



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS - PPGTEM**

**AVALIAÇÃO DA COMPOSTAGEM E VERMICOMPOSTAGEM NA  
DEGRADAÇÃO DE FILMES DE PEAD E BLENDAS DE PLA/TPS**

**JONAS LUDWIG DE BITENCOURT**

Farroupilha

2022

JONAS LUDWIG DE BITENCOURT

AVALIAÇÃO DA COMPOSTAGEM E VERMICOMPOSTAGEM NA DEGRADAÇÃO  
DE FILMES DE PEAD E BLENDAS DE PLA/TPS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, com a orientação do Prof.Dr. Edson Luiz Francisquetti e co-orientação Dra. Mara Zeni Andrade.

Farroupilha  
2022

### CIP - Catalogação na Publicação

B624a Bitencourt, Jonas Ludwig de, 1989-  
Avaliação da compostagem e vermicompostagem na degradação de filmes  
de PEAD e blenda de PLA/TPS. / Jonas Ludwig de Bitencourt -- 2022.  
94 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) -- (Mestrado profissional em Tecnologia e  
Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência  
e tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, 2022.  
Orientador: Edson Luiz Francisquetti.  
Coorientadora: Mara Zeni Andrade.

1. Biopolímeros. 2.Compostagem. 3.Vermicompostagem.  
I. Francisquetti, Edson Luiz, orient. II.Andrade, Mara Zeni,  
coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 678.7-026.85

“Avaliação da compostagem e vermicompostagem na degradação de filmes de  
PEAD e blenda de PLA/TPS”

Jonas Ludwig de Bitencourt

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Farroupilha, 30 de agosto de 2022.

Banca Examinadora:

---

Dra. Ana Paula Bilck - IFRS

---

Dr. Ana Maria Coulon Grisa - UCS

---

Dra. Laura de Andrade Souza - IFRS

---

Dra. Ruth Marlene Campomanes Santana - UFRGS



## SUMÁRIO

RESUMO .....	11
ABSTRACT .....	12
1 INTRODUÇÃO .....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Resíduos domiciliares .....	16
2.2 Polietileno .....	16
2.3 Polímeros biodegradáveis .....	17
2.4 Degradação dos polímeros .....	18
2.5 Vermicompostagem.....	23
2.6 Estruturas de vermicompostagem e compostagem .....	29
2.7 Parâmetros da vermicompostagem .....	30
2.7.1 Temperatura.....	30
2.7.2 Oxigênio e Umidade .....	30
2.7.3 Relação carbono / nitrogênio.....	31
2.7.4 Potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica .....	31
2.7.5 Granulometria .....	31
2.8 Compostagem.....	31
2.8.1 Resíduos orgânicos utilizados na compostagem.....	32
2.8.2 Relação carbono nitrogênio.....	33
2.8.3 Compostagem doméstica .....	35
2.9 Ensaio de toxicidade de solo.....	36
2.10 Teste de aceitação de substratos para anelídeos .....	38
2.11 Teste de compostabilidade .....	38
3 OBJETIVOS.....	40
3.1 Objetivo geral.....	40
3.2 Objetivos específicos.....	40
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
4.1 Materiais .....	41
4.1.1 Estrutura de vermicompostagem e compostagem:.....	41
4.1.2 Amostras poliméricas.....	42
4.1.3 Ensaio de toxicidade.....	42
4.1.4 Teste de aceitação dos substratos:.....	43
4.1.5 Caracterização dos polímeros: .....	44
4.1.6 Lavagem das amostras:.....	45
4.1.7 Teste de compostabilidade .....	45
4.1.8 Controle das variáveis da vermicompostagem e compostagem .....	45
4.2 Métodos .....	46
4.2.1 Método para determinação da eficiência da vermicompostagem dos polímeros ..	46

4.2.2 Método para ensaio de toxicidade dos polímeros.....	48
4.2.3 Método para aceitação do substrato .....	48
4.2.5 Período de aclimatação e adição dos anelídeos .....	50
4.2.6 Preparação das amostras poliméricas e caracterização inicial .....	50
4.2.7 Inserção dos polímeros na vermicomposteira e na composteira .....	50
4.2.8 Retirada das amostras, lavagem e secagem .....	51
4.2.9 Teste de compostabilidade .....	52
4.2.10 Controle das variáveis da vermicompostagem e compostagem .....	52
4.2.11 Ensaio de tração .....	52
4.2.12 Microscopia óptica .....	53
4.2.13 Ensaio de FTIR .....	53
4.2.14 Ensaio de DSC.....	53
4.2.15 Redução de massa .....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
5.1 Ensaio de toxicidade dos polímeros .....	55
5.2 Aceitação do substrato .....	56
5.3 Adição e período de aclimatação dos anelídeos .....	57
5.4 Teste de compostabilidade.....	60
5.5 Controle das variáveis da vermicompostagem e compostagem.....	61
5.6 Microscopia das embalagens.....	64
5.7 Ensaio mecânicos de tração .....	66
5.7.1 Ensaio de tração das amostras da vermicompostagem .....	66
5.7.2 Ensaio de tração das amostras da compostagem .....	67
5.8 FTIR das amostras da vermicompostagem e compostagem .....	71
5.9 DSC das amostras da vermicompostagem e compostagem .....	74
5.10 Verificação de massa das amostras da vermicompostagem/compostagem .....	83
6 CONCLUSÃO .....	85
7 TRABALHOS FUTUROS .....	87
8 REFERÊNCIAS .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estrutura molecular do polietileno. Fonte [13].....	17
Figura 2 Estrutura do poliacidolático PLA.....	18
Figura 3 Estrutura do amido termoplástico TPS [20].....	18
Figura 4 Produtos comuns de degradação térmica e foto oxidativa para polietileno (R, R' e R' são cadeias poliméricas de comprimento variável) [17].....	19
Figura 5 Degradação fotooxidativa de PE contendo carbonila como impurezas (a) um mecanismo Norrish tipo I ou (b) um mecanismo Norrish tipo II. (c) Recombinação radical para formar cadeias reticuladas. R, R' e R' são cadeias poliméricas de comprimento variável [17].....	20
Figura 6 Degradação hidrolítica do PLA na presença de água [27] .....	22
Figura 7 Degradação enzimática do PLA em oligômeros e PLA de baixa massa molar [26]. .....	22
Figura 8 Hidrólise do amido por ação enzimática da amilase [29].....	23
Figura 9 Sistema digestivo dos anelídeos e identificação do clitelo. Fonte: <a href="http://www.bioorbis.org/2018/11/minhocas-padrao-anelideos.html">http://www.bioorbis.org/2018/11/minhocas-padrao-anelideos.html</a> .....	26
Figura 10 Estrutura Vermicomposteira Humi. Fonte: <a href="https://composteirahumi.eco.br/">https://composteirahumi.eco.br/</a> .....	29
Figura 11 Etapas do Processo de Compostagem [44].....	32
Figura 12 Usinas de Compostagem. A da esquerda localiza-se em Belo Horizonte/MG e a da direita em Bituruna/PR. [49].....	33
Figura 13 Composteira com tela [49]. .....	35
Figura 14 Composteira com madeira [49]. .....	35
Figura 15 Composteira com caixa plástica [49].....	36
Figura 16 Composteira com tambor [49]. .....	36
Figura 17 Exemplo da câmara com duas seções [15]. .....	37
Figura 18 Vermicomposteira Humi. Fonte: <a href="https://composteirahumi.eco.br/">https://composteirahumi.eco.br/</a> .....	41
Figura 19 Vermicomposteira e Composteira. Fonte: O autor.....	41
Figura 20 Filme de PEAD puro, processado no IFRS.....	42
Figura 21 Filme de PEAD convencional. ....	42
Figura 22 Filme de PLA/TPS (Alemanha).....	42
Figura 23 Restos vegetais de: casca e polpa de banana (a), brócolis (b), cenoura (c) e maçã (d).....	43
Figura 24 Minhocas <i>Eisenia fetida</i> . .....	44
Figura 25 Esterco bovino. ....	44
Figura 26 Fluxograma representando o método de determinação da eficiência da vermicompostagem dos polímeros. ....	46
Figura 27 Disposição frontal das amostras vermicomposteira / composteira. Fonte: O autor. .....	47
Figura 28 Disposição superior das amostras vermicomposteira / composteira. Fonte: O autor.....	47
Figura 29 Sistema de controle e sensores. ....	49
Figura 30 Estrutura de vermicompostagem e compostagem.....	49
Figura 31 Preparação com resíduos orgânicos.....	49
Figura 32 Disposição das amostras da vermicomposteira e composteira. Fonte: O autor. ...	51
Figura 33 Disposição das amostras da Vermicomposteira. Fonte: O autor. ....	51
Figura 34 Lavagem das amostras.....	51
Figura 35 A: Recipiente e Divisória vertical; B: Recipiente com solo de controle e solo com polímero; C: Amostras de PEAD Puro; D: Amostra de PEAD Convencional; E: Amostra de PLA/TPS. ....	56
Figura 36 Experimento de aceitação de substrato. ....	56
Figura 37 <i>Software</i> de verificação das variáveis. ....	57
Figura 38 Composteira ao receber as minhocas e substrato de alimentação	

(vermicompostagem).....	58
Figura 39 Atividade sexual dos anelídeos.....	58
Figura 40 Casulos eclodidos.....	58
Figura 41 Medidas de T (°C), pH e U(%) durante o período de ensaio para vermicompostagem.....	59
Figura 42 Medidas de T (°C), pH e U(%) durante o período de ensaio para compostagem..	59
Figura 43 (A) amostra inicial de algodão puro, (B) amostra de algodão puro após 5 dias na composteira.....	60
Figura 44 Curvas de tração do algodão antes e depois do teste de compostabilidade.....	60
Figura 45 Microscopia óptica (MO) PEAD puro (1), PEAD convencional (2) e PLA/TPS(3); após (a=0 dia, b=30 dias, c=60 dias, d=90 dias). No ambiente vermicompostagem. Escala de ampliação 50X.....	65
Figura 46 Microscopia óptica (MO) PEAD puro (1), PEAD convencional (2) e PLA/TPS (3); após (a=0 dia, b=30 dias, c=60 dias, d=90 dias). No ambiente compostagem. Escala de ampliação 50X.....	65
Figura 47 Ensaio de tração PE Puro 0, 30, 60 e 90 dias.....	66
Figura 48 Ensaio de tração PEAD Convencional 0, 30, 60 e 90 dias.....	66
Figura 49 Ensaio de tração PLA/TPS 0, 30, 60 e 90 dias.....	67
Figura 50 Ensaio de tração PE puro 0, 30, 60 e 90 dias.....	67
Figura 51 Ensaio de tração PEAD convencional 0, 30, 60 e 90 dias.....	68
Figura 52 Ensaio de tração PLA/TPS 0, 30, 60 e 90 dias.....	68
Figura 53 FTIR PE puro vermicompostagem (0, 30, 60 e 90 dias).....	71
Figura 54 FTIR PE puro compostagem (0, 30, 60 e 90 dias).....	72
Figura 55 FTIR PEAD convencional vermicompostagem (0, 30, 60 e 90 dias).....	72
Figura 56 FTIR PEAD convencional compostagem (0, 30, 60 e 90 dias).....	73
Figura 57 FTIR PLA/TPS vermicompostagem (0, 30, 60 e 90 dias).....	73
Figura 58 FTIR PLA/TPS compostagem (0, 30, 60 e 90 dias).....	74
Figura 60 DSC PE puro 60 dias compostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	75
Figura 59 DSC PE puro inicial (0 dias). 1)Heat from 30°C to 200°C at 20°C/min. 2) Hold for 1 min at 200°C. 3) Cool from 200°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 1 min at 30°C. 5)Heat from 30°C to 200°C at 20°C/min.....	75
Figura 62 DSC PEAD convencional 30 dias compostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	76
Figura 61 DSC PE puro 90 dias compostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	76
Figura 64 DSC PEAD Convencional 90 dias compostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	77
Figura 63 DSC PEAD convencional Inicial (0 dias). 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	77
Figura 66 DSC PE puro 30 dias vermicompostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	78
Figura 65 DSC PEAD convencional 60 dias compostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	78
Figura 68 DSC PEAD convencional 30 dias vermicompostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4)Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min.....	79

Figura 67 DSC PE puro 60 dias vermicompostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4) Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min. ....	79
Figura 70 DSC PEAD convencional 90 dias vermicompostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4) Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min. ....	80
Figura 69 DSC PE puro 90 dias vermicompostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4) Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min. ....	80
Figura 71 DSC PEAD convencional 60 dias vermicompostagem. 1) Heat from 30°C to 180°C at 50°C/min. 2) Hold for 1 min at 180°C. 3) Cool from 180°C to 30°C at 20°C/min. 4) Hold for 2 min at 30°C. 5) Heat from 30°C to 180°C at 20°C/min. ....	81
Figura 72 Amostras de PEAD convencional com furos de minhoca.....	84
Figura 73 Amostra de PLA/TPS com furos de minhoca.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Comparação de métodos utilizados na caracterização dos polímeros em ambiente de vermicompostagem: .....	27
Tabela 2 Resíduos orgânicos para Compostagem [39]. .....	32
Tabela 3 Valores de carbono e nitrogênio de alguns resíduos [39]. .....	34
Tabela 4 Resultados dos ensaios de toxicidade. ....	55
Tabela 5 Verificação inicial e final das massas dos anelídeos. ....	57
Tabela 6 Resultados dos Ensaios de tração dos algodões. ....	61
Tabela 7 Controle de variáveis vermicompostagem. ....	62
Tabela 8 Controle de variáveis compostagem. ....	63
Tabela 9 Ensaios de tração das amostras da vermicompostagem. ....	69
Tabela 10 Ensaios de tração das amostras da compostagem. ....	70
Tabela 11 Redução de cristalinidade PEAD convencional. ....	81
Tabela 12 Redução de cristalinidade PE puro. ....	82
Tabela 13 Redução de massa das amostras da vermicompostagem e compostagem. ....	83

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

C/N – Relação carbono nitrogênio

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

DSC – Calorimetria diferencial exploratória

FTIR – Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

HDPE – Polietileno de alta densidade

IFRS – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

ISO – *International Standardization for Organization*

LDPE - Polietileno de baixa densidade

LLDPE - Polietileno linear de baixa densidade

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MO – Microscopia óptica

NBR – Norma brasileira

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PELBD – Polietileno linear de baixa densidade

PEUAPM – Polietileno de ultra alto peso molecular

PEUBD – Polietileno de ultra baixa densidade

pH – Potencial hidrogeniônico

PLA – Ácido polilático

PS – Poliestireno

TGA – Análise termogravimétrica

TPS – Amido termoplástico

UHMWPE - Polietileno de ultra alto peso molecular

ULDPE - Polietileno de ultra baixa densidade

UV – ultravioleta

## RESUMO

Ao analisar a composição gravimétrica de um aterro sanitário, pode ser observado que grande parte do material é formado por polímeros oriundos das sacolas plásticas, utilizadas para acondicionar o lixo orgânico. Acredita-se que explorar alternativas para mitigar os impactos, decorrentes do descarte incorreto desses resíduos, se faz necessário. Assim é possível segregá-los mais facilmente nos aterros, sendo que o resíduo orgânico pode ser valorado por meio de métodos de compostagem ou vermicompostagem. Dessa forma, obtém-se um incremento na vida útil do aterro e ocorre um ganho considerável do ponto de vista ambiental. Diante disso, o presente trabalho busca analisar a degradação e a descaracterização de poliolefinas comerciais em ambientes de vermicompostagem. A vermicompostagem é um método de tratamento e valorização da fração orgânica dos resíduos que recorre a espécies de anelídeos. Neste estudo foram utilizados os da espécie *Eisenia fetida* com objetivo de determinar a sua eficiência na decomposição do material polimérico presente em embalagens descartáveis de polietileno. A biodegradação dos materiais poliméricos foi avaliada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, calorimetria exploratória diferencial, microscopia óptica, ensaio mecânico de tração e redução de massa. Após a realização destes ensaios foi possível observar degradação dos materiais, bem como ganho de eficiência no ambiente vermicomposto. Para tanto os ambientes de vermicompostagem e compostagem à temperatura, umidade, potencial hidrogeniônico e relação carbono-nitrogênio, foram controlados por meio de sensores. Portanto, este estudo contribui efetivamente para o escopo de pesquisa referente à degradação de polímeros à medida que estabelece a eficiência de degradação em ambiente vermicomposto com filmes comerciais.

Palavras-chave: Biodegradação, Vermicompostagem, Compostagem, Polietileno, Ácido polilático.



## ABSTRACT

When analyzing the gravimetric composition of a sanitary landfill, it can be observed that a large part of the material is formed by polymers from plastic bags, used to store organic waste. It is believed that exploring alternatives to mitigate the impacts resulting from the incorrect disposal of these wastes is necessary. Thus, it is possible to segregate them more easily in landfills, and the organic waste can be valued through composting or vermicomposting methods. In this way, an increase in the useful life of the landfill is obtained and there is a considerable gain from an environmental point of view. Therefore, the present work seeks to analyze the degradation and mischaracterization of commercial polyolefins in vermicomposting environments. Vermicomposting is a method of treatment and recovery of the organic fraction of waste that uses annelid species. In this study, *Eisenia fetida* species were used to determine their efficiency in the decomposition of polymeric material present in disposable polyethylene packaging. The biodegradation of polymeric materials was evaluated by infrared spectroscopy with Fourier transform, differential scanning calorimetry, optical microscopy, mechanical tensile test and mass reduction. After carrying out these tests, it was possible to observe degradation of the materials, as well as a gain in efficiency in the vermicompost environment. For this purpose, the vermicomposting and composting environments at temperature, humidity, hydrogen potential and carbon-nitrogen ratio were controlled using sensors. Therefore, this study effectively contributes to the scope of research regarding polymer degradation as it establishes the degradation efficiency in a vermicompost environment with commercial films.

**Keywords:** Biodegradation, Vermicomposting, Composting, Polyethylene, Polylactic acid.

## 1 INTRODUÇÃO

Os polímeros sintéticos, oriundos dos pólos petroquímicos, possuem taxas de degradação muito baixas e tornam-se um problema ambiental, capazes de colocar em risco o equilíbrio dos ecossistemas, quando descartados inadequadamente [1-3].

As sacolas plásticas são produtos consumidos todos os dias, mas que chegaram à vanguarda das políticas públicas ambientais nas últimas décadas. Elas apresentam benefícios tais como: baixo custo e são leves, duráveis e resistentes à água, o que as tornou imensamente populares. O consumo global de sacolas plásticas é estimado em 0,5 a 1 trilhão de sacolas por ano, ou 1 a 2 milhões de sacolas a cada minuto [1].

No Brasil, calcula-se que ocorra a distribuição de cerca de um milhão e meio de sacolas plásticas por hora, em diversos estabelecimentos comerciais, como lojas e supermercados. Destas, uma pequena parte é reciclada, sendo grande parte encaminhada aos aterros sanitários [4]. A alta produtividade e o uso indiscriminado destas sacolas, associados a um descarte inadequado, têm agravado os problemas ambientais, sobretudo no solo e na água. Estima-se que cerca de 10% de todo o lixo orgânico coletado nas cidades é embalado em sacolas plásticas de uso único, visto que há o costume de acondicionar resíduos orgânicos nestas [5].

Gerando um passivo ambiental, a tríade: produção em massa, possibilidade de longos tempos de decomposição e descarte incorreto são a justificativa para tal descaso ambiental. Isso fica evidente quando se observa a poluição do solo, dos oceanos, dos mares e rios com estes resíduos. Entretanto, quando se trata de um aterro sanitário, outro problema se faz presente: as sacolas plásticas são resistentes e impermeáveis, o que dificulta a degradação da matéria orgânica [6]. Diante do exposto, torna-se relevante buscar alternativas para mitigar os impactos decorrentes da utilização das sacolas plásticas como acondicionadores de resíduos.

Nas últimas duas décadas muitos materiais biodegradáveis tem sido desenvolvidos, tais como amidos termoplásticos (TPS), poli ácido láctico (PLA) e suas blendas. Porém, estes polímeros ainda apresentam limitações quanto a custo, resistência mecânica e química quando comparados com polímeros sintéticos. Também a reciclagem dos polímeros biodegradáveis segundo *The European Waste Framework Directive* deve ser realizada através da compostagem [7].

Dessa forma, é possível segregá-los mais facilmente nos aterros. Assim, o

resíduo orgânico pode ser valorizado por meio de métodos de compostagem e vermicompostagem, incrementando a vida útil do aterro e reduzindo os impactos do ponto de vista ambiental [8]. Por outro lado, devido ao contexto sócio econômico e político, muitas comunidades não possuem acesso a sacolas plásticas produzidas a partir de polímeros biodegradáveis, o que torna a utilização das sacolas plásticas sintéticas, pós-consumo, uma alternativa barata para o acondicionamento de resíduos orgânicos domésticos, os quais posteriormente serão descartados em aterros, compostagem ou vermicompostagem [9].

A compostagem trata-se de uma biooxidação aeróbica exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, em estado sólido. Verifica-se a produção de gás carbônico, água, substâncias minerais e estabilização da matéria orgânica [33]. A vermicompostagem, por sua vez, é um método de tratamento e valorização da fração orgânica dos resíduos, que utiliza espécies de minhocas [9]. Animais anelídeos que estão distribuídos em solos úmidos de todo o mundo. Escavam galerias e canais no solo, abrigando-se e ingerindo restos vegetais juntamente com grandes quantidades de terra. Essa ingestão resulta na produção de húmus, que é a matéria orgânica decomposta, sendo considerado uma excelente fonte de nutrientes para o desenvolvimento de vegetais [10].

A vermicompostagem se estabelece como uma forma de tratamento desses resíduos, que se mostram indispensáveis para o desenvolvimento sustentável. Esta técnica proporciona a reciclagem de nutrientes, da composição orgânica que mantém os solos saudáveis e produtivos. Diante disso, pode-se destacá-la como uma alternativa, já que é ambientalmente correta e de baixo custo [11]. A pesquisa realizada neste trabalho busca analisar a degradação biológica e descaracterização de sacolas plásticas de polietileno e sacolas de PLA/TPS em um ambiente de vermicompostagem, onde foram utilizadas minhocas da espécie *Eisenia fetida*, popularmente conhecida como vermelha da Califórnia.

A poluição decorrente de materiais poliméricos, como poliestireno (PS) e polietileno (PE), no solo, oceanos, rios e aterros sanitários é uma preocupação ambiental já considerada há muitos anos. Larvas de *Zophobas atratus Fabricius* (Besouro Zophobas ou besouro de super verme), popularmente conhecidas por *superworms*, podem degradar PS e PE, recebendo, inclusive, fonte de energia para as suas atividades biológicas. A degradação destes polímeros ocorre por meio de

microorganismos presentes nos intestinos das larvas, que acabam por promover a despolimerização e degradação do material. Análises físicas e químicas confirmaram a biodegradação e a mineralização dos polímeros [12].

A vermicompostagem pode ser utilizada para tratar lodo de esgoto, que assim pode ser reciclado como fertilizante de boa qualidade. A aplicação desse lodo após vermicompostagem, com *Eisenia fetida*, não teria efeito adverso, visto que os metais pesados (Cu, Mn, Pb e Zn) foram reduzidos para limites permitidos. É importante destacar a constatação da resistência desses organismos à contaminação por metais pesados [13]. Outro estudo reportou a não toxicidade de cinco tipos de polímeros em relação à espécie *Eisenia fetida* e *Eisenia andrei*, inclusive o PE, foco do presente estudo [14]. Com base nestes estudos, e através da realização de ensaios normalizados pela ABNT NBR ISO 17512-1 [15] pode-se constatar que os polímeros utilizados na vermicompostagem não apresentaram toxicidade para os anelídeos utilizados.

Neste estudo pretende-se determinar a eficiência das minhocas (*Eisenia fetida*) na decomposição de filmes poliméricos à base de PEAD, provenientes de embalagens descartáveis. O controle de biodegradação dos materiais poliméricos ocorre através de técnicas espectroscópicas e morfológicas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Resíduos domiciliares

Resíduos domiciliares orgânicos, como: restos de comida, cascas de frutas, papéis, grama, restos de folhagens, restos de capina, pó de café, etc., podem ser transformados em adubo, quando são submetidos à compostagem e ou vermicompostagem, e com isso agregar valor a este resíduo, melhorando suas características físico-químicas e biológicas, levando vida ao solo e tornando-se uma fonte de nutrientes, melhorando inclusive as condições do ambiente [16].

Devido às condições sócio-econômicas e culturais, ainda são utilizadas sacolas plásticas para acondicionar estes resíduos por serem, de baixo custo, resistentes e impermeáveis. As sacolas plásticas, de uso comercial, são fornecidas em supermercados e pelo comércio em geral. Produzidas, em poliolefinas, principalmente, por polietilenos (PE). Uma vez utilizadas para acondicionar matéria orgânica, vão parar em aterros, plantas de compostagem ou vermicompostagem, ocasionando um significativo prejuízo na degradação dos resíduos orgânicos. Observa-se também uma perda significativa na vida útil do aterro sanitário, em função disso [6].

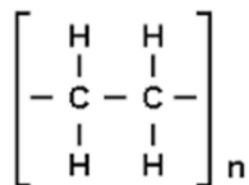
### 2.2 Polietileno

Polímeros sintéticos são estruturas formadas por centenas e milhares de unidades repetitivas chamadas de monômeros. Estes monômeros estão ligados entre si por ligações covalentes, conferindo a estes, alta massa molecular, associada à adição de antioxidantes e estabilizantes, o que lhes proporciona alta durabilidade. Em contrapartida a degradação ambiental fica prejudicada e muito demorada. Embalagens descartáveis normalmente são produzidas em poliolefinas, polímeros particularmente duráveis, devido à sua inércia química, biológica, hidrofobicidade, e ausência de grupos funcionais suscetíveis ao ataque de enzimas microbianas, luz e água. Estes fatores dificultam a degradação ambiental dos resíduos, tornando-os um problema quando são descartadas [17].

As poliolefinas somam cerca de 60% da demanda mundial de termoplásticos, sendo os polietilenos correspondentes a 40%. No Brasil, as poliolefinas representam

cerca de 65%, dos quais 43% correspondem aos polietilenos [17].

O polietileno (PE), Figura 1, obtido a partir do monômero de eteno, via polimerização por adição, dependendo da reação empregada e do catalisador utilizado podem ser produzidos os seguintes polietilenos: Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE); Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE); Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE); Polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM ou UHMWPE); Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou ULDPE) [18]. Do ponto de vista comercial, pode-se dizer que os polietilenos apresentam um perfil de volume e qualidade, com diferentes tipos (*grades*) de desempenho e produtividade, atendendo as necessidades das indústrias de transformação. Dos polietilenos convencionais o PEAD destaca-se por ter baixa permeabilidade à água e seu alto teor de cristalinidade o que lhe confere maior ponto de fusão, melhores propriedades químicas e mecânicas, podendo ser misturados com os outros polietilenos é o polímero preferencial para a produção das sacolas plásticas de uso comercial, as quais são obtidas pelo processo de extrusão. [19].



**Figura 1** Estrutura molecular do polietileno. Fonte [13]

### 2.3 Polímeros biodegradáveis

Polímeros biodegradáveis representam uma forma promissora de reduzir a quantidade de resíduos plásticos descartados em aterros sanitários, sendo a compostagem a alternativa preferencial para seu descarte [20]. Muitos polímeros biodegradáveis foram desenvolvidos nas últimas duas décadas com as propriedades de desempenho desejadas para substituir os polímeros convencionais [21].

Entre todos, o poliácido lático (PLA) Figura 2, é o polímero de base biológica mais significativo, obtido a partir de recursos naturais, como amido, açúcar, milho, etc. Por ser um poliéster o PLA tem boas propriedades mecânicas, é considerado um polímero biodegradável tornando-o uma alternativa aos polímeros sintéticos principalmente na indústria de embalagens. Sua polimerização ocorre através da

abertura do anel lactídeo ou através da polimerização por condensação do ácido láctico. No entanto, o PLA é quebradiço por natureza, necessitando a adição de plastificantes, mistura com outros polímeros para melhorar suas propriedades de flexão e tração dependendo da aplicação [22].

O amido termoplástico (TPS), Figura 3, é um polímero de natureza hidrofílica, alta permeabilidade a vapor de água e com isso reduz suas propriedades mecânicas. Ele é obtido através da plastificação de grânulos de amido, que pode ocorrer através da adição de: glicerol, água, sorbitol, açúcar ou etanoldiamina. Sendo o convencional plastificar os grânulos de amido com glicerol. A desnaturação e plastificação dos grânulos de amido, para formação do TPS, ocorrem através do processo de extrusão. A mistura de PLA e amido, devido ao seu custo competitivo, disponibilidade e biodegradabilidade, é uma possíveis alternativas para substituir os polímeros sintéticos e não degradáveis [22].

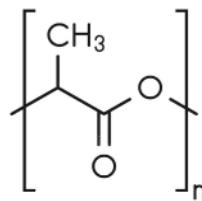


Figura 2 Estrutura do poliacidolático PLA.

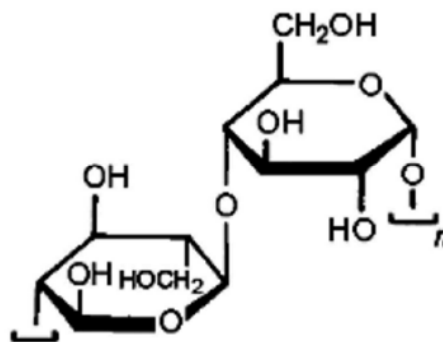


Figura 3 Estrutura do amido termoplástico TPS [20].

## 2.4 Degradação dos polímeros

A degradação natural dos polímeros é demasiadamente lenta, devido a fatores inerentes aos plásticos, são eles: hidrofobicidade, alta massa molecular e ausência de grupos funcionais, em alguns polímeros, reconhecíveis por sistemas enzimáticos [23]. A degradação dos polímeros pode ser acelerada por meio de vias