

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS DE SOUZA SILVA

**BIODEGRADAÇÃO DE POLIPROPILENO (PP) E POLIESTIRENO (PS)
UTILIZANDO FUNGO ISOLADO DO TRATO INTESTINAL DE
Tenebrio molitor Linnaeus.**

CAMPO MOURÃO

2021

VINICIUS DE SOUZA SILVA

**BIODEGRADAÇÃO DE POLIPROPILENO (PP) E POLIESTIRENO (PS)
UTILIZANDO FUNGO ISOLADO DO TRATO INTESTINAL DE
Tenebrio molitor Linnaeus.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação (TCC2), do curso superior de Engenharia Ambiental, do Departamento Acadêmico de Ambiental (DAAMB), do Câmpus Campo Mourão, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Hilton Bernardino de Araújo

CAMPO MOURÃO

2021

VINICIUS DE SOUZA SILVA

**BIODEGRADAÇÃO DE POLIPROPILENO (PP) E POLIESTIRENO (PS)
UTILIZANDO FUNGO ISOLADO DO TRATO INTESTINAL DE *Tenebrio molitor*
Linnaeus.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

03 de maio de 2021.

Ana Paula Peron – Avaliador 1
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Flávia Vieira da Silva Medeiros – Avaliador 2
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Hilton Bernardino de Araújo – Orientador
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2021

RESUMO

O mundo vem sofrendo transformações ambientais significativas através do crescimento populacional, logo, a alta produção de resíduos sólidos é um dos fatores responsáveis por tais transformações. No ano de 2016, foram produzidas globalmente 14 milhões de toneladas de poliestireno e 68 milhões de toneladas de polipropileno, sendo o polipropileno o segundo mais produzido em escala global, ficando apenas atrás do polietileno (com 116 milhões de toneladas) enquanto o poliestireno figura na sexta posição. O grande volume dos materiais plásticos consumidos e por consequência seu descarte pós-consumo e a incorreta disposição deles, é um dos problemas relacionados aos impactos ambientais que os resíduos sólidos têm provocado. No Brasil, o índice de reciclagem de embalagens plásticas e equiparáveis pós-consumo é de 25,8% – o equivalente à reciclagem de 550 mil toneladas no ano de 2016. Devido à má gestão dos resíduos, estima-se que um terço de todo o plástico descartado tenha se inserido na natureza como poluição terrestre, de água doce ou marinha. A maior parte destes resíduos quando mal administrados tem enorme potencial poluidor de ecossistemas terrestres, e 80% dos plásticos nos oceanos sejam provenientes da poluição terrestre. Dada a necessidade de obter-se um processo natural de degradação de compostos termoplásticos, Yang et al. (2015) evidenciou um promissor agente de biodegradação. Trate-se do *Tenebrio molitor* Linnaeus, também conhecido popularmente como larva-da-farinha. Este trabalho buscou avaliar o potencial biodegradador de poliestireno e polipropileno por um fungo isolado do trato intestinal da larva de *Tenebrio molitor* Linnaeus, a fim de se investigar uma possível alternativa para tratamentos de resíduos sólidos a base destes materiais. Para o experimento, realizado no laboratório de bioprocessos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão, foi utilizada uma colônia de fungos isolada do trato intestinal de *Tenebrio molitor* L., oriundo do repositório de material biológico do laboratório. O poliestireno apresentou um valor médio de taxa de biodegradação de 8,16% enquanto para o polipropileno o valor médio foi de 5,13%. O valor mínimo da taxa de biodegradação para PS foi de 4,54% e o máximo de 15,78%, já o PP teve mínimo e máximo de 3,70% e 8,69%, respectivamente. Para PS o desvio padrão foi de 3,39 e a variância de 11,53, nas amostras de PP o desvio padrão 1,64 e a variância ficou na ordem de 2,69. Os fungos utilizados no trabalho, oriundos do trato intestinal da larva de *Tenebrio*, se mostraram eficientes na biodegradação de poliestireno e polipropileno.

PALAVRAS-CHAVE: Biotecnologia, microrganismos, biodegradação

ABSTRACT

The world has been undergoing environmental changes through population growth, so the high production of solid waste is responsible for such changes. In 2016, 14 million tons of polystyrene and 68 million tons of polypropylene were produced globally, with polypropylene being the second most produced on a global scale, just behind polyethylene (with 116 million tons) while polystyrene appears in the sixth position. The large volume of plastic materials consumed and consequently their post-consumption disposal and an incorrect disposal of them, is one of those related to the environmental impacts caused by the solid waste. In Brazil, the recycling rate for plastic and comparable post-consumer packaging is 25.8% - equivalent to the recycling of 550 thousand tons in 2016. Dedicated to poor waste management, it is estimated that one third of all the discarded plastic has been inserted into nature as terrestrial, freshwater or marine formulations. Most of this waste when mismanaged has enormous potential for polluting terrestrial ecosystems, and 80% of plastics in the oceans come from terrestrial. Given the need to obtain a natural degradation process for thermoplastic compounds, Yang et al. (2015) showed a promising biodegradation agent. This is the *Tenebrio molitor* Linnaeus, also popularly known as mealworm. This work sought to evaluate the potential biodegradation of polystyrene and polypropylene by a fungus isolated from the intestinal tract of the larva of *Tenebrio molitor* Linnaeus, in order to investigate a possible alternative for solid waste treatments based on these materials. For the experiment, carried out in the bioprocess laboratory of the Federal Technological University of Paraná, Campus Campo Mourão, a colony of fungi isolated from the intestinal tract of *Tenebrio molitor* L., from the biological material repository of the laboratory, was used. Polystyrene presented an average value of biodegradation rate of 8.16% while for polypropylene the average value was 5.13%. The minimum value of the biodegradation rate for PS was 4.54% and the maximum was 15.78%, whereas the PP had a minimum and a maximum of 3.70% and 8.69%, respectively. For PS, the standard deviation was 3.39 and the variance was 11.53, in the PP samples, the standard deviation was 1.64 and the variance was in the order of 2.69. The fungi used in the work, from the intestinal tract of the *Tenebrio* larvae, proved to be efficient in the biodegradation of polystyrene and polypropylene.

KEYWORDS: Biotechnology, microorganisms, biodegradation

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Objetivos.....	7
1.1.1 Objetivo Geral	7
1.1.2 Objetivos Específicos	7
1.2 Justificativa	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Impactos ambientais no uso de plásticos	9
2.2 Panorama de produção e consumo de plásticos no Brasil e no mundo	10
2.3 Bioprocessos e biotecnologia aplicados ao meio ambiente.....	11
2.4 Poliestireno (C₈H₈)_x	11
2.5 Polipropileno (C₃H₆)_x	12
2.6 <i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus	13
2.7 Utilização de microrganismos no processo de degradação de plásticos	14
3 METODOLOGIA.....	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5 CONCLUSÃO.....	22

1 INTRODUÇÃO

O mundo vem sofrendo transformações ambientais significativas através do crescimento populacional, logo, a alta produção de resíduos sólidos é um dos fatores responsáveis por tais transformações. Dessa forma, a preocupação em relação à disposição final desses resíduos é cada vez maior (FERREIRA et. al, 2017). Com o aumento da conscientização mundial em relação à necessidade de preservação dos recursos naturais, houve a intensificação de pesquisas para a obtenção de processos industriais mais ambientalmente amigáveis (COSTA et. al, 2014).

Segundo dados de Plastics Insight (2016), no ano de 2016, foram produzidas globalmente 14 milhões de toneladas de poliestireno e 68 milhões de toneladas de polipropileno. Os dados citados mostram o polipropileno sendo o segundo mais produzido em escala global, ficando apenas atrás do polietileno (com 116 milhões de toneladas) enquanto o poliestireno figura na sexta posição.

Oliveira (2012) enfatiza que o grande volume dos materiais plásticos consumidos e por consequência seu descarte pós-consumo e a incorreta disposição deles, é um dos problemas relacionados aos impactos ambientais que os resíduos sólidos têm provocado.

O polipropileno é uma resina versátil usada por diversas indústrias, tais como a de embalagens para alimentos e embalagens descartáveis. O polipropileno é, normalmente, dividido em três grupos principais. Cada um desses grupos apresenta diferentes propriedades excepcionais e, portanto, as resinas de polipropileno são utilizadas em muitas aplicações diferentes (NUNES et al., 2015).

Já o poliestireno ou PS é uma resina termoplástica dura, amorfa e transparente polimerizada através do estireno (vinil benzeno). O material é utilizado em diversas aplicações, podendo citar pipetas descartáveis em laboratórios, copos descartáveis, tesouras, pentes, escovas e potes de iogurte (MAISPOLÍMEROS, 2019).

Dada a necessidade de obter-se um processo natural de degradação de compostos termoplásticos, Yang et al. (2015) evidenciou um promissor agente de biodegradação. Trate-se do *Tenebrio molitor* Linnaeus, também conhecido popularmente como larva-da-farinha.

Diante do exposto acima, este trabalho busca avaliar o potencial biodegradador de poliestireno e polipropileno pelo fungo presente no trato intestinal da larva de *Tenebrio molitor* Linnaeus, a fim de se investigar uma possível alternativa para tratamentos de resíduos sólidos a base destes materiais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Quantificar o potencial de biodegradação de amostras de poliestireno e polipropileno por um fungo isolado do trato intestinal da larva de *Tenebrio molitor* Linnaeus.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar a eficiência de biodegradação pelo fungo entre as amostras de PP e PS;
- Analisar a possível aplicação do método em larga escala;
- Verificar uma alternativa ao método tradicional de esgotamento destes materiais.

1.2 Justificativa

A necessidade em se reciclar, reutilizar, reaproveitar e tratar produtos ou materiais utilizados na indústria e no cotidiano das pessoas é essencial, já que estes resíduos ao se ter a destinação correta e eficiente, gera menos impactos ao meio ambiente, aumenta fonte de renda e geração de emprego, eleva a competitividade do país, impacta na vida e na saúde das pessoas. No Brasil, em dados mais recentes levantados pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), o índice de reciclagem de embalagens plásticas e equiparáveis pós-consumo é de 25,8% – o equivalente à reciclagem de 550 mil toneladas no ano de 2016. Esse número poderia ser melhor se não houvesse uma dificuldade logística clara de que o material pós-utilização seja separado nas residências e encaminhado para a coleta seletiva ou a um PEV (Pontos de Entrega Voluntária) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS DISTRIBUIDORES DE RESINAS E BOBINAS PLÁSTICAS E AFINS, 2020).

Devido à má gestão dos resíduos, estima-se que um terço de todo o plástico descartado tenha se inserido na natureza como poluição terrestre, de água doce ou marinha (MACHADO et al., 2017). A maior parte destes resíduos quando mal administrados tem enorme potencial poluidor de ecossistemas terrestres, e 80% dos plásticos nos oceanos sejam provenientes da poluição terrestre (LI; TSE; FOK, 2016).

Tendo em vista a necessidade de tratamento e gestão correta de resíduos plásticos utilizados na indústria e no consumo das pessoas, o presente estudo tem o propósito de verificar

uma alternativa para o tratamento destes resíduos pós utilização, servindo como uma nova possibilidade para os meios atuais, como por exemplo, a queima ou incineração do plástico que pode liberar na atmosfera gases tóxicos prejudiciais à saúde humana, e o descarte ao ar livre desses resíduos que polui corpos d'água e o solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Impactos ambientais no uso de plásticos

Uma das razões que fazem os plásticos serem materiais de uso cada vez mais difundido é a sua durabilidade, consequência de sua estabilidade estrutural, que lhes confere resistência aos diversos tipos de degradação (fotodegradação, quimiodegradação, biodegradação). Alguns tipos de plásticos, por exemplo, necessitam de séculos para se degradar (PIATTI; RODRIGUES, 2005). Segundo o autor se a durabilidade dos plásticos é uma vantagem, por outro lado, representa um sério problema ecológico, pois são muito usados na fabricação de embalagens usualmente descartadas após utilização e que vão se acumulando ao longo do tempo na natureza.

A má gestão dos resíduos plásticos é uma preocupação urgente, já que é muito mais provável que esses resíduos virem poluição do que aqueles tratados em uma unidade controlada de gestão de resíduos. Resíduos mal administrados são aqueles deixados sem coleta, despejados em locais abertos, nas ruas ou tratados em aterros sanitários não regulamentados (JAMBECK, 2015).

De acordo com World Wide Fund for Nature (2019), em 2016, 11% dos resíduos plásticos produzidos não eram coletados, sendo as principais causas o subdesenvolvimento da infraestrutura de gestão de resíduos e as barreiras que tornavam difícil para os usuários finais separarem e descartarem seu lixo. O relatório ainda aponta que os índices de coleta estão acima dos 95% na maioria dos países de alta renda, mas os índices são muitas vezes mais baixos em áreas rurais, uma vez que os sistemas de coleta de resíduos não foram modernizados em linha com os ambientes urbanos. A erradicação da má gestão de resíduos e a reutilização do plástico podem criar um sistema livre de poluição plástica, além de criar mais de um milhão de empregos em reciclagem e na refabricação de plásticos (PLASTICSEUROPE, 2017).

Legislações e incentivos financeiros devem apoiar a indústria no desenvolvimento de alternativas ecologicamente comprovadas no lugar do plástico convencional, maximizando as oportunidades de escala de alternativas comercialmente viáveis. A indústria deve dar suporte ao consumidor durante a eliminação gradativa de plásticos desnecessários, além de adotar modelos de negócio de reuso (WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2019).

Embora existam tecnologias emergentes, como a pirólise, até hoje, praticamente toda destruição destes polímeros foi por incineração, com ou sem recuperação de energia. Os

impactos ambientais e de saúde de incineradores de resíduos fortemente dependem da tecnologia de controle de emissão, bem como do projeto do incinerador e operação (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

2.2 Panorama de produção e consumo de plásticos no Brasil e no mundo

A produção de plásticos processados no Brasil em 2014 foi de 6,71 milhões de toneladas e o consumo de plásticos processados no mesmo ano foi de 7,24 milhões de toneladas. O mercado de plásticos processados no Brasil foi de 6,9 milhões de toneladas em 2015. (PLASTICS INSIGHT, 2016). Ainda segundo os autores, o maior consumidor de plásticos processados no Brasil é a indústria da construção. Os plásticos são usados na construção de canos, tubos, conexões, caixilhos de janelas e isolamentos. O segundo maior consumidor de plásticos processados é a indústria alimentícia, seguida pela automobilística. Juntas, as três principais indústrias ocupam quase 55% dos plásticos processados como segmento final.

O Brasil, segundo dados do Banco Mundial, é o quarto maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, China e Índia. Desse total, mais de 10,3 milhões de toneladas foram coletadas (91%), mas apenas 145 mil toneladas (1,28%) são efetivamente recicladas (WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2019). O relatório ainda indica que o destino de 7,7 milhões de toneladas de plástico são os aterros sanitários. E outros 2,4 milhões de toneladas de plástico são descartados de forma irregular, sem qualquer tipo de tratamento, em lixões a céu aberto.

A produção de plásticos na Europa foi de 59 milhões de toneladas em 2014, enquanto produção mundial de plásticos em 2014 foi de 311 milhões de toneladas. A taxa composta de crescimento anual de 2011 a 2014 é quase entre 3-4% (PLASTIC SINSIGHT, 2016). Entre 1950 e 2017, um total de 9,2 bilhões de toneladas de plásticos foram produzidas, sendo que menos de dez por cento de todo plástico produzido foi reciclado (FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL, 2020).

Os principais polímeros produzidos e importantes para a economia são poliuretano (PUR), polietileno (PE), poliamida (PA), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), cloreto de polivinila (PVC) e polipropileno (PP) (DANSO; CHOW; STREIT, 2019).

Os polímeros utilizados no estudo são comumente encontrados no uso diário, sendo estes copos plásticos a base de polipropileno e de poliestireno.

2.3 Bioprocessos e biotecnologia aplicados ao meio ambiente

Como é do conhecimento geral, o meio ambiente vem sendo agredido pela atividade humana ao longo dos séculos. A biotecnologia nessa área é vista por uma boa parcela das comunidades humanas como uma forma de não só resolver os problemas ambientais atuais, mas também como meio de não aumentar o descalabro ambiental (VITOLLO, 2015).

A biotecnologia tem por objetivo preservar o meio ambiente do impacto negativo causado pelas mãos humanas e relaciona-se principalmente ao processo de biodegradação, uma vez que elimina ou reduz a contaminação de materiais de origem orgânica na água e no solo (SAGRILLO et al., 2015).

Oliveira (2015) salienta que em um clássico bioprocessos, são realizados tratamentos da matéria-prima e preparo dos meios de cultura necessários para o crescimento dos microrganismos utilizados. Em muitos casos, deve-se realizar algum tipo de esterilização das matérias-primas e dos meios de cultura antes da inoculação de microrganismos que realizarão o processo.

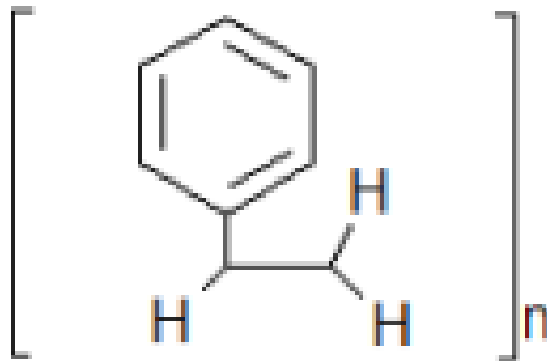
2.4 Poliestireno (C₈H₈)_x

O poliestireno (Figura 1) é um material rígido, duro e transparente, que emite som metálico quando cai. É inodoro, insípido, atóxico, e queima com chama fuliginosa e com densidade específica baixa de 1,054 g/cm³. Devido às suas características e propriedades como baixo custo, boa moldabilidade, baixa absorção de umidade, boa estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento elétrica, fácil coloração e resistência química razoável, é muito usado como material para moldagem, por injeção e termoformação a vácuo (NUNES et al., 2015). Os mesmos autores ainda citam que tal como acontece com polipropileno, policloreto de vinila (PVC) e outros compostos vinílicos, existe a possibilidade de várias formas estereorregulares. As propriedades mecânicas do PS dependem da natureza do polímero (sua massa molar), do método de preparação das amostras e dos métodos de testes.

Por ser um material classificado no grupo dos termoplásticos, apresenta algumas características comuns a este grupo. Dentre tais, podemos destacar a maleabilidade do mesmo, assim como a resistência a variações de temperaturas e resistência a quedas (PLASTBRINQ, 2018).

O material é geralmente considerado como sendo durável e resistente a biodegradação (YANG et al., 2015). Devido a ineficiente reciclagem e ao baixo tempo de vida de uso deste material, uma grande parte dos resíduos a base deste material acabam se acumulando em meio ambiente terrestre ou marinho.

Figura 1 – Fórmula estrutural do poliestireno.



Fonte: Adaptado de Malere (2011).

2.5 Polipropileno (C₃H₆)_x

O polipropileno (Figura 2) é um polímero de hidrocarboneto linear, contendo pouca ou nenhuma insaturação. Na forma cristalizada, as moléculas de polipropileno organizam-se numa configuração espiralada chamada de helicoidal, e esses espirais organizam-se paralelamente uns aos outros, originando um polímero de alto grau de cristalinidade, boa resistência mecânica, boa dureza superficial, elevada rigidez e boa resistência térmica (NUNES et al., 2015).

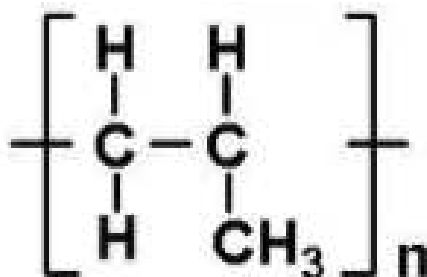
O PP é uma resina de baixa densidade, com um baixo custo de produção e de venda, possuindo boa resistência química, ele é de fácil moldagem, e possui boa estabilidade térmica. Além de ser atóxico e ser resistente a flexão (PLÁSTICO VIRTUAL, 2020).

Produzido a partir da polimerização do gás propileno, este plástico apresenta propriedades como excepcional resistência a rupturas, boa resistência a impactos, boa resistência química, boas propriedades elétricas, sendo muito utilizado na fabricação de recipientes. A resina polipropileno, quando reforçada com fibra de vidro, torna-se mais resistente e é bastante utilizada na indústria de autopeças (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

Alguns produtos em que se encontra o PP, são cadeiras plásticas, brinquedos, copos plásticos, tampas de refrigerantes, seringas de injeção, alguns eletrodomésticos, e autopeças (PLÁSTICO VIRTUAL, 2020).

As principais vantagens de uso do polipropileno são o baixo custo, resistência química elevada, fácil modelagem, alta resistência à fratura por flexão ou fadiga, excelente resistência ao impacto acima de 15°C e ótima estabilidade térmica (GRUPO RPF, 2018).

Figura 2 – Fórmula estrutural do polipropileno.



Fonte: Adaptado de Plástico Industrial (2020).

2.6 *Tenebrio molitor* Linnaeus

O *Tenebrio molitor* L. (Figura 3) é conhecido popularmente como bicho-da-farinha ou simplesmente tenébrio. É um inseto holometábolo e, portanto, sua metamorfose é composta por quatro fases: ovo, larva, pupa e adulto. As larvas atingem cerca de quatro centímetros de comprimento e possuem coloração amarelada com manchas em forma de anéis de cor mais escura pelo corpo. As pupas imaturas são amareladas, mas à medida que se desenvolvem, adquirem tons mais escuros, especialmente nas pernas e na região cefálica. Os adultos apresentam cor negra característica e quando totalmente desenvolvidos medem, em média, 2,5 cm. O ciclo de vida se completa em aproximadamente seis meses sob condições favoráveis (HAINES, 1991).

Figura 3: *Tenebrio molitor* Linnaeus em fase larval



Fonte: Adaptado de Wageningen Academic Publishers (2021).

Durante as pesquisas feitas com larvas de uma espécie de besouro conhecida cientificamente como *Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758 (Coleoptera: Tenebrionidae), uma equipe de cientistas da Universidade de Stanford descobriu que as larvas desse besouro conseguiam se alimentar de pedaços de poliestireno através da presença de bactérias conhecidas como *Exiguobacterium* sp. que fazem parte da microbiota intestinal dessas larvas (YANG et al., 2015). Segundo os autores, no trato digestivo das espécies (*Tenebrio molitor* Linnaeus e *Zophobas morio* Fabricius), ocorre a decomposição biológica, onde as bactérias conseguem decompor o EPS, transformando metade em dióxido de carbono e a outra metade em fragmentos decompostos em forma de excremento.

2.7 Utilização de microrganismos no processo de degradação de plásticos

Estudos recentes têm revelado microrganismos com capacidade de degradar polímeros sintéticos. Embora não haja uma metodologia usual para todos, vários estudos evidenciaram que a ação de microrganismo em diferentes tipos de plásticos (Poliétileno, Poliestireno, PET, Poliuretano) tem se mostrado eficiente na degradação e mineralização dos materiais.

O trabalho conduzido por Mussi-Dias et al. (2017), apresentou a colonização de uma espécie de fungo em meio de cultura contendo fragmentos de poliuretano.

Segundo Wei & Zimmermann (2017), atualmente apenas algumas bactérias e fungos têm sido descritos para a degradação parcial do PET em oligômeros ou monômeros.

Nenhuma enzima atuando nos polímeros de alto peso molecular como poliestireno, poliamida, cloreto de polivinila, polipropileno, poliuretano e polietileno é conhecida (DANSO; CHOW; STREIT, 2019). Os autores ainda salientam que o intemperismo e a fotodegradação são considerados atualmente como as principais forças para o esgotamento inicial dos plásticos, e resultam principalmente na modificação das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Em publicação recente, Schimidt et al. (2017) relatam sobre a degradação microbiana de poliuretano (PUR). As observações de que as enzimas cutinases, também conhecidas por degradar o tereftalato de polietileno (PET) também agem sobre o poliuretano.

Danso, Chow & Streit (2019) dizem que uma vez que a perda de peso e as mudanças na estrutura da superfície são provavelmente atribuídas a degradação de aditivos químicos, muitas vezes constituem uma fração significativa do polímero, os resultados dos estudos precisam ser verificados usando tecnologias mais avançadas. Os autores ressaltam que polímeros comercialmente disponíveis contém aditivos e outras impurezas biodegradáveis, o que interfere nos resultados e pode levar a identificação de falsos positivos, sendo assim, a metodologia geral ligada à análise da degradação do plástico por microrganismos precisa ser padronizada e otimizada.

3 METODOLOGIA

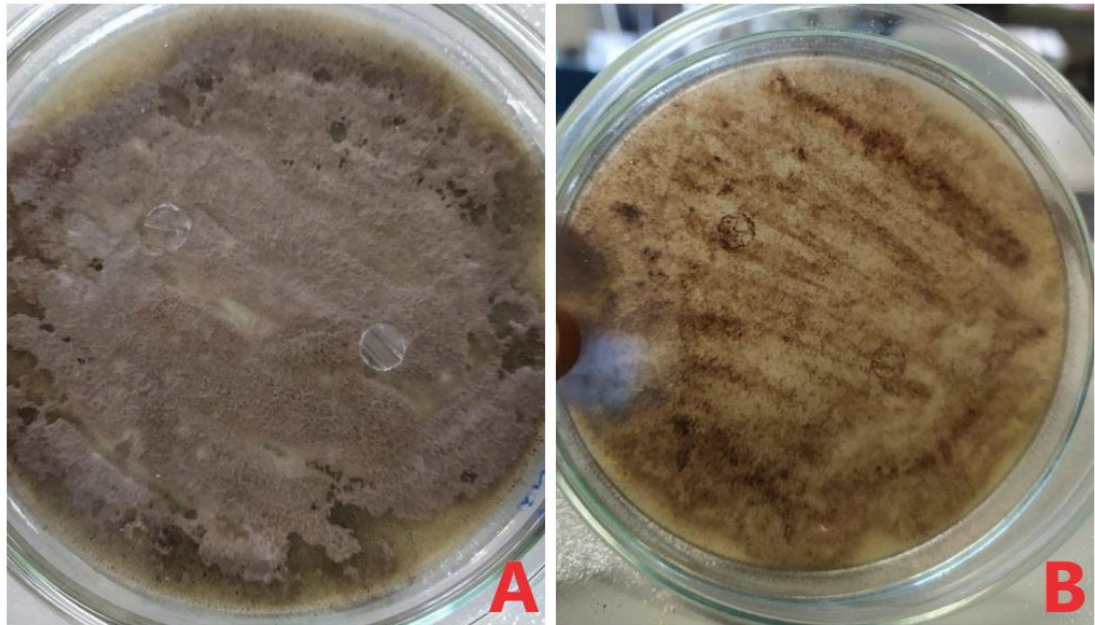
A metodologia aplicada no estudo foi adaptada de Yang et al. (2015). Os estudos conduzidos pelos autores, divididos em duas partes, evidenciaram, em primeiro momento, a capacidade da larva de *Tenebrio molitor* L. em se alimentar de poliestireno expandido como dieta única, em segundo momento, o potencial biodegradador das bactérias presentes em seu trato intestinal. Para o experimento, realizado no laboratório de bioprocessos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão, foi utilizada uma colônia de fungos isolada do trato intestinal de *Tenebrio molitor* L., oriundo do repositório de material biológico do laboratório, obtidos do estudo realizado por Araújo & Silva (2020).

Uma placa de petri com colônias de fungos foi utilizada para a replicação de outras 25 placas, fornecidas pelo laboratório de microbiologia da Universidade, que continha como meio de cultura batata-dextrose-ágar (BDA). O processo de replicação das colônias de fungos foi realizado em uma capela de fluxo contínuo, com o propósito de se evitar eventuais contaminações por outros microrganismos indesejados. As placas semeadas foram levadas para uma estufa microbiológica e mantidas a 30°C, em ambiente propício para o crescimento dos microrganismos, ficando em incubação pelo período de um mês. Passados trinta dias, observou-se o crescimento de colônias de fungos em todas as placas, embora algumas destas apresentaram um certo grau de contaminação, sendo então selecionadas 20 placas para o experimento.

Após a colonização dos fungos nas placas de petri, as amostras dos materiais a base de poliestireno (PS) e polipropileno (PP) foram inseridas junto ao meio de cultura (Figura 4A), para que então fosse possível analisar no decorrer do experimento a quantidade de material que seria degradada pelos microrganismos.

Os materiais a serem degradados, poliestireno e polipropileno, foram obtidos de copos plásticos, comumente utilizados em diversos estabelecimentos comerciais, sendo cortados utilizando um furador de papel, a fim de se manter o tamanho das amostras o mais homogêneo possível, levados a uma solução de álcool 70% para a esterilização da superfície, pesados em balança analítica de cinco dígitos, e por fim inseridos nas placas de petri colonizadas. O material foi cortado em pequenos pedaços com o diâmetro de aproximadamente 1cm. As amostras permaneceram na estufa microbiológica por 90 dias, e após este período os materiais de PS e PP foram retirados das placas (Figura 4B), limpos com álcool 70%, secos e pesados, obtendo-se os valores desejados para o estudo.

Figura 4: Placa de petri colonizada contendo amostras de PS (esquerda) e PP (direita). A) Inserção das amostras na placa colonizada por fungos. B) Placa colonizada contendo as amostras após 90 dias.



Fonte: A autoria própria (2021).

Nota-se o crescimento de um biofilme na superfície das amostras de poliestireno e polipropileno passados 90 dias de exposição a atividade microbiana.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ambos os materiais foram inseridos em meio de cultura contendo fungo, e após 90 dias, foi verificada a taxa de biodegradação efetiva, apresentados na Tabela 1. A taxa de biodegradação foi obtida a partir do cálculo da variação de peso, subtraindo o valor da massa inicial (mi) do valor da massa final (mf). As amostras foram retiradas das placas de petri e totalmente limpas com água e secas, para se retirar qualquer tipo de matéria que poderia influenciar no peso final, e em seguida foram pesadas em balança analítica. Os resultados obtidos foram copilados no software BioEstat 5.3 visando a análise estatística dos dados.

Cabe ressaltar que o único parâmetro utilizado para se determinar a o percentual de biodegradação do material por parte do microrganismo foi a perda de massa das amostras.

Tabela 1 – Dados obtidos após 90 dias de incubação das amostras.

Placa	PSmi(g)	PSmf(g)	Δ PSm	Taxa de biodegradação PS (%)	PPmi(g)	PPmf(g)	Δ PPm	Taxa de biodegradação PP (%)
1	0,0023	0,0021	0,0002	8,69	0,0021	0,0020	0,0001	4,76
2	0,0019	0,0017	0,0002	10,52	0,0022	0,0021	0,0001	4,54
3	0,0019	0,0018	0,0001	5,26	0,0025	0,0024	0,0001	4,00
4	0,0022	0,0021	0,0001	4,54	0,0025	0,0024	0,0001	4,00
5	0,0017	0,0015	0,0002	11,76	0,0024	0,0023	0,0001	4,16
6	0,0018	0,0017	0,0001	5,55	0,0021	0,0020	0,0001	4,76
7	0,0017	0,0016	0,0001	5,88	0,0021	0,0020	0,0001	4,76
8	0,0017	0,0016	0,0001	5,88	0,0025	0,0024	0,0001	8
9	0,0017	0,0015	0,0002	11,76	0,0025	0,0024	0,0001	4,00
10	0,0017	0,0015	0,0002	11,76	0,0022	0,0021	0,0001	4,54
11	0,0019	0,0018	0,0001	5,26	0,0023	0,0021	0,0002	8,69
12	0,0016	0,0014	0,0002	12,5	0,0027	0,0026	0,0001	3,70
13	0,0016	0,0015	0,0001	6,25	0,0021	0,0020	0,0001	4,76
14	0,0019	0,0016	0,0003	15,78	0,0023	0,0022	0,0001	4,34
15	0,0019	0,0018	0,0001	5,26	0,0025	0,0023	0,0002	8
16	0,0015	0,0014	0,0001	6,66	0,0024	0,0023	0,0001	4,16
17	0,0017	0,0016	0,0001	5,88	0,0024	0,0022	0,0002	8,33
18	0,0018	0,0017	0,0001	5,55	0,0022	0,0022	0,0021	4,54
19	0,0016	0,0014	0,0002	12,50	0,0026	0,0025	0,0001	3,84
20	0,0017	0,0016	0,0001	5,88	0,0021	0,0020	0,0001	4,76
Média				8,16				5,13

Fonte: Autoria própria (2021).

A equação utilizada para a obtenção do potencial de degradação foi:

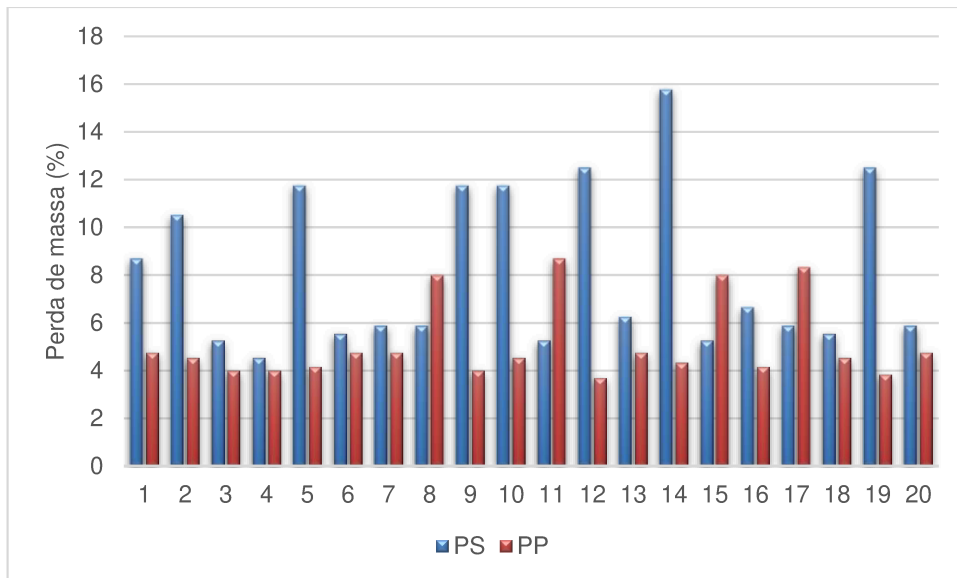
$$\Delta m = m_f - m_i, \text{ sendo:}$$

Δm = variação de massa;
mf = massa final;
mi = massa inicial.

Em posse do valor de variação de massa, aplicando regra de 3, obtém-se a perda de massa percentual.

Observa-se que o fungo foi mais eficiente biodegradando poliestireno comparado ao polipropileno (Gráfico 1). O peso das amostras foi baixo, o que pode ter influenciado na precisão das taxas de biodegradação. O gráfico Box-Plot (Figura 5) demonstra as médias e o desvio padrão para cada material, bem como seus valores extremos (máximo e mínimo).

Gráfico 1: Comparativo de biodegradação de poliestireno (PS) x polipropileno (PP)



Fonte: Autoria própria (2021).

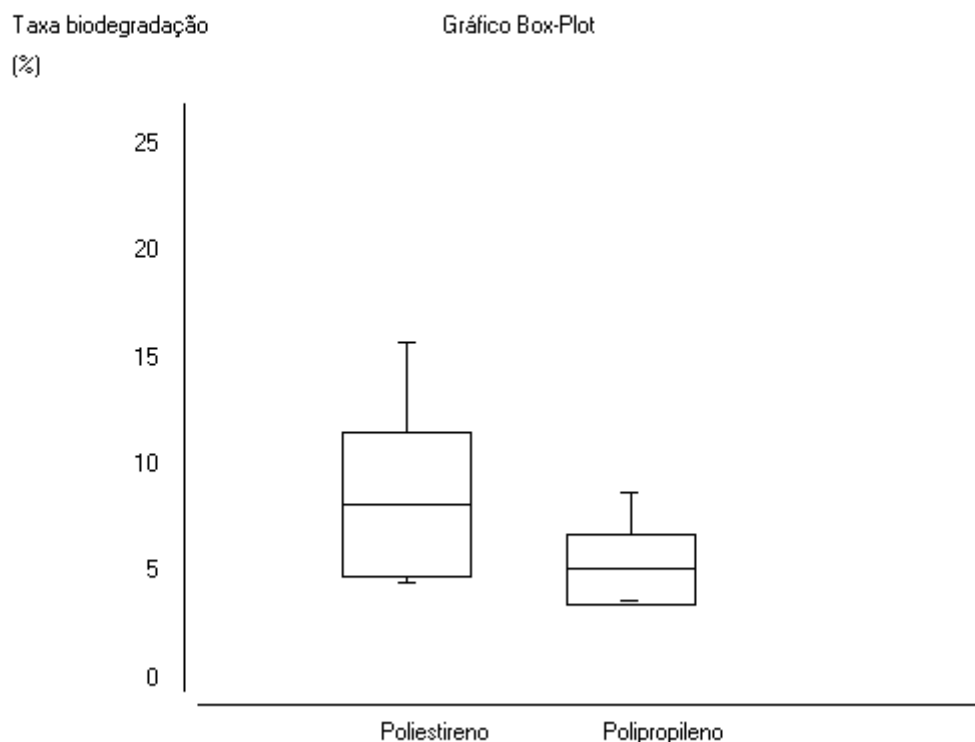
O poliestireno apresentou um valor médio de taxa de biodegradação de 8,16% enquanto para o polipropileno o valor médio foi de 5,13%. O valor mínimo da taxa de biodegradação para PS foi de 4,54% e o máximo de 15,78%, já o PP teve mínimo e máximo de 3,70% e 8,69%, respectivamente. Para PS o desvio padrão foi de 3,39 e a variância de 11,53, nas amostras de PP o desvio padrão 1,64 e a variância ficou na ordem de 2,69.

A partir dos dados obtidos pode-se inferir que o PS teve valores mais dispersos em relação ao PP, os valores mínimos e máximos evidenciam tal afirmativa. Quando se compara as médias aritméticas, observa-se que o valor para o PS foi aproximadamente 37% maior ante

ao PP. O desvio padrão e a variância apresentados para as amostras de PS também se mostraram bem maiores quando comparados aos valores apresentados pelo PP.

Em quatro placas diferentes (8, 11, 15 e 17) os valores da perda de massa do polipropileno se mostraram maiores que os valores de poliestireno. Não é possível afirmar a razão destes resultados. Em oito placas (1, 2, 5, 9, 10, 12, 14 e 19), os valores percentuais da perda de massa por parte do poliestireno se mostraram muito maiores quando comparados ao polipropileno.

Figura 5 – Gráfico Box-Plot de medidas de dispersão



Fonte: Autoria própria (2021).

Yang et al (2015) ressaltam que existe grande diversidade microbiológica em simbiose com a larva de Tenébrio, onde seu trato digestivo pode ser considerado um biorreator eficiente e a cepa em suspensão de *Exiguobacterium* sp. No estudo realizado por esses autores, o índice de degradação média do poliestireno expandido (EPS) foi de 7,4% em 60 dias de testes. O estudo realizado por Yang et al. (2018) foi o primeiro a relatar a presença de bactérias

degradantes de poliestireno no trato intestinal de *Tenebrio molitor* L. confirmado pelo crescimento bacteriano em um meio de cultura contendo PS e pela medição da perda de peso do material. Foi evidenciado também um curto tempo de retenção do material no conteúdo intestinal da larva, sendo que em menos de 24 horas 47,7% do carbono foi convertido em CO₂.

Para o projeto em questão, pode-se verificar que o fungo encontrado no trato intestinal da larva apresentou em média uma taxa de degradação do PS de 8,16% e de 5,13% para PP, evidenciando que o microrganismo possui um grande potencial de biodegradação.

Os estudos envolvendo consumo de EPS por microrganismos tem se mostrado promissores, e inúmeras espécies de bactérias e fungos possuem bom desempenho, metabolizando o EPS. De acordo com Yang et al (2018), os ensaios não são padronizados devido à grande diversidade e fatores limitantes para o metabolismo de cada espécie estudada, impossibilitando a comparação de rendimento entre eles.

Em Medeiro et al. (2018) o teste foi aplicado em um substrato contendo apenas EPS e outro substrato nutritivo. As eficiências de redução do material foram de 3,62% e 32,28%, nessa ordem.

Em um estudo recente publicado por Araújo et al. (2020), que se utilizou do mesmo fungo para analisar a biodegradação de poliestireno expandido (EPS), obteve um resultado de 8,56% de taxa de biodegradação em um período de 48 dias. No mesmo estudo, bactérias presentes no trato intestinal da larva de *Tenebrio* também foram isoladas, totalizando seis colônias diferentes, e que apresentaram uma taxa de biodegradação média de 4,36%. A metodologia utilizada no estudo em questão foi similar a utilizado neste presente trabalho.

Comparando com os estudos citados acima, os resultados obtidos no projeto mostraram que o microrganismo utilizado apresentou uma taxa de biodegradação considerável para ambos os materiais, tendo em vista que em todas as amostras ocorreu a perda de massa, embora careçam de estudos mais aprofundados, em especial para o polipropileno, pouco testado até o momento. O estudo é um dos pioneiros a utilizar o microrganismo para os fins propostos. Não foi realizado nenhum tipo de identificação do fungo.

Para a aplicação em escala industrial, o tempo de retenção dos materiais em relação a porcentagem de biodegradação efetiva apontam a necessidade de avanço de novos estudos, haja vista que os polímeros utilizados podem conter aditivos e outras impurezas biodegradáveis, que podem representar uma fração significativa do polímero e que são mais facilmente quebrados que sua estrutura real.

5 CONCLUSÃO

A crescente produção e consumo global de materiais plásticos aliados à sua baixa reciclagem levam ao acúmulo destes resíduos no meio ambiente, sendo potenciais poluidores do solo e da água. Alternativas que visam mitigar estes efeitos adversos são objetos de estudos recentes.

Estudos recentes indicam microrganismos capazes de biodegradar e mineralizar tipos diferentes de plásticos, trazendo uma nova perspectiva ambiental para a solução destes problemas.

O presente estudo buscou apresentar uma nova alternativa para o tratamento destes tipos de resíduos. Os fungos utilizados no trabalho, oriundos do trato intestinal da larva de *Tenebrio*, se mostraram eficientes na biodegradação de poliestireno e polipropileno. A taxa média de biodegradação do primeiro material foi de 8,16% enquanto no segundo material foi de 5,13%. No geral, a degradação de PS foi 37% maior que a degradação de PP. O único parâmetro utilizado para a análise foi a perda de massa por parte dos materiais quando exposto ao meio colonizado pelos microrganismos.

Não é possível afirmar que toda essa perda de massa seja efetivamente dos materiais em questão, haja vista que os produtos podem conter aditivos e outros elementos biodegradáveis, que constituíram uma fração do material e podem influenciar na análise dos resultados. Os pesos medidos dos materiais foram baixos, o que também pode ter influenciado na precisão dos cálculos percentuais.

Ao se comparar com métodos tradicionais, onde normalmente o esgotamento destes materiais são feitos por incineração, a alternativa se mostra ambientalmente mais agradável, porém a perda de massa ainda é muito baixa.

A aplicação do método em larga escala necessita de estudos mais avançados, como o comportamento do fungo estudados em simbiose com outros microrganismos. A descoberta de enzimas catalisadoras do processo de biodegradação pode significar um grande avanço para os estudos.

Vale ressaltar que o microrganismo utilizado nesse trabalho não foi identificado, abrindo uma lacuna para trabalhos subsequentes.

REFERÊNCIAS

- ADIRPLAST. **O destino da destinação correta de recicláveis.** Disponível em: <<https://adirplast.org.br/news/o-desafio-da-destinacao-correta-de-reciclaveis/>>. Acesso em: 12 set. 2020.
- ARAUJO, J. H. B.; GOMES, K. F.; SILVA, V. S.; FERNANDES, A. Degradação de poliestireno expandido utilizando microrganismos. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA*, 25., 2020, Toledo - PR. **Anais [...]**. Toledo: UTFPR, 2020.
- CARVALHO, J. L. M; TOLEDO, J. C. Polipropileno: um mercado em constante evolução. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS*, 14., 2000, São Pedro - SP. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC413-002.pdf>. Acesso em: 09 set. 2020.
- DANSO, D; CHOW, J; STREIT, W, R. Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 85, 2019.
- GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L.; Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science advances**. 3(7), 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- GROTE, Z. V. Análise energética e exergética de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (Isopor). **Mackenzie de Engenharia e Computação**, Guaratinguetá, v. 1, n. 3, p. 9- 27, dezembro 2003.
- GRUPO RPF. **Entenda o que é polipropileno (PP) e para o que serve?** Disponível em: <<https://www.gruporpf.com.br/blog/entenda-o-que-e-polipropileno-pp-que-para-o-que-serve/>>. Acesso em: 03 abr. 2021.
- HAINES, C. P. **Insects and arachnids of tropical stored products: their biology and identification**. 2. ed. Chatham, Kent: Natural Resources Institute, 1991.
- JAMBECK, J. R; GEYER, R; WILCOX, C; SIEGLER, T. R; PERRYMAN, M; ANDRADY, A; NARAYAN, R; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, p. 768-771, 2015.
- OLIVEIRA, Maria Clara Brandt Ribeiro. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.
- LI, W. C; TSE, F. H; FOK, L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. **Science of The Total Environment**, v. 566-567, p. 333-349, 2016.
- MACHADO, A. A. S; KLOAS, W; ZARFL, S. H; RILLIG, M. C. Microplastics as a emerging threat to terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, edição 4, p. 1405-1416, 2018.

MAISPOLÍMEROS. **Poliestireno (PS): entenda suas principais características, aplicações e tipos.** Disponível em: <<http://www.maispolimeros.com.br/2019/02/25/poliestireno-ps/>>. Acesso em: 09 set. 2020.

MALERE, Caroline Paganucci dos Reis. **Síntese e Caracterização de Padrão de Poliestireno para Cromatografia de Permeação em Gel através da Polimerização via Radical Livre Controlada mediada por Radicais Nitróxidos.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas - SP, 2011.

MEDEIROS, A. S.; TOMOTO, A. L. S.; ARAÚJO, J. H. B.; BRAGION, G. R.; GARBIN, B.; CHERULLI, G. M. S. B.; MATOS, I. V. Biodegradação de poliestireno expandido utilizando *Tenebrio molitor* Linnaeus, 1758 (Coleoptera: Tenebrionidae) e *Zophonbas morio* Fabricius, 1776 (Coleoptera: Tenebrionidae). **Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 5, n. 9, p. 271-279, 2018.

MUSSI-DIAS, V.; SANTOS, A. V.; TAVARES, L. P. S.; HERNÁNDES, G.A.F; FREIRE, M.G.M. Degradação de poliuretano por fungos: perspectivas para preservação ambiental. **Revista Perspectivas Online: Biológicas & Saúde**, v. 7, n. 24, p. 88-95, 2017. ISSN: 2236-8868 (Online). DOI: 10.25242/886872420171168.

NUNES, E. C. D. **Termoplásticos: estruturas, propriedades e aplicações.** São Paulo – SP. Editora Erica, 2015.

OLIVEIRA, L.; LACERDA, C. S.; ALVES, I. J. B. R.; SANTOS, E. D.; OLIVEIRA, S. A.; BATISTA, T. S. A. Impactos ambientais causados pelas sacolas plásticas: o caso Campina Grande, PB. **Revista Brasileira de Biologia e Farmácia**, v. 7, n. 1, p. 88-104, 2012.

Disponível em:

http://sites.uepb.edu.br/biofar/download/v7n12012/impactos_ambientais_causados_pelas_sacolas_plasticas.pdf. Acesso em: 12 set. 2020.

OLIVEIRA, V. G. **Processos biotecnológicos industriais: produção de bens de consumo com uso de fungos e bactérias.** São Paulo - SP. Editora Erica, 2015.

PLASTBRING. **Poliestireno: o que é, tipos e propriedades.** Disponível em:

<<https://plastbrinq.com.br/poliestireno/>>. Acesso em: 12 set. 2020.

PLÁSTICO INDUSTRIAL. **Polipropileno (PP).** Disponível em: <[https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/604-Polipropileno-\(PP\).html](https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/604-Polipropileno-(PP).html)>. Acesso em: 22 maio 2021.

PLÁSTICO VIRTUAL. **Quais são os produtos que utiliza PP?** Disponível em: <<https://plasticovirtual.com.br/quais-sao-os-produtos-que-utiliza-pp/>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

PLASTICS EUROPE. **Plastics - the Facts 2017.** Disponível em:

https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf. Acesso em: 11 set. 2020.

PLASTICS INSIGHT. **Brazil Processed Plastics Production, Consumption & Trade Balance (2014)**. Disponível em: <<https://www.plasticsinsight.com/brazil-processed-plastics-production-consumption-trade-balance-2014/>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

PLASTICS INSIGHT. **Europe Plastics Production**. Disponível em: <<https://www.plasticsinsight.com/europe-plastics-production/>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

PLASTICS INSIGHT. **World Plastics Production**. Disponível em: <<https://www.plasticsinsight.com/world-plastics-production/>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

SAGRILLO, F. S.; DIAS, F. R. F.; TOLENTINO, N. M. C.; OLIVEIRA, V. G. **Processos produtivos em biotecnologia**. São Paulo - SP. Editora Erica, 2018.7

SCHMIDT, J.; WEI, R.; OESER, T.; SILVA, L. A. D.; BREITE, D.; SCHULZE, A.; ZIMMERMANN, W. Degradation of Polyester Polyurethane by Bacterial Polyester Hydrolases. **Polymers**, v. 9, n. 65, 2017. DOI:0.3390/polym9020065.

VITOLO, M. **Biotecnologia farmacêutica: aspectos sobre aplicação industrial**. São Paulo - SP. Editora Edgar Blucher, 2015.

WEI, R.; ZIMMERMANN, W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?. **Microbial biotechnology**, v. 10, p. 1308-1322, 2017.

YANG, Y.; YANG, J.; WU, W.; ZHAO, J.; SONG, Y.; GAO, L.; YANG, R.; JIANG, L. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: Part 1. Chemical and physical characterization and isotopic tests. **Environmental science & technology**, v. 49, n. 20, p. 12080-12086, 2015.

YANG, S. S.; BRANDOM, A. M.; XING, D. F.; YANG, J.; PANG, J. W.; CRIDDLE, C. S.; REN, N. Q.; WU, W. M. Progresses in Polystyrene Biodegradation and Prospects for Solutions to Plastic Waste Pollution. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2018. p. 012005.