mitigação e remediação (ARPIA *et al.*, 2021).

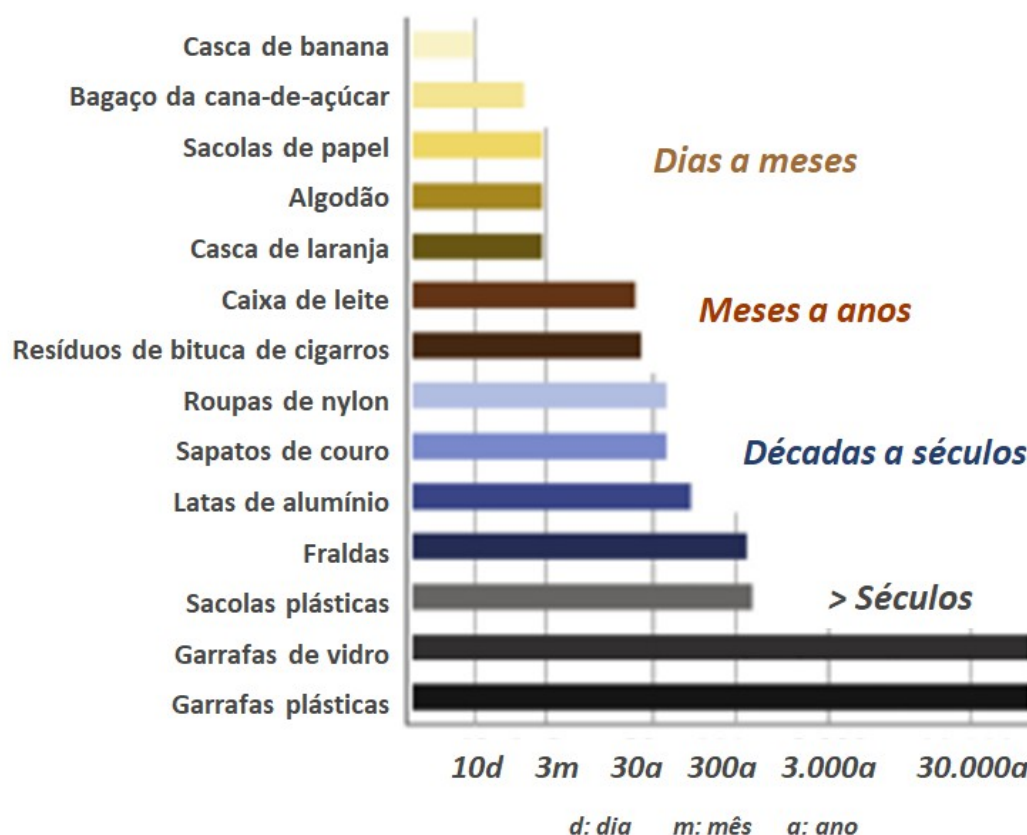
A estratégia de contenção tem como propósito a reciclagem e gestão adequada do aterro, enquanto que a mitigação impõe uma série de estratégias de redução dos plásticos em circulação global, tais como uso de regulamentos e medidas legislativas, controle de origem e programas de limpeza (ARPIA *et al.*, 2021). Já a remediação visa diminuir a concentração de plásticos no ambiente principalmente por meio da degradação. Assim, desde o início da década de 70, pesquisas têm sido realizadas com o propósito de compreender os fatores relacionados aos processos de degradação dos plásticos (WANG *et al.*, 2020).

O processo de degradação natural dos plásticos está associado a dois fatores, sendo um abiótico e outro biótico. A degradação abiótica refere-se à mudança nas propriedades físicas ou químicas, podendo ser influenciada por condições ambientais (temperatura, pH, umidade, salinidade, nível de oxigênio, luz e temperatura) e ainda pelo tipo de superfície, topografia, hidrofobicidade da superfície, distribuição das cargas elétricas, peso molecular, os tipos de grupos funcionais e aditivos adicionados aos polímeros. Por outro lado, a degradação biológica refere-se à ação de organismos vivos, que corresponde a atividade metabólica, atividade enzimática e liberação de ácidos (BAHL *et al.*, 2021; TIWARI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2021).

Os processos de degradação podem ser classificados como mecânico, térmico, químico e biológico, que envolvem a fotodegradação, degradação térmica ou pirólise, biodegradação, hidrólise, compostagem e degradação termo-oxidativa (GUO *et al.*, 2019). Por consequência, no processo de degradação ocorrem mudanças nas propriedades físicas e químicas dos plásticos, tais como alterações na cor, superfície, cristalinidade, tamanho das partículas e densidade (GUO; WANG, 2019).

Em geral, os materiais plásticos convencionais são muito resistentes à degradação quando comparados aos outros materiais, que apresentam rapidez e efetividade na degradação (Figura 1). Contudo, o tempo de permanência dos plásticos no ambiente depende das propriedades dos plásticos, bem como das condições ambientais circundantes (ZHANG *et al.*, 2021).

FIGURA 1. Período de degradação de plásticos, de diferentes materiais.



Fonte: Modificado de Chen *et al.* (2020 b).

PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO

Conforme apontado, a degradação dos plásticos pode ocorrer pela ação mecânica, térmica, química e biológica. No quadro 1 pode-se observar as vantagens e desvantagens de cada um desses processos.

QUADRO 1. Vantagens e desvantagens dos processos de degradação de plásticos.

Processos de degradação	Vantagens	Desvantagens
Mecânica	A degradação mecânica leva a uma diminuição no tamanho das partículas e, conseqüentemente, a um aumento na área de superfície das partículas de polímero, o que resulta em uma degradação mais rápida devido à maior reatividade.	Cisões em cadeia de polímeros durante a degradação fototérmica e química afetarão as propriedades mecânicas dos plásticos e, particularmente, seu alongamento de tração na ruptura e módulo de tração.
Térmica	O tratamento térmico quebra grandes polímeros plásticos em hidrocarbonetos menores de vários números de carbono e pontos de ebulição em um ambiente inerte, sem ar ou controlado a temperaturas elevadas.	No ambiente, a oxidação exotérmica é improvável de acontecer devido a uma exigência de alta temperatura.
Química	Os mecanismos predominantes	Esse método não pode ser

	dependem fortemente do tipo de polímero, uma vez que existem inúmeras composições diferentes de polímeros sintéticos produzidos. Eles também usa produtos químicos que podem quebrar a ligação polimérica de plásticos e converter polímeros em um estado não perigoso.	usado em grande escala, pois os agentes químicos usados para a degradação do plástico podem gerar resíduos tóxicos.
Biológica	A degradação parcial ou primária da cadeia do polímero leva a produtos de transformação estáveis ou temporariamente estáveis.	Requer pré-tratamentos químicos ou físicos para converter polímeros em monômeros, a fim de tornar a biodegradação mais eficiente e rápida.

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

A hidrólise é um dos principais processos de degradação de polímeros contendo heteroátomos, tais como o poliuretano (PU) e polietileno (PET), tendo como resultado, a cisão de ligações éster, que leva à formação de grupos carboxílicos, tornando a hidrólise autocatalítica (ENFRIN *et al.*, 2019).

Dos processos de degradação, a fotodegradação tem se mostrado o processo mais rápido, enquanto que a biodegradação e até mesmo a hidrólise ocorrem mais lentamente. Isso se deve ao fato de que no processo de fotodegradação, a radiação UV inicia uma reação de oxidação térmica autocatalítica, que pode induzir a formação de radicais livres, adição de oxigênio, abstração de hidrogênio e cisão ou reticulação de cadeias químicas, bem como mudanças morfológicas incluindo flocos e fissuras; enquanto que na biodegradação, principalmente quando o ambiente encontra-se em condições anaeróbicas, como exemplo sedimentos, tal fato contribui para a cinética de degradação lenta, envolvendo o acoplamento de reações termodinâmicas favoráveis e desfavoráveis e transformações bioquímicas por microrganismos (DU *et al.* 2021; JI *et al.*, 2021).

Vale destacar que os processos de foto-oxidação e hidrólise levam à formação de fraturas, rachaduras e buracos na superfície dos plásticos, induzindo a fragilização, o que consequentemente auxilia nos demais processos de degradação (ENFRIN *et al.*, 2019).

Além dos processos supracitados, a tecnologia de compostagem tem sido amplamente utilizada como uma tecnologia ecologicamente correta para descartar resíduos orgânicos e produzir fertilizante orgânico. Contudo, estudos têm demonstrado a aplicação da tecnologia de compostagem para a degradação de plásticos. O processo de degradação do plástico está relacionado principalmente às suas propriedades físicas e químicas, bem como a atividade microbiana. A alta temperatura, umidade e altas concentrações de oxigênio no processo de compostagem, podem acelerar a oxidação dos plásticos, aumentar a rugosidade da superfície e ainda promover a quebra da ligação C – C (SUN *et al.*, 2021). Por outro lado, Miri *et al.* (2022), mencionam que o processo de compostagem não é um método prático eficiente, por gerar produtos tóxicos, tais como componentes aromáticos e metais potencialmente tóxicos.

BIODEGRADAÇÃO

Microrganismos quando colonizam microplásticos, podem utilizar esse substrato como fonte de carbono (YUAN *et al.*, 2020), bem como podem promover a transferência vertical de genes e a resistência a antibióticos, o transporte de poluentes, além de servir como nicho para o crescimento de outros organismos (CAI *et al.*, 2019).

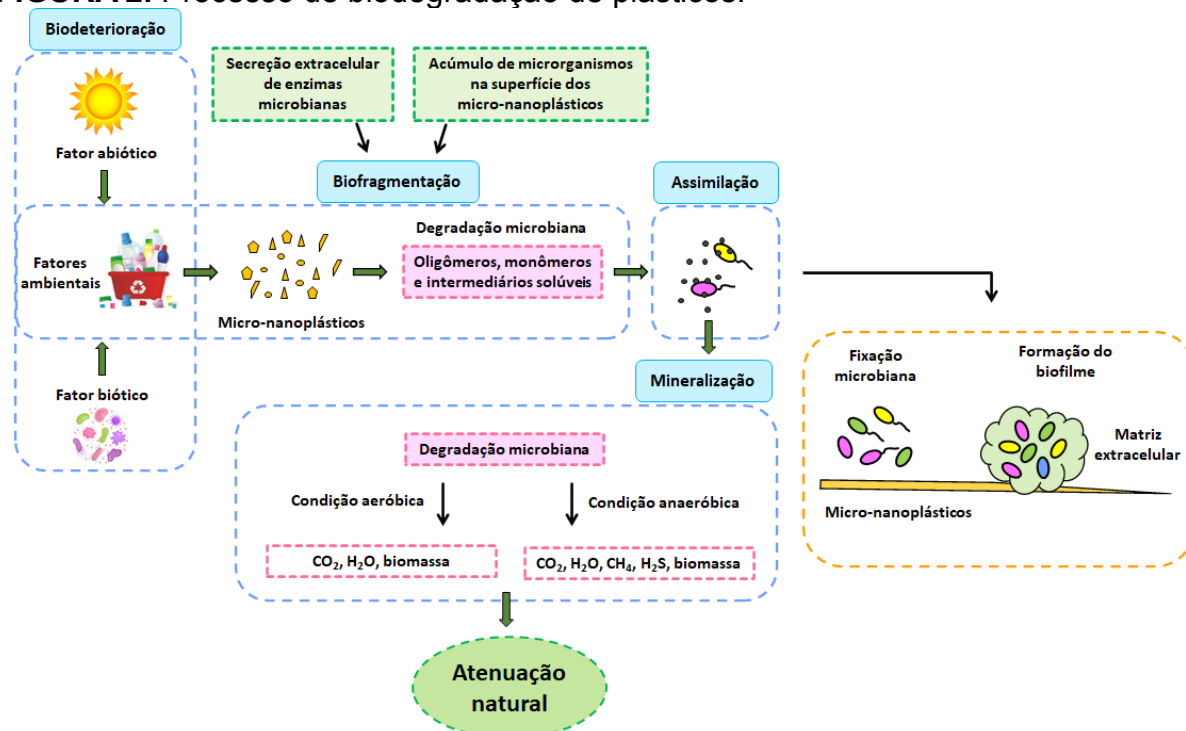
As bactérias representam o maior grupo de microrganismos presentes na natureza e é bem conhecida na literatura a sua capacidade de formar biofilmes e degradar poluentes. Estudos têm revelado que a biodegradação de poluentes orgânicos por culturas puras, tendem a produzir metabólitos tóxicos que podem afetar o crescimento microbiano, no entanto, quando há um consórcio de microrganismos esses efeitos são minimizados, pois esses metabólitos podem ser utilizados por outros organismos presentes no consórcio. Ademais, bactérias no consórcio apresentam interações de sinergismo, mutualismo e simbiose, aumentando a atividade metabólica e tolerância durante a degradação do poluente (YUAN *et al.*, 2020).

Em adição às bactérias, os fungos também tem alto potencial para aderir e utilizar os plásticos como fonte de energia. Os fungos podem promover a formação de diferentes ligações químicas nos plásticos, tais como carbonil, carboxil e grupos funcionais de éster, diminuindo sua hidrofobicidade (YUAN *et al.*, 2020). O desenvolvimento da comunidade plastisférica pode ser afetado por condições ambientais, bem como por propriedades plásticas como cor, forma, densidade, hidrofobicidade, tipo de polímero, área de superfície específica, topografia, rugosidade e carga da superfície (CAI *et al.*, 2019; WEN *et al.*, 2020).

Para que o processo de biodegradação seja efetivado, os microrganismos precisam colonizar as superfícies dos plásticos e sintetizar várias enzimas intracelulares e extracelulares, no entanto, o mecanismo de ação das enzimas extracelulares é bem conhecido, enquanto que das enzimas intracelulares ainda não são bem compreendidos (TIWARI *et al.*, 2020). Por intermédio da colonização e produção de enzimas, o processo de biodegradação, ocorre seguindo as seguintes etapas: biodeterioração, biofragmentação, assimilação e mineralização (TIWARI *et al.*, 2020).

A biodeterioração é a etapa inicial, em que as enzimas extracelulares (esterase, lipase, peróxidos de lignina, lacase, peróxidos de manganês, poli (3-hidroxibutirato) despolimerases e cutinases) atuam na superfície do plástico, aumentando a hidrofobicidade e consequentemente alterando as propriedades físicas e químicas; logo ocorre o processo de biofragmentação que consiste na clivagem dos polímeros complexos em formas mais simples, como exemplo, oligômeros, dímeros e monômeros; em seguida ocorre a assimilação, etapa em que os grupos carbonil ou hidroxil são metabolizados dentro da célula por enzimas intracelulares, por meio da β -oxidação e do ciclo do ácido tricarboxílico (TCA); e finalmente a mineralização que é a produção de metabólitos oxidados, tais como dióxido de carbono, água, nitrogênio e metano (Figura 2) (BAHL *et al.*, 2020; TIWARI *et al.*, 2020; MIRI *et al.*, 2022).

FIGURA 2. Processo de biodegradação de plásticos.



Fonte: Modificado de Tiwari *et al.* (2020).

O processo de biodegradação pode ser afetado por vários fatores, dentre eles os relacionados ao crescimento do microrganismo, topografia da superfície e cristalinidade dos plásticos, absorção de água, orientação das cadeias de polímeros e temperaturas de reações, além da proporção superfície-volume, isto é, quanto maior a proporção ou menor o tamanho do polímero mais prontamente será degradado (YUAN *et al.*, 2020; MIRI *et al.*, 2022). A biodegradação de plásticos geralmente requer condições de umidade e temperatura relativamente altas, sendo aproximadamente 70% de umidade e 55 °C, condições estas que nem sempre são encontradas no ambiente natural (LIAO; CHEN, 2021).

A completa biodegradação requer que os microrganismos utilizem os polímeros como fonte de carbono e energia, no entanto, para acelerar essas reações, alguns experimentos têm combinado o tratamento térmico com a atividade metabólica de bactérias. Estudos têm mostrado que o pré tratamento térmico de poliestireno pode auxiliar na liquefação e degradação parcial, produzindo oligômeros com baixa viscosidade, que por sua vez podem facilitar a ação das bactérias, resultando em uma degradação mais eficiente (LI *et al.*, 2020).

Chandra *et al.* (2020), relataram que bactérias como *Bacillus* sp. BCBT21, *Bacillus amyloliquefaciens* BSM-1, *Bacillus amyloliquefaciens* BSM-2, *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Brevibacillus borstelensis*, *Bacillus vallismortis* bt-dsce 01, *P. proteogophonas* e *Paenibacillus* sp. são capazes de degradar vários tipos de microplásticos. Cai *et al.* (2019) investigaram a capacidade de adesão de *Escherichia coli*, *Bacillus pumilus* e *Bacillus subtilis*, em diferentes tipos de plásticos (PE, PEV, PP e PET), no entanto, os resultados revelaram que *Escherichia coli* aderiu menos, quando comparada as demais bactérias.

Estudo realizado por Shabbir *et al.* (2020) mostrou que bactérias foram capazes de degradar diferentes tipos de microplásticos. Li *et al.* (2020) revelaram que *Microbulbifer hydrolyticus* foi capaz de degradar polietileno de baixa densidade.

A espécie bacteriana *Acinetobacter bacterium* isolada de *Tribolium castaneum* foi eficiente na degradação de poliestireno (WANG *et al.*, 2020). Os fungos por sua vez, também são eficientes nos processos de biodegradação. Paço *et al.* (2017) investigaram a capacidade de *Zalerium maritimum* de degradar PE, e os resultados revelaram que houve uma redução dos pellets, tanto em massa quanto em tamanho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção mundial de plásticos tem se expandido nas últimas décadas, em consequência dos usos múltiplos de produtos à base desses polímeros. Como consequência é gerado uma quantidade inestimável de resíduos, que são lançados diretamente no ambiente ou são reciclados.

Avanços em pesquisas para minimizar os impactos dos plásticos existentes no ambiente, bem como a aplicação de leis para reduzir a produção e consumo são de fundamental importância, visto que os plásticos podem causar efeitos diretos e indiretos na saúde. Ademais, processos de degradação têm sido amplamente estudados e se apresentam com uma alternativa para a remediação de plásticos presentes no ambiente.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil 2018**. 2018, 47 p.

ANAGNOSTI, L.; VARVARESOU, A.; PAVLOU, P.; PROTOPAPA, E.; CARAYANNI, V. I. Worldwide actions against plastic pollution from microbeads and microplastics in cosmetics focusing on European policies. Has the issue been handled effectively? **Marine Pollution Bulletin**, v. 162, p. 1-15, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111883>>. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111883

ARPIA, A. A.; CHEN W. H.; UBANDO, A. T.; NAGVI, S. R.; CUIABA, A. B. Microplastic degradation as a sustainable concurrent approach for producing biofuel and obliterating hazardous environmental effects: A state-of-the-art review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, n. 15, p. 1 -4, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126381>>.doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126381

BAHL, S.; DOLMA, J.; SINGH, J. J.; SEHGAL, S. Biodegradation of plastics: A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, n. 1, p. 31-34, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>>. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.096

BRADNEY, L. WIJESEKARA, H.; PALANSOORIYA, K. N.; OBADAMUDALIGE, N.; BOLAN, N. S.; OK, Y. S. RINKLEBE, J.; KIM, K. H.; KIRKHAM, M. B. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. **Environment International**, v. 131, p. 1-18, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104937>>. doi: 10.1016/j.envint.2019.104937

BRASIL. **Projeto de Lei nº 6528/2016. Projeto de Lei nº 6528/2016**, que Proíbe a manipulação, a fabricação, a importação e a comercialização, em todo o território nacional, de produtos de higiene pessoal, cosméticos e perfumaria que contenham a

adição intencional de microesferas de plástico, e dá outras providências. Disponível em: < <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2117806> > Acesso em: 17 de fevereiro de 2022.

BRASIL. **Projeto de Lei do Senado nº 263/2018**. Projeto de Lei do Senado nº 263/2018, que Altera as Leis nºs 6.360, de 23 de setembro de 1976, que dispõe sobre a vigilância sanitária a que ficam sujeitos os medicamentos, as drogas, os insumos farmacêuticos e correlatos, cosméticos, saneantes e outros produtos, e dá outras providências, e 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, para vedar o uso de micropartículas de plástico na composição de produtos cosméticos, e para proibir a fabricação, a importação, a distribuição, ainda que a título gratuito, e a comercialização de sacolas plásticas para acondicionamento e transporte de mercadorias, bem como de utensílios plásticos descartáveis para consumo de alimentos e bebidas, com exceção dos fabricados com material integralmente biodegradável. Disponível em: < <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/133434?o=d> >. Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

CAI, L.; WU, D.; XIA, J.; SHI, H.; KIM, H. Influence of physicochemical surface properties on the adhesion of bacteria onto four types of plastics. **Science of The Total Environment**, v. 671, p. 1101-1107, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.434>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.434

CALERO, M.; GODOY, V.; QUESADA, L.; MARTÍN-LARA, M. A. Green strategies for microplastics reduction. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 28, p. 1 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100442>>. doi: 10.1016/j.cogsc.2020.100442

CHANDRA, P.; ENESPA; SINGH, D. P. Microplastic degradation by bacteria in aquatic ecosystem. **Microorganisms for Sustainable Environment and Health**, p. 431-467, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00022-X> >. doi: 10.1016/B978-0-12-819001-2.00022-X

CHEN, Y, AWASTHI, A. K., WEI, F., TAN, Q., LI, J. Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. *Science of the Total Environment*. **Science of The Total Environment**, v. 752, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141772

CHEN, G.; FENG, Q.; WANG, J. (a). Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risksto humans. **Science of The Total Environment**, v. 703, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135504> >. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135504

CHEN, X; YAN, N. A.. (b). brief overview of renewable plastics. **Materials Today Sustainability**, 2020, v. 7-8, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100031>>. doi: 10.1016/j.mtsust.2019.100031

CONTI, I.; SIMIONI, C.; VARANO, G.; BRENNAN, C.; COSTANZI, E.; NERI, L. M. Legislation to limit the environmental plastic and microplastic pollution and their influence on human exposure.

Environmental Pollution, v. 288, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117708>>. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117708

DU, H.; XIE, Y.; WANG, J. Microplastic degradation methods and corresponding degradation mechanism: Research status and future perspectives. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126377>>. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126377

ENFRIN, M.; DUMÉE, L. E.; LEE, J. Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. **Water Research**, v. 161, p. 621-638, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.049>>. doi: 10.1016/j.watres.2019.06.049

EUROPEAN BIOPLASTICS. **What are bioplastics? Material types, terminology, and labels** – An introduction, 2018.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics market data 2019: Global production capacities of bioplastics 2019-2024**. 2019.

FOJT, J.; DAVID, J.; PRIKRY, R.; REZÁCOVÁ, V.; KUCERIK, J. A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil. **Science of The Total Environment**, v. 745, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140975>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140975

GALLO, F.; FOSSI, C.; WEBER, R.; SANTILLO, D.; SOUSA, J.; INGRAM, I.; NADAL, A.; ROMANO, D. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. **Environmental Sciences Europe**, v. 30, n. 13, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s12302-018-0139-0>>. doi: 10.1186/s12302-018-0139

GOLWALA, H.; ZHANG, X.; MDISKANDER, S.; SMITH, A. L. Solid waste: An overlooked source of microplastics to the environment. **Science of The Total Environment**, v. 769, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144581>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144581

GUO, X.; WANG, J. The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 142, p. 1-14, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.019>>. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.019

HUANG, D.; TAO, J.; CHENG, M.; DENG, R.; CHE, S.; YIAN, L.; LI, R. Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 407, 2021. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124399>>. doi:
10.1016/j.jhazmat.2020.124399

JI, X.; MA, Y.; ZENG, G.; XU, X.; MEI, K.; WANG, Z.; CHEN, Z.; DAHLGREN, R.; ZHANG, M.; SHANGA, X. Transport and fate of microplastics from riverine sediment dredge piles: Implications for disposal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 404, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124132>. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124132

KABIR, E.; KAUR, R.; LEE, J.; KIM, K. H.; KWON, E. E. Prospects of biopolymer technology as an alternative option for nondegradable plastics and sustainable management of plastic wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120536> 0959-6526>. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120536 0959-6526

LEAL FILHO, W.; SALVIA, A. L.; BONOLI, A.; SAARI, U. A.; VORONOVA, V.; KLOGA, M.; KUMBHAR, S. S.; OLSZEWSKI, K.; QUEVEDO, D. M. BARBIR, J.. An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe. **Science of The Total Environment**, v. 755, n. 1, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142732>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142732

LI, Z.; WEI, R.; GAO, M.; REN, Y.; YU, B.; NIE, K.; XU, K.; LIU, L. Biodegradation of low-density polyethylene by *Microbulbifer hydrolyticus* IRE-31. **Journal of Environmental Management**, v. 263, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110402>>. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110402

LIAO, J.; CHEN, Q. Biodegradable plastics in the air and soil environment: Low degradation rate and high microplastics formation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126329>>. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126329

LIWARSKA-BIZUKOJC, E. Effect of (bio)plastics on soil environment: A review. **Science of The Total Environment**, v. 795, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148889>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148889

MATO GROSSO. **Projeto de Lei nº 1017/2020. Projeto de Lei nº 1017/2020**, que dispõe acerca da proibição da utilização de copos descartáveis plásticos em eventos oficiais ou que pertençam ao calendário oficial do estado de Mato Grosso. Disponível em: <<https://www.al.mt.gov.br/proposicao/?tipoPropositura=&palavraChave=copos&numeroPropositura=&ano=&autor=paulo+ar+ar%C3%BAjo&dataPublicacaoInicio=&dataPublicacaoFim=&search=>>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2022.

MATO GROSSO DO SUL. **Lei nº 5.372/2019. Lei nº 5.372/2019**, que dispõe sobre a proibição de fornecimento de canudos confeccionados em material plástico, no âmbito do Estado de Mato Grosso do Sul. Disponível em:<

https://www.tjms.jus.br/legislacao/public/pdf-legislacoes/lei_n._5.372.pdf>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

MIRI, S.; SAINI, R.; DAVOODI, S. M.; PULICHARIA, R.; BRAR, S. K.; MAGDOULI, S. Biodegradation of microplastics: Better late than never. **Chemosphere**, v. 286, 2022, disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131670>>. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131670

MORESCO, V.; OLIVER, D. M.; WEIDMANN, M.; MATAALLANA-SURGET, S.; QUILLIAM, R. S. Survival of human enteric and respiratory viruses on plastics in soil, freshwater, and marine environments. **Environmental Research**, v. 199, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111367>>. doi: 10.1016/j.envres.2021.111367

PAÇO, A.; DUARTE, K.; COSTA, J. P.; SANTOS, P. S. M.; SANTOS, P. S. M.; PEREIRA, R.; PEREIRA, M. E.; FREITAS, A. C.; DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T. A. P. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. **Science of The Total Environment**, v. 586, p. 10-15, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.017>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.017

PLASTICSEUROPE. **Plastics – the Facts 2019**. 2019. Disponível em: <<https://plasticseurope.org/de/wissenshub/>> Acesso em 25 de junho de 2020.

RIO DE JANEIRO a. Assembleia Legislativa. **Projeto de Lei nº 3794/2018**. Projeto de Lei nº 3794/2018, que proíbe a utilização de canudos de plástico, exceto os biodegradáveis, em restaurantes, bares, quiosques, ambulantes, hotéis e similares no âmbito do estado do rio de janeiro. Disponível em: <<http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/scpro1519.nsf/18c1dd68f96be3e7832566ec0018d833/f992767fee4cf7a68325822d006158e6>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

RIO DE JANEIRO b. **Projeto de Lei nº 1098/2018**. Projeto de Lei nº 1098/2018, que proíbe a utilização e o fornecimento de copos plásticos descartáveis pelos restaurantes, bares, lanchonetes, barracas de praia, ambulantes e similares no município do rio de janeiro, e dá outras providências. Disponível em: <<http://mail.camara.rj.gov.br/APL/Legislativos/scpro1720.nsf/249cb321f17965260325775900523a42/6fe0f818e22957f783258369006e5058?OpenDocument&ExpandSection=-3>> Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

RIO DE JANEIRO c. **Lei Municipal 8006/2018**. Lei Municipal 8006/2018, que modifica a Lei nº 5.502, de 15 de julho de 2009, que dispõe sobre a substituição e recolhimento de sacolas plásticas em estabelecimentos comerciais localizados no estado do rio de janeiro, como forma de colocá-las à disposição do ciclo de reciclagem e proteção ao meio ambiente fluminense. Disponível em: <https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/594011207/lei-8006-18-rio-de-janeiro-rj>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

RIO DE JANEIRO. **Lei nº 8473/2019. Lei nº 8473/2019**, que adequa a legislação que dispõe sobre a substituição de sacolas plásticas não recicláveis e não retornáveis distribuídas pelos estabelecimentos comerciais localizados no estado do rio de janeiro, consolidando a redação. Disponível em: < <https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/737166284/lei-8473-19-rio-de-janeiro-rj#:~:text=1%C2%BA%20Esta%20Lei%20disp%C3%B5e%20sobre,prote%C3%A7%C3%A3o%20do%20meio%20ambiente%20fluminense..> Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

SÁNCHEZ, C. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation. **Biotechnology Advances**, v. 40, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107501>>. doi: 10.1016/j.biotechadv.2019.107501

SÃO PAULO. **Lei nº 17.261/2020. Lei nº 17.261/2020**, que Dispõe sobre a proibição de fornecimento de produtos de plástico de uso único nos locais que especifica. Disponível em: <https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-17261-de-13-de-janeiro-de-2020>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2022. Texto original.

SHABBIR, S.; FAHEEM, M.; ALI, N.; KERR, P. G.; WANG, L. F.; KUPPUSAMY, S.; LI, Y. Periphytic biofilm: An innovative approach for biodegradation of microplastics. **Science of the Total Environment**, v. 717, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137064>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137064

SHRUTI, V. C.; KUTRALAM-MUNIASAMY, G. Bioplastics: Missing link in the era of Microplastics. **Science of The Total Environment**, v. 697, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134139>>. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134139

STEINHORST, J.; BEYERL, K. First reduce and reuse, then recycle! Enabling consumers to tackle the plastic crisis – Qualitative expert interviews in Germany. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127782>>. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127782

UN, Y.; REN, X.; RENE, E. R.; WANG, Z.; ZHOU, L.; ZHANG, Z.; WANG, Q. The degradation performance of different microplastics and their effect on microbial community during composting process. **Bioresource Technology**, v. 332, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125133>>. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125133

- TIWARI, N, SANTHIYA, D.; SHARMA, J. G.. Microbial remediation of micro-nano plastics: Current knowledge and future trends. **Environmental Pollution**, v. 265, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115044>>. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115044
- WANG, Z.; XIN, X.; SHI, X.; ZHANG, Y. A polystyrene-degrading *Acinetobacter* bacterium isolated from the larvae of *Tribolium castaneum*. **Science of The Total Environment**, 726, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138564>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138564
- WEN, B., LIU, J. H.; ZHANG, Y.; ZHANG, H. R.; GAO, J. Z.; CHEN, Z. Z. Community structure and functional diversity of the plastisphere in aquaculture waters: Does plastic color matter? **Science of the Total Environment**, v. 740, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140082> 0048-9697/0>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140082 0048-9697/0
- YUAN, J.; MA, J.; SUN, Y.; ZHOU, T.; ZHAO, Y.; YU, F. Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. **Science of The Total Environment**, v. 715, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136968>>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136968
- ZHANG, K.; HAMIDIAN, A. J.; TUBIC, A.; ZHANG, Y.; FANG, J. K. H.; WU, C. LAM, P. K. S. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. **Environmental Pollution**, v. 274, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>>. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554
- ZOUNGRANAN, Y.; LYNDIA, E.; DOBI-BRICE, K. K.; TCHIRIOUA, E.; BAKARY, C.; YANNICK, D. D. Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104396>>. doi: 10.1016/j.jece.2020.104396