

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

AMANDA ORIANI LOUREIRO

BIOPLÁSTICOS E PLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS:
revisão bibliográfica dos principais materiais e seus impactos ambientais

SÃO CARLOS -SP
2021

AMANDA ORIANI LOUREIRO

BIOPLÁSTICOS E PLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS:
revisão bibliográfica dos principais materiais e seus impactos ambientais

Monografia de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Dr^a. Vadila Giovana Guerra Bettega

São Carlos-SP
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de bacharelado do(a) candidato(a) Amanda Oriani Loureiro, realizada em 16/11/2021:

Prof. Dr. Jorge José Correa Lopes
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. José Mansur Assaf
Universidade Federal de São Carlos

Prof^a. Dr^a. Vadila Giovana Guerra Bettega
Universidade Federal de São Carlos

Dedico este trabalho aos meus pais, Renato e Lucélia; minha irmã, Agnes; meus avós e à todas as mulheres inspiradoras que fizeram ou fazem parte da minha história.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Renato e Lucélia, por tudo que me proporcionaram para que eu pudesse chegar até aqui. Por me ensinarem, sempre com muito amor, a ter foco e dedicação para alcançar meus objetivos. Ao meu pai, especialmente, por me ensinar a ter paciência durante meus processos e à minha mãe, por me inspirar a ser forte e determinada.

À minha família como um todo, em especial à minha irmã Agnes, por sempre acreditar em mim e torcer por mim. Sua torcida e seu apoio me inspiram a ir mais longe.

À minha avó Wanny pelo carinho, amor e por estar sempre presente em todos os momentos importantes torcendo pelas minhas conquistas.

Às minhas irmãs de alma da República Tudo Pela Dona por todas as experiências especiais e pelos aprendizados que compartilhamos durante esses anos de faculdade e que seguiremos compartilhando na vida. O apoio de vocês por todos esses anos foi fundamental.

À minha orientadora, Vádila, por todo o suporte durante o processo de construção deste trabalho.

À Universidade Federal de São Carlos por todas as portas que me abriu e a todos os professores por tudo que me ensinaram e contribuíram tanto para a minha formação acadêmica quanto para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

O plástico é um material de baixo custo extremamente versátil, podendo ser utilizado para os mais diversos fins, desde embalagens de alimentos até materiais hospitalares. Foi uma descoberta revolucionária feita em 1907, começou a ser produzido em larga escala em 1950 e hoje, devido ao consumo e produção desenfreados, é um grande problema ambiental. O plástico é um polímero derivado do petróleo, uma fonte fóssil extremamente nociva ao meio ambiente, e seu tempo de degradação varia de 20 a 600 anos. Mesmo com esse longo período, devido às ações do tempo, eles não se degradam totalmente, dando origem a pequenas partículas que são denominadas microplásticos. Essas partículas são impossíveis de serem retiradas do meio ambiente e se acumulam há anos principalmente nos mares. Estudos encontraram microplásticos até nas profundezas do oceano, onde outros tipos de resíduos não são normalmente encontrados. Nesse cenário, a busca por materiais menos prejudiciais ao meio ambiente vem crescendo. A conscientização de parcela da população faz com que as indústrias precisem procurar soluções mais sustentáveis para seus produtos. Assim, os plásticos produzidos a partir de fontes renováveis e os plásticos biodegradáveis vem ganhando espaço no mercado. Neste trabalho será realizada uma revisão bibliográfica buscando informações relevantes sobre 3 tipos de bioplásticos: um plástico não biodegradável produzido a partir de fontes renováveis (Polietileno Verde), um plástico biodegradável produzido a partir de fontes renováveis (Ácido Polilático) e um plástico biodegradável produzido a partir de fonte fóssil (Ecoflex). O intuito é diferenciar esses três tipos de plástico, elucidando as suas classificações como ecologicamente corretos e abordando as suas principais características. Os processos de produção e as vantagens e desvantagens de cada material serão analisadas. Além disso, serão abordados biopolímeros inovadores que estão sendo estudados como alternativas de substituição a alguns polímeros convencionais. Por fim, será possível avaliar as condições em que estes materiais realmente são mais sustentáveis e quais os melhores caminhos para serem tomados em prol da sustentabilidade.

Palavras-chave: Plásticos. Microplásticos. Bioplásticos. Plásticos Biodegradáveis. Plásticos Verdes.

ABSTRACT

Plastic is an extremely versatile, low-cost material that can be used for a wide variety of purposes, from food packaging to hospital supplies. It was a revolutionary discovery made in 1907, began to be produced on a large scale in 1950, and today, due to unbridled consumption and production, is a major environmental problem. Plastic is a polymer derived from petroleum, a fossil source that is extremely harmful to the environment, and its degradation time ranges from 20 to 600 years. Even with this long period, due to the actions of time, they do not degrade completely, giving rise to small particles that are called microplastics. These particles are impossible to remove from the environment and have been accumulating for years, especially in the seas. Studies have found microplastics even in the depths of the ocean, where other types of waste are not normally found. In this scenario, the search for materials that are less harmful to the environment has been growing. The awareness of part of the population makes it necessary for industries to seek more sustainable solutions for their products. Thus, plastics produced from renewable sources and biodegradable plastics have been gaining space in the market. In this paper will be conduct a literature review seeking relevant information on three types of bioplastics: a non-biodegradable plastic produced from renewable sources (Green Polyethylene), a biodegradable plastic produced from renewable sources (Polyactic Acid), and a biodegradable plastic produced from a fossil source (Ecoflex). The intent is to differentiate these three types of plastics, elucidating their classifications as environmentally friendly and addressing their main characteristics. The production processes and the advantages and disadvantages of each material will be analyzed. In addition, innovative biopolymers that are being studied as alternatives to some conventional polymers will be addressed. Finally, it will be possible to evaluate the conditions under which these materials are actually more sustainable and which are the best ways to be taken towards sustainability.

Keywords: Plastics. Microplastics. Bioplastics. Biodegradable Plastics. Green Plastics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tempo de Degradação de Diferentes Materiais Plásticos.....	20
Figura 2 - Microplásticos primários e secundários	24
Figura 3 - Capacidade global de produção dos bioplásticos e plásticos biodegradáveis	27
Figura 4 – Classificação dos Plásticos	28
Figura 5 - Cadeia de produção dos plásticos	34
Figura 6 - Polimerização do etileno.....	37
Figura 7 - Estrutura dos isômeros do ácido lático	40
Figura 8 - Síntese de PLA por Policondensação direta	41
Figura 9 - Síntese de PLA por polimerização de abertura do anel	42
Figura 10 - Estrutura molecular do Ecoflex®	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Tipos e Aplicações dos Termoplásticos.....	18
Tabela 2 - Principais vantagens e desvantagens da compostagem.....	33
Tabela 3 - Prós e contras dos plásticos produzidos a partir de fontes renováveis	39
Tabela 4 - Empresas inovadoras na produção de biocanudos	49

LISTA DE SIGLAS

PVD – Policloreto de vinila

PLA – Ácido poliláctico

EVA – Poliacetato de etileno vinil

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PC – Policarbonato

PA – Poliamida

PMMA – Polimetilmetacrilato

PEAD – Polietileno de alta densidade

WWF – World Wildlife Found – Fundo mundial da natureza

GEEs – Gases do efeito estufa

CO₂ – Monóxido de carbono

CH₄ – Metano

BPA – Bisfenol A

CDC – Centers for Disease Control and Prevention

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

Pet – Poli tereftalato de etila

EPIs – Equipamentos de proteção individual

MNCR - Movimento Nacional dos Catadores de Recicláveis

MPs – Microplásticos

USP – Universidade de São Paulo

UV – Ultravioleta

PHB – Polihidroxibutirato

CONAR – Conselho de Autorregulamentação Publicitária

PBAT – Polibutirato

ABIPLAST – Associação Brasileira da Indústria do Plástico

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

H₂O – Água

PHB – Polihidroxibutirato

PCL – Policaprolactona

PBS – Succinato de polibutileno

PHBV – Poli (hidroxibutirato-co-valerato)

CMA – Carboximetilamido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO	15
3 METODOLOGIA PARA A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4.1 Plásticos	17
4.1.1 Cenário Atual dos Plásticos no Brasil	21
4.2 MICROPLÁSTICOS	23
4.3 BIOPLÁSTICOS	26
4.4 PLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS	30
4.4.1 Microplásticos biodegradáveis	31
4.4.2 Compostagem Industrial	32
5 PROCESSO DE PRODUÇÃO	34
5.1 INDÚSTRIA DO PLÁSTICO	34
5.2 POLIETILENO VERDE	35
5.3 ÁCIDO POLILÁTICO (PLA)	39
5.3.1 Policondensação	41
5.3.2 Polimerização por abertura do anel	41
5.4 ECOFLEX	44
6 INOVAÇÕES	47
6.1 FILMES PLÁSTICOS	47
6.2 CANUDOS	48
7 DISCUSSÃO	50
8 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos começaram a ser utilizados em larga escala na década de 1950 e, desde então, sua produção só aumenta. Em 1950, produziu-se 2 milhões de toneladas desse material, enquanto, apenas no ano de 2015, a produção foi de 380 milhões de toneladas. Se somarmos toda a produção de 1950 até 2015, teremos 8,3 bilhões de toneladas, das quais apenas 9% foram recicladas (MAZHANDU *et al.*, 2020).

O primeiro plástico, chamado Parkesine, foi fabricado a partir de celulose e apresentado na “Great London Exposition” em 1862. O nome é homenagem ao seu inventor, Alexandre Parkes. Durante os 40 anos seguintes, vários plásticos derivados de matérias primas naturais foram fabricados, mas foi apenas em 1907 que o Bakelite, o primeiro plástico totalmente sintético, foi produzido por Leo Hendrik Baekeland. Cinco anos depois, o policloreto de vinila (PVC) foi patenteado por Fritz Klatte (Atlas do plástico, 2020).

A descoberta de que o PVC poderia ser produzido a partir do cloro, um resíduo da indústria petroquímica, foi o gatilho para a expansão massiva da produção desse plástico. Além disso, a procura por esse material aumentou muito na Segunda Guerra Mundial por conta do seu uso para isolar cabos em navios da Marinha. A matéria prima barata e o aumento da demanda marcaram a ascensão do PVC, que hoje é um dos plásticos mais importantes do mercado.

Antes da descoberta do plástico sintético, materiais como bolas de bilhar, teclas de piano, candelabros e guarda chuvas eram produzidos a partir do marfim de elefantes. Os carretéis de filmes eram feitos de papel, os capacetes feitos de metal e os discos de música feitos de cera. Nos hospitais, os materiais utilizados eram tubos de borracha e garrafas de vidro não descartáveis. Os plásticos foram uma reviravolta na produção desses e de outros milhares de materiais, trazendo facilidade, higiene e barateamento de produção.

Segundo Frias, J.P.G.L (2019), os materiais plásticos são extremamente versáteis por causa de sua baixa densidade, baixa condutividade térmica e elétrica e resistência à corrosão. Eles servem de barreira contra água e oxigênio, sendo usados em uma grande faixa de aplicações, desde embalagem de alimentos até aplicações médicas e tecnológicas. Essa ampla utilização promove uma produção desenfreada e assim, o plástico, inicialmente um material revolucionário, tornou-se um grande problema ambiental.

Entre 1950 e 2015, 5 bilhões de toneladas de plástico foram descartadas em aterros ou no meio ambiente, isso é 79% de tudo que foi produzido nesse tempo. Em 2050 estima-se que

esse número atingirá 12 bilhões de toneladas. Devido às suas características químicas, ele é considerado um poluente persistente, que além de levar centenas de anos para entrar no processo de degradação, não se degrada por completo, formando partículas microscópicas denominadas microplásticos. Estas, devido ao tamanho, são impossíveis de serem retirados do meio ambiente e mais de 50 trilhões dessas partículas já estão acumuladas nos oceanos e conseqüentemente na cadeia alimentar, já que elas são ingeridas acidentalmente pelo zooplâncton e outros animais (MAZHANDU *et al.*, 2020).

“Estamos contaminados de plástico até ao comer peixe, ao usar nossas roupas e produtos de higiene. O plástico consegue poluir em todos os estágios de seu ciclo de vida, desde quando o petróleo e o gás são extraídos para produzi-lo até quando é descartado indevidamente, depositado em aterros, reciclado de maneira equívoca ou queimado”. (Atlas do Plástico, 2020, p. 8).

Dado o cenário alarmante e o aumento da conscientização de parcela da população, os bioplásticos estão ganhando espaço como uma alternativa mais sustentável. Esses plásticos são produzidos a partir de matérias primas renováveis (como cana de açúcar, amido de milho, beterraba) e têm a promessa de serem menos prejudiciais ao meio ambiente. Porém, nem todos os bioplásticos são biodegradáveis e os que são necessitam de condições muito específicas para se degradarem. Esses plásticos acabam, em sua maioria, sendo descartados de maneira incorreta e, em alguns casos, podem impactar negativamente o ambiente, assim como os plásticos comuns.

2 OBJETIVO

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo avaliar o processo de produção dos principais plásticos biodegradáveis e bioplásticos do mercado, entendendo o impacto ambiental causado por esse processo como um todo. Além disso, serão estudadas as condições em que esses plásticos de fato se decompõem e a possibilidade de encontrar essas condições no ambiente. A partir disso, será possível concluir se eles são de fato mais sustentáveis ou se são apenas estratégia de marketing de empresas como tentativa de se adequar ao momento atual, podendo ser caracterizados como “*greenwashing*”.

Também serão abordados alguns biopolímeros inovadores que estão sendo estudados para serem usados no lugar de polímeros convencionais. Esses estudos são fundamentais para encontrar alternativas de materiais adequados para cada situação.

3 METODOLOGIA PARA A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia de pesquisa utilizada foi uma pesquisa exploratória, em que se buscou revisar a literatura disponível inicialmente nos seguintes tópicos: plásticos, microplásticos, bioplásticos e plásticos biodegradáveis. Buscou-se entender o processo do surgimento do plástico, sua importância para a história, a grande dependência desse material atualmente e as consequências que essa dependência traz, sendo uma delas o aparecimento dos microplásticos, que foi tratada mais a fundo.

O conceito de microplástico foi descrito, assim como o processo de formação dessas partículas e os problemas ambientais causados por elas. Com isso, levantou-se a importância da utilização de materiais mais sustentáveis, como os bioplásticos e plásticos biodegradáveis. Foram explicitadas as diferenças entre esses dois tipos e com o avanço das pesquisas notou-se o aparecimento frequente dos principais biopolímeros disponíveis no mercado atualmente. Assim, os termos polietileno verde, PLA e Ecoflex foram adicionados às palavras chaves e o estudo nesses materiais foi aprofundado.

Para o levantamento de artigos de pesquisa foram utilizadas as bases de dados do Periódico CAPES, Google Acadêmico e Science Direct. Além disso, os relatórios “Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização”, publicado pela WWF (World Wildlife Found) em 2019; “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil” publicado pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) em 2020 e o “Atlas do Plástico” publicado pela Fundação Heinrich Böll em 2020 foram utilizados para levantamento de informações. As principais contribuições de cada estudo foram abordadas neste trabalho, a fim de apresentar e discutir as informações mais importantes para chegar às conclusões finais.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse item serão abordados os principais termos e conceitos base dessa pesquisa bibliográfica.

4.1 Plásticos

A palavra “plástico” é derivada do latim *plastiku* – “que modela”, sendo assim, materiais plásticos são quaisquer materiais flexíveis e modeláveis em condições favoráveis de calor ou pressão. Os plásticos podem ser naturais, como resinas de árvores e marfim (muito utilizados na antiguidade) ou sintéticos, sendo estes produzidos principalmente a partir de matérias primas derivadas do petróleo.

O surgimento do plástico sintético foi um processo iniciado em 1839 pelo americano Charles Goodyear (1800-1860) com a descoberta da vulcanização da borracha, que tornava esse material natural mais resistente às altas temperaturas. Dando continuidade ao processo, em 1870, o americano John Wesley Hyatt (1837-1920) usou celulose das plantas para produzir celuloide, um substituto do marfim na produção de bolas de bilhar.

O primeiro plástico totalmente sintético foi produzido por um processo de polimerização pelo químico belga Leo Baekeland (1863-1944) em 1907. Foi nomeado Bakelite e é um material infusível, capaz de suportar temperaturas de 300 °C, resistir a produtos químicos fortes e um excelente isolante elétrico (REMINGTON, 1910). Essa descoberta foi revolucionária para a ciência e a vida moderna, abrindo portas para a produção dos mais variados tipos de plásticos, amplamente utilizados no dia a dia (FRIAS, 2019)

Os plásticos sintéticos são, na maioria das vezes, derivados de petróleo e formados a partir da união de grandes cadeias moleculares, chamadas de polímeros. Suas propriedades são definidas a partir do tamanho e da estrutura das moléculas e são divididos em dois grupos: termofixos e termoplásticos.

Os termofixos, também chamados de termorrígidos, são plásticos que não podem ser remodelados ou fundidos após moldados, ou seja, sua rigidez não se altera mesmo com aumento da temperatura, que se for muito alta causa a decomposição desses polímeros. Por conta disso, a reciclagem desses materiais não é possível. Se enquadram nesse grupo o poliacetato de etileno vinil (EVA), muito utilizado na confecção de palmilhas na indústria de calçados e materiais com aplicações na produção de peças da indústria automobilística como poliuretano, poliéster e resinas epóxi (GUAMÁ, 2018)

Os termoplásticos são aqueles que não se alteram quimicamente durante o aquecimento e por isso podem ser remoldados após resfriamento (PGIRP, 2009). De acordo com Guamá et. al. 2018, como esse processo pode ser repetido várias vezes, esses plásticos são recicláveis. Eles são divididos em seis tipos, cujo nome e principais aplicações se encontram na tabela 1.

Tabela 1 – Principais Tipos e Aplicações dos Termoplásticos.

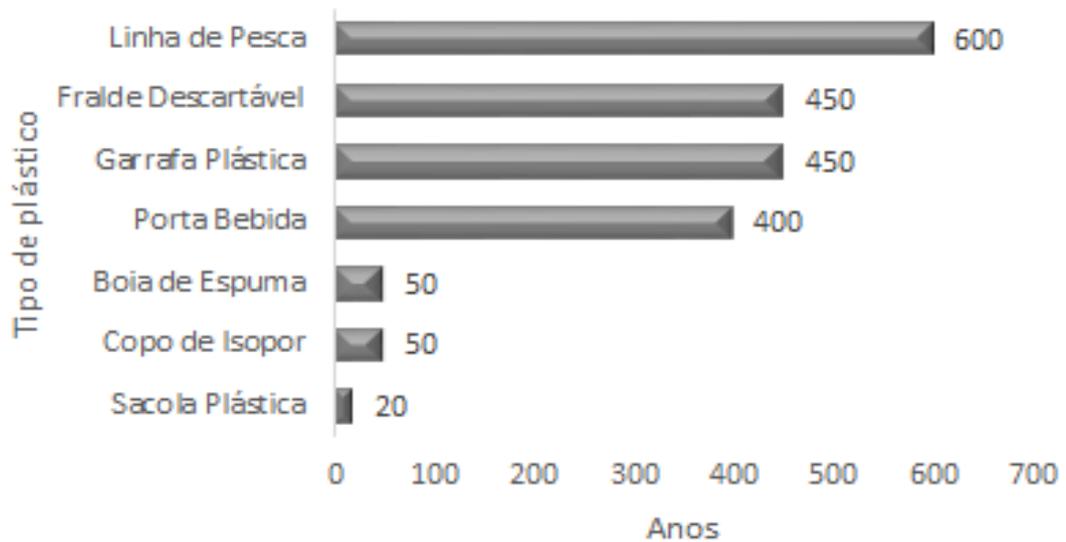
Tipo	Principais Aplicações
Polietileno Tereftalato (PET)	Embalagens de refrigerantes, sucos e produtos de limpeza
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	Engradados para bebidas, garrafas de álcool, produtos de higiene e produtos químicos
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	Embalagens de alimentos, sacos de lixo, filmes plásticos, revestimento de caixas de leite
Policloreto de Vinila (PVC)	Calçados, tubos e conexões para água, encapamento de cabos elétricos q
Polipropileno (PP)	Potes de margarina, seringas descartáveis, acabamento interno de carros
Poliestireno (PS)	Copos descartáveis, placas isolantes, material escolar e material de embalagem
Outros (PC, PA, PMMA)	Malas, CDs, roupas, cordas, paraquedas, cerdas para escova de dentes

Fonte: Adaptado de (Guamá et. al., 2018 & Atlas do Plástico, 2020).

As propriedades dos plásticos dependem do tamanho, composição e estrutura química e estão diretamente ligadas às suas aplicações. Um material que possui alta resistência a produtos químicos, como o PEAD, pode ser utilizado como embalagem para esses produtos. Muitas vezes, para melhorar as características do plástico, são misturados aditivos como plastificantes, retardantes de chama e corantes. Estes tornam o material mais durável ou mais flexível, por exemplo, porém são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde (ATLAS DO PLÁSTICO, 2020)

A alta massa molecular dos plásticos é a principal responsável por suas características especiais, sendo de maior interesse comercial aqueles cuja massa molar é superior a 10000 g/mol. Quanto maiores as moléculas, melhores as propriedades mecânicas e quanto mais entrelaçadas as cadeias que formam as moléculas do plástico, maior a resistência dos polímeros. Quando essas cadeias, além de entrelaçadas, também são unidas por ligações químicas, a resistência mecânica é aumentada e materiais muito resistentes a choque, atrito e tração podem ser produzidos (PIATTI, RODRIGUES, 2005).

Por suas características químicas e físicas os materiais plásticos têm um tempo de vida muito longo, como é possível observar a partir do gráfico da figura 1. Embora sejam altamente resistentes, eles são afetados principalmente pela radiação, mudança de temperatura, umidade e movimento das ondas do ambiente marinho. Essas condições favorecem mudanças psicotermais e promovem a degradação do plástico em pequenas partículas chamadas de microplásticos e nanoplásticos (BARNES, 2009). De acordo com Hale et al. (2018), os microplásticos são partículas que medem de 1 μm a 5 mm e que se acumulam no meio ambiente há décadas.

Figura 1 – Tempo de Degradação de Diferentes Materiais Plásticos

Fonte: Adaptado de (MAZHANDU et al., 2020).

De acordo com estimativas atuais, 40% de todo o plástico consumido se torna lixo com menos de um mês, muitos deles sendo de uso único. Como apenas uma pequena porcentagem desse plástico é reciclada, grande parte é descartada em aterros, lixões ou incinerada. (ATLAS DO PLASTICO, 2020). A reciclagem não é um processo lucrativo, já que os custos operacionais são mais altos que o preço de venda dos materiais secundários. Além disso, é um modelo de negócio arriscado pois depende de diversos fatores, como qualidade e quantidade de material coletado e o preço de venda do material que produzem já que estes, apesar do custo mais elevado, têm menor qualidade que plásticos virgens e por isso precisam ser vendidos a um preço mais baixo. Esses fatos, somados à falta de incentivo ao desenvolvimento de soluções mais ecológicas, fazem com que o descarte no meio ambiente ou a incineração sejam os destinos mais baratos e o que mais acontece atualmente (Relatório WWF, 2019).

A poluição pelo plástico tem ligação direta com a qualidade do ar, do solo e das águas. O principal vilão da poluição nesses casos são os microplásticos. Os plásticos descartados nessas condições sofrem ação do ambiente e com o tempo se degradam em pequenas partículas, que poluem tanto o solo como as águas e são inaladas ou ingeridas por animais e seres humanos (Relatório WWF, 2019).

A incineração do lixo plástico apenas transfere de um problema para o outro, liberando altas quantidades de GEEs (Gases do Efeito Estufa) como dióxido de carbono (CO₂) e metano

(CH₄). Esses gases são extremamente prejudiciais à saúde humana causando problemas respiratórios e doenças cardíacas, além de trazerem problemas ambientais, como a contribuição para o aumento da temperatura terrestre.

Além dos problemas ambientais e dos problemas associados ao descarte incorreto dos plásticos, os componentes dos plásticos apresentam um grande risco à saúde humana. Esses riscos podem ser causados pelos monômeros que compõem a molécula polimérica, pelos aditivos adicionados à molécula para melhorar suas propriedades ou uma junção dos dois. O Bisfenol A (BPA), um dos monômeros mais conhecidos e também utilizado como aditivo em alguns plásticos, foi encontrado na urina de 95% dos participantes de uma pesquisa realizada em 2005 pela CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*). Esse composto é facilmente liberado das embalagens plásticas para os alimentos e bebidas, sendo ingerido pelos consumidores. Os estudos relacionados às consequências dessa ingestão ainda são recentes, porém o BPA já é associado a problemas principalmente nas mulheres, como câncer de mama, síndrome do ovário policístico, obesidade e esterilidade (HALDEN, 2010).

4.1.1 Cenário Atual dos Plásticos no Brasil

Segundo o Atlas do Plástico de 2020, produzido pela Fundação Heinrich Böll, o Brasil é o quarto maior produtor de plástico do mundo, com 11,3 milhões de toneladas produzidas por ano. O país só fica atrás dos EUA (70,7 milhões), China (54,7 milhões) e da Índia (19,3 milhões).

De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil publicado neste mesmo ano pela ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), 16,8% dos resíduos produzidos por uma pessoa é plástico, ficando atrás apenas dos resíduos orgânicos. A estimativa do Atlas do Plástico é que um brasileiro produz em média 1 kg de resíduo plástico por semana, resultando em 52kg por semana. Se levarmos em conta toda a população brasileira, são produzidos em torno de 11 milhões de toneladas de lixo plástico por ano, o que equivale a 460 mil containers, que ocupariam 115 navios cargueiros.

A partir de um estudo do Banco Mundial, a WWF, no relatório “Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização” publicado em 2019, afirmou que apenas 1,28% das 11,3 milhões de toneladas de plástico produzidas no país é reciclada e reinserida no mercado. Isso corresponde a apenas 145 mil toneladas e mostra como o país ainda é extremamente atrasado na gestão dos resíduos plásticos. Para se ter uma base de comparação, segundo a Abal

(Associação Brasileira do Alumínio), em 2020 foram recicladas 97,4% das latas de alumínio no Brasil.

Atualmente o plástico é indispensável nos mais diversos setores. Embalagens de alimentos (PET, poliestireno, PVC), indústria têxtil (poliéster), construção civil (tubos de polietileno de baixa densidade), indústria automotiva (para-choques, painel), indústria aeronáutica (painéis, divisórias, banheiros) são apenas alguns dos exemplos das aplicações (Atlas do Plástico, 2020).

No cenário atual da epidemia do Coronavírus o consumo de plástico explodiu. Máscaras, equipamentos de proteção individual (EPIs), embalagens de alimentos, luvas descartáveis e tudo mais utilizado para proteção contra o covid-19 são produzidos a partir de plástico, um material barato e simples. Além do aumento do consumo de plástico para produção desses materiais, ainda há o fato de que na grande maioria das vezes eles são utilizados apenas uma vez e descartados logo em seguida, contribuindo para o aumento do descarte incorreto (MONTENEGRO, 2021).

A indústria do plástico se beneficia com isso, vendendo a ideia de que só consumindo produtos descartáveis é possível se proteger do Coronavírus. A praticidade do uso de máscaras, embalagens e utensílios descartáveis, somada ao medo da população de contrair o vírus e ao incentivo da indústria em relação a necessidade do descarte imediato desses produtos está causando um tsunami de lixo plástico. Para se ter uma ideia, se toda a população brasileira usasse máscaras descartáveis seriam utilizadas 3,5 bilhões por mês. Como cada máscara possui em torno de 3 gramas, totalizariam 10,5 toneladas de plástico por mês, o que é equivalente a 9 estátuas do Cristo Redentor (MONTENEGRO, 2021).

Segundo a Eccaplan, empresa de consultoria de sustentabilidade, em texto publicado em novembro de 2020, além do aumento do uso de materiais plásticos, a pandemia também teve um efeito devastador na reciclagem no Brasil, impactando principalmente aqueles que estão na linha de frente da coleta. Os catadores de materiais recicláveis, segundo o texto, são responsáveis por 90% da reciclagem do país.

A renda desses catadores, que girava em torno de um salário mínimo, reduziu em 80%, de acordo com o Movimento Nacional dos Catadores de Recicláveis (MNCR). De acordo com Maia et. al. (2020), grande parte dos catadores são de regiões periféricas ou mesmo moradores de rua que usam a coleta de reciclagem para obter algum tipo de renda. Associado à questão da vulnerabilidade social e econômica desse grupo, temos o risco à saúde a que são expostos constantemente por estarem em contato direto com embalagens pós consumo e outros tipos de lixo que podem estar contaminados. Devido às condições de vida, os catadores têm um sistema

imunológico mais baixo e muitos são grupos de risco por doenças, hábitos de vida e/ou idade, agravando o risco de vida que eles correm ao serem expostos ao vírus.

Somado a isso, as empresas que compram os recicláveis ou pararam suas atividades por tempo indeterminado ou estão pagando muito pouco pelos materiais, o que reduz ainda mais as opções dos catadores. Por causa do alto risco a que são expostos e a dificuldade em vender os materiais coletados, muitos catadores pararam suas atividades por tempo indeterminado, impactando muito na coleta e na reciclagem no país.

Nesse cenário de pandemia, com o plástico sendo utilizado cada vez mais desenfreadamente e sem nenhum tipo de política de reciclagem ou descarte correto que funcione de fato, o acúmulo desse material, e consequentemente de microplásticos, em aterros, na natureza e nos mares só cresce.

4.2 MICROPLÁSTICOS

Em 1970 foi relatada pela primeira vez na literatura científica a presença de pequenos detritos de plástico no ambiente marinho. Foi em 2004 que o termo “microplástico” foi empregado pela primeira vez, pelo pesquisador britânico Richard Thompson, para definir essas pequenas partículas e o termo é utilizado até hoje pela comunidade científica (OLIVATTO et al., 2018).

Arthur et al. descreveu, em 2009, os microplásticos como partículas menores que 5mm, enquanto Hale et al. (2018) as definiu como partículas com tamanho entre 1 µm e 5 mm e as partículas menores que 1 µm como nanoplásticos. Cole et al., em 2011, aprofundou essa definição e dividiu os microplásticos em primários e secundários. O primário é aquele que já foi produzido em tamanho microscópico para compor a formulação de determinados produtos e o microplástico secundário é aquele resultante da fragmentação de artefatos de plásticos maiores descartados no meio ambiente, que pode ocorrer tanto no ambiente aquático quanto no ambiente terrestre.

Nos microplásticos primários se enquadram os *pellets*, que são esferas usadas como matéria prima para produção de plásticos maiores e as microesferas, que são adicionadas em cosméticos, pastas dentais, esfoliantes e outros produtos da indústria de higiene e beleza. (FAPESP, 2019). Um exemplo famoso de microplástico primário é o glitter, um adereço usado principalmente no Carnaval e que virou polêmica nos últimos anos. Quando esse glitter é lavado do corpo, vai parar nas redes de tratamento de esgoto e consequentemente polui rios e mares, já que essas partículas são tão pequenas que não é possível filtrá-las (GRAGNANI, 2018).

Os microplásticos secundários são fibras provenientes de roupas sintéticas, tapetes, carpetes, partículas liberadas pelo atrito dos pneus dos veículos no asfalto, fragmentos de sacolas, redes de pesca, garrafas PET, resíduos de matérias empregados no cultivo agrícola. Podem ser fragmentos de qualquer tipo de material plástico que sofre ação dos efeitos ambientais, como raios UV, variação de temperatura, umidade, ação das ondas. Segundo texto publicado no site Parlamento Europeu, a lavagem de roupas sintéticas é responsável por 35% dos microplásticos primários liberados no meio ambiente.

A Figura 2 é um resumo dos principais microplásticos primários e suas utilizações e dos principais materiais que dão origem aos microplásticos secundários.

Figura 2 - Microplásticos primários e secundários

PRIMÁRIOS		SECUNDÁRIOS			
Pellets: esferas usadas como matéria-prima para a produção de plásticos maiores	Microesferas adicionadas em cosméticos, pastas dentais, esfoliantes e outros produtos de higiene e beleza	Fibras provenientes de roupas sintéticas, tapetes, carpetes e liberadas pelo atrito dos pneus no asfalto	Fragmentos de sacola de supermercado, garrafas PET e redes de pesca	Resíduos plásticos expostos às intempéries ambientais (raios UV, temperatura, umidade, ação das ondas)	Restos de materiais empregados no cultivo agrícola, como estufas, telas de sombreamento e filmes para cobertura do solo

Fonte: Adaptado de (Revista FAPESP, 2019).

Os microplásticos (MPs) apresentam três grandes problemas devido as suas dimensões microscópicas:

- É impossível retirá-las do meio ambiente e por isso elas se acumulam, principalmente no ambiente marinho, há décadas. Nos últimos estudos, a presença dos MPs vem sendo relatadas nas mais diferentes regiões geográficas, desde a Baía de Guanabara, Rio de Janeiro (OLIVATTO et al., 2019) até as profundezas dos oceanos (VAN CAUWENBERGHE et al., 2013). Além disso, os microplásticos também estão sendo detectados em produtos de consumo humano, causando grande preocupação; (OLIVATTO et al. 2018);
- São ingeridos por uma grande variedade de animais, principalmente do zooplâncton, que são alimentos para peixes e conseqüentemente esses microplásticos vão entrando na cadeia alimentar. Um estudo liderado por Alexander Turra, professor do Instituto Oceanográfico da USP, detectou a presença de microplásticos em 75% dos mexilhões na região de Santos. A Agência Ambiental da Áustria e a Universidade Médica de

Viena coordenaram um estudo que revelou quantidades de microplásticos nas fezes de 8 voluntários de diferentes países (FAPESP, 2019);

- Partículas pequenas têm uma superfície de contato maior por unidade de área e estão mais expostas a substâncias tóxicas e são capazes de absorvê-las com facilidade (GESAMP, 2015). Sendo assim, além dos contaminantes intrínsecos dos plásticos, os microplásticos ainda são vetores de contaminantes, como metais pesados e POPs (poluentes orgânicos persistentes) (FAPESP, 2019), substâncias que também acabam sendo carregadas pela cadeia alimentar, chegando até os seres humanos.

Um estudo realizado pela Universidade de Nova York analisou a água de 259 garrafas comercializadas por empresas líderes do mercado mundial. Em 242 dessas garrafas foram encontrados resíduos dos mais variados tipos de plásticos. Os estudos revelaram uma média global de 10,4 partículas por litro de água. Os microplásticos também estão presentes nos alimentos e no ar. A universidade canadense British Columbia, em um estudo publicado na revista *Environmental Science and Technology*, estimou que uma pessoa, levando em conta a inalação pela poluição do ar e a ingestão por meio de água e alimentos, consome entre 74 e 121 mil partículas de microplásticos (SCHUKMAN, 2018).

A maior parte dos estudos publicados focam na quantidade de microplásticos na superfície dos oceanos (e. g., OLIVATTO *et al.*, 2019; MAZHANDU *et al.*, 2020; Cozar *et al.*, 2014), porém, grandes quantidades dessas partículas também já foram detectadas nas profundezas do oceano (CAUWENBERGHE *et al.*, 2013) e no solo (FOJT *et al.*, 2020) e no ar. Dris *et al.* (2017), por exemplo, relataram que a concentração de microfibras no ambiente interno (entre 1 e 60 microfibras por m³) é mais alta do que no ambiente externo (0.3 a 1.5 microfibras por m³) e como as pessoas passam mais tempo em ambientes internos, estão sujeita a uma maior a exposição a inalação de microplásticos e seus aditivos.

A preocupação em relação a essas partículas vem aumentando e com isso os estudos relacionados a eles e suas consequências também. Os animais podem ingerir microplásticos acidentalmente ou por confundirem com alimentos por conta do tamanho, forma e coloração. Mudanças no comportamento, hábitos e desenvolvimento são notadas em organismos que têm contato com essas partículas. Dentre os estudos realizados na área, Mattsson *et al.* (2017) descobriram que microplásticos reduzem o tempo de vida do zooplâncton, Olivatto *et al.* (2018)

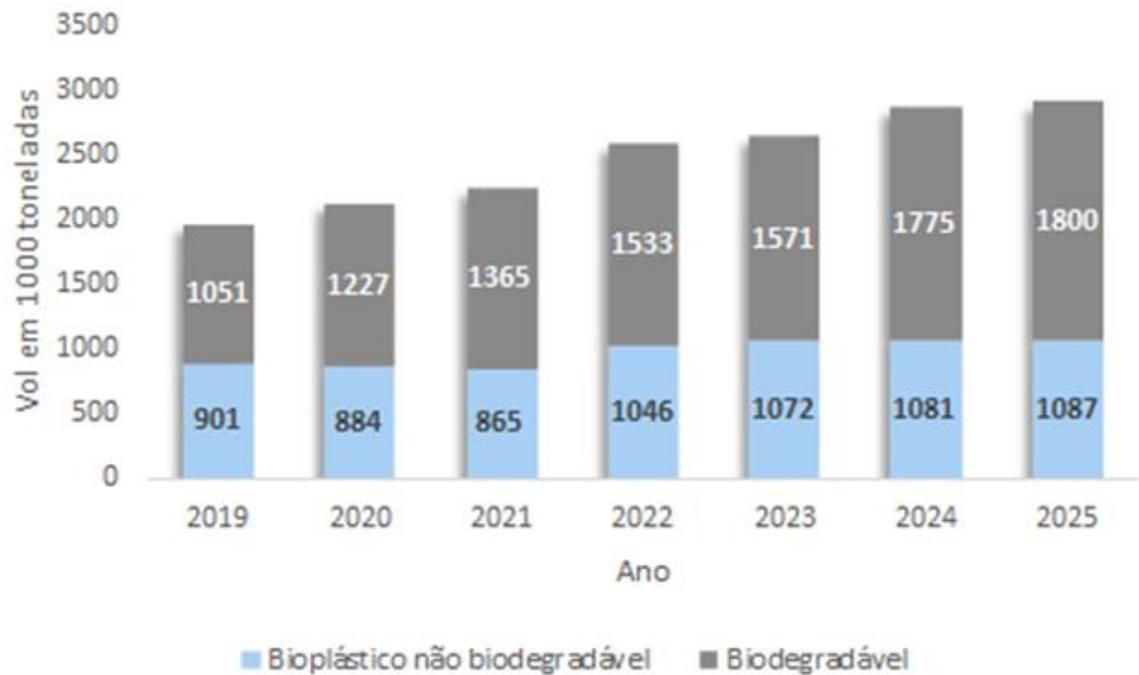
relataram que podem causar estresse e alterações hormonais e Sussarellu *et al.* demonstraram redução na capacidade reprodutiva de algumas espécies (HALE *et al.*, 2018).

O impacto da ingestão e inalação dessas micropartículas no organismo humano ainda não é totalmente conhecido. Prata (2017) sugeriu que a inalação de microplásticos pode causar doenças respiratórias e cardiovasculares e se inaladas em grande concentração, até câncer pulmonar. Tendo em vista esses e outros riscos, é de extrema importância entender a composição e dinâmicas dos MPs nos ecossistemas aquático e terrestre e também na composição de produtos de consumo humano (OLIVATTO *et al.*, 2018), além de buscar por materiais mais sustentáveis e pelo descarte correto dos mesmos, evitando aumentar o acúmulo de microplásticos nos ambientes terrestres e aquáticos.

4.3 BIOPLÁSTICOS

A produção e consumo desenfreado de materiais plásticos, o descarte incorreto dos mesmos e a crescente preocupação com a poluição por microplásticos levam as pessoas, e conseqüente a indústria, a buscarem soluções menos prejudiciais ao meio ambiente. Nesse cenário, a produção de bioplásticos vem aumentando. Segundo a European Bioplastics, a capacidade mundial de produção de bioplásticos, em 2019, foi de 2,1 milhões de toneladas, valor que deve chegar a 2,8 milhões de toneladas em 2025.

Na Figura 3 é possível observar a estimativa crescente capacidade mundial de produção desses materiais, separados em plásticos não biodegradáveis produzidos a partir de fontes renováveis e plásticos biodegradáveis.

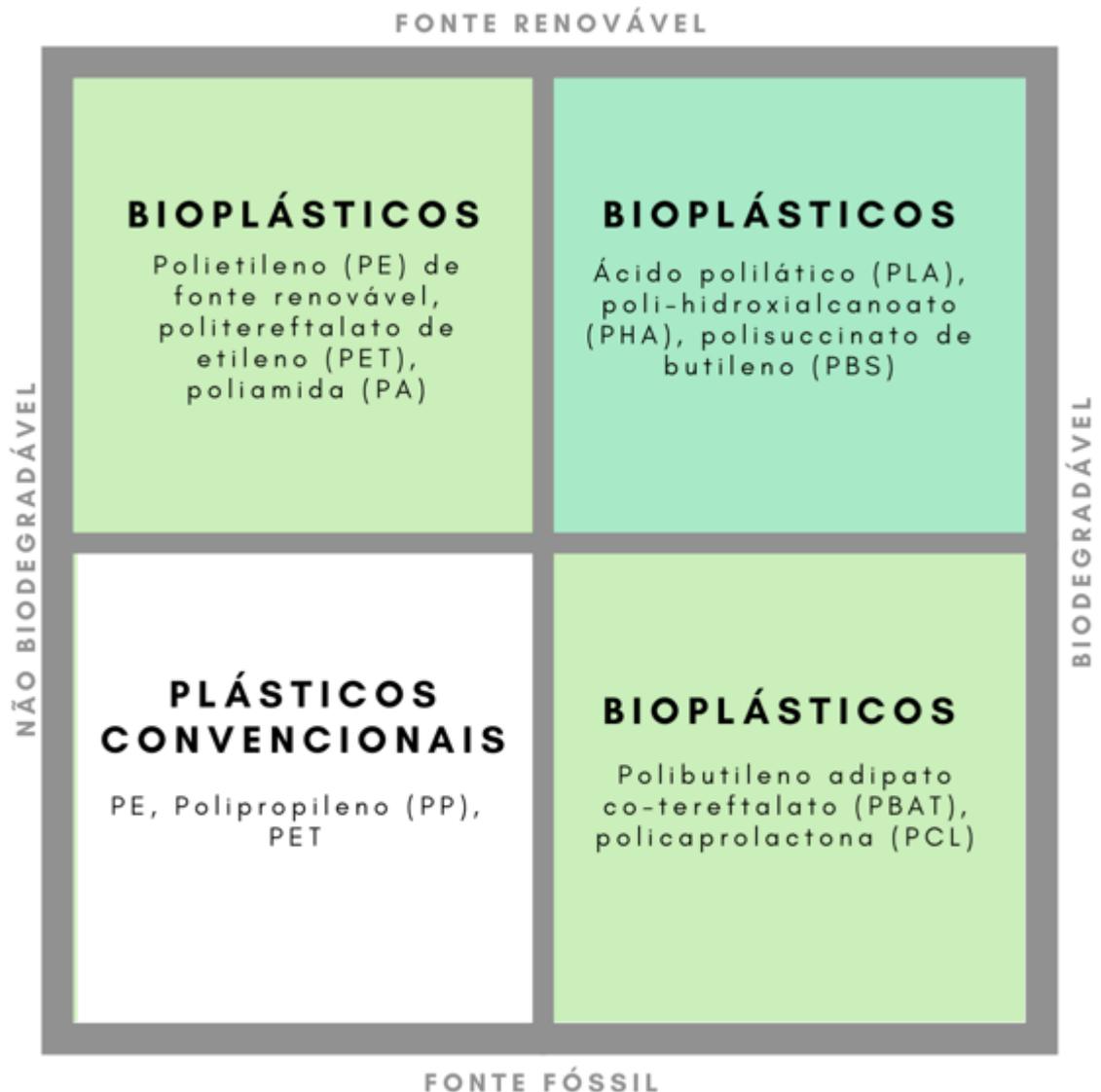
Figura 3 - Capacidade global de produção dos bioplásticos e plásticos biodegradáveis

Fonte: Adaptado de European Bioplastics.

O primeiro bioplástico foi desenvolvido em 1920 pelo agrônomo francês Maurice Lemoigne, a partir de bactérias. Ele observou células refratárias no interior da bactéria *Bacillus megaterium* e, mais tarde, esse material foi identificado como PHB (Polihidroxibutirato), um polímero biodegradável promissor e muito utilizado atualmente. Apesar de ter sido desenvolvido em 1920, o PHB só começou a ser alvo de interesse e ter suas propriedades físicas e químicas começaram a ser estudadas em 1970, por conta da crise do petróleo, principal matéria prima dos plásticos convencionais.

Segundo o conceito da European Bioplastic, os bioplásticos podem ser divididos de acordo com a sua matéria prima e com a sua degradação, como mostra o esquema na Figura 4. Os plásticos produzidos a partir de ou que contenham fontes renováveis em sua fabricação são chamados de *biobased*. Já os plásticos que se degradam em substâncias atóxicas, como água e dióxido de carbono ou são compostáveis são considerados biodegradáveis. Sendo assim, é possível que um bioplástico não seja biodegradável e que um plástico biodegradável seja produzido a partir de fontes fósseis.

Figura 4 – Classificação dos Plásticos



Fonte: European Bioplastics.

Esse conceito da European Bioplastic é o mais utilizado mundialmente e traz algumas brechas, sendo as duas principais delas o fato de não existir uma porcentagem mínima de fonte renovável utilizada na produção de um plástico para que ele seja considerado um bioplástico e o fato de as condições de biodegradabilidade de um material serem medidas em condições de controladas de compostagem, que não são atingidas em outros ambientes. Esses fatos possibilitam que empresas vendam uma imagem de sustentabilidade para seus clientes que muitas vezes não é 100% verdadeira, prática denominada *greenwashing* (FAPESP, 2020).

O termo *greenwashing* foi usado pela primeira vez em 1986 por um ambientalista chamado Jay Westervelt e pode ser definida a prática de uma organização se promover como ecologicamente correta a partir do exagero de seus atributos sustentáveis com informações infundadas ou enganosas. O *greenwashing* pode ser feito de diversas formas, como a partir da divulgação apenas de informações selecionadas ou a divulgação de comportamentos e ações expostos como sustentáveis, mas que não trazem uma mudança concreta (NETTO *et al.*, 2020). Essas ações induzem erroneamente o consumidor, principalmente por meio das propagandas, a acreditarem estar fazendo um bem ao meio ambiente ao consumir determinado produto ou contratando determinada empresa. Essa prática é crime e empresas como Fiat, Ford e General Motors foram advertidas pelo Conar (Conselho de Autorregulamentação Publicitária) por promessas ecológicas não comprovadas.

No caso dos bioplásticos, uma empresa vender um plástico produzido principalmente a partir de fontes fósseis com apenas uma pequena porcentagem de fonte renovável como ecologicamente correto pode ser considerado uma forma de *greewashing*. O consumidor acredita estar consumindo um produto mais sustentável quando de fato ele prejudica o ambiente do mesmo jeito que um plástico sintético convencional.

Outro ponto importante é que, além do processo de produção dos bioplásticos ser mais custoso em relação ao plástico convencional, vivemos em uma sociedade onde padrões de consumo mais responsáveis ambientalmente se tornam rapidamente tendência, o que aumenta ainda mais os preços e torna-os exclusivos apenas a classe mais detentora de dinheiro. As empresas que praticam o *greenwashing* ganham muito dinheiro e as pessoas que investem nesses produtos acabam pagando um preço abusivo por eles sem que de fato eles sejam mais sustentáveis (SANTOS, 2021).

Neste trabalho serão abordados mais a fundo 3 materiais de grande importância econômica e acadêmica, que representam cada um dos grupos de bioplásticos apresentados pela European Bioplastic.

O polietileno verde é um bioplástico não biodegradável de alta performance e grande importância no mercado por possuir as mesmas características do polietileno petroquímico, um dos plásticos mais utilizados no mundo. Pode ser produzido a partir de diversas fontes de biomassa, como beterraba, milho, cana de açúcar e celulose. A Braskem, empresa brasileira do ramo petroquímico, produz o polietileno verde “I’m green” a partir do etanol da cana de açúcar. A capacidade da planta da empresa é a produção de 200 mil toneladas, que correspondem a 10% da produção mundial de bioplástico (FAPESP, 2020) (CATÁLOGO BRASKEM).

O ácido polilático (PLA) é um exemplo de material que é biodegradável e 100% produzido a partir de fontes renováveis. Pode ser feito a partir de amido de milho, cana de açúcar e ser utilizado para produzir copos, talheres, garfos e filamentos para impressora 3D. É um biopolímero bastante conhecido por suas propriedades e sua capacidade de se misturar com outros compostos (FAPESP, 2020).

O Ecoflex® da empresa alemã BASF é um plástico biodegradável produzido a partir de compostos fósseis. Produzido a partir do PBAT (Polibutirato), um polímero biodegradável, o Ecoflex® tem propriedades idênticas às de um plástico convencional e é utilizado principalmente na produção de sacolas e embalagens (Redação Brasil Alemanha News, 2011).

Além dos plásticos produzidos a partir de fontes renováveis e dos biodegradáveis, também existem os oxibiodegradáveis. Estes são plásticos comuns que recebem aditivos químicos para acelerar o processo de degradação. De acordo com a ABIPLAST (2016), os aditivos fazem com que o plástico se degrade em minúsculas partículas, que são tóxicas, poluentes e carregadas pelos aditivos químicos que foram adicionados ao material. Os plásticos oxibiodegradáveis não serão tratados neste trabalho por não existirem pontos positivos sob o ponto de vista da autora na utilização deles.

4.4 PLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS

Os plásticos biodegradáveis vêm com a promessa de se decompor em biomassa, água e CO₂ em pouco tempo a partir da ação de microorganismos e de serem, em parte, compostáveis. (OAKES, 2020). Porém, essas características dependem de muitos fatores, como estrutura química, complexidade e cristalinidade dos polímeros. O processo de degradação e compostabilidade desses plásticos requer condições específicas de temperatura, pressão e umidade e a compostagem só ocorre, em totalidade, em condições de compostagem industrial (ZHU, WANG, 2020).

Para que um plástico seja considerado compostável ele precisa estar de acordo com normas e padronizações, que diferem em cada país, sendo que alguns países estão mais desenvolvidos que outros nessas questões. A norma europeia EN 13432 2000, por exemplo, tem quatro requisitos principais quanto a características do material, degradação completa, desintegração e qualidade do composto formado. Dentre outras especificações, segundo a EN 13432, é preciso que o material apresente níveis de desintegração de mais de 90% em um tempo de 12 semanas e mínimo de 90% do material desintegrado em partículas menores que 2mm sob

condições de compostagem industrial, além de um conter pelo menos 50% de matéria orgânica e baixa concentração de metais pesados.

Algumas das normas similares à EN13432 são ASTM D6400 nos Estados Unidos, AS4736 na Austrália, GB 18006 na China e ISO 17088 mundialmente. A ASTM D6400 especifica que um material seja testado conforme o ASTM 5338, um método de testagem que determina a biodegradação aeróbica de materiais plásticos em condições controladas de compostagem. A AS4739 e a ISO 17088 são bastante similares às EN13432. Já a norma chinesa é mais focada em transporte, armazenamento e rotulagem, enquanto falhou em levar em conta a questão ambiental (REN, 2003).

Um ponto importante e em comum entre praticamente todas as normas e padronizações é que elas são estipuladas a partir de condições de compostagem industrial, que não são encontradas em aterros sanitários e no ambiente natural, que é onde a maior parte desses materiais vão parar.

Em um estudo publicado em 2019, Napper e Thompson testaram a degradabilidade de sacolas plásticas comuns, biodegradáveis e oxibiodegradáveis em 3 locais diferentes: oceano, solo e ao ar livre. Os estudos mostram que em 3 anos nenhum dos tipos de sacolas se degradou rapidamente nas condições em que foram expostos e, na maioria dos casos, houve a desintegração do material em microplásticos. Nazareth *et al.* (2019) mostrou que bioplásticos imersos em água do mar por 180 dias não mostraram nenhum tipo de degradação, mesmo sendo vendidos como produtos biodegradáveis. O descarte desse tipo de material em locais incorretos, como no estudo, leva a formação de micropartículas denominadas microplásticos biodegradáveis.

4.4.1 Microplásticos biodegradáveis

A maioria dos plásticos biodegradáveis, quando não são descartados corretamente, como é o caso de grande parte deles, fica exposta a condições que não são favoráveis à degradação. Desse modo, esses plásticos se degradam em partículas menores, que se assemelham aos microplásticos de plásticos convencionais e foram denominadas microplásticos biodegradáveis.

Elas apresentam os mesmos problemas dos microplásticos convencionais já expostos no item 4.2. Além disso, uma pesquisa realizada por Zuo *et al.* (2019), mostrou que os microplásticos biodegradáveis têm uma capacidade de absorção de poluentes maior do que a dos convencionais, carregando mais dessas substâncias tóxicas para a cadeia alimentar.

4.4.2 Compostagem Industrial

A compostagem é o processo de decomposição biológica de materiais orgânicos e é responsável por transformar sólidos de origem vegetal ou animal em substâncias orgânicas com propriedades benéficas e seguradas, que são usadas como adubo, promovendo a reciclagem de nutrientes e de matéria orgânica. O processo é capaz de transformar as características físico-químicas, reduzir massa e volume, estabilizar a carga orgânica e higienizar esses materiais. Essa técnica difere da decomposição natural no quesito de ser realizada sob condições controladas, o que torna o processo mais rápido e gera um composto de melhor qualidade (CHEN et al., 2011).

De acordo com o Conselho Nacional de Padrões Orgânicos, composto é o produto de um processo controlado no qual macroorganismos quebram materiais orgânicos de origem animal ou vegetal em formas mais compatíveis com o solo. O composto deve ser produzido por meio de um processo que combina materiais com uma porcentagem de C:N entre 25:1 e 40:1. A temperatura deve ser mantida entre 55 e 75 °C por um tempo determinado de acordo com o tipo de processo e os materiais precisam ser revolvidos de tempos em tempos. O processo de compostagem industrial ocorre em 5 etapas:

- Análise dos resíduos orgânicos: os resíduos são avaliados a partir de seu processo de produção, matérias primas, insumos utilizados e características físico químicas. Para que o resíduo esteja apto a compostagem industrial, é necessário que seja aprovado por um técnico e que seu Certificado de Aprovação de Certificação de Resíduos Sólidos seja emitido pela CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental);
- Disposição dos resíduos em leiras: são misturados com cavacos de madeira e outros insumos ao chegarem na planta de compostagem e em seguida espalhados em leiras, onde são revolvidos com sopradores ou máquinas para garantir a aeração e o crescimento de microrganismos. Estes são responsáveis pela digestão desse material, além de promover aumento da temperatura do sistema, que higieniza esses resíduos e elimina os patógenos.

- Desprendimento do calor na termofílica: a mistura de compostagem fica disposta nas leiras por 55 dias com temperaturas de 55°C, que garantem higienização, eliminação de patógenos e redução da umidade da massa, que deve ser no máximo 40% ao final do processo;
- Peneiramento: o composto é peneirado para retirada de fragmentos de areia, que retornam para o início do processo. O composto fica no processo de maturação na peneira por até 30 dias.
- Aplicação em áreas agrícolas: após todas as etapas, esse produto se torna um fertilizante orgânico e é registrado no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Esse fertilizante pode ser utilizado tanto na agricultura, em grandes plantações, como em casa em plantas ornamentais;

Tabela 2 - Principais vantagens e desvantagens da compostagem

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Compostagem pode decompor materiais orgânicos, que representam a maior porcentagem de resíduos gerados	Emissões de odor, poeira e aerossóis
Sequestra carbono do ar, reduzindo os gases do efeito estufa e adiciona esse carbono a terra	Instalações de compostagem necessitam de um espaço maior do que outras tecnologias de gerenciamento de resíduos
Produto serve com um condicionador do solo, conservando a umidade, melhorando a infiltração e reduzindo a erosão	Produto ainda não tem relevância no mercado e por isso não é tão viável economicamente

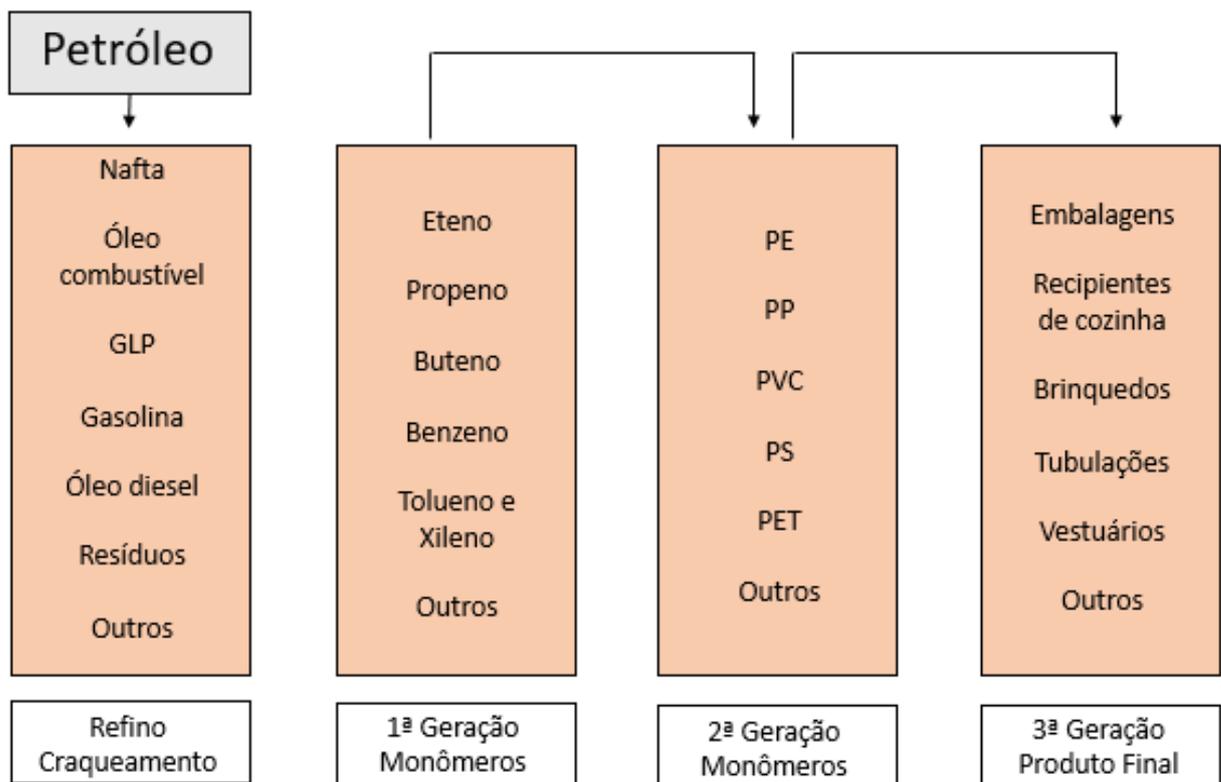
Fonte: Adaptado de (Epstein, 2017).

5 PROCESSO DE PRODUÇÃO

5.1 INDÚSTRIA DO PLÁSTICO

O plástico tem como matéria-prima principais derivados de petróleo. Estima-se que 4% da produção mundial de petróleo é usada para esse fim. (OLIVATTO et al., 2018). Na Figura 5 tem-se a cadeia de produção simplificada dos plásticos.

Figura 5 - Cadeia de produção dos plásticos



Fonte: (OLIVATTO, 2017).

O petróleo bruto é uma mistura de uma série de hidrocarbonetos que passa por várias etapas de um processo de refino que gera muito subprodutos, especificados no primeiro retângulo da figura 5. A nafta é a principal matéria prima do plástico e usada pelas indústrias de primeira geração para produzir os principais monômeros usados na produção dos plásticos. Na indústria de segunda geração são produzidas as resinas poliméricas ou “pellets” e a indústria de terceira geração, também conhecida como indústria da transformação, é responsável pela moldagem dos produtos finais (OLIVATTO et al., 2018).

A exploração do petróleo é uma atividade que está ligada a diversos problemas ambientais como: vazamentos de óleo que promovem alteração nos ecossistemas costeiros e terrestres, desastres ambientais, poluição do ar, degradação ambiental, desmatamento, extinção de espécies, dentre outros impactos. Essa prática envolve alto risco ambiental e mesmo com alto monitoramento e não há como evitar totalmente que acidentes aconteçam (SANTOS, 2012).

O processo de refino do petróleo promove diversas emissões atmosféricas e de resíduos sólidos. Os principais gases liberados são os óxidos de enxofre e nitrogênio, monóxido de carbono, materiais particulados e hidrocarbonetos. Dentre os resíduos sólidos têm-se os sedimentos do fundo dos tanques de armazenamento do petróleo cru, borras oleosas, argilas de tratamento e sólidos emulsionados em óleo. Esses sólidos possuem elementos químicos tóxicos e é necessário tratamento intenso antes da disposição desses resíduos (MARIANO, 2001).

Para melhorar o processamento e o desempenho dos materiais plásticos são adicionados a eles substâncias químicas chamadas aditivos, que podem ser plastificantes (melhoram resistência química), estabilizantes (melhoram resistência à luz e oxidação), corantes, fillers (melhoram resistência ao atrito). Esses aditivos podem ser perigosos e alguns são comprovadamente tóxicos, como é o caso do Bisfenol A. Durante a degradação dos plásticos eles são liberados no meio ambiente ou carregados pelas partículas de microplásticos e além disso, podem ser liberados nos alimentos quando usados em plásticos de embalagens alimentícias, causando problemas de saúde nos humanos (COLTRO, 2000).

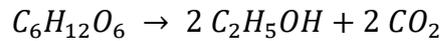
5.2 POLIETILENO VERDE

O polietileno verde é produzido, principalmente, a partir do etanol da cana de açúcar. Tem as mesmas propriedades, aplicações e desempenho que o polietileno comum e é impossível identificar suas diferenças visualmente. O fato desse biopolímero ser similar ao polietileno de fontes fósseis também traz vantagens, já ele pode substituir o polietileno convencional em todos os produtos sem que haja perda de funcionalidade, resistência ou estética do material.

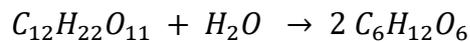
A Braskem, empresa brasileira, é líder no mercado mundial de produção desse polímero, com o polietileno verde I'm green bio-based, que está presente no mercado desde 2010 (Catálogo Braskem, 2016).

Na produção do PV, o etanol é produzido a partir da cana de açúcar, no qual microorganismos, a partir da fermentação, quebram moléculas de açúcar (hexoses) presentes nessa matéria prima em duas moléculas de etanol e duas de gás carbônico, segundo a Equação

1. Como na cana a sacarose é o açúcar predominante, é necessário um processo anterior é fermentação, chamado inversão da sacarose (Equação 2), na qual a sacarose se transforma em glicose e frutose a partir da ação de uma enzima chamada invertase.



Equação 1: Obtenção do etanol a partir da hexose



Equação 2: Inversão da sacarose

A cana de açúcar passa pelos seguintes processos para obtenção de etanol (NOVA CANA, 2012):

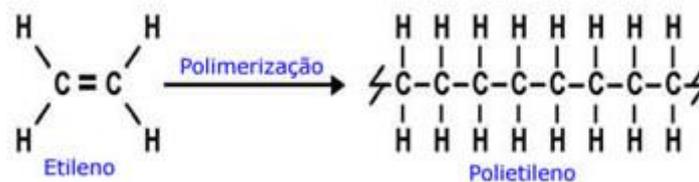
- Lavagem: retirada de impurezas;
- Moagem: a cana lavada passa por trituradores e 70% se torna um líquido chamado melado e 30% (parte sólida) se transforma em bagaço, que pode ser utilizado para geração de energia;
- Eliminação de impurezas: o melado passa por uma peneira para retirar resquícios de bagaço e outras impurezas. Essa prática é realizada a partir da decantação dessas partículas;
- Fermentação: o caldo puro é levado a tanques e recebe a adição de microorganismos, sendo a mais comum uma levedura denominada *Saccharomyces cerevisia*. Esse processo dura horas e a levedura se alimenta do açúcar do caldo, quebrando-o em etanol e gás carbônico, segundo a Equação 1. O resultado desse processo é uma mistura contendo leveduras, açúcar não fermentado e em torno de 10% de etanol;

- Destilação: o vinho passa por um processo de destilação para que o etanol seja separado da mistura a partir do aquecimento em colunas de destilação. Assim, o álcool é evaporado e depois condensado.

Após essas etapas, o etanol é desidratado para a obtenção de eteno, também conhecido como etileno. Este monômero passa por um processo de polimerização para dar origem ao “mero”, que são as partes do polímero.

O processo de polimerização consiste na quebra da instauração da molécula do eteno. A ligação pi da instauração é rompida e uma valência livre surge em cada carbono da extremidade. Essa polimerização é chamada de polimerização por adição e as moléculas são adicionadas umas às outras repetidas vezes a partir dessas valências livres, formando o polietileno. A Figura 6 abaixo mostra como ocorre esse processo.

Figura 6 - Polimerização do etileno



Fonte: (Descomplica, 2016).

A produção de etanol a partir da cana de açúcar é um processo menos custoso, chegando a custar, por exemplo, 4 vezes menos que o etanol de beterraba, processo bastante utilizado na Europa. Além disso, a produtividade da cana para produção de etanol é bem mais alta do que a da beterraba e a do milho (EUA). Esse é um processo que pode ser otimizado a partir de tecnologias, ampliando a produtividade e reduzindo a necessidade de aumentar áreas de cultivo. Em um estudo realizado pela Braskem sobre o ciclo de vida do polietileno verde, concluiu-se que a produção de uma tonelada desse material captura e fixa até 2,5 toneladas de CO₂ da atmosfera, enquanto cada tonelada de polietileno petroquímico produzido lança 2,1 toneladas de CO₂ para a atmosfera.

Um dos pontos negativos da produção do etanol por essa rota são as queimadas de cana de açúcar, uma prática que promove a queima da palha e das canas verdes que não são utilizadas no processo de produção do etanol e do açúcar, facilitando a colheita. Essa prática, apesar do Decreto Federal n. 2.661/98 que estabelecia o fim gradativo da queima da cana-de-açúcar para os próximos 20 anos (1998-2018) ainda é bastante comum no Brasil e traz grandes

consequências ambientais e para a saúde humana. As emissões de grandes quantidades gases do efeito estufa como monóxido de carbono, hidrocarbonatos e óxidos de nitrogênio, a poluição de ar por fumaça e fuligem são alguns dos efeitos no ambiente. Como consequência, temos efeitos como sintomas de doenças respiratórias, agravamento de casos de asma e hospitalização de idosos e crianças, que são os mais afetados por essa poluição do ar (RIBEIRO, 2008).

Com o aumento do consumo de etanol tanto em combustíveis quanto como matéria prima para outros processos, como a produção de polietileno verde, faz-se necessário buscar processos mais eficientes de produção. A seleção de cepas de leveduras mais produtivas, plantas melhoradas e biorreatores otimizados são um caminho para tornar o processo de produção do etanol mais eficiente. Além disso, a obtenção do etanol celulósico, conhecido como etanol de segunda geração, é uma ótima solução, já que promoveria o aproveitamento total da cana de açúcar e reduziria as queimas, já que ele é produzido a partir da palha e do bagaço da cana de açúcar, chamados de biomassa lignocelulósica. Apenas 1/3 da planta é utilizada na obtenção de açúcar e o restante, que seria desperdiçado, pode ser hidrolisado, por enzimas capazes de hidrolisar celulose e hemicelulose, a fim de se obter a glicose e posteriormente o etanol (OLIVEIRA, MANTOVANI, 2009).

Segundo Santiago e Rodrigues (2017), os materiais lignocelulósicos são compostos principalmente por uma estrutura aromática chamada lignina e polímeros de carboidratos denominados celulose e hemicelulose. Silva et al. (2019) determinaram as três etapas principais da obtenção do etanol de segunda geração: pré-tratamento, hidrólise enzimática e fermentação, sendo a natureza recalcitrante (resistente) da biomassa lignocelulósica o maior desafio técnico e econômico dessa produção. A interação intermolecular e a ausência de água na estrutura da molécula tornam difícil desestruturá-la e convertê-la em monossacarídeos fermentescíveis (SILVA *et al.*, 2019).

Santos *et al* (2012) ao estudarem o potencial da palha de cana de açúcar para a produção do etanol concluíram que o aproveitamento da palha pode contribuir significativamente para o aumento da produção de etanol. De acordo com o estudo, para cada tonelada de cana processada são gerados 140kg de bagaço e 140kg de palha, como a produtividade média por hectare no Brasil é 85 toneladas de cana, são geradas 12 toneladas de bagaço e 12 toneladas de palha por hectare de cana plantado. Considerando que toda a glicose da cana seria utilizada, tanto do bagaço quanto da palha, seria possível dobrar o volume de etanol produzido sem aumentar a área plantada. O desafio atual, que vem sendo enfrentado por diversos centros de pesquisa, é encontrar tecnologias que viabilizem economicamente a técnica de produção do etanol celulósico. É interessante pontuar que para que seja possível fazer o aproveitamento dessa

palha, as queimadas precisam deixar de existir, o que seria mais um ponto positivo na questão ambiental e saúde humana.

Mülhaupt (2012), em seu estudo sobre plásticos produzidos a partir de fontes renováveis, trouxe os principais prós e contras relacionados à produção e utilização de biopolímeros. Os principais pontos levantados pelo autor estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Prós e contras dos plásticos produzidos a partir de fontes renováveis

Prós	Contras
Fontes renováveis conservam fontes não renováveis	Competição com a produção de alimentos gerando aumento nos custos dos alimentos
Redução das emissões de dióxido de carbono	Agricultura intensificada, aumento do uso de fertilizantes, desmatamento
Culturas energéticas como incentivos não alimentares para agricultores em países industrializados com excesso de produção de alimentos	Monoculturas de culturas energéticas ameaçam a biodiversidade
Sem toxicidade e sem riscos para a saúde	Desintegração pode gerar micropartículas

Fonte: (Mülhaupt, 2012).

5.3 ÁCIDO POLILÁTICO (PLA)

O ácido polilático é um polímero sintético termoplástico composto por várias cadeias de repetição do ácido láctico, que é obtido a partir da fermentação de vegetais ricos em amido. Conhecido como polímero do século XXI, é o único polímero de base biológica, biocompatível e biodegradável produzido em larga escala. (PRETULA; SLOMKOWSKI; PENCZEK, 2016). É um plástico 100% biodegradável produzido a partir de fontes renováveis, que pode ser pela sua semelhança com um plástico convencional pode ser usado para os mais diversos fins.

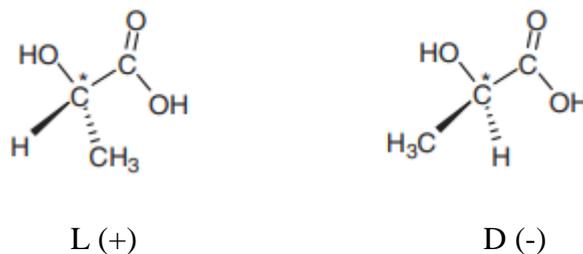
Atualmente a sua utilização mais ampla é na produção de filamentos de impressora 3D, composição de embalagens de alimentos e aplicações médicas. Suas características como elevada dureza superficial, baixa contração, boa adesão entre as camadas, facilidade de

impressão em qualquer tipo de impressora e boa aderência deixam esse plástico em uma posição de destaque no setor das impressoras 3D. Além disso, sua biocompatibilidade, ou seja, sua habilidade em ser compatível com tecidos vivos, torna-o muito interessante para aplicações médicas, como na produção de implantes e elementos de fixação óssea (PRETULA; SLOMKOWSKI; PENCZEK, 2016).

A produção do ácido láctico pode ser obtida a partir de síntese química ou a partir da ação fermentativa de microrganismos como fungos, bactérias e leveduras. A fermentação é o processo mais econômico e estima-se que 90% do total de ácido láctico produzido no mundo é a partir da fermentação por bactérias (ZHOU et al.,2006). Esse processo tem vegetais (milho, beterraba e cana de açúcar) como matérias primas. Rotas alternativas de produção, como a partir do soro do leite (resíduo da indústria do queijo) e caldo de cana de açúcar, por exemplo, estão sendo estudadas a fim de tornar o processo ainda mais econômico. (BERNARDO, 2014).

O ácido láctico possui um carbono quiral (assimétrico) em sua estrutura química. Esse carbono faz com que essa molécula exista em duas formas (Figura X), como o isômero levogiro L(+) e como o isômero dextrogiro D(-). (PRETULA; SLOMKOWSKI; PENCZEK, 2016). Os polímeros produzidos a partir dos isômeros levogiro e dextrogiro tem propriedades bem similares com os produzidos por fontes fósseis. A síntese química produz apenas a mistura racêmica DL, enquanto o processo fermentativo produz tanto os isômeros separados quanto a mistura racêmica, dependendo do microrganismo utilizado (SODEGARD e STOLT, 2002).

Figura 7 - Estrutura dos isômeros do ácido láctico



Fonte: (PRETULA; SLOMKOWSKI; PENCZEK, 2016).

Após o processo de fermentação é necessária a separação do caldo fermentativo e a purificação do ácido láctico para que se dê continuidade para a produção do PLA, que pode ser

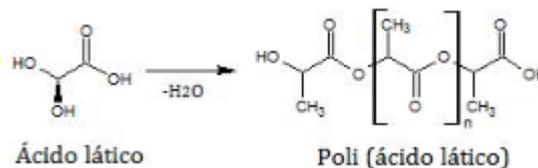
obtido por algumas rotas, sendo as duas principais a policondensation do ácido láctico (DO) e a polimerização por abertura do anel lactídeo (ROT).

5.3.1 Policondensation

De acordo com SOEGARD e STOLT (2002) a policondensation é a rota mais simples e econômica de produção do PLA, porém o produto obtido apresenta uma baixa massa molecular, o que confere propriedades mecânicas abaixo do padrão esperado para a maioria das aplicações onde é utilizado. Estudos para aprimorar esse processo obtiveram algum sucesso e já é possível obter um poliácido láctico com maior massa molecular a partir da manipulação do equilíbrio de água, ácido láctico e PLA.

Nessa rota água condensada é removida sem permitir que o monômero de L-lactídeo seja evaporado no equilíbrio. As condições ideais para esse processo são temperaturas entre 180 e 200 °C, baixa pressão de 5 Torr e um tempo longo de reação com catalisador e solvente azeotrópico (RHAMAN, BHOI, 2021).

Figura 8 - Síntese de PLA por Policondensation direta



Fonte: (HORBAN *et al.*, 2016).

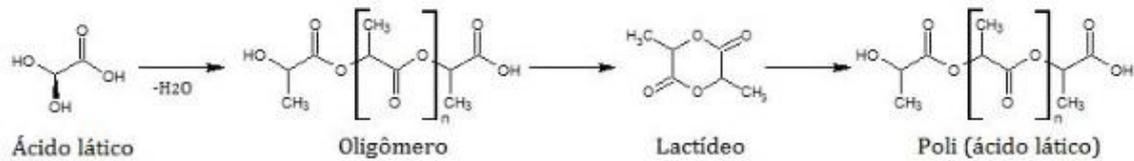
5.3.2 Polimerização por abertura do anel

Essa rota apresenta um nível maior de complexidade, porém é a mais utilizada no mercado por produzir um polímero final de alta massa molecular, com propriedades químicas que podem ser melhor controladas nas aplicações (SOEGARD, STOLT, 2012). Nesse processo, um composto intermediário chamado lactídeo é utilizado. (CASTRO-AGUIERRI *et al.*, 2016).

A polimerização por abertura do anel inclui a policondensation do ácido láctico com a formação do oligômero seguida da despolimerização deste em lactídeo, que é feita a partir do

aumento da temperatura e redução da pressão da policondensação. O PLA é obtido pela abertura do anel do lactídeo, como mostra a equação química na figura X (SODEGARD, STOLT, 2012).

Figura 9 - Síntese de PLA por polimerização de abertura do anel



Fonte: (HORBAN *et al.*, 2016).

Enquanto os processos de produção dos bioplásticos não biodegradáveis e dos biodegradáveis de fontes fósseis são muito parecidos dos plásticos convencionais e são realizados nos mesmos equipamentos, o processo de produção dos plásticos biodegradáveis produzidos a partir de fontes renováveis tem alguns aspectos particulares importantes. Esses plásticos tendem a ser higroscópicos e por conta disso a umidade pode causar vários problemas como formação indesejada de espuma, hidrólise e aceleração da degradação térmica, sendo necessário uma etapa de pré secagem antes do início do processo. Outro aspecto é a variação de lote para lote, que pode gerar anomalias de fluxo como deslizamento de paredes, devido as geometrias e propriedades heterogêneas da matéria prima, como por exemplo das fibras naturais utilizadas para reforçar polímeros (LASKE, 2015). Esses fatores tornam o custo de produção do PLA bem elevado, o que não o torna competitivo no mercado, já que os materiais produzidos a partir desse biopolímero tem custo muito mais elevado que os materiais plásticos convencionais.

O L-ácido láctico, além de ser produzido eficientemente por fermentação a partir de fontes renováveis, possui uma alta temperatura de condensação de 175°C e alto grau de cristalinidade. A degradação do PLA acontece de acordo com o ambiente a que ele está exposto. Em seres humanos e animais, ele é hidrolisado e os oligômeros solúveis são metabolizados pelas células. No ambiente, é hidrolisado em oligômeros de menor massa molecular e posteriormente mineralizado em CO₂ e H₂O pelos microorganismos presentes no solo. O L-PLA pode ser degradado por ação enzimática, hidrólise ou pela ação de microorganismos. (TOKIWA, CALABIA, 2006).

Em estudo de Kale *et al.* (2006) comparou-se a degradação de uma garrafa de água e um recipiente de PLA em compostagem industrial e no ambiente externo por um período de 30 dias. As condições de compostagem foram temperatura > 60°C, umidade relativa > 65% e Ph

em torno de 7,5. Nos primeiros dias de compostagem, as embalagens começaram a reduzir o tamanho, em seguida foram gradativamente perdendo a forma, coloração e se tornaram quebradiças. No dia 30 foram observados apenas alguns resíduos das embalagens, principalmente da parte da tampa da garrafa. As embalagens que ficaram no ambiente externo, sofrendo ação de chuva, radiação solar, neve, vento e variações de temperatura e pressão não apresentaram nenhum tipo de mudança visível durante os 30 dias.

De acordo com Suyama *et al.* (1996), a degradação de plásticos biodegradáveis depende dos microorganismos existentes no ambiente, porém pouco se sabe sobre quais microorganismos são responsáveis pela degradação de cada tipo de plástico biodegradável. Por isso, o objetivo desse estudo foi isolar bactérias presentes no solo que são capazes de fazer essa degradação. Foram isoladas 39 bactérias morfologicamente diferentes capazes de degradar PHB, PCL e PBS, porém, nenhuma capaz de degradar o PLA. Dessa forma, pode-se concluir que essas bactérias não estão amplamente espalhadas pelo ambiente e que o PLA é menos suscetível a ataques microbianos comparado a outros poliésteres (TOKIWA, CALABIA, 2006).

Segundo Pranamuda *et al.* (1997), os estudos até aquele momento tinham focado muito na degradação enzimática ou hidrolítica do PLA. Sendo assim, fazia-se necessário um estudo a fim de demonstrar a biodegradabilidade do PLA por microorganismos. Foi assim que foram capazes de isolar a bactéria *Amycolatopsis sp.*, que se mostrou capaz de degradar 60% do plástico filme de PLA utilizado no experimento em menos de 15 dias. A conclusão foi que, mesmo com a escassez de microorganismos que degradam o PLA no solo, a *Amycolatopsis sp.* é uma cepa eficaz no tratamento de resíduos de plástico PLA.

Chamas *et al.* (2020), analisaram a taxas de degradação plásticos convencionais e biodegradáveis em diferentes ambientes. O PLA mostrou taxas mais altas em condições de compostagem e aterros, enquanto sua taxa de degradação em ambientes marinhos é menor e pode ser comparada a taxa de degradação de polímeros a base de petróleo, como polietileno de baixa e de alta densidade. Isso acontece porque espera-se que os plásticos biodegradáveis se degradem totalmente em condições de compostagem industrial, cujas temperaturas são acima de 60 °C, o que não acontece em ambientes marinhos, onde a temperatura raramente ultrapassa os 20 °C. De acordo com o estudo, em aterros a taxa de degradação do PLA foi 21 vezes maior do que a do polietileno de alta densidade, isso porque as temperaturas reportadas nesse ambiente foram entre 80-100 °C, o que é suficiente para degradar o PLA, desde que haja a presença da umidade.

Gironi e Piemonte (2013), fizeram uma comparação entre a avaliação do ciclo de vida de alguns bioplásticos (incluindo o PLA) e plásticos convencionais. Essa análise levou em conta

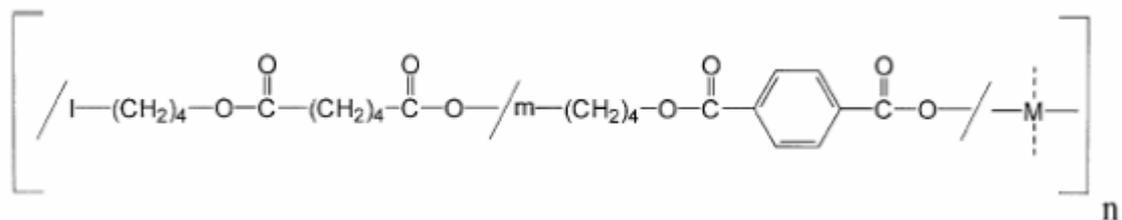
fatores que determinam o impacto desses plásticos no ambiente como contribuição para o aquecimento global, toxicidade aos seres humanos, depleção abiótica (liberação de combustíveis fósseis, metais, minerais), acidificação e eutrofização. A partir disso, Gironi e Piemonte demonstraram que o uso de plásticos produzidos a partir de biomassa é mais vantajoso na questão de demanda de energia e na redução da emissão de gases do efeito estufa. Porém, por outro lado, tem um maior impacto na acidificação e eutrofização do solo por conta dos fertilizantes e outros químicos utilizados nas plantações das matérias primas.

5.4 ECOFLEX

Ecoflex® é o nome comercial do poli (butileno adipato co-tereftalato) (PBAT). Ele é um polímero biodegradável produzido a partir de fontes fósseis. O PBAT tem como características alta massa molecular e estrutura química de cadeia longa ramificada que garantem a esse material elasticidade, resistência à água e a ruptura (CAPELEZZO et al.,2017). Essas características, somadas à resistência à gordura e à mudança de temperatura tornam esse material ideal para aplicações em embalagens de alimentos como frutas, verduras e fast food, garantindo que esses alimentos não percam o sabor e o frescor (PELLICANO, 2008).

Foi lançado no mercado em 1998, pela empresa alemã BASF e a estrutura molecular que compõe os meros está representada na Figura 10, sendo M os extensores de cadeia ou componentes modulares (PELLICANO, 2008).

Figura 10 - Estrutura molecular do Ecoflex®



Fonte: (PELLICANO, 2008)

O processo de biodegradação do Ecoflex® vem sendo bastante estudado. Os testes realizados em laboratórios, nos quais o Ecoflex® foi totalmente imerso em um inóculo microbiologicamente ativo obtiveram bons resultados: o polímero completo e todos os oligômeros e monômeros formados em qualquer estágio da degradação foram metabolizados

em mais de 99%, sem que encontrassem qualquer resíduo. O Ecoflex® também foi testado em condições controladas de compostagem e após 80 dias, 90% da evolução teórica do CO₂ foi alcançada, o que está de acordo com a ISO 17088, norma que determina parâmetros de biodegradabilidade (SIEGENTHALER et al., 2011).

Uma das vantagens do Ecoflex® é ser uma excelente blenda para bioplásticos e plásticos biodegradáveis, que normalmente não possuem propriedades tão boas. Além disso, essa mistura reduz de impactos ambientais e o custo de produção do Ecoflex®. Nesse cenário, a BASF desenvolveu o Ecovio®, uma blenda de Ecoflex® (PBAT) com ácido polilático (PLA), que além de ser biodegradável e compostável, possui alto teor de fonte renovável, já que o ácido polilático, como já visto no item 4.3 é obtido principalmente a partir da fermentação de fontes vegetais.

O custo de produção dos biopolímeros ainda é bastante caro quando comparado aos baixos preços dos plásticos convencionais e muitas vezes esse custo se torna uma barreira e inviabiliza a produção dos mesmos e é um dos maiores empecilhos na substituição dos polímeros petroquímicos, que tem um custo muito baixo (ISHIAKU et al. 2002). Por isso, e também com o intuito de melhorar as propriedades de degradação, vários pesquisadores vem estudando o efeito da adição de matérias primas renováveis abundantes e mais baratas nos biopolímeros principalmente no Ecoflex, que tem uma grande facilidade em formar blendas. Alguns desses estudos serão citados logo em seguida.

Pellicano et al. (2009) estudaram a influência da adição de amido de mandioca na biodegradação da blenda polimérica de PHBV/Ecoflex®. O PHBV é o poli(hidroxibutirato-co-valerato), também conhecido como Biocycle® e a adição de amido de mandioca, um aditivo abundante e biodegradável, visa reduzir os custos de produção e aprimorar as características biodegradáveis desse polímero. A partir de experimentos, os pesquisadores concluíram que a adição de 30% de amido de mandioca aumenta a biodegradabilidade, porém fragiliza a blenda PHBV/Ecoflex por atuar como um composto inerte e existir uma baixa adesão no composto polimérico.

Casado (2009), em seu estudo sobre o desenvolvimento e caracterização de blendas com diferentes proporções de Ecoflex e proteína de soja, demonstrou que uma blenda de Ecoflex®, proteína de soja, óleo epoxidado e anidro maleico na proporção 75/25/5/1 apresenta propriedades similares ao polietileno de baixa densidade (PEBD). Além disso, para esse caso a taxa de degradação praticamente dobrou quando comparada ao Ecoflex® puro. O óleo epoxidado foi utilizado como estabilizante, a fim de melhorar a resistência ao calor e retardar o

envelhecimento, já o anidro maleico, como compatibilizante com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas. Esse estudo mostrou que a adição da proteína de soja torna o material mais sustentável, por possuir uma porcentagem de matéria produzida a partir de fontes renováveis e também aumenta a taxa de degradação do material (CASADO, 2009).

Em 2005, a fim de viabilizar economicamente a blenda PHB/Ecoflex, Casarin et al. estudaram os efeitos da adição de 30% de pó de madeira na blenda de composição 75% PHB e 25% Ecoflex. O PHB é um importante biopolímero, com propriedades similares às do polipropileno (PP), fabricado a partir da fermentação de açúcares. “Após o consumo o PHB pode ser descartado em aterros sanitários sem causar impactos ao ambiente, podendo ser biodegradado por bactérias e fungos” (MALGONI, CASARIN, 2012). Tanto o custo do Ecoflex quando o do PHB são altos e a partir da adição do pó de madeira foi possível reduzir esse custo e além disso, concluiu-se, no estudo de Casarin et al., que essa modificação da blenda foi eficiente e contribui para melhorar ou manter algumas propriedades como módulo de elasticidade e temperatura de fusão.

A maior desvantagem é ser produzido a partir de fontes fósseis provenientes principalmente do petróleo, uma fonte não renovável e que acarreta em diversos problemas ambientais. Os riscos da exploração do petróleo são altíssimos, principalmente relacionados a vazamento desse óleo e explosões. Além disso, da mesma maneira que o ácido poliláctico (PLA), esse plástico é biodegradável em condições de compostagem industrial. Quando descartado em aterros, no ambiente e nos mares a biodegradação praticamente não ocorre ou ocorre parcialmente dando origem aos microplásticos.

6 INOVAÇÕES

Diante do exposto, nota-se a importância de encontrar alternativas de fato mais sustentáveis para os materiais plásticos hoje utilizados. A principal dificuldade encontrada é que os materiais verdes e os biodegradáveis costumam ter propriedades mecânicas inferiores quando comparados aos convencionais. Além disso, as propriedades exigidas para cada tipo de uso do plástico são bem diferentes. Sendo assim, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com diferentes matérias primas a fim de encontrar materiais alternativos que sejam de boa qualidade e consigam suprir bem as necessidades enquanto são mais sustentáveis para o meio ambiente. Em seguida serão abordadas algumas dessas pesquisas.

6.1 FILMES PLÁSTICOS

A poluição do meio ambiente devido ao descarte de filmes plásticos de polímeros sintéticos sem nenhum controle é um grande problema mundial (HENRIQUE *et al.* 2008). A necessidade do uso de embalagens para proteger os alimentos do ambiente externo e preservá-lo em bom estado por mais tempo associada ao baixo custo e boas propriedades dos plásticos sintéticos faz com que estes sejam cada vez mais utilizados. Esses plásticos não são biodegradáveis e sua reciclagem consome muita energia térmica, sendo urgente a redução do desperdício de embalagens, que quase 100% das vezes são de uso único, e a busca por novos materiais, como os filmes biodegradáveis. Porém, o uso desses materiais tem sido limitado devido às baixas propriedades mecânicas e fraca barreira contra a umidade (alta permeabilidade ao vapor de água) e por isso diversos estudos sobre a adição de outros compostos à esses filmes vêm sendo realizados (SOUZA *et al.*, 2011).

O PBAT, mais abordado neste trabalho pelo seu nome comercial Ecoflex, apresenta características boas para a utilização como filmes, porém seu alto custo não o torna competitivo nesse mercado. Nesse contexto, Amorim (2019) fez um experimento analisando o comportamento da adição de fibras de bagaço da laranja, um resíduo da agroindústria da laranja. A adição de 20% de fibras ao PBA resultou em aumento da taxa de degradação no ambiente e redução de 20% nos custos de produção, um resultado bastante satisfatório e que abre portas para a continuidade de pesquisas nesse campo.

O amido é um polímero natural com grande potencial para produção de filmes biodegradáveis. Pode ser encontrado em tubérculos, cereais e raízes e facilmente transformado em um biopolímero (REIS, 2021). As fontes de amido podem ser as mais diversas, sendo alguns

exemplos: amido de aveia (GALDEANO, 2007); amido de milho (ALVES, 2009); amido de pinhão (SILVA, 2011); amido de mandioca (ARAÚJO, 2014). O emprego do amido nos biofilmes tem algumas desvantagens, como a formação de materiais quebradiços e higroscópicos. Visando melhorar as propriedades mecânicas desses materiais, diversos estudos estão sendo realizados com a adição de compostos e/ou a formação de blendas com outros polímeros ou biopolímeros (SOUZA *et al.*, 2011).

Machado *et al.* (2012) desenvolveu um trabalho sobre a eficácia de biofilmes de amido de mandioca com reforço de nanocelulose e erva-mate como aditivo antioxidante. No estudo, a presença dos nanocristais de celulose foi responsável por reduzir a permeabilidade do bioplástico ao vapor de água (grande problema dos bioplásticos de amido) e a adição da erva-mate, uma fonte natural de polifenóis, forneceu propriedades antioxidantes sem provocar diferenças nas propriedades mecânicas.

Henrique *et al.* (2007), estudaram as características físicas de biofilmes produzidos a partir dos seguintes amidos modificados: *cross linked*, carboximetilamido (CMA) de alta e baixa viscosidade e esterificado. Os filmes apresentaram boas propriedades, como facilidade de gelatinação, transparência, maleabilidade e homogeneidade. Apesar disso, quando comparados com o filme comercial de PVC, mostraram-se mais permeáveis e que há muito a se trabalhar na formulação para melhorar as propriedades. Dessa forma, a continuidade das pesquisas com essas e outras matérias primas faz-se extremamente necessária para encontrar um substituto sustentável adequado para o PVC.

6.2 CANUDOS

A poluição por canudos plásticos é um problema principalmente nas praias e oceanos. Fabricados a partir de polipropileno e poliestireno, tem um processo de degradação muito lento e impactam a saúde dos animais e seres humanos, tanto pela formação dos microplásticos quanto pelo seu acúmulo na superfície dos oceanos, impedindo a entrada de luz e consequentemente a realização de fotossíntese. Nos últimos anos o assunto dos problemas trazidos pelos canudos plásticos viralizou e nesse cenário, pesquisas estão sendo desenvolvidas e canudos biodegradáveis já estão sendo produzidos por empresas, principalmente startups.

Silva *et al.* (2019) estudaram a produção de um biocanudo a partir de amido, gel de aloe vera e glicerol. De acordo com os pesquisadores, o processo de produção foi simples e atingiu bons resultados. A adição de gel de aloe vera e do glicerol contribuíram para a flexibilização do material, as características mecânicas foram satisfatórias nos testes e a biodegradação foi

comprovada pela alta taxa de degradação. O amido representa um importante material na produção de plásticos verdes e seu uso na produção de biocanudos também foi foco em outros estudos, apresentando bons resultados quando há modificação química do amido para torná-lo mais resistente.

Na Tabela 4 encontram-se exemplos empresas que produzem canudos sustentáveis, sua localização e a matéria prima utilizada.

Tabela 4 - Empresas inovadoras na produção de biocanudos

Empresa	País	Matéria Prima
Tri Canudos de Trigo	Brasil	Caule do trigo
Sorbos	Espanha	Amido de milho
Hay Straws	Estados Unidos	Talos de trigo
Wisefood	Alemanha	Resíduos da produção de suco de maçã

Fonte: Elaboração autoral

7 DISCUSSÃO

O consumo insustentável de plásticos, intensificado pela pandemia do COVID 19, traz sérias consequências para o meio ambiente. O acúmulo desse material na natureza, associado a formação de microplásticos, redução da disponibilidade de fontes fósseis e o aquecimento global provocado principalmente pela emissão de gases do efeito estufa são estímulos ao aumento do interesse e da demanda por polímeros verdes e biodegradáveis. Nesse cenário, as empresas estão sendo cobradas pelos consumidores e investidores por uma melhor performance ambiental e por produtos mais sustentáveis, o que está fazendo a prática de *greenwashing* aumentar nos últimos anos. Os termos “verde” e “biodegradável” facilmente podem dar a falsa impressão de que esses materiais são totalmente sustentáveis e não acarretam em impactos negativos. Pelo exposto neste trabalho, nota-se a importância de conhecer bem cada tipo de material a fim de evitar cair em propagandas enganosas.

De um modo geral, quando se diz respeito a matéria prima, o ciclo de vida dos plásticos verdes, como o polietileno verde e o PLA, traz menos consequências negativas ao meio ambiente que os plásticos de fontes fósseis, colaborando para a redução da demanda de petróleo, redução da emissão de gases do efeito estufa e captura de dióxido de carbono da atmosfera durante o crescimento das matérias primas. Como ponto negativo têm-se a possível competição com outras culturas por terras aráveis e o fato de que a fermentação pode ser realizada a partir de batata, milho, mandioca e outros alimentos, esses dois fatores podem acarretar na competição com a produção de alimentos e causar aumento do preço dos mesmos por redução da disponibilidade. Por outro lado, é possível otimizar a produção dos bioplásticos a fim de aumentar a produtividade do processo sem precisar aumentar a área de matéria prima plantada e utilizar como matéria prima vegetais que não sejam a base da alimentação. Além disso, o fato de serem produzidos a partir de biomassa abre caminho para rotas alternativas e mais sustentáveis, como o uso de resíduos de indústrias como matéria prima, como é o caso do bagaço de cana para o polietileno verde e do soro de leite para o PLA.

O principal ponto negativo em relação ao polietileno verde e outros plásticos verdes é o fato de que eles não são biodegradáveis, demoram o mesmo tempo para se decompor que os plásticos convencionais e sua degradação no ambiente também dá origem aos microplásticos. Esse fato é extremamente importante e não é de conhecimento da população, já que é totalmente omitido de propagandas tanto das empresas que fabricam esses materiais quanto daquelas que o utilizam na fabricação de seus produtos. Essa situação se enquadra como *greenwashing*, já que de acordo com Netto *et al.* (2020) uma das formas de realizar essa prática é por meio da

disseminação apenas de informações selecionadas que deixem a empresa com uma imagem sustentável. A falta de informação muitas vezes prejudica o descarte correto dos plásticos verdes, pois os consumidores não têm conhecimento do comportamento desses materiais, que consideram sustentáveis, no meio ambiente.

Empresas mudarem a fonte de seus materiais de fóssil para renovável é uma ação que traz benefícios ambientais, porém é uma resolução apenas parcial, sendo necessário garantir que esses materiais sejam descartados da maneira correta. Os plásticos verdes não biodegradáveis são recicláveis e para assegurar que esse processo ocorra é necessária a conscientização da população quanto a separação do lixo, mas, antes disso, é preciso que haja investimentos na coleta seletiva e no processo de reciclagem a fim de torná-lo sustentável economicamente.

Dentre os 3 materiais apresentados mais profundamente no trabalho, o ácido polilático (PLA) é o mais interessante ambientalmente tanto do ponto de vista da composição quanto da degradação. O estudo de rotas alternativas, como a produção a partir de soro do leite (BERNARDO, 2014) é imprescindível para tornar o PLA menos custoso e mais competitivo comercialmente, além de promover uma melhor destinação para esse resíduo da indústria do leite. Segundo Chamas *et al.* (2020) a taxa de degradação do ácido polilático em aterros sanitários é 21 vezes maior que a do polietileno de alta densidade, porém estudos como de Kale *et al.* também demonstraram que plásticos biodegradáveis não sofreram nenhum tipo de degradação quando ficaram 30 dias expostos em um ambiente externo já que como concluído por Suyama *et al.* (2016), o PLA é menos suscetível a ataques microbianos e os microorganismos capazes de realizar esse ataque não estão tão espalhados pelo ambiente, o que não favorece a degradação desse material fora de compostagem industrial.

O Ecoflex®, também foco neste estudo, apresenta os mesmos pontos negativos relacionados ao processo de produção que os plásticos convencionais, como uso de uma fonte não renovável que oferece vários riscos ambientais desde sua extração até seu tratamento, incluindo a elevada emissão de gases do efeito estufa, contaminação do ambiente pela exploração do petróleo e liberação de resíduos atmosféricos e sólidos no processo de refino e craqueamento do petróleo. Uma das principais vantagens do Ecoflex é que ele forma excelentes blendas com outros materiais biodegradáveis e com plásticos verdes, o que pode melhorar as propriedades desses biopolímeros, devido as boas características mecânicas, e reduzir a porcentagem de fonte fóssil em sua composição e dessa forma colaborar para uma redução do uso dessa fonte não renovável e dos impactos ambientais que ela causa. Um fator sempre controverso e contestado a respeito de plásticos biodegradáveis é a sua biodegradabilidade sob

condições que não são controladas. As normas e padronizações desse tipo de plástico sempre dizem respeito à degradação desses materiais sob condições de compostagem industrial, que não são condições semelhantes às encontradas em aterros sanitários, no meio ambiente e no mar, que é onde a maior parte dos plásticos vai parar. O termo biodegradável causa a falsa impressão de que o material com essa característica não vai se tornar um resíduo e nem vai trazer consequências negativas para o meio ambiente. As pessoas, quando compram um produto biodegradável, precisam estar cientes dessas informações e precisam ter um local para descartar corretamente esses materiais.

Da mesma forma que a reciclagem dos plásticos verdes, a compostagem industrial dos plásticos biodegradáveis precisa ser garantida a fim de resolver o problema como um todo e não apenas parcialmente. A logística reversa seria uma boa alternativa para responsabilizar as empresas pelos seus produtos e exigiria que elas implantassem sistemas de coleta desses produtos e garantissem uma disposição final adequada.

A busca por materiais mais sustentáveis não é simples, pois cada aplicação exige materiais com características específicas de tempo de vida, resistência ao calor, maleabilidade e resistência, por exemplo. As pesquisas, assim como as abordadas no capítulo de Inovações devem continuar e ganhar maior importância e visibilidade. Além disso, a produção dos bioplásticos poderia receber subsídios dos governos a fim de ter seu preço de custo reduzido e assim poder competir no mercado com os plásticos convencionais e deixar de ser um produto elitizado. De acordo com Torresi *et al.* (2008, p. 17), “o Brasil é o país com maior condição de gerar biomassas renováveis” e essas biomassas são alternativas economicamente e ambientalmente atrativas, mas que não serão possíveis “sem o engajamento da comunidade científica e o apoio financeiro e político dos órgãos de fomento à pesquisa e à inovação”.

8 CONCLUSÃO

Diante de todo o exposto neste trabalho, pode-se concluir que os bioplásticos estão sendo utilizados por empresas principalmente como estratégia de marketing, o que pode sim ser considerado uma prática de greenwashing. Apenas os pontos positivos desses materiais são expostos e pouca gente está ciente de que eles também apresentam desvantagens e precisam ser descartados da maneira correta.

Os plásticos verdes e plásticos biodegradáveis podem ser alternativas mais sustentáveis desde que recebam o tratamento adequado após o uso, que seria a reciclagem para os bioplásticos não biodegradáveis e a compostagem para os biodegradáveis. Para que isso aconteça é necessária conscientização da população quanto ao impacto negativo desses materiais quando descartados no ambiente e as empresas que produzem ou utilizam esses materiais devem ser responsáveis por lidar com esses resíduos, pois só assim estas serão de fato empresas responsáveis ambientalmente.

Para lidar com o problema dos plásticos é necessário:

- Conscientização geral da necessidade de redução do consumo dos plásticos e do descarte correto;
- Coleta seletiva de qualidade;
- Investimento em pesquisas de biopolímeros;
- Informação disseminada a respeito dos biopolímeros, suas vantagens e desvantagens;
- Responsabilização das empresas por seus resíduos, incluindo os biopolímeros, garantindo reciclagem e compostagem.

REFERÊNCIAS

3D LAB. **PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA.** Disponível em: <https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>. Acessado em: 29/10/2021.

ABAL. **Mesmo com alta do consumo, Brasil reciclou mais de 97% das latas de alumínio para bebidas em 2020.** Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/mesmo-com-alta-do-consumo-brasil-reciclou-mais-de-97-das-latas-de-aluminio-para-bebidas-em-2020/>. Acessado em: 29/10/2021.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos.** Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acessado em: 29/10/2021.

AMORIM, João Antonio de Pretto. **Reaproveitamento de fibra residual da agroindústria da laranja para filmes biodegradáveis de PBAT.** 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

ATLAS DO PLÁSTICO. **Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos.** Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2020-11/Atlas%20do%20PI%C3%A1stico%20-%20vers%C3%A3o%20digital%20-%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

ATUALIDADE PARLAMENTO EUROPEU. **O impacto da produção e dos resíduos têxteis no ambiente (infografia).** Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20201208STO93327/o-impacto-da-producao-e-dos-residuos-texteis-no-ambiente-infografia>. Acessado em: 29/10/2021.

BASF. **BASF oferece soluções sustentáveis para a indústria de embalagens na Interpack 2017.** Disponível em: https://www.basf.com/br/pt/media/news-releases/2017/04/09052017_r12.html. Acessado em: 29/10/2021.

BBC NEWS BRASIL. **Como seu glitter no Carnaval chega aos peixes no Oceano.** Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-42797763>. Acessado em: 29/10/2021.

BBC NEWS BRASIL. **Consumo de plásticos explode na pandemia e Brasil recicla menos de 2% do material.** Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-55131470>. Acessado em: 29/10/2021.

BBC NEWS BRASIL. **Oito razões pelas quais o plástico conquistou o mundo.** Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-44502689>. Acessado em: 29/10/2021.

BELLOLI, Rodrigo. **Polietileno verde do etanol da cana-de-açúcar brasileira: biopolímero de classe mundial.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, 2010.

BLOG TERA AMBIENTAL. **Compostagem Industrial: Entenda o processo que colabora para a economia circular.** Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera->

[ambiental/compostagem-industrial-entenda-o-processo-que-colabora-para-a-economia-circular](#). Acessado em: 29/10/2021.

CÂNDIDO, Carla Valéria Lima *et al.* **Plano de gerenciamento integrado de resíduos plásticos – PGIRP**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente: Fundação Israel Pinheiro, 2009. 32 p.; il.

CAPELEZZO, A. P; *et al.* **Polímero Biodegradável Antimicrobiano Através da Aditivção com Compostos à Base de Zinco**. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/AR20170280.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

CASADO, Eliana Botaro. **Desenvolvimento e caracterização de blendas de poliéster sintético biodegradável com proteína de soja e estudo de biodegradação em solo**. 2009. 79f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267004>. Acessado em: 29/10/2021.

CASARIN, Suzan A. *et al.* **Blendas PHB/copolíesteres biodegradáveis: biodegradação em solo**. Seção Técnica – Polímeros 23 (1) • 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282013005000003>. Acessado em: 29/10/2021.

CASARIN, Suzan A. *et al.* **Caracterização de Blendas Phb / Ecoflex Modificadas Com Pó – de – Madeira**. Anais do 8º Congresso Brasileiro de Polímeros. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2005/PDF/755.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

CASTRO-AGUIRRE, E; Iñiguez-Franco F, Samsudin H, Fang X, Auras R. **Poly(lactic acid)-Mass production, processing, industrial applications, and end of life**. Adv Drug Deliv Rev. 2016 Dec 15; 107:333-366. DOI: 10.1016/j.addr.2016.03.010. Epub 2016 Apr 1. PMID: 27046295.

CHAMAS, Ali; *et al.* **Degradation Rates of Plastics in the Environment**. ACS Sustainable Chem. Eng. 2020, 8, 9, 3494–3511.

COLTRO, Leda. **Aditivos para Materiais Plásticos**. Instituto de Tecnologia de Alimentos, Vol. 12, nº 1, jan-marc. 2000. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v12n1/v12n1_artigo4.pdf. Acessado em: 29/10/2021.

CÓZAR A, Echevarría F, González-Gordillo JI, Irigoien X, Ubeda B, Hernández-León S, Palma AT, Navarro S, García-de-Lomas J, Ruiz A, Fernández-de-Puelles ML, Duarte CM. **Plastic debris in the open ocean**. Proc Natl Acad Sci U S A. 2014 Jul 15;111(28):10239-44. DOI: 10.1073/pnas.1314705111. Epub 2014 Jun 30. PMID: 24982135; PMCID: PMC4104848.

CROP LIFE BRASIL. **Bioplásticos: uma alternativa para reduzir a poluição**. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/noticias/bioplasticos-uma-alternativa-para-reduzir-a-poluicao/>. Acessado em: 29/10/2021.

DESCOMPLICA. **Polímeros: fique por dentro das reações de polimerização!** Disponível em: <https://descomplica.com.br/artigo/polimeros-fique-por-dentro-das-reacoes-de-polimerizacao/4Qg/>. Acessado em: 29/10/2021.

ECCAPLAN. **Catadores de materiais recicláveis e a pandemia de COVID-19: o caso da COOPTRESC.** Disponível em: <https://eccaplan.com.br/blog/2020/09/03/catadores-de-materiais-reciclaveis-e-a-pandemia-de-covid-19-o-caso-da-cooptresc/>. Acessado em: 29/10/2021.

E-CYCLE. **Conheça diferentes modelos de canudos biodegradáveis.** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/canudos-biodegradaveis/>. Acessado em: 29/10/2021.

F. Gironi & V. Piemonte. *Bioplastics and Petroleum-based Plastics: Strengths and Weaknesses, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2011 33:21, págs. 1949-1959, DOI: [10.1080 / 15567030903436830](https://doi.org/10.1080/15567030903436830).

FOJT J, David J, Přikryl R, Řezáčová V, Kučerík J. *A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil*. Sci Total Environ. 2020 Nov 25; 745:140975. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140975. Epub 2020 Jul 18. PMID: 32712500.

FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL STIFTUNG BRASIL. **A onda de biodegradáveis no Brasil.** Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2021/01/19/onda-de-biodegradaveis-no-brasil>. Acessado em: 29/10/2021.

FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL STIFTUNG BRASIL. **O tsunami plástico.** Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2021/01/18/o-tsunami-plastico>. Acessado em: 29/10/2021.

GESAMP. **Grupo Misto de Peritos sobre os Aspectos Científicos de Proteção Ambiental Marinha.** Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM, Revista A Ressurgência - Ano 2015. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/00000a/00000a31.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

GUAMÁ, Fernando Francisco Miranda Corrêa de. **Lixo Plástico - de Sua Produção até a Madeira Plástica.** XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2008.

HALDEN, RU. *Plastics and health risks*. Annu Rev Public Health. 2010; 31:179-94. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.012809.103714. PMID: 20070188.

HORBAN, M. A. *et al.* **Produção de Poli(Ácidolático) a partir do Soro do Leite.** The Journal of Engineering and Exact Sciences - Vol. 03, N.08, (2017) 1136-1150.

JONES, Frances. **A ameaça dos microplásticos:** fragmentos de plásticos com dimensões micrométricas estão em todos os lugares e impõem desafios ao seu controle. PESQUISA FAPESP, jul. 2019, 281. Disponível: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-ameaca-dos-microplasticos/>. Acessado em: 29/10/2021.

JONES, Frances. **A Promessa dos Bioplásticos**. PESQUISA FAPESP, abr. 2020, 290. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2020/04/073-076_bioplastico_290.pdf. Acessado em: 29/10/2021.

KALE, Gaurav; AURAS, Rafael; SINGH, Sher Paul. *Comparison of the degradability of poly(lactide) packages in composting and ambient exposure conditions*. Packaging Technology and Science – An International Journal, August 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pts.742>. Acessado em: 29/10/2021.

MAIA, Carlos Vangerre de Almeida *et al.* **Reflexões sobre o Impacto da Pandemia por Coronavírus na Atuação do Catador de Materiais Recicláveis**. Revista Pegada – vol. 21, n.3, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/endri/Downloads/7903-30909-1-PB.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

MARIANO, Jacqueline Barboza. **Impactos Ambientais do Refino de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2001 VIII, 216 p. 289 (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético, 2001) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

MÜLHAUPT, Rolf. *Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics: Dreams and Reality*. Published: November, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/macp.201200439>. Acessado em: 29/10/2021.

NAPPER, Imogen E and Thompson, Richard C. *Environmental Deterioration of Biodegradable, Oxo-biodegradable, Compostable, and Conventional Plastic Carrier Bags in the Sea, Soil, and Open-Air Over a 3-Year Period*. *Environmental Science & Technology* 2019 53 (9), 4775-4783. DOI: 10.1021/acs.est.8b06984.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Poluição por plástico é um problema grave — mas ainda não é tarde demais para solucioná-lo**. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/ciencia/2020/10/poluicao-por-plastico-e-um-problema-grave-mas-ainda-nao-e-tarde-demais>. Acessado em: 29/10/2021.

OLIVATTO, G. P. *et al.* *Microplastic contamination in surface waters in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil*. *Marine Pollution Bulletin* – Vol. 139, February 2019, Pages 157-162. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X18308932>. Acessado: 29/10/2021.

OLIVATTO, G. P. *et al.* **Microplásticos: Contaminantes de Preocupação Global no Antropoceno**. *Rev. Virtual Quim.*, 2018, 10 (6), 1968-1989. Acessado em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v10n6a16.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

OLIVATTO, Gláucia Peregrina; Carreira, Renato da Silva. **Estudo sobre Microplásticos em águas superficiais na porção oeste da Baía de Guanabara**. Rio de Janeiro, 2017. 155p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29926/29926.PDF>. Acessado em: 29/10/2021.

OLIVEIRA, Luciana Gonzaga de & MANTOVANI, Simone Morais. **Transformações biológicas: contribuições e perspectivas**. *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 3, 742-756, 2009.

PELLICANO, Marília. **Desenvolvimento e Caracterização de Blendas PHBV/Ecoflex e suas Modificações com Amidos**. São Carlos – UFSCar, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/765/1827.pdf?sequence=1>. Acessado em: 29/10/2021.

PIATTI, Tânia Maria. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: EDUFAL, 2005. 51p.: il. - (Conversando sobre ciências em Alagoas).

PLÁSTICO INDUSTRIAL. **Crescimento do mercado global de bioplásticos**. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/1380-Crescimento-do-mercado-global-de-bioplásticos.html>. Acessado em: 29/10/2021.

PRANAMUDA, H; Tokiwa Y, Tanaka H. *Poly lactide Degradation by an Amycolatopsis sp.* *Appl Environ Microbiol*. 1997 Apr;63(4):1637-40. DOI: 10.1128/aem.63.4.1637-1640.1997. PMID: 16535586; PMCID: PMC1389564.

PRETULA; SLOMKOWSKI; PENCZEK. *Poly lactides—Methods of synthesis and characterization*. 2016, p. 4-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.05.002>. Acessado em: 29/10/2021.

RAHMAN, Md Hafizur & Bhoi, Prakash. *An Overview of Non-biodegradable Bioplastics*. *Journal of Cleaner Production*. 294. 126218. 10.1016/j.jclepro.2021.126218.

REDAÇÃO BRASIL ALEMANHA NEWS. **BASF amplia produção de plásticos biodegradáveis**. Disponível em: <https://brasilalemanhanews.com.br/economia/basf-amplia-producao-de-plasticos-biodegradaveis/>. Acessado em: 29/10/2021.

REN, X. *Biodegradable plastics: a solution or a challenge?* *Journal of Cleaner Production*. Volume 11, Issue 1, February 2003, Pages 27-40. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00020-3). Acessado em: 29/10/2021.

REVISTA CULTIVAR. **Impactos ambientais das queimadas de cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.grupocultivar.com.br/artigos/impactos-ambientais-das-queimadas-de-cana-de-acucar>. Acessado em: 29/10/2021.

RIBEIRO, Helena. **Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória**. *Rev. Saúde Pública* 42 (2), abr. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-89102008005000009>. Acessado em: 29/10/2021.

SANTOS, Fernando A; *et al.* **Potencial da Palha de Cana-de-Açúcar Para Produção de Etanol**. *Quim. Nova*, Vol. 35, No. 5, 1004-1010, 2012.

SANTOS, Patrícia Vieira dos. **Impactos Ambientais Causados pela Perfuração de Petróleo**. *Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas | Sergipe | v. 1 | n.15 | p. 153-163 | out. 2012.*

SIEGENTHALER, K.O. & Künkel, Andreas & Skupin, G. & Yamamoto, Motonori. *Ecoflex and Ecovio: Biodegradable, Performance-Enabling Plastics*. *Advances in Polymer Science, Synthetic Biodegradable Polymers*, 2011.

SILVA, George Amaro da. **A descoberta do plástico e uma imersão no pet (Politereftalato de etileno)**. *Jornal Eletrônico – Faculdades Integradas Vianna Júnior*. Ano II – Edição II – setembro 2010. Disponível em: <https://www.jornaleletronicofivj.com.br/jefvj/article/view/579/557>. Acessado em: 29/10/2021.

SILVA, Leonardo de Araújo *et al.* **Protótipo de canudo biodegradável à base de amido e gel de Aloe vera: caracterização e análise da integridade**. *Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol. 4. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.org/articles/210203344.pdf>. Acessado em: 29/10/2021.

SODEGARD, A., STOLT, E. M. *Properties of lactic acid-based polymers and their correlation with composition*. *Prog. Polym. Sci.*, v.27, p.1123–1163, 2002. P. 1126-1127.

SOUZA, Carolina Oliveira de. **Estudo comparativo da caracterização de filmes biodegradáveis de amido de mandioca contendo polpas de manga e de acerola**. *Quím. Nova* 35 (2) • 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000200006>. Acessado em: 29/10/2021.

SUPER INTERESSANTE. **Como foi inventado o plástico?** Redação Mundo Estranho. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-foi-inventado-o-plastico/>. Acessado em: 29/10/2021.

SUYAMA, T; Tokiwa Y, Ouichanpagdee P, Kanagawa T, Kamagata Y. *Phylogenetic affiliation of soil bacteria that degrade aliphatic polyesters available commercially as biodegradable plastics*. *Appl Environ Microbiol.* 1998 Dec;64(12):5008-11. DOI: 10.1128/AEM.64.12.5008-5011.1998. PMID: 9835597; PMCID: PMC90957.

TOKIWA, Y; Calabia, BP. *Biodegradability and biodegradation of poly(lactide)*. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2006 Sep;72(2):244-51. DOI: 10.1007/s00253-006-0488-1. Epub 2006 Jul 6. PMID: 16823551.

WWF. **Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização**. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/51804/1552932397PLASTIC_REPORT_02-2019_Portugues_FINAL.pdf. Acessado em: 29/10/2021.

ZHOU, S. *et al.* **Fermentation of 12% (w/v) glucose to 1.2 M lactate by *Escherichia coli* strain SZ194 using mineral salts medium**. *Biotechnology Letters*. v. 28, p. 663–670, 2006.

ZUO, LZ, Li HX, Lin L, Sun YX, Diao ZH, Liu S, Zhang ZY, Xu XR. *Sorption and desorption of phenanthrene on biodegradable poly(butylene adipate co-terephthalate) microplastics*. *Chemosphere*. 2019 Jan; 215:25-32. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.09.173. Epub 2018 Oct 3. PMID: 30300808.