
Biodegradação e biorremediação de plásticos

Clenivaldo Pires da Silva, Esperança Edna Alexandre Chibite, Michele Harumi Motoyama

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-03-9.c8>

Resumo

Os plásticos atualmente são um grande problema ecológico em todo mundo, e o uso destes é amplo, que vai a objetos domésticos de uso geral, vestimentas, partes dos veículos automotivos, computadores, e quase todo tipo de embalagem de produtos de higiene e alimentação. Observando que a maioria dos plásticos ainda são derivados do petróleo, na qual é originária dos subprodutos da indústria, e que tem origem tanto do óleo bruto quanto do gás natural. Sendo que no refino, o petróleo é fracionado em diversos tipos de materiais, como nafta, gasolina, querosene, óleos lubrificantes etc. É da nafta que são extraídas as substâncias que vão compor os plásticos. Ou seja, os plásticos são formados por macromoléculas caracterizadas pela repetição múltipla de uma ou mais unidades químicas simples sendo unidas entre si por reações químicas chamadas de reações de polimerização. Por devido à falta de manejo adequado destes resíduos derivados de plásticos, os chamados microplásticos vêm se tornando os principais vilões do planeta. Já que os mesmos possuem de 1 a 5 mm de diâmetro, este vem sendo encontrado nos solos, rios, oceanos, passou a estar em nossa cadeia alimentar. O objetivo deste capítulo é revisar artigos mais recentes do uso de microrganismos na biodegradação e biorremediação de plásticos nos ambientes naturais.

Palavras chaves: Micro-plásticos, Microorganismo, Ambientes Naturais.

Abstract

Plastics have been a huge ecological problem around the world. Their use is widespread, ranging from general purpose household utensils to clothing, vehicle parts and computers. Furthermore, they are also present in almost all types of packages for food and hygiene. The raw materials for almost all types of plastic are crude oil and natural gas. In the refining process the oil is broken down into several types of materials, such as naphtha, gasoline, kerosene, lubricating oils, etc. The plastics are made from the substances that are extracted from naphtha. More precisely, plastics are made of macromolecules, which are characterized by multiple repetition of one or more simple chemical units joined together by chemical reactions called polymerization reactions. Due to the lack of proper handling of the wastes derived from plastics, the so-called micro-plastics are turning into the main villains of the planet. These particles are about 1 to 5 mm in

diameter, and they have been found in soils, rivers, oceans, and they became part of our food chain. The aim of this chapter is to present an analysis of the most recent research articles that were published on the use of microorganisms for the biodegradation and bioremediation of plastics in natural environments.

Key-words: Micro-plastics, Microorganism, Natural Environments.

1. Introdução

Atualmente, os plásticos vêm causando diversos problemas ambientais em diversos países, principalmente o Brasil. Para The World Wide Fund - Fundo Mundial para a Natureza (WWF, 2019), o país é o quarto maior que gera lixo plástico ficando atrás somente dos EUA, China e Índia. O estudo aponta que mais de 104 milhões de toneladas de plástico irão poluir nossos ecossistemas até 2030. Nem todos os plásticos são derivados do petróleo, alguns são de fontes renováveis como a cana-de-açúcar ou o milho, mas a grande maioria é originária dos subprodutos da indústria do petróleo, e tem origem tanto do óleo bruto quanto do gás natural.

Os plásticos passaram a estar presente nos utensílios domésticos, em equipamentos e brinquedos, na construção civil e nos transportes, em nossas roupas e em quase todo tipo de embalagem que acomoda produtos de higiene e alimentação (FAGUNDES; MISSIO, 2019). No entanto, os plásticos tornaram-se grande problema ecológico, devido às suas propriedades químicas, pelo seu uso irrestrito e pelo manejo inadequado de seus resíduos. Sendo encontrado nos solos, rios, oceanos, passou a estar em nossa cadeia alimentar. Os micros plásticos vêm se tornando os principais vilões do planeta, pois estão em toda parte sem serem vistos, pois possuem de 1 a 5 mm de diâmetro. Já foram encontrados em ambientes terrestres, marinhos e reservas de água doce, mas também na água de torneira e engarrafada, no sal marinho, no mel, na cerveja, nos frutos do mar e em peixes consumidos pelo homem (CHAVES, 2019).

Existem diversos programas de reciclagem, mas nem sempre é economicamente viável, então torna-se necessário estudar os vários métodos de biodegradação de plásticos (MUTHUKUMAR; VEERAPPAPILLAI, 2021). Esta revisão teve como objetivo compilar artigos recentes do uso de microrganismos na biodegradação e biorremediação de plásticos nos ambientes naturais. Foi realizado um levantamento nas bases de dados (PUBMED, Science

Direct e Google Scholar), no período de 2018 a 2021, usando restrições ou combinações de termos: '**Plásticos**', '**Biorremediação**', '**Biodegradação**', '**polímeros**', '**polietileno**', '**poliuretano**', '**polipropileno** em inglês e português. Plataformas de conteúdos científicos, como o Portal de Periódicos **CAPES** e buscas diretas a notícias e sites relacionados com o tema também foram utilizadas. Os termos foram agrupados em 3 grupos: Plástico: História, Composição e os Tipos; Plásticos e o meio ambiente: Entendendo o problema; A Biodegradação/Biorremediação por Fungos e Bactérias.

2. Plásticos: História, Composição e os Tipos

A palavra plástico deriva do grego *plastikos*, que significa algo possível de ser moldado em diferentes formas (GOEL, NITHIN, 2017). Deste modo, a história conta que o plástico vem da contribuição de vários inventores, e cada um deles obteve avanços significativos. O destaque é para o químico belga, Leo Baekeland (1863-1944), que foi o primeiro a criar um plástico totalmente sintético e comercialmente viável, chamado de Bakelite (ou baquelite).

Deste modo, surge a era dos plásticos modernos, sendo a maioria sintética e obtida a partir de recursos não renováveis, como petróleo bruto, carvão e gás natural (GOEL; NITHIN, 2017; AUGUSTA et al., 1993). No refino, o petróleo é fracionado em diversos tipos de materiais, como nafta, gasolina, querosene, óleos lubrificantes etc. É da nafta que são extraídas as substâncias que vão compor os plásticos, que são: propeno, eteno, butadieno, benzeno, xileno e tolueno. Em suma, pode-se dizer que os plásticos são formados por macromoléculas caracterizadas pela repetição múltipla de uma ou mais unidades químicas simples sendo unidas entre si por reações químicas chamadas de reações de polimerização (CRUZ; SOUZA; FREITAS, 2020). Ou seja, os plásticos são compostos majoritariamente de polímeros que podem ser orgânicos ou sintéticos, em estado sólido e modelados por ação do calor ou da pressão (DINIZ SILVA et al., 2021).

Segundo a ONG Recicloteca (2020), os plásticos são divididos em grupos de acordo com as suas características de fusão ou derretimento (Tabela 1). O primeiro grupo é dos termoplásticos que amolecem ao serem aquecidos, podendo ser moldados, e quando resfriados ficam sólidos e tomam uma nova forma. Esse processo pode ser repetido várias vezes. Já os plásticos termofixos

(ou termorrígidos), mesmo que sejam aquecidos, não irão amolecer, e assim não poderá ser moldado novamente, devido à formação de estrutura molecular interligada. Portanto, não poderá ser reciclado.

Tabela 1. Tipos de plásticos e suas aplicações.

| TIPOS | APLICAÇÕES |
|---|---|
| TERMOFIXOS OU TERMORRÍGIDOS | |
| PU – Poliuretanos EVA–Poliacetato de Etileno Vinil | Solados de calçados, interruptores, peças industriais elétricas, peças para banheiro, pratos, travessas, cinzeiros, telefones etc. |
| TERMOPLÁSTICOS mais de 80% dos produtos | |
| PET-polietileno tereftalado | Corresponde por Frascos de refrigerantes, produtos farmacêuticos, produtos de limpeza, mantas de impermeabilização e fibras têxteis etc. |
| PEAD–polietileno de alta densidade | Embalagens para cosméticos, frascos de produtos químicos e de limpeza, tubos para líquidos e gás, tanques de combustível para veículos automotivos etc. |
| V ou PVC–policloreto de vinila | Frascos de água mineral, tubos e conexões de encanamento, calçados, encapamentos de cabos elétricos, equipamentos médico-cirúrgicos, esquadrias e revestimentos, etc. |
| PEBD–polietileno de baixa densidade | Embalagens de alimentos, sacos industriais, sacos para lixo, lonas agrícolas, filmes flexíveis para embalagens e rótulos de brinquedos, etc; |
| PP–polipropileno | Embalagens de massas e biscoitos, potes de margarina, seringas descartáveis, equipamentos médico-cirúrgicos, fibras e fios têxteis, utilidades domésticas, autopeças (pára-choques de carro). |
| PS –poliestireno | Copos descartáveis, placas isolantes, aparelhos de som e tv, embalagens de alimentos, revestimento de geladeiras, material escolar. |
| Outros | Plásticos especiais e de engenharia, CDs, eletrodomésticos, corpos de computadores etc. |

Fonte: Recicloteca, 2020.

3. Plásticos e o Meio ambiente: Entendendo o problema

O plástico tem se tornado um dos assuntos mais comentados na sociedade atual tendo em vista que a produção de plástico aumentou consideravelmente nos últimos anos e vem sendo descartado incorretamente (BAIA et al, 2020). O lixo encontrado nos oceanos é composto por 80% de plástico ele está presente tanto nas águas superficiais, linhas costeiras e fundo marinho (MORALES-CASELLES et al., 2021). Este mesmo estudo destaca que dentre 10 resíduos (maiores de 3 cm) presentes nos oceanos, 8 eram algum tipo de plástico.

Os detritos plásticos que se acumulam nos oceanos representam uma séria ameaça à flora e fauna marinha (MUTHUKUMAR; VEERAPPAPILLAI, 2021). Um dos principais responsáveis é o PET (Politereftalato de etileno). O enorme uso do PET se deve à sua ampla diversidade de aplicações, que vai desde indústrias têxtil (multifilamento) até as indústrias de alimentos, principalmente pelas indústrias de refrigerantes e suco (PACHECO et al. 2021). A marca de refrigerante Coca-Cola tem sido considerada por uma auditoria internacional como a mais poluidora do mundo (Break Free From Plastic, <https://www.breakfreefromplastic.org/>). O descarte das garrafas PET é estimado em cerca de 4,7 bilhões de unidades por ano e o material acaba contaminando os rios e canais, indo para lixões ou espalhados por terrenos vazios (PACHECO et al., 2021).

4. Biodegradação e biorremediação por microrganismos

4.1. A Biodegradação

Quimicamente, os plásticos são polímeros de longas cadeias de hidrocarbonetos com alto peso molecular, derivados principalmente de produtos petroquímicos (HEES et al, 2019). Com o atual cenário de produção e uso global de plástico aliado à sua resistência à degradação no meio ambiente e aos problemas de poluição causados por estes, várias pesquisas buscam soluções ecologicamente sustentáveis, como a biodegradação, para a mitigação deste grande mal ambiental.

A biodegradação é definida como a capacidade de uma ou mais culturas de microrganismos para utilizar o polímero sintético como única fonte de carbono (SIVAN, 2011). A degradação de plástico é uma alteração física ou química que

ocorre como resultado de fatores abióticos (luz, calor, umidade e condições químicas) e de fatores bióticos (atividade biológica) (TOKIWA, et al, 2009). Devido a sua composição química e peso molecular, a degradação do plástico pode levar milhões de anos.

Para Alshehrei, (2017), a capacidade de degradar os polímeros por microrganismos diminui com o aumento do peso molecular destes pois, há diminuição da solubilidade do polímero, o que o torna desfavorável para o ataque microbiano, visto que este precisa ser assimilado na membrana da célula bacteriana e decomposto por enzimas celulares.

A degradação biológica envolve a atividade de microrganismos como bactérias e fungos. Geralmente, os plásticos podem ser biodegradados aerobicamente na natureza e no solo bem como anaerobicamente em sedimentos e aterros sanitários. Neste processo, são produzidos, aerobicamente, subprodutos como dióxido de carbono e água e outras substâncias orgânicas menores a partir da quebra de moléculas orgânicas na presença de oxigênio e anaerobicamente, dióxido de carbono, água e metano (ISHIGAKI et al, 2004). No processo anaeróbico os microrganismos usam como aceptor de elétrons nitrato, sulfato, ferro, manganês e dióxido de carbono (ALSHEHREI, 2017).

Durante a biodegradação, como os polímeros são constituídos por cadeias longas e são insolúveis em água, os microrganismos são incapazes de transportá-los diretamente pelas membranas externas das suas células. Os microrganismos desenvolveram estratégias que consistem em excretam enzimas extracelulares (exoenzimas) que despolimerizam os polímeros extracelulares produzindo cadeias com moléculas menores como oligômeros, dímeros e monômeros que podem passar pela membrana semipermeável da célula bacteriana (Figura 01).

A biodegradação aeróbica, também conhecida como respiração aeróbica, participa do microrganismo aeróbio e neste processo, os microrganismos, usam como aceptor final de elétrons o oxigênio para quebrar moléculas orgânicas maiores em moléculas menores.

Os principais polímeros produzidos e com importância econômica (Figura 02) são polieteno (PE), polipropileno (PP), poliuretano (PUR), Poliamida (PA), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS), e polivinil (PVC) (DANSO, et al

2019). No entanto, nem todos os polímeros exibem o mesmo padrão de degradabilidade.

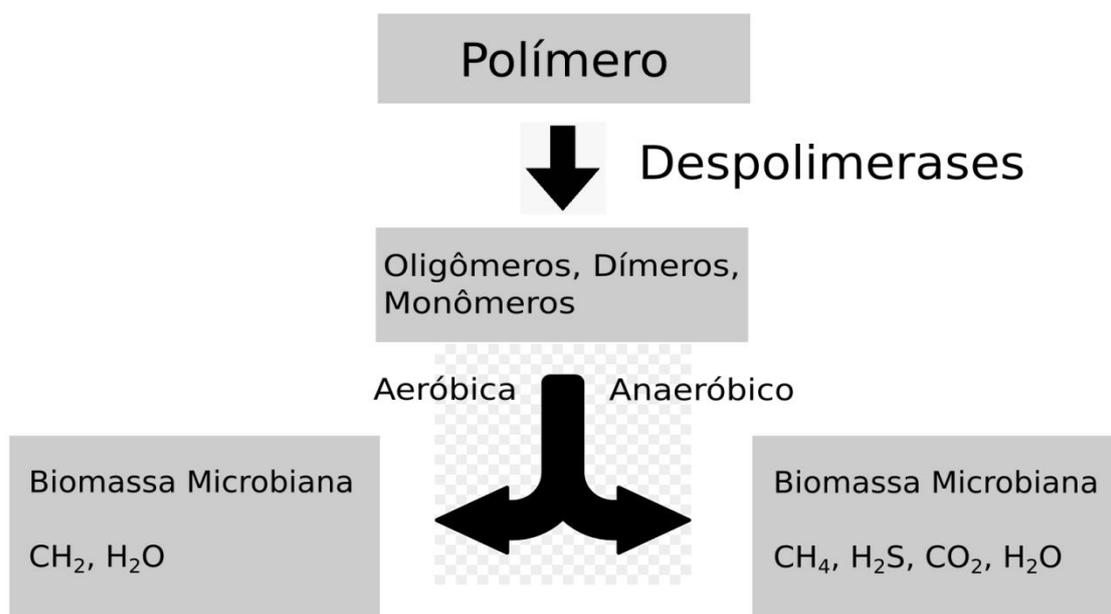


Figura 1. Caminhos que indicam reações durante a degradação de um polímero. Fonte: Adaptação do autor Alshehrei (2017).

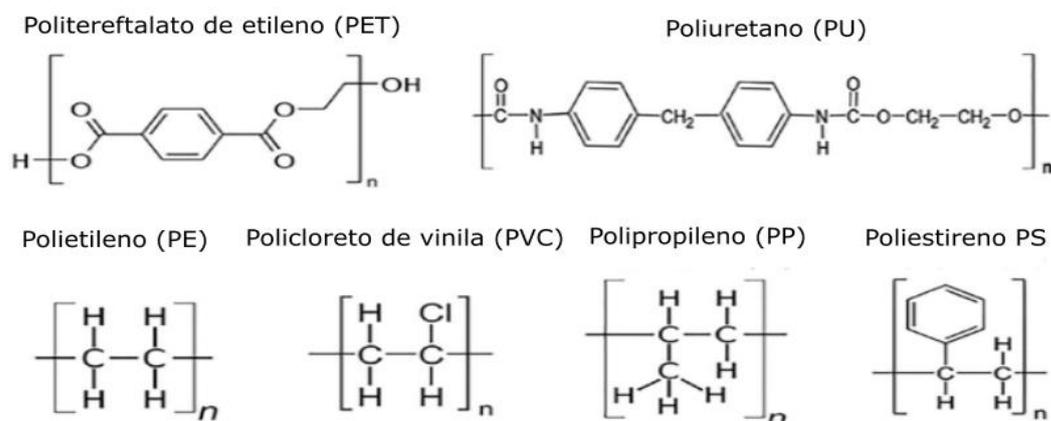


Figura 2. Estrutura Química dos Polímeros. Fonte: Mohanan et al, 2020.

4.1.1. Politereftalato de etileno (PET)

É um dos principais petroplásticos sintéticos produzido em grande escala com produção anual de 56 milhões de toneladas em 2013 (NEUFELD et al.,

2016). PET é constituído por poliésteres aromáticos com altas temperaturas de transição vítrea (T_g) de aproximadamente 75-80 °C no ar. É usado para uma variedade de aplicações como na produção de garrafas PET, películas PET e fibras na indústria têxtil. Poucas bactérias e fungos foram descritos com capacidade de degradar este polímero. Tem sido citado principalmente o filo Actinobacteria, a maioria Gram – positiva, gêneros *Thermobifida* e *Thermomonospora* (DANSO, 2019).

Quanto aos mecanismos de degradação de PET, Yoshida et al. (2016), demonstraram que a enzima PETase converte o PET em mono (2-h hidroxietil) ácido tereftálico (MHET), com quantidades mínimas de ácido tereftálico ácido (TPA) e bis (2-hidroxietil) -TPA como produtos secundários. Outra enzima, MHETase (digestão por MHET enzima), hidrolisa ainda mais o MHET em dois monômeros, TPA e EG (Figura3).

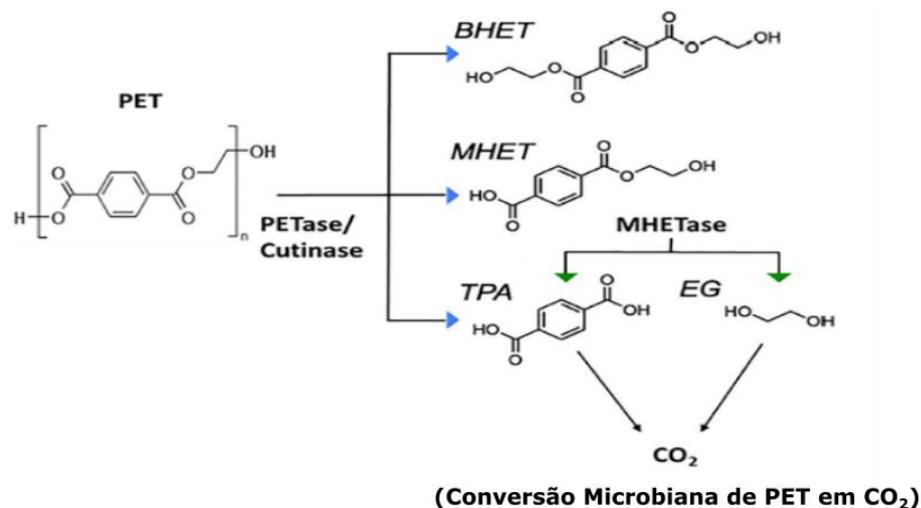


Figura 3. Biodegradação de PET. Fonte: Mohanan et al, 2020.

4.1.2. Polipropileno (PP)

É um dos polímeros mais usados entre os polímeros sintéticos, na produção de molduras de plástico, pastas fixas, suturas não absorvíveis, fraldas, entre outros. Pode ser degradado pela exposição à radiação ultravioleta da luz solar, e pode ser oxidado em altas temperaturas. Algumas pesquisas descreveram a capacidade de certas espécies de fungos como *Aspergillus niger*

e bactérias como *Pseudomonas* e *Vibrio* com poder biodegradável para este polímero (ALSHEHREI, 2017).

4.1.3. Polieteno (PE)

O polietileno (PE) é um polímero estável, constituído por cadeia longa de etileno e é produzido como polietileno de alta densidade. Geralmente tem uma estrutura semicristalino e é extremamente resistente à biodegradação, no entanto, foi reportado que oligômeros de PE de baixo peso molecular (MW = 600-800) podem ser parcialmente degradados por *Actinobacter* spp. após a dispersão, enquanto o PE de alto peso molecular não pode ser degradado.

Alguns Actinomicetos como *Streptomyces* e fungos como *Aspergillus* e *Penicillium* têm sido usados em pesquisas para facilitar esse processo (ALSHEHREI, 2017). Após algum tratamento é possível tornar as cadeias de carbono do polímero sensíveis à biodegradação. São produzidos anualmente mais de 100 milhões de toneladas de PE globalmente e geralmente, este polímero é usado na indústria de embalagens como um dos principais materiais de embalagem (PLASTICS EUROPE, 2018).

4.1.4. Poliestireno (PS)

É um polímero sintético, hidrofóbico constituído por monômeros de estireno. Amplamente usado na indústria de embalagens e na produção de artigos de uso diário como CD, talheres, placas de Petri, etc (DANSO, 2019). É um polímero reciclável, mas não biodegradável embora algumas pesquisas tenham reportado que cepa de *Actinomicetos* tenham sido capazes de degradar este polímero, mas com um poder muito baixo (ALSHEHREI, 2017). Embora nenhuma bactéria seja conhecida por degradar o polímero, um número maior de gêneros bacterianos que são capazes de metabolizar o monômero estireno como fonte única de carbono são conhecidos (DANSO, 2019).

4.1.5. Cloreto de polivinila (PVC)

O PVC é o terceiro polímero sintético mais produzido, após o PE e PP (DANSO, 2019). É um plástico forte que resiste a diferentes fatores, como abrasão e produtos químicos, e possui uma baixa absorção de umidade (ALSHEHREI, 2017). E pode ser encontrado em sua forma rígida ou plastificada.

Contudo, a poluição causada por este polímero é muito séria. Muitos estudos relataram sobre a degradação térmica e fotodegradação do PVC mas a biodegradação do PVC foi tentada em muitas pesquisas contudo poucos microrganismos demonstraram essa capacidade (MOHANAN, 2020).

4.2. Biorremediação

A biorremediação é uma técnica utilizada para tratar os contaminantes e reduzir o impacto da poluição, seja no solo, na água ou no ar. É um processo que utiliza organismos vivos para degradar ou reduzir diversos poluentes seja orgânico ou inorgânico, os organismos podem ser microrganismos como bactérias e fungos, plantas, ou de substâncias obtidas a partir deles. Dessa forma, a biorremediação é uma ótima técnica para esta situação em que o meio ambiente está vivendo (BHAT, 2019).

Segundo Idowu (2021) existem determinadas condições que favorecem a biorremediação, como: a capacidade do microrganismo sobreviver e apresentar bioatividade até mesmo nas condições de poluição; habilidade do organismo utilizar o poluente como substrato; o sistema contaminante e enzima precisa estar próximo, sendo no interior ou no exterior da célula; o microrganismos deve ter enzimas eficazes para a biorremediação; é necessário condições ambientais favoráveis adequadas para aumentar o potencial da biorremediação.

A biorremediação pode ser realizada tanto no local da contaminação como em outro lugar, dessa forma dependendo da localização do tratamento do resíduo essa técnica pode ser classificada em biorremediação in situ ou em biorremediação ex situ. O in situ é o tratamento feito no local da contaminação ou poluição, já o ex situ é retirado o material contaminante do local de origem e é tratado em um lugar longe do sítio de contaminação (IDOWU et al., 2021).

4.2.1. Biorremediação por bactéria

De acordo com Idowu (2021) os microrganismos têm a capacidade de quebrar as cadeias moleculares em polímeros como o PET por meio da degradação. Na biorremediação um dos processos bastante utilizado é a degradação, mas isso não quer dizer que a biodegradação pode resultar em uma biorremediação total. Durante a biodegradação a quebra das cadeias

moleculares leva a diminuição do tamanho total das macromoléculas que formam o polímero (IDOWU et al., 2021; PRAKASH et al., 2013).

Em 2016 foi descoberto a bactéria *Ideonella sakaiensis* 201-F6 que degrada o poli (tereftalato de etileno) (PET), usando o plástico como fonte de energia e fonte de carbono, estes produzem 2 enzimas capazes de hidrolisar o PET (YOSHIDA et al., 2016) (Figura 4). 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-hidroxi) tereftalato (MHET) e a segunda enzima MHETase que hidroliza MHET em tereftalato e etilenoglicol (PALM et al., 2019).

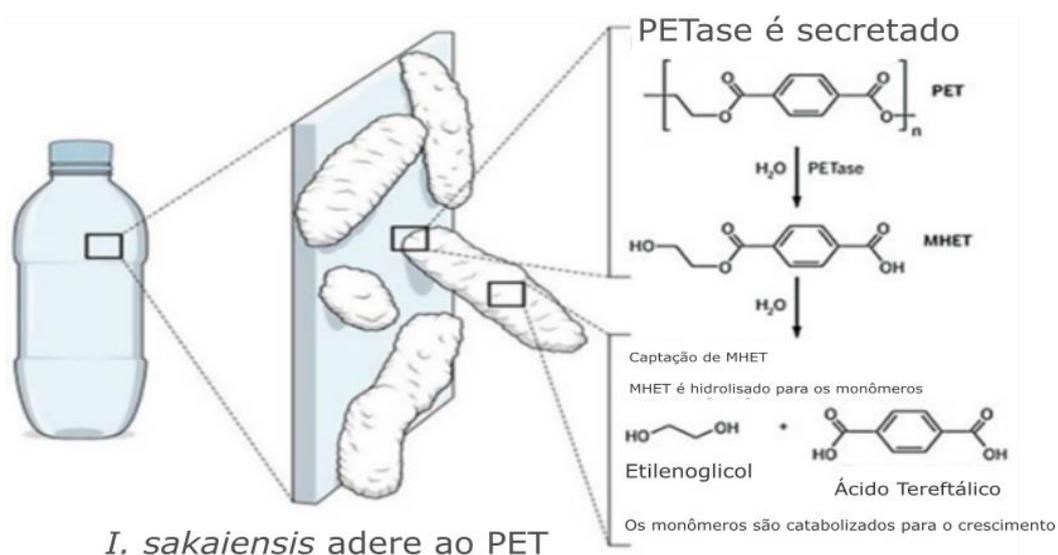


Figura 4. Plástico como fonte de energia e fonte de carbono. Fonte: CHAN, 2016.

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) (IDOWU et al., 2021).

4.2.2. Biorremediação por fungos

Um artigo publicado em 2017 evidenciou o fungo *Zalerion maritimum* com alto potencial de biorremediação de polietileno microplástico (PE), onde foi

constatado que esse organismo cresce na presença de microplásticos através da avaliação do crescimento dos fungos no meio com microplástico. Foi constatado que esse organismo cresce na presença de partículas microplásticas, com base nas modificações observadas como, variações de massa, bem como nos resultados de FTIR (*Espectroscopia* no infravermelho) e Ressonância Magnética Nuclear. 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 (PAÇO et al., 2017).

5. Considerações finais

Os plásticos, encontram-se intimamente ligados ao dia-a-dia da sociedade e devido ao seu alto poder de poluição estes devem ser descartados de forma segura e em locais adequados. Os microrganismos têm o potencial natural de usar produtos petrolíferos, incluindo plásticos como suas fontes de carbono e energia, ajudando assim a reduzir a ameaça de poluição do plástico no meio ambiente e, subsequentemente, mitigando as mudanças climáticas. O potencial natural dos microrganismos pode ser projetado e otimizado por meio da biotecnologia como uma forma sustentável de “limpar” a poluição do plástico que ameaça a vida na terra, na água e no ar.

6. Referências

AUGUSTA, J., JOACHIM, R., MILLER, A. AND WIDDECKE, H. A rapid evaluation plate test for the biodegradability of plastics. **Applied Microbiology and Biotechnology.**, n. 39, p. 673–678, 1993. Doi: 10.1007/BF00205073.

BAIA, B.G.F.; FONTANEZ, C.F.; SILVA, G.G.; ALMEIDA, L. D.; ASSIS, M. D.; CINEZI, G.R.; DIAS, L. Plásticos e seus impactos ambientais. **International Studies on Law & Education**, n. 3, p. 167-176, 2020. Disponível em: <http://www.hottopos.com/isle34_35/167-176JVernePlasticosF.pdf>. Acesso em: 03 de nov. 2021.

BHATT, P. Smart bioremediation technologies: Microbial enzymes. **Academic Press**, ed. 1, p. 408, 2019.

CHAVES, L.R. A ameaça dos microplásticos: Fragmentos de plásticos com dimensões micrométricas estão em todos os lugares e impõem desafios ao seu controle. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/a-ameaca-dos-microplasticos/>>. Acesso em: 03 de nov. 2021.

DINIZ SILVA, C.R.L.; CAMPOS, G.S.; MANSUR, L.D.C. P.; MATTIELLO, N.A. Inovações tecnológicas que buscam reduzir o problema gerado pelo lixo plástico. *Anais Do Congresso Nacional Universidade, EAD E Software Livre*, 2(12). Disponível: <<https://nasnuv.com/ojs2/index.php/UEADSL/article/view/594>>. Acesso em: 03 de nov. 2021.

FATIMAH,. A Biodegradation of Synthetic and Natural Plastic by Microorganisms. **Journal of Applied & Environmental Microbiology**, v. 5, n. 1, p. 8-19, 2017. DOI: 10.12691/jaem-5-1-2.

GOEL, S., NITHIN, B. Degradation of Plastics. *Advances in Solid and Hazardous Waste Management Springer*, p. 235-247. 2017. Doi: 10.1007/978-3-319-57076-1_11.

HEES,T.; ZHONG, F.; STURZEL,M. MÜLHAUPT. Tailoring hydrocarbon polymers and all-hydrocarbon composites for circular economy. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 40, 2019. Doi: 10.1002/marc.201800608.

KRUEGER, M.C.; HARMS, H.; AND SCHLOSSER, D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. **Applied Microbiology and. Biotechnology**, n. 99, p. 8857–8874, 2015. Doi: 10.1007/s00253-015-6879-4.

KRZMARZICK, M. J. ; TAYLOR, D. K.; FU, XIANG, AND MCCUTCHAN, A. L. Diversity and Niche of Archaea in Bioremediation. **Hindawi**, v. 2018, p. 17, 2018. DOI: 10.1155/2018/3194108.

IDOWU, S. A., AROTUPIN, D. J., AND OLADEJO, S. O. Plastic Pollution and Climate Change: Role of Bioremediation as a Tool to Achieving Sustainability. **African Handbook of Climate Change Adaptation**, 2021. Doi: 10.1007/978-3-030-45106-6_102.

MATIAS, T.P.; IMPERADOR, A.M. Visão geral das políticas de conservação do mar no Brasil e os impactos sociais e ambientais no contexto da pandemia COVID-19. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvement* , [S. l.] , v. 10, n. 12, p. e451101220786, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20786>>. Acesso em: 22 nov. 2021.

MOHANAN, N.; MONTAZER, Z.; SHARMA, P.K.; LEVIN, D.B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. **Frontiers of Microbiology**, 2020. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.

MORALES-CASELLES, C.; VIEJO, J.; MARTÍ, E.; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, D.; PRAGNELL-RAASCH, H.; GONZÁLEZ-GORDILLO, I.; MONTERO, E.; ARROYO, GONZALO M.; HANKE, G.; SALVO, V.S.; BASURKO, O.C. ; MALLOS, N.; LEBRETON, L.; ECHEVARRÍA, F.; VAN EMMERIK, T.; DUARTE, C.M.; GÁLVEZ, J.A.; VAN SEBILLE, E.; GALGANI, F.; GARCÍA, C.M.; ROSS, P.S.; BARTUAL, A.; IOAKEIMIDIS, C.; MARKALAIN, G.; ISOBE, A.; CÓZAR, A. An inshore–offshore sorting system revealed from global classification of ocean

litter. **Nature Sustainability**, v. 4(6), p. 484-493, 2021. Doi: 10.1038/s41893-021-00720-8.

MUTHUKUMAR, A.; VEERAPPAPILLAI, S. Biodegradation of Plastics: A Brief Review. **International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research**, Vol. 31(2), n. 36, pg. 204-209, March/April 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282050386_Biodegradation_of_plastics_-_A_brief_review>. Acesso em: 03 de nov. 2021.

PACHECO, J.A.L.; FARIAS, R.M.; PACHECO, G.F.; PACHECO, A.P.L. Termo-oxidação acelerada em garrafas pet descartadas no meio ambiente. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.2, p. 18957-11972, feb. 2021. Doi:10.34117/bjdv7n2-509.

PAÇO, A.; DUARTE, K.; DA COSTA, J.P.; 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. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.017>.

PALM G.J.; REISKY, L.; BÖTTCHER, D.; MÜLLER, H.; MICHELS, E.A.P.; WALCZAK, M.C.; BERNDT, L.; WEISS, M.S.; BORNSCHEUER, U.T.; WEBER, G. Structure of the plastic-degrading *Ideonella sakaiensis* MHEase bound to a substrate. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2019. Doi: 10.1038/s41467-019-09326-3.

PLASTICS EUROPE. Plastics - the facts 2018: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Plastics - Europe, Brussels, Belgium. 2018. Disponível em: <<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2018-Plastics-the-facts.pdf>>. Acesso em: 29 de nov. 2021.

PRAKASH, D.; GABANI, P. CHANDEL, A. K.; RONEN, Z.; SINGH, O.V. Bioremediation: a genuine technology to remediate radionuclides from the environment. **Microbial Biotechnology**, v. 6, n. 4, p. 349-360, 2013. Doi: 10.1111/1751-7915.12059.

RECICLOTECA. Plástico: história, composição, tipos, produção e reciclagem. 2020. Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/plastico/>>. Acesso em: 06 de nov. 2021.

RAAMAN, N.; RAJITHA, N.; JAYSHREE, A.; JEGADEESH, R. Biodegradation of plastic by *Aspergillus* spp. isolated from polythene polluted sites around Chennai. **Journal of Academia and Industrial Research**, v. 1: p. 313-316. Doi: 10.3722-3742.

SIVAN, A. New perspectives in plastic biodegradation. **Environmental biotechnology**, n. 22, p. 422-426. Doi: 10.1016/j.copbio.2011.01.013.

SOBREIRA, G.A. O direito internacional no combate à poluição dos mares por plástico: responsabilidade estatal, instrumentos jurídicos viáveis para controle de

condutas e possíveis sanções para um Brasil poluidor do meio ambiente marinho. 2019. 67 f. Monografia (Graduação em Direito) - Faculdade de Direito, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

WWF. Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. 2019. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>>. Acesso em: 03 de nov. 2021.

YOSHIDA, S.; HIRAGA, K.; TAKEHARA, T.; ODA, K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). **Science**, n. 351, p. 1196–1199, 2016. Doi: 10.1126/science.aad6359.

Autores

Clenivaldo Pires da Silva, Esperança Edna Alexandre, Michele Harumi Motoyama.

Programa de Pós Graduação em Biotecnologia Ambiental, Universidade Estadual de Maringá. E-mails: pg54403@uem.br, clenivaldo2015@gmail.com, pg54952@uem.br, edchibite@gmail.com, pg402540@uem.br, micheleharumi@hotmail.com.