



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



LEONARDO MASIN MESQUITA

**BIORREMEDIAÇÃO DE XENOBIÓTICOS PROVENIENTES DOS PLÁSTICOS
ATRAVÉS DE MICRORGANISMOS**

UBERLÂNDIA

2023

LEONARDO MASIN MESQUITA

**BIORREMEDIAÇÃO DE XENOBIÓTICOS PROVENIENTES DOS
PLÁSTICOS ATRAVÉS DE MICRORGANISMOS**

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do curso de Engenharia Química.

Professora: Prof. Dra. Juliana de Souza Ferreira

UBERLÂNDIA

2023

LEONARDO MASIN MESQUITA

**BIORREMEDIAÇÃO DE XENOBIÓTICOS PROVENIENTES DOS
PLÁSTICOS ATRAVÉS DE MICRORGANISMOS**

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do curso de Engenharia Química.

Uberlândia, 30 de Janeiro de 2023.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Juliana de Souza Pereira – Orientadora (FEQ - UFU)

Profa. Dra. Thamayne Valadares de Oliveira – Docente (FEQ - UFU)

Warlen Agnelo Dias – Mestrando (PPGEQ - FEQ - UFU)

RESUMO

No Mundo, estima-se que a produção de termoplásticos desde 1950 ultrapassou 9 bilhões de toneladas de plásticos, acarretando em sérios problemas socioambientais, devido ao descarte incorreto. Devido às características desses resíduos sintéticos, quando despejados em aterros sanitários, oceanos, lagos e rios, comprometem a fauna e a flora devido a substâncias conhecidas como xenobióticas de difícil degradação. Em razão desses compostos os polímeros acabam se acumulando no meio ambiente por serem componentes sintéticos e por possuírem aditivos que podem alterar sua estrutura podendo tornar esses termoplásticos recalcitrantes. Uma estratégia utilizada para minimizar os prejuízos ambientais é a reciclagem que divide em três tipos, a reciclagem mecânica, química e energética. Sendo a reciclagem mecânica a mais utilizada por ser a mais econômica e por ter uma certa eficiência, a quantidade reciclada está longe de equiparar com a produção de polímeros termoplásticos novos. Diante do exposto, o desenvolvimento deste estudo teve por objetivo realizar uma revisão de literatura acerca de rotas alternativas para o tratamento desses resíduos visando o seu tratamento por biorremediação por microrganismos com potencial de degradação destes compostos. Com o desenvolvimento desse trabalho, notou-se que os fungos são agentes em potencial para o tratamento devido a sua característica de degradação alta e também por produção de biossurfactantes que auxiliam à quebra dos xenobióticos presentes nos polímeros, além da sua utilização como fonte de carbono, contribuindo para a diminuição desses compostos no meio ambiente.

Palavras-chave: Biorremediação, Xenobióticos; Microrganismos, Termoplásticos, Plastificantes.

ABSTRACT

Worldwide, it is estimated that the production of thermoplastics since 1950 has exceeded 9 billion tons of plastics, resulting in serious socio-environmental problems due to incorrect disposal. Due to the characteristics of these synthetic residues, when dumped in landfills, oceans, lakes and rivers, they compromise the fauna and flora due to substances known as xenobiotics that are difficult to degrade. Because of these compounds, polymers end up accumulating in the environment because they are synthetic components and because they have additives that can alter their structure and may make these thermoplastics recalcitrant. A strategy used to minimize environmental damage is recycling, which is divided into three types: mechanical, chemical and energetic. Since mechanical recycling is the most used because it is the most economical and because it has a certain efficiency, the amount recycled is far from equating with the production of new thermoplastic polymers. Given the above, the development of this study aimed to carry out a literature review about alternative routes for the treatment of these wastes, aiming at their treatment by bioremediation by microorganisms with the potential to degrade these compounds. With the development of this work, it was noted that fungi are potential agents for treatment due to their high degradation characteristic and also for the production of biosurfactants that help to break down the xenobiotics present in polymers, in addition to their use as a source of carbon, happy for the decrease of these compounds in the environment.

Keywords: Bioremediation, Xenobiotics; microorganisms, thermoplastic, plasticizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Destino dos polímeros.....	6
Figura 2 – Estrutura geral dos ftalatos.....	9
Figura 3 – Fatores que auxiliam a biodegradação dos polímeros.....	11
Figura 4 – Simbologia de Identificação de materiais poliméricos segundo a norma ABNT NBR 13230.....	13
Figura 5 – Exemplos de despolimerização.....	15
Figura 6 – Microrganismos identificados através do microscópio AXIOSTAR/ZEISS (40X), Fungos <i>Mucor spp</i> e leveduras do gênero <i>Rhodotorula spp</i>	17
Figura 7 – Biorreator com unidades em centímetros.....	18
Figura 8 – Fluxograma do processo proposto de tratamento dos plásticos utilizando fatores bióticos e abióticos.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aditivos responsáveis pela alteração das propriedades físicos - químicos e suas respectivas funções.....	7
---	---

LISTA DE SIGLAS

DDT – Diclorodifeniltricloetano

DEPH – Di-(2-etilhexil) ftalato

DINP – Diisononil ftalato

DIPP – Diizopentil ftalato

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

PE – Polietileno

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PU – Poliuretano

PET– Poli (tereftalato de etileno)

PVC – Poli (cloreto de vinila)

UV – Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	3
2.1	Objetivos Gerais.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Histórico e Definição.....	4
3.2	Classificação dos Polímeros Sintéticos.....	5
3.2.1	Desvantagens do Uso de Polímeros Sintéticos.....	5
3.2.2	Aditivos Utilizados nos Plásticos.....	7
3.2.3	Plastificantes Ftalatos.....	8
3.3	Biodegradação Microbiana.....	9
3.3.1	Importância da Biodegradação dos Polímeros.....	9
3.3.2	Características que Auxiliam a Biodegradabilidade dos Polímeros.....	10
3.3.3	Aspectos Gerais dos Microrganismos em Relação aos Polímeros.....	11
3.4	Tratamentos dos Resíduos Petroplásticos.....	12
3.4.1	Reciclagem Mecânica.....	12
3.4.2	Reciclagem Química.....	14
3.4.3	Reciclagem Energética.....	16
4	AVANÇOS NOS TRATAMENTOS DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS POR ROTAS BIOLÓGICAS.....	16
4.1	Relação de Estudos.....	16
4.2	Discussão.....	19
5	CONCLUSÃO.....	21
6	REFERÊNCIAS.....	23

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os plásticos estão presentes diariamente no cotidiano sob as mais diversas aplicações, formas e suas respectivas funções. A partir da expansão industrial, agrícola e urbana no século XX, os polímeros sintéticos (derivados do petróleo) obtiveram um importante lugar na sociedade como utilidades domésticas, indústria automotiva, telecomunicações, aeronáutica e saúde, sendo eles: polietileno (PE), tereftalato de polietileno (PET), poliuretano (PU), poliestireno (PS), polipropileno (PP) e cloreto de polivinila (PVC), que são extremamente recalcitrantes, ou seja, não se decompõe naturalmente (MOHANAN *et al.*, 2020).

A relevância dos debates ambientais a respeito do mau uso dos plásticos fez com que a humanidade avaliasse o uso destes polímeros sintéticos, uma vez que seus resíduos geram grande preocupação para o meio ambiente e saúde humana (CALLAPEZ *et al.*, 2022).

Esses polímeros sintéticos possuem atributos de cunho antropogênico não naturais em sua composição e seus componentes químicos, conhecidos como aditivos, são conhecidos como xenobióticos. Este termo derivado das palavras gregas *xeno* (estranho) e *bios* (vida) se refere a substâncias químicas estranhas à vida que possuem capacidade de interagir com o metabolismo de seres vivos de maneira nociva, a curto e longo prazo, sejam elas como substâncias isoladas ou como uma mistura delas (SILVA, C. M. M. S.; VIEIRA, R. F, 2008; ŠTEFANAC T.; GRGAS D.; LANDEKA D. T, 2021). Além disso, esses compostos aditivos na produção de plásticos podem ser liberados durante um processo de produção do polímero, durante o uso do produto final ou na etapa de reciclagem ou tratamento do produto usado, podendo afetar o ambiente de forma deliberada ou acidental, podendo ser depositados, volatilizados, biomagnificados¹ ou mineralizados.

¹ Biomagnificação – fenômeno que ocorre quando há acúmulo progressivo de substâncias ou compostos químicos ao longo de uma teia alimentar.

A produção de derivados do petróleo como os plásticos utiliza compostos químicos conhecidos como xenobióticos, que são utilizados como aditivos para deixar esses polímeros com uma maior maleabilidade e resistência. Dentre esses aditivos destacam-se os ftalatos, com uma produção de milhões de toneladas por ano e que compõem diferentes produtos, assim como os de higiene pessoal, tubos de PVC, embalagens de alimentos, adesivos, plásticos, brinquedos, cosméticos, dentre outros (ŠTEFANAC; GRGAS; LANDEKA, 2021; FERREIRA; MORITA, 2012; FONTENELE et al., 2010).

Um dos processos amplamente utilizados para tratamentos desses resíduos é a reciclagem daqueles da classe dos termoplásticos, que apresentam uma ampla faixa de aplicações devido a características como a capacidade de se moldar, baixa densidade, boa aparência, isolamento térmico e elétrico, resistência ao impacto, além de possuírem um baixo custo, como os PETs. A reciclagem mecânica por extrusão convencional possui um limite máximo de ciclos de processamento até que as propriedades dos polímeros deixem de ser as mesmas, sendo três no caso dos PETs e dez para os PPs. Dessa forma, esse tipo de tratamento beneficia a classe em questão, visto que cada tipo de polímero que ela engloba possui seu próprio ciclo de reaproveitamento, mas que inevitavelmente terá suas propriedades de memória modificadas após certo tempo e se tornando mais duros, quebradiços e impedindo assim uma aplicação semelhante ao polímero virgem (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Em relação à reutilização ou ao processamento destes polímeros a degradação de compostos poliméricos por microrganismos como bactérias, fungos e algas ocorre em um processo natural no meio ambiente conhecido como biodegradação. A biodegradação de polímeros ocorre no processo bioquímico quando esses microrganismos utilizam esses compostos e seus aditivos como fonte de carbono e energia (GRISA, 2011). Alguns fatores abióticos que podem influenciar de maneira significativa o processo de degradação desses polímeros sintéticos são: radiação UV, a umidade, a temperatura e o pH são os principais fatores para a fragmentação da cadeia dos polímeros ou cisão dos polímeros. A degradação oxidativa foto-iniciada de

PE, PP e PS leva à redução do peso molecular e à formação de grupos terminais carboxílicos, devido à ação abiótica que leva à formação de fragmentos menores desses polímeros que são suscetíveis à biodegradação (MOHANAN, *et al.*, 2020).

À vista disso, para a diminuição dos polímeros sintéticos no meio ambiente surgiu-se novas alternativas para o tratamento desses resíduos como o aterro sanitário, para a degradação via biótica e visto que no solo possui uma gama variedade de microrganismos, sendo que, no aterro sanitário, o chorume possui uma matriz orgânica que contribui para que esses microrganismos se proliferem liberando no meio enzimas que são responsáveis por atuar sobre substâncias sintéticas provenientes das atividades antropogênicas (FERREIRA; MORITA, 2012). Com isso, a biodegradação torna-se atraente em relação a biorremediação *in situ* por apresentar um aumento das taxas de transferência de massa dos contaminantes da fase sólida para líquida e melhorando assim o contato entre os contaminantes, nutrientes e microrganismos, além de um menor tempo de degradação dos contaminantes no meio ambiente. (VIDALI, 2001).

Diante do exposto previamente, este trabalho tem por objetivo analisar a aplicação de microrganismos para a biodegradação de xenobióticos provenientes de ações antropológicas e rotas alternativas para a biodegradação desses compostos sintéticos, por meio de uma revisão literária. Após o levantamento de informações obtidas na literatura, será proposto técnicas que proporcionam avanços no quesito do tratamento de resíduos sintéticos, selecionando um microrganismo com alto potencial de biorremediação e descrever uma possível rota deste processo em um aterro sanitário e tratamento do solo através de um biorreator segundo alguns artigos.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivos Gerais

Em virtude do que foi apresentado, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão na literatura sobre a biodegradação de xenobióticos provenientes de

plásticos utilizando uma fonte alternativa para minimizar os impactos ambientais e sociais através de microrganismos degradadores.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os polímeros da classe dos termoplásticos;
- Diferenciar fatores que influenciam a quebra dos polímeros em tamanhos menores como fatores bióticos e abióticos;
- Apresentar o processo de biodegradação através dos microrganismos;
- Abordar as etapas utilizadas para a biorremediação dos plásticos;
- Determinar um processo para o tratamento dos polímeros sintéticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico e Definição

Os polímeros estão presentes na evolução da humanidade, desde suas primícias, sendo que os polímeros naturais foram os primeiros a serem utilizados. Através de registros históricos, um dos primeiros polímeros a serem utilizados foi a resina da árvore "*Rhus verniciflua*" pelos chineses, e outro grande exemplo foi o uso do âmbar, uma resina termoplástica moldável. Similarmente é possível observar que o homem, para sobreviver de forma mais confortável, começou a criar rotas para garantir sua sobrevivência. A partir da revolução industrial no século XX, os polímeros sintéticos derivados do petróleo obtiveram um considerável lugar na sociedade moderna acompanhando com grandes evoluções, como na comunicação, setores alimentícios, saúde, transportes e dentre outros (HAGE JUNIOR, 1988; PITT; BOING; BARROS, 2011).

A introdução de compostos químicos sintéticos novos como, por exemplo, os derivados da indústria petroquímica, são de difícil degradação no meio ambiente, ou não biodegradáveis, chamados de compostos recalcitrantes. O processo de biodegradação ocorre por enzimas que por sua vez são específicas de acordo com cada polímero novo, ou seja, a evolução enzimática não é rápida o suficiente para degradar à medida que se produz novos compostos. Apesar disso, ao estudar

microrganismos na natureza notou-se que certos compostos de difícil degradação estavam sumindo no solo, como os hidrocarbonetos halogenados, que mais chamaram a atenção devido a sua toxicidade e serem compostos recalcitrantes (MOHANAN *et al.*, 2020).

Além disso, a produção de polímeros sintéticos acarreta consigo materiais xenobióticos, que são utilizados como plastificantes, ou seja, seu uso consiste em atribuir novas características como flexibilidade, tenacidade e ductibilidade, isto é, a capacidade do material ser moldável. Esses materiais estão associados a diversas doenças de cunho carcinogênicos e teratogênicos, causando distúrbios aos órgãos reprodutivos e disfunções endócrinas (FERNANDEZ; ANDRÉ; CARDEAL, 2017; SPERLING, 2005).

3.2 Classificação dos Polímeros Sintéticos

Os polímeros podem ser classificados de duas maneiras, naturais e sintéticos. Dentre as diversas formas de polímeros existentes, foram divididos em relação as suas estruturas químicas e interações moleculares. Sendo assim, os polímeros sintéticos possuem algumas peculiaridades em relação à sua classificação, como por exemplo os termoplásticos, termofixos, borrachas e fibras, sendo que esses nomes referem principalmente ao seu comportamento físico, químico e mecânico (ALVES, 2005).

A classe dos polímeros termoplásticos, possuem uma grande variedade sendo que os PP, PE, PVC, PET, PS e dentre outros são os compostos sintéticos mais utilizados no Brasil, isso se dá ao fato de sua gama variedade de aplicações como isolantes térmicos e elétricos, embalagens, setor automotivo, eletrodomésticos, construção civil e dentre outras aplicações. Além disso, esses compostos possuem baixo custo, baixa densidade e capacidade de serem moldáveis (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

3.2.1 Desvantagens do Uso de Polímeros Sintéticos

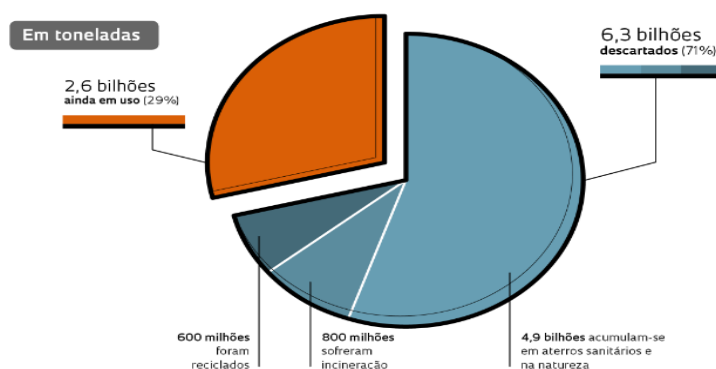
Segundo Geyer, Jambeck e Law (2017) o mundo já produziu cerca de 8,9 bilhões de toneladas de plásticos desde 1950. Segundo esta análise, os termoplásticos

possuem as maiores produções globais até 2015, seguidos de PE (36%), PP (21%), PVC (12%), e por PET, PUR e PS com cerca de 10% cada. Dentre esses 42%, aproximadamente, de todos os polímeros não fibrosos foram usados para embalagens compostas de PE, PP e PET e outro grande grupo de polímeros não fibrosos foi utilizado em construções com 69% de todo PVC que corresponde a 19% de todos os termoplásticos mundial.

Visto que esses compostos são considerados inertes a enzimas provenientes de microrganismos, em suma, faz com que isso se torne um grande problema, pois o tempo de vida desses polímeros é extremamente longo, tornando um sério problema ambiental (PIRES, 2011). Por consequência, para minimizar esses problemas, são utilizados três destinos diferentes para os resíduos plásticos, sendo o primeiro a reciclagem, que vem sendo aplicada para diminuir a utilização do plástico virgem; reaproveitando o material já produzido. Em segundo plano, esses polímeros podem ser destruídos termicamente através de incineradores. Por fim, temos a última alternativa, sendo esses dejetos descartados em aterros sanitários, ou deixados em lixões a céu aberto (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Com uma análise mais aprofundada de Vasconcelos (2019) no estudo do artigo *Production, use, and fate of all plastics ever made*, tem-se que desde 1950 até 2017 os plásticos sintéticos tiveram vários destinos conforme a Figura 1.

Figura 1 – Destino dos polímeros



Fonte: Vasconcelos, 2019.

3.2.2 Aditivos Utilizados nos Plásticos

Os aditivos utilizados nos polímeros sintéticos possuem características únicas. Dependendo da finalidade do termoplástico são aplicados diferentes aditivos para obter propriedades finais desejadas. Sendo assim, o tipo do aditivo utilizado para suprir essas necessidades é determinado por três fatores: (i) tipo do polímero, (ii) processo de produção para obtenção da peça e (iii) qual a sua aplicação no produto final. Os principais aditivos utilizados nos polímeros sintéticos estão descritos na Tabela 1 (ALMEIDA; SOUZA, 2014).

Tabela 1 – Aditivos responsáveis pela alteração das propriedades físicos - químicos e suas respectivas funções.

(continua)

Aditivos	Função
Colorantes	Alterar a aparência de um produto polimérico, proporcionando o tingimento necessário do material para a aplicação desejada.
Plastificantes	Aumentar a flexibilidade de polímeros por meio da facilidade de movimentação molecular provocada pela sua utilização. Usados principalmente em resinas de PVC.
Antiestáticos	Auxiliar a dissipação de cargas estáticas presentes na superfície de uma peça ou produto plástico por meio de condutividade elétrica e prevenindo descargas ou choques elétricos.

Tabela 1 – Aditivos responsáveis pela alteração das propriedades físicas - químicas e suas respectivas funções.

(conclusão)

Aditivos	Função
Agentes de reticulação	Formar ligações cruzadas entre as moléculas do polímero para melhorar propriedades como rigidez e dureza.
Cargas	Adicionar volume a um polímero, aumentando sua rigidez e sua dureza superficial.
Reforços	Aumentar a resistência mecânica de polímeros utilizando para isso fibras curtas e longas e esferas.
Estabilizantes	Atuar diminuindo a velocidade de degradação dos polímeros ou evitando o início do processo degradativo durante a vida útil do produto.

Fonte: Adaptação de ALMEIDA; SOUZA, 2014.

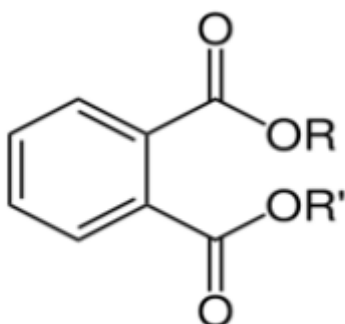
3.2.3 Plastificantes Ftalatos

Os plastificantes são utilizados na produção dos polímeros devido à sua função principal, ou seja, tem por sua finalidade alterar as propriedades, fazendo com que esses plásticos se tornem mais flexíveis e resistentes como, por exemplo, o PVC. Devido a esse uso, inicialmente esses polímeros foram utilizados para tornar os plásticos mais rígidos, entretanto, uma desvantagem desses produtos está relacionada com seu descarte devido às dificuldades de degradação dos seus componentes (ALMEIDA; SOUZA, 2014).

Os plastificantes especialmente a classe dos Ftalatos, compostos derivados do ácido 1,2-benzenodicarboxílico, são amplamente utilizados na indústria do PVC, além disso, são empregados como agentes de estabilização e solubilizantes, são

encontrados em diversos setores, como em produtos de higiene pessoal, cosméticos, tintas, tubos de PVC, embalagens de adesivos e brinquedos infantis. Os plastificantes ftálicos correspondem a cerca de 92% do mercado total dos plastificantes, sendo que os mais utilizados são os DEPH (Di-(2-etilhexil) ftalato) com 51%, DIDP (Diizopentil ftalato) com 21%, DINP (Diisononil ftalato) com 11% e o restantes dessa classe somam 17%. Essa classe se destaca devido a sua flexibilidade em baixas temperaturas, resistência à esterilização a altas temperaturas e, os polímeros aos quais são adicionados esses plastificantes podem ser produzidos de caráter transparentes, ou seja, uma grande vantagem para embalagens, por isso o DEHP é o mais utilizado já que, possui todas essas características. Sua estrutura consiste em duas cadeias alifáticas e dependendo da substituição pode ser gerador mais de 60 tipos de compostos ftálicos diferentes, a Figura 2 mostra a estrutura geral (ALMEIDA; SOUZA, 2014; CERQUEIRA, 2018; FONTENELE *et al.*, 2009).

Figura 2 – Estrutura geral dos ftalatos



Fonte: Fontenele *et al.* (2009).

3.3 Biodegradação Microbiana

3.3.1 Importância da Biodegradação dos Polímeros

Além de serem essenciais para a estrutura dos solos, os microrganismos são os agentes responsáveis pela decomposição de moléculas orgânicas complexas como os compostos sintéticos. Esses seres são responsáveis por diversos ciclos biogeoquímicos, como o ciclo da água, carbono, enxofre e dentre outros (NEVES; PIRES, 2011; SILVA;

VIEIR, 2008). A biodegradação de termoplásticos provenientes do petróleo pode ser estudada de diversas maneiras, sendo que duas delas chamam a atenção.

Existem duas maneiras de tratar xenobióticos: a primeira é por meio de atividades metabólicas e dissipação em ambientes bem definidos, como na natureza. Por outro lado, também é possível estudar microrganismos isolados para identificar vias metabólicas específicas, incluindo as enzimas responsáveis pela transformação. Em ambos os processos os microrganismos catalisam substratos complexos como os xenobióticos, como fonte de carbono e energia. Desse modo, a procura de microrganismos degradadores é umas das opções mais ecológicas e de baixo custo.

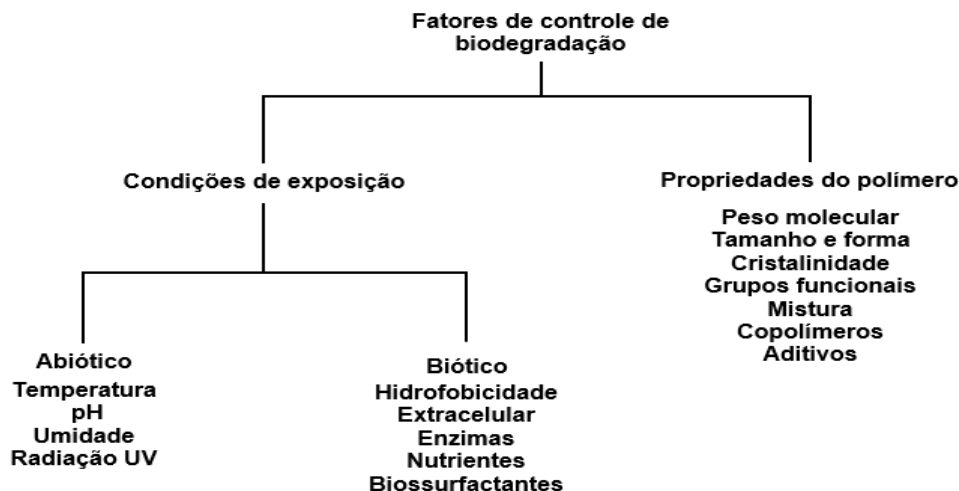
A degradação pode ser parcial ou total. Quando ela é degradada parcialmente é conhecida de co-metabolismo, ou seja, o produto resultante da biodegradação não contribui para a sobrevivência do microrganismo, porém esse co-metabolismo pode servir de substrato para transformações enzimáticas de outras espécies de microrganismos, possibilitando a degradação completa de xenobióticos (GAYLARDE; BELLINASSO; MANFIO, 2011; MELO; AZEVEDO, 2009).

3.3.2 Características que Auxiliam a Biodegradabilidade dos Polímeros

Geralmente, a biodegradação é um processo que depende de vários fatores, como os fatores ambientais normais e a morfologia dos polímeros, pois a biodegradação de petroplásticos está relacionada com a formação polimérica, ou seja, com suas interações físico-químicas. A degradação dos materiais sintéticos, como os plásticos, é um processo destrutivo que altera irreversivelmente as propriedades desses materiais. Durante esse processo, eles ficam sujeitos a diversos fatores, tanto abióticos quanto bióticos. Os fatores abióticos são provenientes de ações físicas, como radiação ultravioleta, temperatura, atrito mecânico e ações antropológicas como tratamento químicos, térmicos e mecânicos que é a própria reciclagem. Já os fatores bióticos são ações provenientes de microrganismos presentes no ambiente que através da degradação enzimática pode iniciar a degradação. Esse processo pode ocorrer de duas maneiras: adsorção das enzimas nas superfícies do polímero, seguida de

hidroperoxidação (MOHANAN; MONTAZER; SHARMA; LEVIN, 2020; NEVES; PIRES, 2011).

Figura 3 – Fatores que auxiliam a biodegradação dos polímeros



Fonte: Adaptação de Mohanan *et al.* (2020).

3.3.3 Aspectos Gerais dos Microrganismos em Relação aos Polímeros

Os microrganismos são conhecidos pela função decompositora de matérias presentes no meio ambiente, dentre elas, os fungos e bactérias são os grupos com maiores afinidades nos estudos de biodegradação de xenobióticos. Devido a essas características muitos cientistas começaram a criar métodos de cultivos de microrganismos, estudar suas enzimas e mecanismos de atuação desses seres em polímeros sintéticos. Nos primeiros ensaios de biodegradação microbiana os pesquisadores tentaram demonstrar que a atividade microbiana dependia de fatores físicos dos plásticos, como resistência a tração, absorção de água e cristalinidade. Sendo assim, esses experimentos levaram em consideração diferentes microrganismos de diferentes fontes para encontrar o melhor micróbio para degradar esses petroplásticos (BARBOSA, 2022; MONTAZER; NAJAFI; LEVIN, 2020).

Ao se estudar os mecanismos da biodegradação dos polímeros, viu-se que algumas bactérias e fungos eram capazes de hidrolisarem esses compostos sem um tratamento abiótico e notaram que as bactérias aeróbicas tinham quatros estágios de

biodegradação; a biodeterioração, biofragmentação, bioassimilação e mineralização (MOHANAN; MONTAZER; SHARMA; LEVIN, 2020).

Os fungos além de serem capazes de hidrolisarem os polímeros, algumas espécies são capazes de produzir biossurfactantes, ou seja, substâncias que facilitam a degradação dos contaminantes e reduzem a toxicidade de moléculas xenobióticas como por exemplos os aditivos que compõem esses materiais (BARBOSA, 2022).

3.4 Tratamentos dos Resíduos Petroplásticos

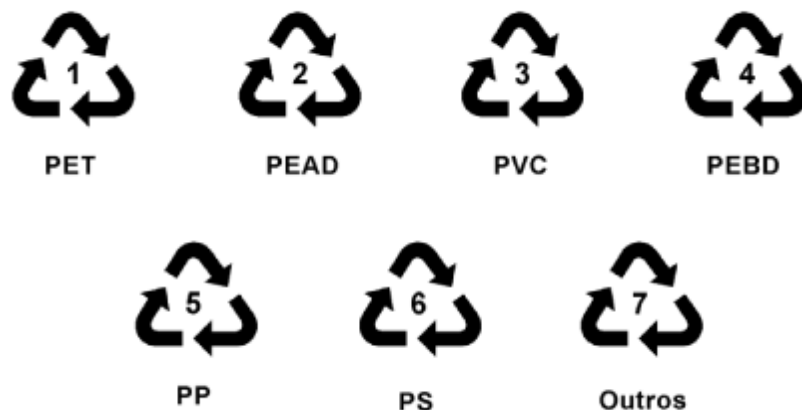
3.4.1 Reciclagem Mecânica

Os resíduos termoplásticos como já citado, apresentam sérios problemas, principalmente relacionados a proliferação de doenças endócrinas aos seres humanos e problemas ambientais relacionados à poluição de solos e mares. Além disso, muitos países, como os europeus, sofrem com esses resíduos materiais, por conta de não terem espaço físico suficiente para o descarte. Para ter-se um número de tamanha proporção, estimasse que 70% desses resíduos estão em aterros sanitários na Europa. Atualmente, para diminuir os impactos ambientais desses materiais é utilizado campanhas para a diminuição e conscientização dos petroplásticos em embalagens, assim como a reciclagem de diferentes formas e, por último, a incineração para produção de energia (SANTOS; AGNELLI; MANRICH, 2004).

Devido à essa problemática a reciclagem começou a chamar atenção, principalmente em âmbito brasileiro, onde no início da década de 90 crescia em média de 15% ao ano segundo a ABIQUIM (Associação Brasileira de da Indústria Química). Na mesma década, nos Estados Unidos, plásticos reciclados começaram a serem utilizados em embalagens alimentícias, onde esses materiais eram utilizados como multicamada, ou seja, não entram em contato diretamente com os alimentos. No entanto, no Brasil, segundo a ANVISA na Portaria n. 987 de 08 de dezembro de 1998, só se pode utilizar materiais plásticos como os PET's reciclados em camadas intermediárias de filmes multicamadas para embalagens descartáveis e não alcoólicas (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Sabendo dos problemas ambientais, o Brasil adotou uma divisão segundo a norma da ABNT NBR 13230 (Ver Figura 4), onde os materiais plásticos devem possuir uma identificação indicando o tipo de resina das garrafas, brinquedos e embalagens alimentícias, pois isso é uma maneira de assegurar que o plástico reciclado seja o mais homogêneo possível e não tenha problemas com dificuldades na reciclagem mecânica, devido à instabilidade térmica de alguns polímeros, e outros problemas relacionados aos aditivos, visto que os mesmos dão certas características a esses materiais como estabilizantes, agentes de reticulação, colorantes e plastificantes (COLTRO; GASPARINO; QUEIROZ, 2008).

Figura 4 – Simbologia de Identificação de materiais poliméricos segundo a norma ABNT NBR 13230.



Fonte: SPINACÉ; PAOLI, 2005.

Para ocorrer a reciclagem mecânica, são necessários alguns procedimentos como: separação do resíduo, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento. Após esses processos tem-se o produto final o polímero reciclado.

A separação é uma etapa de extrema importância, devido a especificidade dos tipos de polímeros. Primeiramente, tem-se a chamada separação manual é realizada uma triagem dos resíduos e eles são separados por rótulos, contendo a identificação

dos polímeros. Além disso, é efetuada uma separação automatizada baseada na diferença de densidade dos componentes, utilizando tanques de flotação ou hidrociclones podendo ser utilizada para o PE, o PP, o PS, o PVC e o PET. Na sequência, tem-se o processo da moagem cujo objetivo é de diminuir a dimensão do material de tal forma que forme flocos, de tamanhos uniformes, para que assim a extrusão ocorra mais homogênea possível.

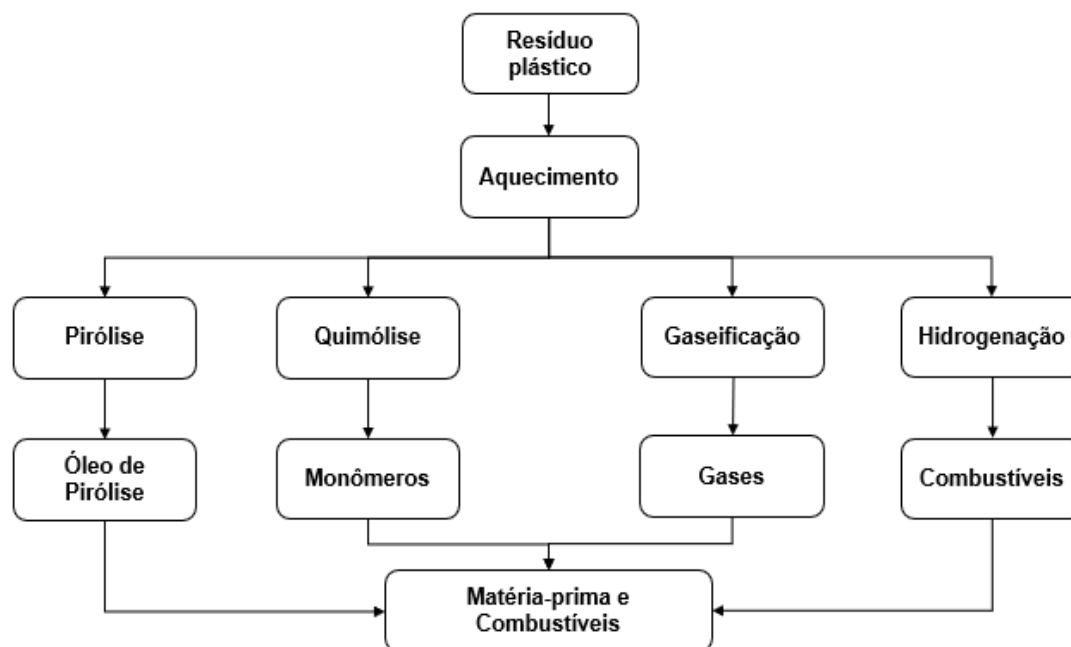
Um das características das embalagens pós-consumo se dá pelo alto nível de contaminantes, tanto orgânicos quanto inorgânicos, e para eliminar essas impurezas, deve-se realizar uma lavagem, para que essas partículas não interfiram na qualidade final do material reciclado. Após lavagem, os materiais são submetidos ao processo de secagem, podendo ser utilizado um secador centrifugo contínuo com soprador de ar quente para remoção dos particulados pós lavagem. Em seguida o material é encaminhado para etapa de aglutinação, com a finalidade de aumentar a densidade desses materiais para auxiliar a etapa de extrusão, etapa onde o material é aquecido de forma controlada até a temperatura de fusão (YUGUE, 2020).

Uma das desvantagens desse processo é que cada polímero possui sua característica, como cristalinidade, resistência mecânica, baixa densidade, baixa condutividade e, além disso, possuem aditivos que melhoram suas características físico-química; as quais estão presentes nos rótulos dos mesmos. Ademais, tem-se cada polímero possui que podem ser moldados, sendo que isso pode variar de cinco até dez vezes. Ao chegar nessa etapa é necessário a adição de polímeros virgens no processo (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

3.4.2 Reciclagem Química

A reciclagem química é um processo onde os resíduos plásticos são tratados para que se possa utilizar os mesmos como fonte de matéria-prima para novos polímeros através do processo conhecido como despolimerização. Esse tipo de tratamento pode ser feito de diferentes formas, como mostra a Figura 5 (AVELINO, 2020).

Figura 5 – Exemplos de despolimerização.



Fonte: Adaptado de (AVELINO, 2020).

A pirólise é uma das técnicas mais empregadas para o tratamento desses resíduos, principalmente pelo fato de que ela pode ser utilizada em diversos tipos de plásticos considerados recalcitrantes. Com a aplicação dessa técnica em alguns países, viu-se que é possível obter uma diminuição desses resíduos no meio ambiente ou em aterros sanitários, principalmente daqueles resíduos de difícil degradação. A pirólise é o processo na qual ocorre a quebra de moléculas pela ação do calor e ausência de oxigênio, podendo ocorrer em duas formas, (i) em baixas temperaturas, onde obtém-se compostos aromáticos e gases leves e (ii) em altas temperaturas, onde obtém-se óleos e gases. As demais formas de reciclagem como a hidrogenação, quimólise e gaseificação são usadas substâncias para quebrar os polímeros e utilizar esse resíduo tratado como matéria-prima para novos produtos (YUGUE, 2020; AVELINO, 2020).

A grande desvantagem da reciclagem química deve-se ao seu alto custo e por se tratar de processos complexos. Dessa forma, esses processos acabam não sendo utilizados, pois torna-se mais caro tratar esse resíduo e transformá-lo em um novo polímero, do que apenas utilizar uma matéria-prima virgem (AVELINO, 2020).

3.4.3 Reciclagem Energética

A reciclagem energética ocorre através da incineração dos resíduos plásticos como combustível para produção de energia elétrica devido ao alto valor calorífico dos petroplásticos. Para se ter um comparativo, 1 kg de plástico é equivalente a 1 kg de óleo combustível quando convertida em energia. A grande desvantagem desse tipo de tratamento são os gases produzidos da queima desses resíduos, pois dependendo da origem dos mesmos os gases podem ser mais ou menos tóxicos. Por fim, os incineradores do ponto de vista social geram menos empregos quando comparado com os processos de reciclagem mecânica e química (YUGUE, 2020; AVELINO, 2020).

4 AVANÇOS NOS TRATAMENTOS DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS POR ROTAS BIOLÓGICAS

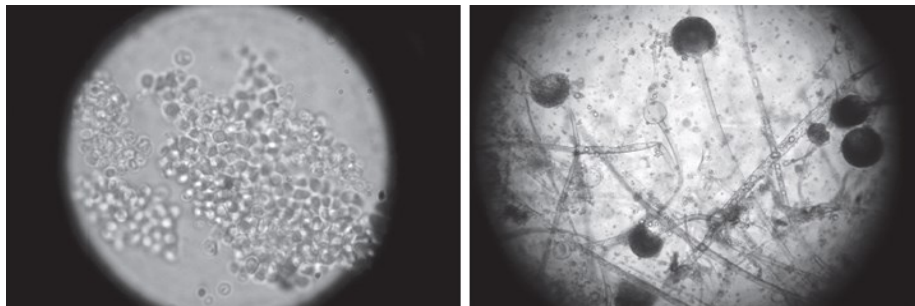
4.1 Relação de Estudos

Os tratamentos dos petroplásticos através de microrganismos estão cada vez mais difundidos no meio acadêmico, como mostra o estudo de Grisa *et al.* (2011), avaliando a degradação biológica do PVC em aterro sanitário, no qual foi possível identificar a ação de fungos e bactérias. O estudo foi realizado em duas etapas, sendo que a primeira etapa constituiu no tratamento físico, conhecido como abiótico. Nele foram utilizados filmes de PVC flexível em que foi realizada uma lavagem com hipoclorito de sódio a uma concentração de 7%, água destilada por 24 h e, por fim, secado. Já a segunda etapa foi responsável pelos fatores bióticos, ou seja, por ações de microrganismos diretamente e indiretamente. Nesta etapa, o material foi aterrado por 11 meses, em contato com diversos microrganismos de diferentes gêneros como *Penicillium*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Fusarium*, *Cladosporium*, *Aspergillus* e *Trichoderm*. Neste presente trabalho, os cientistas avaliaram as amostras de PVC aterrado após esse período, realizando análises térmicas e químicas para determinar o quanto de

massa do material polimérico foi perdido e quais microrganismos atuaram na sua degradação.

Na análise por espectrometria no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), observou-se que o PVC aterrado teve intensas modificações, sendo a principal relacionada ao grupo dos alcenos (CH₂) axiais, que sofreram deformações consideráveis, cujo os radicais são relacionados a aditivos como os plastificantes da classe dos ftalatos, além de que, em 11 meses, o espectro infravermelho indicou variações características, que indica a ocorrência de modificações estruturais. Através da micrografia do PVC notou-se algumas irregularidades relacionadas a sua superfície, como furos e fissuras, causadas pelas ações de microrganismos. De acordo com os estudos anteriores relacionados a esses agentes microbiológicos, observou-se que eles são responsáveis por consumirem plastificantes presentes nos polímeros, como mostrou a análise citada acima. Por fim, foi levantada uma análise para identificar os principais biodegradadores do PVC no aterro sanitário e foi constatado a presença de fungos do gênero *Mucor spp* e leveduras do gênero *Rhodotorula spp.*, como mostra a Figura 6, além dos agentes degradadores dos plastificantes como o fungo *Aureobasidium Pullulans* e bactérias do tipo *Pseudomonas Aeruginosa*.

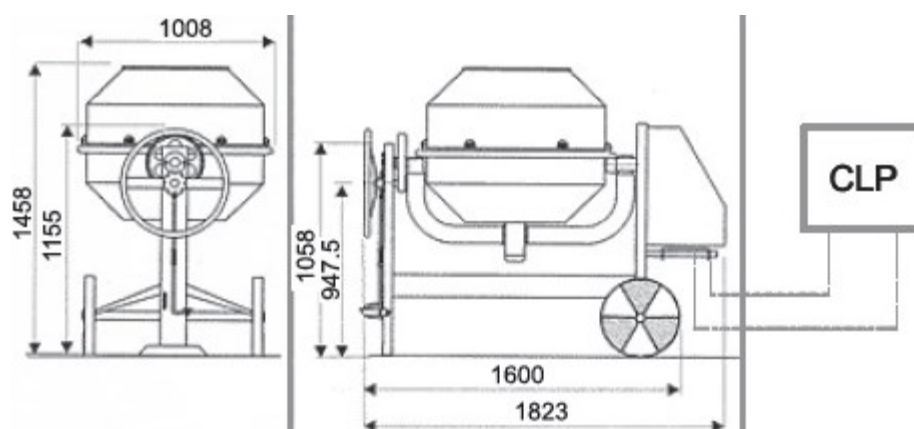
Figura 6 – Microrganismos identificados através do microscópio AXIOSTAR/ZEISS (40X), Fungos *Mucor spp* e leveduras do gênero *Rhodotorula spp.*



Fonte: GRISA *et al.*, 2011.

Outro estudo relacionado ao tratamento dos plásticos é a biorremediação que no estudo de Ferreira e Morita (2012), avaliou-se o tratamento de resíduos contaminados por xenobióticos provenientes dos aditivos plásticos, principalmente os ftalatos. Para tal avaliação, foi feito um tratamento do solo contaminando, apenas para homogeneizar o material, ou seja, para não ter problemas com os resíduos orgânicos, após esse processo amostras foram levadas ao biorreator como mostra a Figura 7, onde foi adicionado o inóculo de microrganismos presentes no solo, como as bactérias autóctones² e alóctones³ e monitorado por 120 dias.

Figura 7 – Biorreator com unidades em centímetros.



Fonte: Ferreira e Morita 2012.

Este trabalho avaliou a biorremediação de 100 kg de material contaminado acompanhando o pH, umidade e temperatura do biorreator. A partir de 15 dias do tratamento, notou-se que um aumento no pH, devido à biodegradação dos ácidos orgânicos formados. Além do pH, a temperatura do reator também foi monitorada, a qual variou de 17°C a 25°C indicando que houve uma reação dos microrganismos com o solo contaminado. Avaliando os teores iniciais dos plastificantes no solo, que foram de $15 \pm 1 \text{ mg kg}^{-1}$ para o isobutanol, $18 \pm 2 \text{ mg kg}^{-1}$ para o DEHP e de $69 \pm 1 \text{ mg kg}^{-1}$ para o DIDP e, após 120 dias, houve uma remoção acima de 70%, sem

² Bactéria autóctone – Microrganismo em nível populacional estável em um ambiente específico.

³ Bactéria alóctones – Microrganismos alocados em um ambiente específico.

necessitar de correção do pH e nem controle de temperatura, apenas da umidade por volta de 40%. Mostrando assim sua importância no tratamento de resíduos tóxicos ao meio ambiente e também uma rota alternativa e de baixo custo (FERREIRA; MORITA, 2012).

Visto que os microrganismos possuem diferentes gêneros e espécies, num estudo realizado por Barbosa (2022) destacou três fungos capazes de degradar hidrocarbonetos provenientes do petróleo, dentre eles estão *Agaricus bisporus*, *Pleurotus ostreatus* e *Ganoderma lucidum*. Os autores afirmam que esses microrganismos são capazes de degradarem com facilidade matérias de cunho sintético, além de produzirem surfactantes que auxiliam a dissolução e degradação de contaminantes tóxicos no meio ambiente. O fungo *Ganoderma lucidum* em particular é de bastante interesse devido à sua capacidade de degradação de xenobióticos tanto de corantes à agrotóxicos da classe dos DDT (Diclorodifeniltricloetano), mostrando-se eficiente na biodegradação e também na biorremediação.

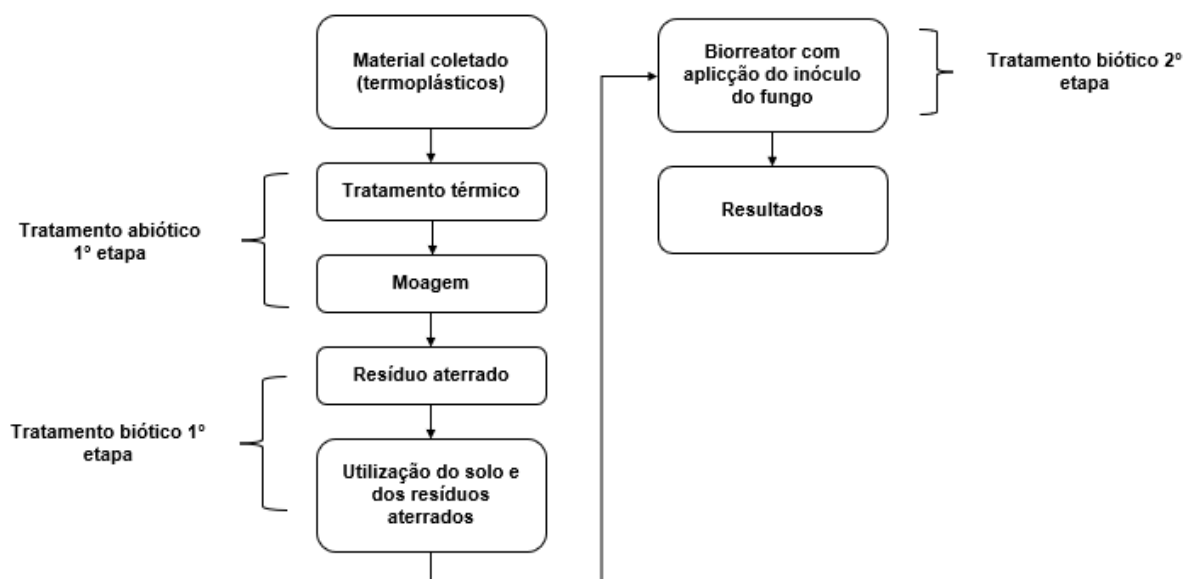
Dessa forma, como os xenobióticos estão presentes em todos ambientes em específico e grandes quantidades no solo e, com todos os aspectos levantados no tratamento dos resíduos termoplásticos, a rota biológica é uma promissora fonte de pesquisas e resultados visto a sua gama variedade de microrganismos capazes de biodegradar materiais recalcitrantes, assim podendo ser uma possível minimizadora dos problemas causados por esses poluentes.

4.2 Discussão

Diante do exposto problema, o tratamento de resíduos plásticos através de microrganismos mostrou-se uma alternativa muito atraente no quesito inovação e sustentabilidade no tratamento de xenobióticos, visto que os resíduos plásticos contêm aditivos que são tóxicos ao meio ambiente e aos seres humanos. Após o levantamento literário é possível notar que há diversas maneiras de se tratar esses resíduos plásticos e seus aditivos através da biorremediação e biodegradação.

A biorremediação é uma técnica que chama muita atenção, pois ela pode ser dividida em duas etapas, abiótico e biótico como já citado na presente revisão bibliográfica. Para biodegradar e possuir uma eficiência alta nesse tipo de tratamento sugere-se a seguinte proposta apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do processo proposto de tratamento dos plásticos utilizando fatores bióticos e abióticos.



Fonte: O autor, (2023).

Através do fluxograma apresentado acima, é evidente que o tratamento através de microrganismo ocupa um papel fundamental na degradação e geração de coproduto, entretanto é necessário um estudo mais assertivo em relação a escolha do microrganismo, visto que existe uma enorme variedade de fungos, bactérias e leveduras degradadoras no meio ambiente. Ainda assim, o fungo *Ganoderma lucidum* apresentou resultados satisfatórios de degradação sendo uma excelente alternativa como biorremediador.

Para se ter um método mais eficiente pode-se fazer um tratamento biótico utilizando um tratamento térmico, que é responsável por alterar as estruturas desses

polímeros, seguido da utilização de moendas para deixar os plásticos de maneira mais uniforme e em pequenos tamanhos. Após esse tratamento, os fatores bióticos entrariam em ação através do aterramento desse material e, conseqüentemente, os microrganismos presentes no solo seriam responsáveis pela biodegradação dos mesmos, ou seja, fariam uma das etapas da biodegradação. Essa etapa consiste em esperar um determinado tempo para que isso possa ocorrer, visto que com 11 meses já se tem bons resultados.

Na etapa final, o material retirado do solo passa por um processo de tratamento em um biorreator. Esse tratamento é feito com o inóculo do fungo *Ganoderma lucidum* e tem como objetivo reduzir o tamanho dos materiais sintéticos, facilitando a remoção dos ativos plásticos responsáveis pela toxidade do meio ambiente. Além disso, esse processo trata o plástico e o inóculo do fungo como utiliza essa matéria como fonte de carbono, convertendo-os possivelmente em água e dióxido de carbono.

Portanto, novos métodos de tratamentos de polímeros sintéticos devem ser desenvolvidos com o propósito de se ter um mecanismo que auxilia a diminuição de plásticos no meio ambiente e de forma que não gere resíduos tóxicos, além de propor alternativas de baixo custo e eficientes.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do presente estudo é compreender os desafios enfrentados no tratamento de matérias xenobióticos provenientes dos plásticos. Essas matérias são amplamente consumidos em nossa vida diária, em diversas formas, como os termoplásticos. Diante disto, propôs-se uma revisão bibliográfica para auxiliar pesquisas futuras como uma alternativa viável para o tratamento dos resíduos plásticos utilizando microrganismos como o fungo *Ganoderma lucidum*, visando também um processo de baixo custo e eficiente.

Com o intuito de melhorar o processo de tratamento dos plásticos e reduzir o impacto ambiental causado por seus aditivos tóxicos, algumas ações tem sido propostas. Uma delas é a utilização da biorremediação, que consiste na aplicação de

técnicas biológicas para degradar essas matérias. Essas técnicas incluem a moagem e o tratamento térmico que em uma faixa de temperatura de 250°C a 680°C provocam mudanças físicas nos termoplásticos, seguido pelo tratamento biológico, onde os microrganismos presentes no meio ambiente são utilizados para degradar os resíduos.

Na primeira etapa, o aterro sanitário é utilizado como fonte de microrganismos, que são aplicados no material retirado do solo na segunda etapa. Essas ações têm se mostrado eficazes na melhoria do tratamento dos plásticos e na redução do impacto ambiental causado por seus aditivos.

Dessa forma, conclui-se que a biorremediação, deve ser foco de investimentos e estudos visando aprimorá-la para ampliar o tratamento dos resíduos plásticos gerados em nosso dia a dia, não sendo de nenhuma maneira substituída ou substituta da reciclagem mecânica, química e energética e sim complementada.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudêncio de; SOUZA, Wander Burielo de. Engenharia dos Polímeros: Tipos de Aditivos, Propriedades e Aplicações. [S.L.]: Saraiva Educação S.A., 2014. 192 p. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr&id=84uwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT39&dq=aditivos+dos+plasticos&ots=GhfQMNMOTu&sig=yyGFGniVRr4cnsyKrgX7cfDWsKU&pli=1#v=onepage&q&f=false)

[BR&lr&id=84uwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT39&dq=aditivos+dos+plasticos&ots=GhfQMNMOTu&sig=yyGFGniVRr4cnsyKrgX7cfDWsKU&pli=1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr&id=84uwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT39&dq=aditivos+dos+plasticos&ots=GhfQMNMOTu&sig=yyGFGniVRr4cnsyKrgX7cfDWsKU&pli=1#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 02 dez. 2022.

ALVES, Ciro José. Desenvolvimento de metodologia de ensaios para avaliação comparativa do envelhecimento de borrachas nitrílicas expostas à diversas condições de temperatura e ambiente. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

AVELINO, Guilherme Monteiro. A RECICLAGEM QUÍMICA COMO ALTERNATIVA AO TRATAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS NO BRASIL. 2020. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020

BARBOSA, Matheus dos Santos. Importância dos fungos de podridão branca do gênero Ganoderma na biodegradação e biorremediação de compostos xenobióticos: uma revisão. 2022. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 1.399, de 15 de dezembro de 1999**. Brasília, 1999.

COLTRO, Leda; GASPARINO, Bruno F.; QUEIROZ, Guilherme de C. Reciclagem de materiais plásticos: a importância da identificação correta. Polímeros, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 119-125, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282008000200008>. Disponível

em: <https://www.scielo.br/j/po/a/NdHp5H75XM75JqgV6pqccPr/?lang=pt#>.
Acesso em: 12 dez. 2022.

CALLAPEZ, Maria Elvira; COIMBRA, Raquel Ferreira; CRUZ, Sara Marques da; CARVALHO, Vânia; SÁ, Susana França de. A exposição Plasticidade – Uma História dos Plásticos em Portugal: um processo participativo no Museu de Leiria. Open Edition Journals. Coimbra, p. 1-25. 5 mar. 2022.

FERNANDEZ, Miriany A. Moreira; ANDRÉ, Leiliane Coelho; CARDEAL, Zenilda de Lourdes. Hollow fiber liquid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry method to analyze bisphenol A and other plasticizer metabolites. Journal Of Chromatography A, [S.L.], v. 1481, p. 31-36, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2016.12.043>.

FERREIRA, Ieda Domingues; MORITA, Dione Mari. Biorremediação de solo contaminado por isobutanol, Bis-2-etil-hexilftalato e Di-isodecilftalato. Revista Brasileira de Ciência do Solo, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 643-652, abr. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000200033>.

FONTENELE, Eveline Gadelha Pereira; MARTINS, Manoel Ricardo Alves; QUIDUTE, Ana Rosa Pinto; MONTENEGRO JÚNIOR, Renan Magalhães. Contaminantes ambientais e os interferentes endócrinos. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia**, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 6-16, fev. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0004-27302010000100003>.

GAYLARDE, Christine Claire; BELLINASSO, Maria de Lourdes; MANFIO, Gilson Paulo. Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 78-87, jun. 2011.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, [S.L.], v. 3, n. 7, p. 1-5, 7

jul. 2017. American Association for the Advancement of Science (AAAS).
<http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

GRISA, Ana M. C.; SIMIONI, Taysnara; CARDOSO, Vicente; ZENI, Mara; BRANDALISE, Rosmary N.; ZOPPAS, Bárbara C. D. A. Degradação biológica do PVC em aterro sanitário e avaliação microbiológica. **Polímeros**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 210-216, 8 jul. 2011. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282011005000046>.

HAGE JUNIOR, Elias. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. 1988. 4 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

MELO, Itamar Soares de; AZEVEDO, João Lúcio de. Estratégias de isolamento de microrganismos envolvidos na degradação de xenobióticos. In: AMBIENTE, Embrapa Meio. V Taxonomia de Organismos. 2. ed. Jaguariúna: Embrapa, 2009. p. 199-216.

MOHANAN, Nisha; MONTAZER, Zahra; SHARMA, Parveen K.; LEVIN, David B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers In Microbiology*, [S.L.], 26 nov. 2020. Frontiers Media SA.
<http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>. Disponível em:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7726165/#>. Acesso em: 06 dez. 2022.

MONTAZER, Zahra; NAJAFI, Mohammad B. Habibi; LEVIN, David B. Challenges with Verifying Microbial Degradation of Polyethylene. *Polymers*, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 123, 5 jan. 2020. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/polym12010123>. Disponível em:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7022683/>. Acesso em: 08 dez. 2022.

MOREIRA, M. Desenvolvimento de métodos cromatográficos para análise de plastificantes, alquilfenóis e seus metabólitos em alimentos e urina. Tese Doutorado (Doutorado em Química Analítica) - Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em <<http://hdl.handle.net/1843/SFSA-9U8T2F>. Acesso em 2018-01-17.

NEVES, Aline Abreu; PIRES, Camila de Freitas. BIODEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS POR FUNGOS FILAMENTOSOS. 2011. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011.

PIRES, Camila de Freitas. BIODEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS POR FUNGOS FILAMENTOSOS. 2011. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011.

PITT, Fernando Darci; BOING, Denis; BARROS, António André Chivanga. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO, CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO DE POLÍMEROS SINTÉTICOS E DE FONTES RENOVÁVEIS. Revista da Unifebe, [s. l.], v. 1, n. 9, p. 1-18, nov. 2011.

SANTOS, Amélia S. F.; AGNELLI, José Augusto M.; MANRICH, Sati. Tendências e desafios da reciclagem de embalagens plásticas. Polímeros, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 307-312, dez. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282004000500006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/pygZmYqm3yhzqVTzhwXvrNb/?lang=pt>. Acesso em: 10 dez. 2022.

SILVA, Celia Maria Maganhotto s; VIEIR, Rosana Faria. Impacto de xenobióticos e metais pesados na microbiota do solo. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 32 p.

SPERLING, L.H. Introduction to Physical Polymer Science: introduction to polymer science. 4. ed. [S.L.]: Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Inc., 2005.

845 p. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez34.periodicos.capes.gov.br/doi/book/10.1002/0471757128>. Acesso em: 27 nov. 2022.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurelio de. A TECNOLOGIA DA RECICLAGEM DE POLÍMEROS. 2005. 8 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ŠTEFANAC T.; GRGAS D.; LANDEKA D. T. A Review: Xenobiotics-Division and Methods of Detection. J Xenobiot, [s. l.], 26 out. 2021. Disponível em: <https://10.3390/jox11040009>. Acesso em 22 ago. 2022.

VIDALI. M. An Overview: Bioremediation. Pure and Applied Chemistry, Padova, v. 73, n. 7, p. 1163-1172, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/pac200173071163>. Acesso em 20 set. 2022.

VASCONCELOS, Yuri. O planeta plástico. **O Dilema dos Plásticos**, São Paulo, v. 281, n. 1, p. 18-24, jul. 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/plastic-planet/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

YUGUE, Eduardo Tadashi. Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil. 2020. 231 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192646/yugue_et_me_sorocaba.pdf?sequence=4&isAllowed=y. Acesso em: 10 dez. 2022.