

Programa de Pós-Graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

**ADITIVAÇÃO DO POLI(ÁCIDO LÁTICO) COM ÓLEO DE RICINUS COMMUNIS L.
PARA EMBALAGEM BIODEGRADÁVEL**

GIOVANNE GALINARI OLIVEIRA

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Salvan Pagnan
Escola de Design – UEMG

Belo Horizonte
2025

Programa de Pós Graduação em Design (PPGD)
MESTRADO EM DESIGN

**ADITIVAÇÃO DO POLI(ÁCIDO LÁTICO) COM ÓLEO DE RICINUS COMMUNIS L.
PARA EMBALAGEM BIODEGRADÁVEL**

Documento apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Design, na linha de tecnologias, materiais e ergonomia, da Universidade do Estado de Minas Gerais, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadora: Profa. Dra. Caroline Salvan
Pagnan
Escola de Design – UEMG

Belo Horizonte

2025

O48a Oliveira, Giovanne Galinari.

Aditivação do poli(Ácido Láctico) com óleo de ricinus communis L. Para embalagem biodegradável [manuscrito] / Giovanne Galinari Oleveira. – Belo Horizonte, 2025.

86f.; enc.: il, color.; 31cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Minas Gerais.
Programa de Pós- Graduação em Design,2025.

Orientador (a): Profa.Dra. Caroline Salvan Pagnan

Bibliografias: 74 – 86.

1.Os problemas do plástico e possíveis soluções sustentáveis .2. Aditivação do PLA com óleo de rícino.3. Biodegradação no solo a temperatura ambiente. I.Pagnan, Caroline Salvan.II. Universidade do Estado de Minas Gerais. Escola de Design. Programa de Pós-graduação. III.Titulo.

CDD: 701

CDU: 745

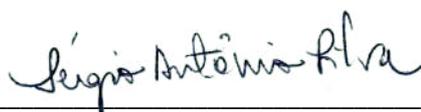
Bibliotecária responsável: Adriana Maria Alves Da silva CRB6/ 3739/0

ADITIVAÇÃO DO POLI (ÁCIDO LÁCTICO) COM ÓLEO DE RICINUS COMMUNIS L. PARA EMBALAGEM BIODEGRADÁVEL

Autor: Giovanne Galinari Oliveira

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 11 de abril de 2025.



Sérgio Antônio Silva
Coordenador PPGD - UEMG
MASP 935.182-6

Prof. Sérgio Antônio Silva, Dr.
Coordenador do PPGD

BANCA EXAMINADORA

Profa. Caroline Salvan Pagnan, Dra.
Orientadora
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof. Artur Caron Mottin, Dr.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais

Profa. Monique de Alvarenga Pinto Cotrim, Dra.

Pesquisadora independente

Profa. Eliane Ayres, Dra.

Universidade do Estado de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil(CAPES) – Código de REGULAMENTO: Cursos de Mestrado e Doutorado em Design – versão 2022 | UEMG 26 Financiamento 001.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que contribuíram de maneira significativa para a realização desse mestrado. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e orientação de diversas pessoas. Por esse motivo, dedico esse capítulo a vocês.

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar a oportunidade de realizar este trabalho, pela saúde, sabedoria e força que me permitiram superar os desafios dessa jornada e por me capacitar para concluí-la com êxito.

Expresso meu reconhecimento aos professores que ministraram as disciplinas ao longo do curso, Professores(as) Anderson Horta, Caroline Pagnan, Clara Santana, Edson Carpintero, Eduardo Romeiro e Marcelina Almeida. Sua dedicação ao ensino e sua habilidade em transmitir conhecimento foram fundamentais para minha formação acadêmica e para o desenvolvimento desse trabalho. Também a todos os membros da secretaria que sempre estiveram dispostos a ajudar em tudo o que foi preciso, meu muito obrigado.

À minha orientadora, Professora Caroline Salvan Pagnan, agradeço pela orientação cuidadosa e pela constante inspiração ao longo deste processo. Seu comprometimento e expertise foram cruciais para o aprimoramento da pesquisa e para a definição de direcionamentos fundamentais, o meu muito obrigado.

Não posso deixar de expressar minha gratidão aos meus amigos, cujo apoio emocional foi essencial para superar os desafios deste percurso acadêmico. Seus incentivos e momentos de descontração foram a luz que iluminou os dias mais desafiadores,

obrigado. Em especial agradeço as amigas Júlia Guimarães e Monique Cotrim pelo apoio durante a realização e análise dos ensaios deste trabalho. A dedicação e o auxílio de ambas foram indispensáveis e para o desenvolvimento e a qualidade dessa pesquisa.

E, em especial à minha família, que sempre esteve ao meu lado. Minha mãe Ana Maria, meus irmãos Audrey e Bruno, meus cunhados Rodrigo e Carol, meus “filhos” peludinhos Kiwi e Luke, mas em especial ao meu pai, Leônidas, que, ao longo dessa minha jornada, nos deixou, mas cujo espírito continua a me guiar. Seu apoio incondicional e sua crença em meu potencial foram uma fonte constante de inspiração. Dedico este trabalho a ele com profundo carinho, você estará sempre em meu coração.

A todos vocês, meu mais sincero agradecimento. Este trabalho é resultado não apenas do meu esforço individual, mas também do suporte e da colaboração de cada um de vocês. A todos o meu muitíssimo obrigado!

RESUMO

A categoria dos polímeros engloba uma série de materiais, naturais e sintéticos, em constante desenvolvimento na manufatura. A indústria, com o processo de síntese química, foi justamente a responsável pelo amplo desenvolvimento de diversas categorias de polímeros sintéticos, tornando-os a categoria de materiais de preferência em diversos setores. As vantagens de sua aplicação são amplamente conhecidas, aliando versatilidade formal e economia em escala proporcionada pela relativa facilidade de seu processamento, em contraposição, porém, aos impactos ambientais negativos decorrentes de seu grande volume de descarte. Diversas estratégias vêm tomando espaço na tentativa de mitigar os efeitos negativos do fim de seu ciclo de vida, sendo a biodegradação uma das principais. Dentre os polímeros com este enfoque, destaca-se o Poli(ácido Lático) (PLA), com propriedades mecânicas próximas às de polímeros convencionalmente disponíveis no mercado, compatível com os processos produtivos mais comuns na indústria, proveniente de recursos renováveis, biocompatível e, além disso, é biodegradável. Porém, sua degradação requer circunstâncias muito particulares, o que acaba dificultando esse processo. Esse projeto estudou o uso de modificadores para o PLA, não nocivos ao meio ambiente e que facilitassem a sua decomposição natural no solo a temperatura ambiente. A partir de ensaios e testes de fotodegradação, biodegradação em solo, MEV, FTIR, tração e ângulo de contato, os resultados da aplicação do óleo de Ricinus Communis L. e Poli(Etileno Glicol) junto ao PLA, se demonstraram promissores na potencialização da biodegradabilidade do polímero, mostrando perda de massa ao longo de 120 dias, indicando biodegradação. Além disso, os ensaios indicam também um ganho de resistência e flexibilidade da amostra.

palavras chave: biopolímero, blenda, sustentabilidade, biodegradação, policaprolactona, poli(etileno glicol),

ABSTRACT

The category of polymers encompasses a wide range of materials, both natural and synthetic, that are in continuous development within manufacturing. The industry, through chemical synthesis processes, has been primarily responsible for the extensive development of various categories of synthetic polymers, making them the preferred material in multiple sectors. The advantages of their application are widely recognized, combining formal versatility and cost efficiency due to the relative ease of processing. However, these benefits come at the cost of significant environmental impacts resulting from their large-scale disposal. Various strategies have been developed to mitigate the negative effects of their end-of-life cycle, with biodegradation being one of the most prominent approaches. Among polymers with this focus, Poly(lactic acid) (PLA) stands out due to its mechanical properties, which are comparable to those of conventionally available polymers, its compatibility with common industrial production processes, its derivation from renewable resources, its biocompatibility, and, importantly, its biodegradability. However, its degradation requires highly specific conditions, which pose challenges to this process. This project aims to investigate the use of environmentally friendly modifiers for PLA that facilitate its natural decomposition in soil at ambient temperature. The application of *Ricinus Communis* L. oil has shown promising results in enhancing the polymer's biodegradability.

Keywords: biopolymer, blend, sustainability, biodegradation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Microplásticos	15
Figura 2 – Que animais ainda são usados para fazer casacos de pele?	22
Figura 3 – Comparação de Embalagens Após 15 Dias	23
Figura 4 – Ilustração de uma prótese de joelho.....	25
Figura 5 – O Ciclo da reciclagem.....	28
Figura 6 – O ciclo da economia circular.....	30
Figura 7 – Comparação do brilho entre peças de PLA fosco e PLA silk	34
Figura 8 - Grãos de PLA	38
Figura 9 – Estrutura Química do PLA	38
Figura 10 – Policaprolactona (PLC) – Estrutura química.....	39
Figura 11 – Estrutura Química Óleo de Rícino	40
Figura 12 – Poli(etileno glicol) – Estrutura química.....	41
Figura 13 – Amostras Obtidas	43
Figura 14 – Divisão da Amostra (PPCL-8020).....	43
Figura 15 – Amostras Expostas à Radiação UV.....	44
Figura 16 – Espectrofotômetro Konica Minolta CM-600d	45
Figura 17 – Amostras no Recipiente com Solo.....	47
Figura 18: Gráfico Tensão x Alongamento das amostras submetidas ao ensaio de tração	51
Figura 19: Imagens de MEV da fratura do (a) PLA-100, (b) PPEG-9010 e (c) PORPEG-801010 – magnificação de 150 vezes	53
Figura 20: Imagens de MEV da fratura do (a) POR-8020, (b) PORPEG-801010 e (c) PPEG-9010 – magnificação de 150 vezes	54
Figura 21: ΔE^*	58
Figura 22: ΔL^*	58
Figura 23: Reflectância	59
Figura 24: Intensidade de Cor (K/S)	60
Figura 25 – Mudança de translucidez de PORPEG-801010	61
Figura 26 – Quebra na réplica 2 de PORPEG-801010.....	62
Figura 27 – Segunda quebra na réplica 2 de PORPEG-801010	62
Figura 28: Gráfico de variação de massa das amostras durante a biodegradação	63
Figura 29: Espectro de FTIR do PLA-100.....	67
Figura 30: Espectros de FTIR: a) PLA-100, b) PPCL-8020, c) POR-8020, d) PORPEG-801010, e) PPEG- 9010.....	68
Figura 31: Espectros de FTIR após processos de degradação: a) PLA-100, b) PPCL-8020, c) POR-8020, d) PORPEG-801010	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de Tensão Máxima e Alongamento das amostras.....	52
Tabela 2 – Medida de Cor PLA-100.....	56
Tabela 3 – Medida de Cor PPCL-8020.....	56
Tabela 4 – Medida de Cor POR-8020.....	56
Tabela 5 – Medida de Cor PORPEG-801010.....	56
Tabela 6 – Evolução de massa das Amostras.....	61
Tabela 7 – Valores medidos por meio do ângulo de contato.....	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - ΔE^*	57
Equação 2 - ΔL^*	57
Equação 3 - Δa^*	57
Equação 4 - Δb^*	57
Equação 5 - Refletância	59
Equação 6 – Equação de Kubelka-Munk	60

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

PLA	Poli(ácido láctico)
ABS	Poli(acrilonitrila-butadieno-estireno)
PCL	Policaprolactona
PEG	Poli(etileno glicol)
g	Grama
°C	Graus Célsius
g/mol	Gramas por Mol
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição
PLA-100	Amostra composta por 100% PLA
PPCL-8020	Amostra composta por 80% PLA + 20% PCL
POR-8020	Amostra composta por 80% PLA + 20% Óleo de Rícino
PORPEG-801010	Amostra Composta por 80% PLA + 10% Óleo de Rícino + 10% PEG 6000
PPEG-9010	Amostra Composta por 90% PLA + 10% PEG 6000
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
US\$	Dólar Americano
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
PVC	Policloreto de Vinila
VHS	Sistema Doméstico de Vídeo
CD	Disco Compacto
DVD	Disco Digital Versátil
M	Médio
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
pH	Potencial Hidrogeniônico
N	Newton
mm/min	Milímetro por Minuto
h	Hora
hrs	Horas
UV	Ultra Violeta

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	14
1.1	Problema de Pesquisa.....	14
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
2	<i>REVISÃO DA LITERATURA</i>	19
2.1	A descoberta do Polímero Sintético	19
2.2	Impacto Sócio-Cultural dos Plásticos.....	19
2.2.1	Disco de Vinil	19
2.2.2	Meia Calça	21
2.2.3	Embalagens Alimentícias.....	22
2.2.4	Saúde	23
2.3	Os Problemas dos Plásticos.....	25
2.3.1	Escassez de Recursos Naturais	26
2.3.2	Poluição Ambiental	26
2.3.3	Impactos na Saúde Humana.....	26
2.4	Possíveis Soluções	27
2.4.1	Reciclagem	27
2.4.2	Economia Circular.....	30
2.4.3	Bioplásticos	31
2.5	Termoplásticos	32
2.6	O PLA.....	32
2.7	Aditivação	34
2.8	Explorando Alternativas para uma Solução Ideal	35
3	<i>METODOLOGIA</i>	37

3.1	Etapas Envolvidas	37
3.2	Materiais	38
3.2.1	Poli(ácido lático) – PLA	38
3.2.2	Policaprolactona – PCL	39
3.2.3	Óleo de Rícino – <i>Ricinus Communis L.</i>	39
3.2.4	Poli(etileno glicol) – PEG.....	40
3.3	Amostras	41
3.4	Caracterizações.....	44
3.4.1	Fotodegradação	44
3.4.2	Biodegradação em Solo.....	46
3.4.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	47
3.4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	48
3.4.5	Ângulo de Contato.....	49
3.4.6	Ensaio de Tração	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Propriedades mecânicas	51
4.2	Fotodegradação por Exposição à Radiação Ultravioleta	55
4.3	Biodegradação em Solo	61
4.4	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	66
5	POSSÍVEIS APLICAÇÕES	70
6	CONCLUSÃO.....	72
7	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema de Pesquisa

Os polímeros são materiais versáteis, presente em quase tudo em que tocamos. Podem ser obtidos a partir de monômeros naturais e sintéticos, esses mais popularmente conhecidos como plásticos. Dentre todas as técnicas de processamento dos plásticos uma das mais comuns é a extrusão, onde eles são fundidos e pressionados através de uma matriz para a formação de filamentos e, posteriormente, cortados em formato de pequenos grãos, chamados pellets. A título de exemplo, em um dos processos produtivos mais comuns, a injeção, esses grãos são aquecidos, fundidos e conformados dentro de moldes para formar os produtos, que então são embalados e transportados até as prateleiras das lojas, onde compramos, consumimos e descartamos. (GORNI, 2003)

Esses produtos descartados vão se juntando um por um, até se tornarem milhares de milhões. Em 2017 foram produzidas mais de 350 milhões de toneladas de plástico e, com esses números, está sendo estimado que 1.200 milhões de toneladas de plástico estarão em aterros ou no meio ambiente até 2050 (WELDEN, 2020). Junto a isso, além do plástico ser um problema ambiental, também está se tornando problema de saúde.

Quando descartados, esses plásticos podem ter vários destinos. Ao se acumular no tempo, o lixo polimérico forma chorume, que é tóxico e penetra no solo e nos lençóis freáticos, intoxicando ecossistemas e prejudicando a vida de animais selvagens. Outros plásticos encontram seu caminho até o mar, onde são confundidos por alimento e comidos por peixes, que se sentem alimentados, porém não estão e acabam morrendo por desnutrição. (DE SOUZA, 2022)

Uma grave questão é quando os plásticos acabam se quebrando em micropartículas por vias naturais, esses, chamados microplásticos (Figura 1), encontram caminhos até a cadeia alimentar e são ingeridos por humanos. Um exemplo é o próprio peixe que comeu o plástico, que é comido pelo homem e que, dessa forma, acaba comendo o plástico

contido no peixe. É estimado que humanos consomem de 0,1g a 5g de microplásticos a cada semana, quantidade equivalente a um cartão de crédito. E engana-se que os vegetarianos estão livres desse problema, já que dentre os meios o que mais contribui para o consumo de microplásticos é simplesmente o ato de beber água (JIN, 2021).

Diante dos inúmeros problemas ambientais causados pelos plásticos, a busca por soluções definitivas para seus impactos é fundamental, em vez de adotarmos apenas estratégias que visem a mitigação temporária dos danos. A criação de novos materiais, desenvolvidos a partir de recursos renováveis e com a capacidade de se biodegradar, representa uma alternativa promissora. Esses novos materiais poderiam reduzir significativamente a persistência dos resíduos no meio ambiente, oferecendo uma solução sustentável e eficaz para um dos maiores desafios ambientais atuais.

Figura 1 – Microplásticos



Fonte: National Geographic Brasil (2022)

1.2 Justificativa

Ao longo do tempo, todos os plásticos podem se degradar, mas somente alguns podem se biodegradar, e menos ainda são compostáveis. Plásticos que somente se degradam são muito prejudiciais ao nosso meio ambiente quando descartados incorretamente, o que acontece com uma frequência considerável. A biodegradação, por outro lado, é menos prejudicial para o meio ambiente, é a capacidade de um material se desfazer naturalmente. Porém, isso acontece somente sob condições adequadas. Já os plásticos compostáveis são projetados para se desfazer completamente em condições de compostagem, um processo biológico no qual os materiais se transformam em matéria orgânica rica em nutrientes, adequada para o enriquecimento do solo. (RECICLAGEM, 2021; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2022; SMITH, *et al.*, 2018; JIN, 2021).

Grande parte dos plásticos utilizados atualmente são obtidos a partir de recursos finitos, sendo os de origem fóssil como o petróleo por exemplo, o mais comum entre eles que, além de ser esgotáveis, são altamente poluentes. A substituição desse tipo de polímeros por bioplásticos, onde a grande maioria tem sua produção feita a partir de recursos renováveis, já vem sendo estudada e implementada aos poucos. O uso de biopolímeros no mercado global tem demonstrado um crescimento substancial, impulsionado pela crescente ênfase na sustentabilidade e preocupações ambientais. (MURARIU, 2016)

De acordo com o relatório da MarketsandMarkets, o mercado global de bioplásticos é projetado para atingir US\$ 6,95 bilhões até 2025, com uma taxa de crescimento anual composta de 12,9% durante o período de previsão ("Bioplastics Market by Type, Application, Region - Global Forecast to 2025"). Esses dados evidenciam a tendência global de adoção de bioplásticos em diversas indústrias, refletindo o compromisso cada vez maior com soluções ambientalmente responsáveis e sustentáveis. Um desses bioplásticos que vem ganhando cada vez mais notoriedade no mercado global é o Poli(ácido láctico), mais conhecido como PLA. Com quase todos os setores de produção focados em produtos renováveis, a demanda do PLA teve um forte crescimento nos últimos anos (POLYLACTIC, 2021). Além de suas propriedades ecológicas e

sustentáveis, como o fato dele ser produzido a partir de recursos renováveis e ser biodegradável, o PLA também é conhecido pela sua grande versatilidade em aspectos físicos como rigidez e facilidade de moldagem. (MARKETS AND MARKETS, 2022; POLYLACTIC, 2021; AURAS, *et al.*, 2011).

Um dos campos que o PLA vem ganhando bastante destaque é na Impressão 3D, uma tecnologia que se tornou acessível nos últimos anos, o que, de acordo com McCue (2018), resultou rapidamente em uma indústria multibilionária. O ramo de impressão 3D possui várias tecnologias distintas, a mais comum dentre elas é a tecnologia FDM (Modelagem por Deposição Fundida) também conhecida como FFF (Fabricação por Filamento Fundido, sendo o PLA, o mais utilizado deles atualmente (YODERS, 2021). É importante ressaltar que as condições de biodegradação de PLA se aplicam somente ao material virgem, o que não é o caso em muitos dos filamentos de mercado, pois estes utilizam modificadores como outros tipos de polímeros e aditivos para melhorar resistência, facilidade de impressão e aparência visual (TELLIER, 2022), o que dificulta ainda mais sua biodegradação dadas as condições específicas que o PLA requer.

De acordo com Griffin (2021), o PLA pode sim se biodegradar, mas para isso são necessários meses sob circunstâncias muito particulares, somente encontradas em instalações de compostagem industriais específicas, além do fato de o PLA não poder ser misturado com outros tipos de plástico e sua separação ser muito complicada, devido a difícil distinção entre ele e os demais plásticos convencionais, tornam essas instalações muito raras. Fora dessas condições, a biodegradação do PLA se torna inviável e é tratado como um plástico degradável como outro qualquer. (GRAPPLING, 2022; GIRONI, 2012). A reciclagem do PLA se torna difícil devido às suas propriedades intrínsecas. O PLA tem um ponto de fusão mais baixo em comparação com plásticos convencionais, tornando-se suscetível a amolecer e degradar durante os processos de reciclagem convencionais. Além disso, o PLA é quimicamente incompatível com muitos outros tipos de plásticos, o que torna difícil a mistura durante a reciclagem, resultando em materiais reciclados de menor qualidade. Sua semelhança visual com outros plásticos também dificulta a identificação e a separação manual dos fluxos de resíduos. Superar esses desafios exige

a implementação de processos de reciclagem especializados, como a reciclagem química, que é mais complexa e onerosa (AURAS, *et al.*, 2011; MERCHAN, *et al.* 2022).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Esse projeto tem como objetivo estudar a possibilidade do desenvolvimento de um polímero biodegradável, feito completamente a partir de recursos renováveis, que possibilite a sua degradação em instalações de compostagens comuns e residenciais em temperatura ambiente. Tendo como base a aditivação do PLA com Óleo de Rícino e avaliar as propriedades mecânicas, flexibilidade, resistência, molhabilidade, biodegradabilidade e fotodegradabilidade desse novo material.

1.3.2 Objetivos Especificos

- I. Selecionar aditivos biodegradáveis provenientes de recursos renováveis;
- II. Desenvolver metodologia para a incorporação dos aditivos selecionados ao PLA;
- III. Compreender as propriedades mecânicas dos materiais obtidos por meio de teste de tração;
- IV. Compreender a sensibilidade dos materiais obtidas a água;
- V. Testar os materiais obtidos quanto à exposição à radiação ultravioleta;
- VI. Testar os materiais obtidos quanto à susceptibilidade microbiana por enterro em solo;
- VII. Avaliar os resultados dos testes e ensaios feitos com os materiais desenvolvidos e compará-los aos testes feitos aos materiais de controle e com estudos anteriores;
- VIII. Estudar possíveis aplicações mercadológicas a partir dos resultados obtidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A descoberta do Polímero Sintético

Tudo começou em 1907 quando o cientista Americano Leo Baekeland descobriu o Polioxibenzimetilenglicolanidrido, mais conhecido como Baquelite que foi o primeiro material 100% sintético que poderia ser moldado em qualquer formato. (ACS, 2022)

A baquelite, naquele momento poderia ser interpretada como uma espécie de milagre da ciência, por ser muito resistente, não derreter e não pegar fogo. Não é à toa que em poucos anos já estava presente na casa da maioria das pessoas em forma de rádios, telefones e vários outros itens domésticos, que iam do preto básico a várias cores vibrantes. (ACS, 2022)

A sua descoberta desencadeou uma série de novos materiais que seriam usados para diferentes tipos de objetos de todas as áreas possíveis. Isso teve impacto nas questões sociais e culturais tão grandes, que são até difíceis de mensurar.

2.2 Impacto Sócio-Cultural dos Plásticos

2.2.1 Disco de Vinil

São inegáveis os impactos da comunicação em todas as suas expressões para o âmbito sócio-cultural. Músicas, filmes, videogames, entre outros meios de comunicação tem papel fundamental para a expressão cultural, movimentar discursos, incluir e unir as pessoas na sociedade. E o plástico tem papel fundamental para a viabilização desse movimento da comunicação, principalmente para democratizá-lo e levá-lo ao encontro de pessoas mais desprovidas.

Como já dizia Caixeta, 2021:

De modo geral que a música para além de aumentar a atenção das crianças, ajudar na formação intelectual e mental, melhorar a motivação para diversas

atividades escolares, também contribui com a formação de sujeitos mais alegres, além de ampliar o repertório cultural das mesmas. (CAIXETA, 2021)

A música começou a chegar nas mãos da população em 1926, através do disco de vinil, que no início não era feito de vinil e sim de goma laca, um tipo de polímero natural provindo da borracha, mas era muito frágil, caro e conseguia comportar somente 4 minutos, isso tudo tornava o disco um item caro, viável somente para grandes empresas como rádios por exemplo. (PICCINO, 2003)

Com a descoberta e o desenvolvimento dos plásticos o disco foi se evoluindo, chegou a ser feito de baquelite, até chegar no Policloreto de Vinila, mais conhecido como vinil ou PVC. Sim, o mesmo material usado nas tubulações de água e esgoto da casa de todos. Com o novo disco, agora feito de vinil, as faixas passaram de 4 para 30 minutos de cada lado, multiplicando sua capacidade basicamente por quinze, além de ser um material muito mais resistente. Isso permitiu um barateamento significativo do disco, que passou a ser incluído em âmbito residencial doméstico, tudo graças ao plástico. (JENKINS, 2019). "O vinil foi fundamental para a cultura musical do século XX, embalou gerações e ajudou a construir identidades e tribos." (BURATTI; LORENA, 2018)

Junto com a música, outros que têm esse papel tão importante quanto, são os videogames e principalmente o cinema. Como já dizia Magalhães, 2015: "O cinema, enquanto linguagem artística e como espaço de relações sociais de lazer e de entretenimento, encontra-se em uma situação de destaque no campo cultural."

E eles puderam chegar às mãos da população através das fitas VHS (*Video Home System* – Sistema Doméstico de Vídeo) e cartuchos, ambos feitos de plástico, e que, junto a música, avançaram para o CD (*Compact Disk* – Disco Compacto) e o DVD (*Digital Versatile Disc* – Disco Digital Versátil), discos de plástico mais compactos e que armazenavam ainda mais conteúdo e que, com a criação das locadoras puderam chegar mais facilmente nas casas de toda a população. (MAGALHÃES, 2015)

2.2.2 Meia Calça

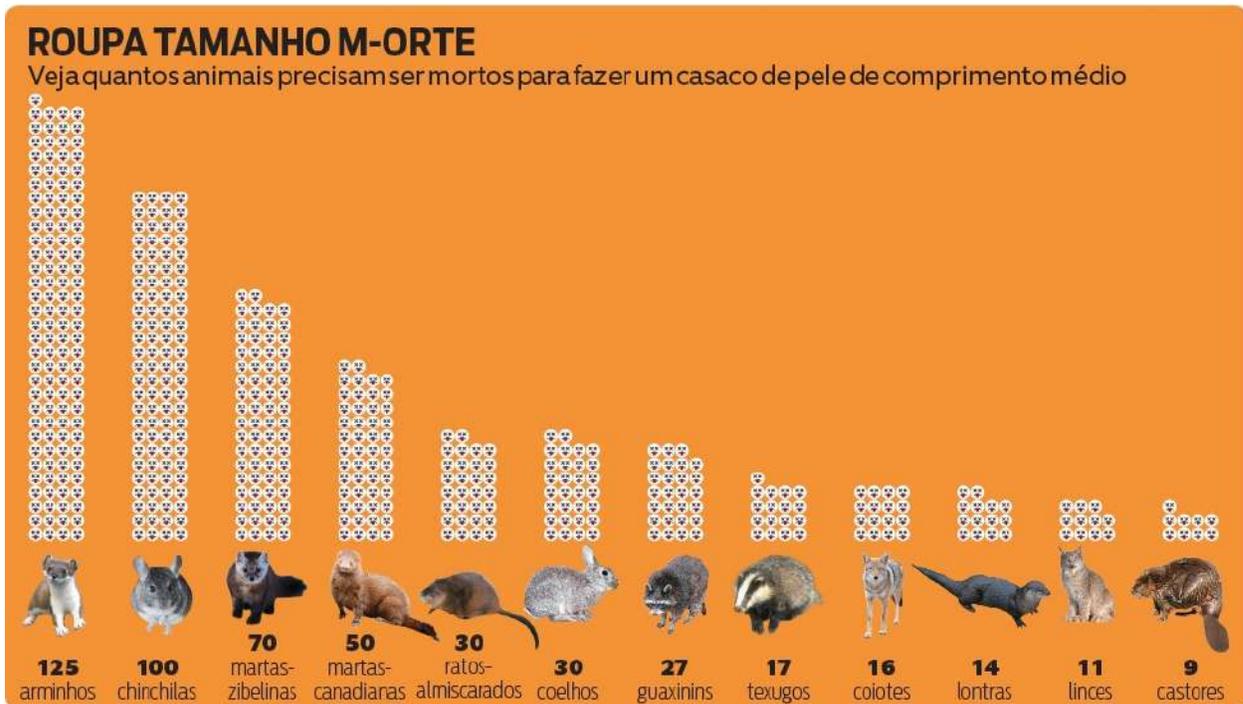
Nos séculos passados, a tendência da moda era ditada pela realeza e acompanhava quem podia, o que não saía muito da área mais nobre das cidades. Contudo, uma variável dessa equação foi alterada e isso teve efeito direto no resultado, principalmente no acesso pelas pessoas mais simples, e essa variável foi o material, o plástico. (SPIVACK, 2012)

Vemos as meias-calças, por exemplo, eram feitas de seda e seu uso era quase que exclusivo da realeza. Mas isso somente até o dia 16 de maio de 1940, quando foram colocadas à venda as novas meias-calças, mas essas eram feitas de nylon, um outro tipo de plástico. As novas meias venderam tanto que esse dia foi conhecido como *Nylon Day*, vendendo 4 milhões de pares em somente 2 dias e 64 milhões só naquele ano. (SPIVACK, 2012)

Mas o que revolucionou a indústria da moda não foram as meias de nylon, mas sim um outro produto, também feito de plástico, os tecidos sintéticos. A sua importância social era clara, bem observado por Patricia Field, Figurinista da série da HBO "Sex and the City" em entrevista para o documentário Planeta Plástico, 2002: "O tecido sintético teve uma importância social, democratizaram a indústria do vestuário."

Contudo a sua importância, não foi apenas social, mas também ambiental, substituindo as roupas feitas de couro e pele animal, com efeito drástico para a sobrevivência desses animais, que agora deixaram de virar roupas. A imagem da Figura 2 mostra a quantidade de animais de espécies diferentes necessários para fazer uma unidade de um casaco de tamanho M (Médio) e junto dela fica uma pergunta: quantos animais deixaram de ser mortos devido ao plástico e os tecidos sintéticos provindos dele?

Figura 2 – Que animais ainda são usados para fazer casacos de pele?



Fonte: Mundo Estranho – Super Interessante (2020)

2.2.3 Embalagens Alimentícias

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) calcula que 1,3 bilhão de toneladas de alimentos são desperdiçadas por ano no mundo – cerca de 1/3 do que é produzido globalmente, e o grande responsável por isso é o apodrecimento do alimento. (O DESPERDÍCIO, 2020). Quando expostos ao ar, oxigênio, os alimentos começam a oxidar e com isso ficam podres e impróprios para consumo, assim são descartados e desperdiçados. Em um mundo onde grande parte da população mal tem o que comer, isso se torna inaceitável.

Por meio dos plásticos, temos algumas soluções, que não resolvem o problema, mas ajudam a reduzir a quantidade de desperdício de alimentos consideravelmente, e essas soluções são as embalagens. "1,5g de plástico filme para embrulhar um pepino pode prolongar sua vida útil de 3 para 14 dias." (DORA; IACOVIDOU, 2019). Ou seja, com somente um pouco de plástico, conseguimos multiplicar a vida de um pepino mais de 4 vezes (Figura 3).

Tudo isso somente com um plástico convencional e de ampla disponibilidade no mercado. Contudo há estudos que estão desenvolvendo um novo tipo de embalagem, as biologicamente ativas, que são embalagens plásticas que possuem microorganismos vivos incorporados em seu material que são benéficos aos alimentos. Essa nova solução pode reduzir o desperdício e os custos e ele atrelado, pode reduzir o uso de aditivos químicos usados para a preservação desse alimento, tornando-o mais fresco e mantendo aspectos nutricionais. (BITTENCOURT *et. al*, 2020)

Figura 3 – Comparação de Embalagens Após 15 Dias



Fonte: Qureshi (2021)

2.2.4 Saúde

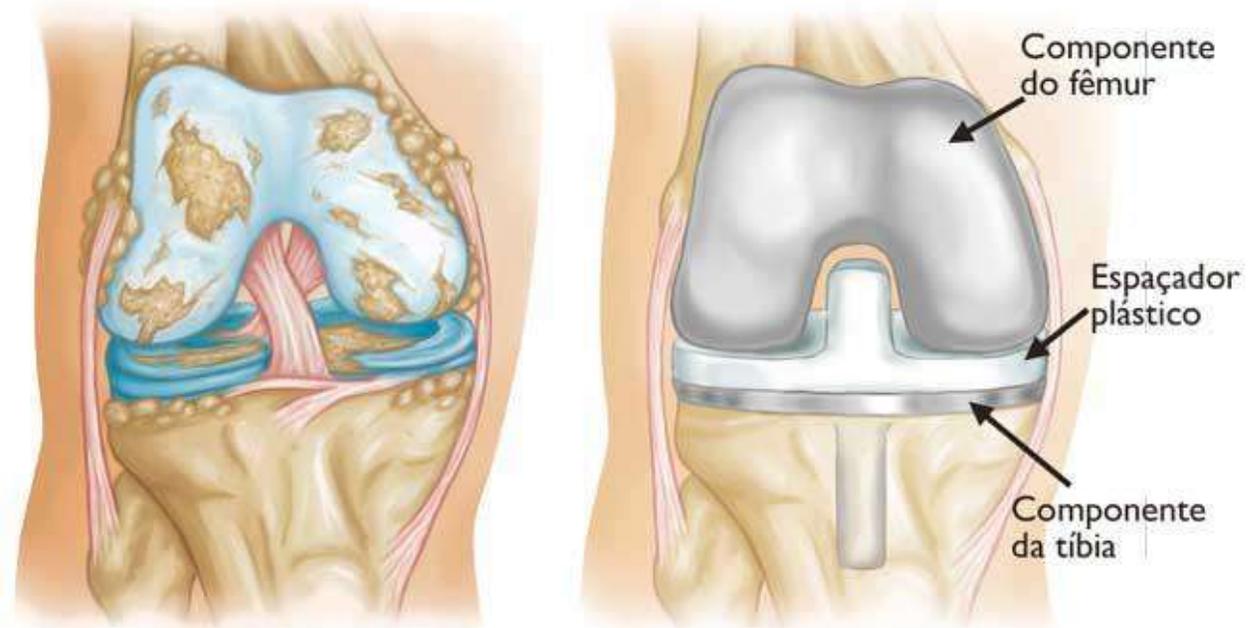
A preservação de alimentos é importante não só para evitar o desperdício, mas também para a nossa saúde, já que o consumo de alimentos apodrecidos pode ter grandes consequências para nosso bem-estar. E, paralelamente ao impacto potencial dos plásticos em nossa saúde por meio das embalagens, há outro produto que afeta

diretamente a nossa saúde relacionada à alimentação: as escovas de dentes. Graças aos plásticos, as escovas de dente são mais macias e ergonômicas, cabem melhor em nossas mãos, o que agrada principalmente as crianças, que, com escovas com essas características, tendem a ter uma escovação de 30 a 40% mais longa, fato muito importante, já que hábitos como a escovação dentária, quanto mais cedo eles são desenvolvidos, mais tendências eles têm de prevalecer ao crescer. (Andy Switky, Designer de Fabricação da IDEO em entrevista para o documentário Planeta Plástico, 2002)

Ainda no campo da saúde, um olhar mais atento permite o levantamento de diversos exemplos de produtos poliméricos de grande impacto, como lentes de contato e óculos, que ajudam na saúde da visão, colchões de espuma, que ajuda na saúde do nosso corpo, entre outros vários exemplos. Contudo os plásticos não possibilitam somente a preservação da saúde, ele a leva a pessoas que já não a tem mais a partir das próteses.

Plásticos como o nylon são auto-lubrificantes, o que permitiu o desenvolvimento de próteses de juntas como joelhos (Figura 4), ombros e cotovelos e serem mais efetivas e durarem mais tempo, dando mais qualidade de vida as pessoas que necessitam desses instrumentos para terem mais qualidade de vida. (PLANETA PLÁSTICO, 2002) Além disso, novas próteses mais sérias puderam ser desenvolvidas, como as de coração, que requer um material duro para o seu exterior e outro macio, mas também resistente para o interior, que aguente as centenas de milhares de batimentos diários por muitos e muitos anos. (PLANETA PLÁSTICO, 2002)

Figura 4 – Ilustração de uma prótese de joelho



Fonte: Associação Americana De Ortopedia (AAOS) (2015)

Outro ponto recente e importante de citar é o da Covid-19, onde pudemos presenciar mais de perto a importância dos plásticos nas máscaras de proteção, das vacinas, que são aplicadas por seringas plásticas, por médicos e enfermeiros que utilizam de matérias de proteção como luvas, aventais, máscaras, etc., todos feitos de algum tipo de plástico. Uma outra pergunta pode ser feita aqui, quantas vidas foram salvas devido aos plásticos?

2.3 Os Problemas dos Plásticos

Os plásticos vêm desempenhando um importante papel no mundo moderno. Sua versatilidade, durabilidade e baixo custo de produção os tornaram mundialmente populares, presente em grande parte de todos os setores econômicos mundiais. A produção global de plásticos atingiu aproximadamente 350 milhões de toneladas em 2017, um aumento significativo em relação às décadas anteriores (MELLO, SOTO, VIVEIRO, 2020). No entanto, os benefícios econômicos foram tantos, que acabaram causando um uso descontrolado e muitas vezes até irresponsável dos plásticos. Esse

fato tem gerado uma série de problemas que levam a grandes impactos negativos para a sociedade em diferentes aspectos.

2.3.1 Escassez de Recursos Naturais

A vasta produção de plásticos exige uma quantidade significativa de recursos naturais como petróleo e gás natural. O crescente aumento em sua demanda contribui para a escassez desses recursos finitos. Além disso, o processo de extração desses recursos e a produção de plásticos podem resultar em impactos ambientais negativos. Derramamentos de petróleo e degradação de habitats naturais são exemplos disso. (O'ROURKE; CONNOLLY, 2003).

2.3.2 Poluição Ambiental

O uso e descarte exagerados de plásticos, principalmente os de uso único, resultou em uma crescente poluição ambiental. Plásticos convencionais não biodegradáveis se acumulam em aterros sanitários e possuem contribuição significativa na produção de chorume, um líquido tóxico resultante da decomposição de resíduos sólidos, gerando substâncias químicas prejudiciais, que podem vaziar e contaminar o solo e águas subterrâneas, poluindo ecossistemas terrestres e aquáticos.

Além do chorume, há também uma fragmentação de plásticos em pedaços cada vez menores chamadas de microplásticos. A poluição por essas micro partículas gera uma preocupação crescente, pois elas afetam todo o ecossistema marinho e também causam muitos danos à vida subaquática (JIN, 2021; JAMBECK, *et al.* 2015; THOMPSON, *et al.* 2009; HALDEN, 2010).

2.3.3 Impactos na Saúde Humana

Os chamados microplásticos, além de causarem problemas ambientais nos ecossistemas terrestres e aquáticos, também estão se tornando problema de saúde

humana. Ao se propagarem, os microplásticos encontram caminhos até a cadeia alimentar e são ingeridos pelos humanos. (JIN, 2021).

Além disso, produtos químicos potencialmente tóxicos presentes em alguns plásticos podem contaminar alimentos e objetos com os quais temos contato direto. Isso pode resultar em riscos para a saúde, como distúrbios hormonais e reações alérgicas (TEUTEN, 2009).

2.4 Possíveis Soluções

É um fato que os plásticos possuem sérios problemas, contudo seus benefícios são muito grandes para simplesmente deixar de usá-los. De fato, os impactos negativos em âmbito ambiental, social e econômico geram apreensão em diversos campos da sociedade, o que se desdobra na busca por alternativas. Para contornar isso, soluções foram propostas e colocadas em prática. Contudo sua praticidade e eficiência ainda estão sob debate.

2.4.1 Reciclagem

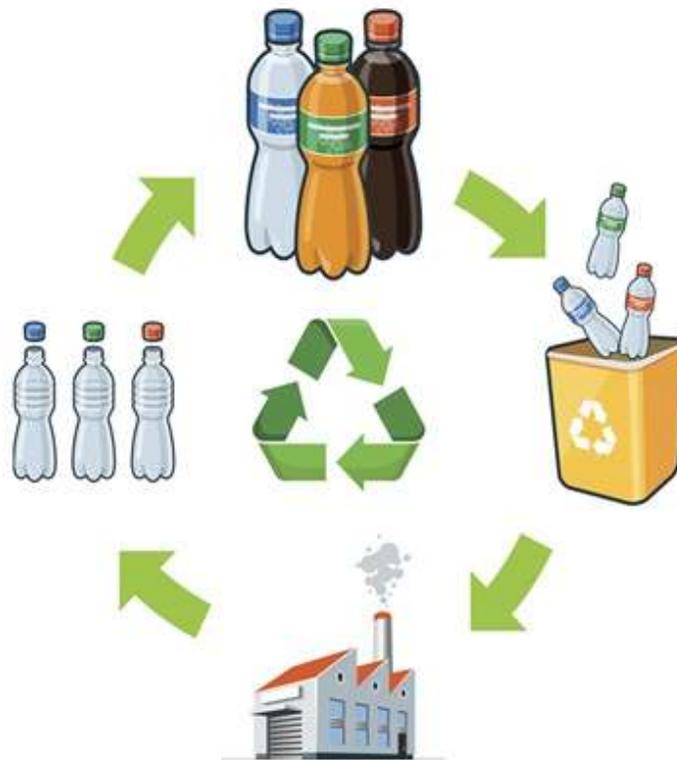
Ao discutir a sustentabilidade dos plásticos, a solução apontada mais comum é a reciclagem, que consiste no reprocessamento do material ao fim da vida útil do produto, transformando-o novamente em matéria prima (Figura 5). Ao se levar em consideração que, grande parte dos plásticos mais usados no mercado hoje tem o petróleo como principal fonte de matéria prima, essa prática desempenha um papel crucial na redução da extração desse recurso, mitigando assim os impactos dessa exagerada exploração (RECICLAGEM, 2021).

Além disso, ao se comparar a fabricação do plástico reciclado ao plástico que provém dessa matéria prima, é possível notar que o gasto de energia com o material reciclado é consideravelmente menor, resultando na redução de emissões de gases do efeito estufa,

levando a um efeito direto ao combate das mudanças climáticas (HOPEWELL, DVORAK, KOSIOR, 2009).

Outro ponto a ser levado em consideração é a diminuição do volume residual desses materiais. Levando ao prolongamento da vida útil de aterros sanitários e reduzindo a necessidade de suas ampliações ou multiplicações, podendo reduzir a produção de chorume, um líquido poluente resultante da decomposição de resíduos orgânicos e materiais tóxicos nesses aterros, que também é muito nocivo ao meio ambiente (HOPEWELL, DVORAK, KOSIOR, 2009).

Figura 5 – O Ciclo da reciclagem



Fonte: Redação Pensamento Verde (2017)

Contudo a reciclagem também apresenta falhas e enfrenta vários desafios. De início, observa-se uma queda em relação a qualidade do material, que frequentemente apresenta ser inferior em relação ao material virgem em parâmetros como rigidez, flexibilidade, entre outros fatores. Isso acaba limitando suas aplicações, fato que se

agrava mais ao passo que o material sofre um novo processo de reciclagem. Isso se dá levando em consideração a possibilidade de reciclagem daquele material, pois existe uma vasta diversidade de plásticos e nem todos têm a possibilidade de serem reciclados. Esse fato agrava ainda mais a complexidade do processo de reciclagem, elevando o custo de separação que, se não ocorrer de forma correta e plásticos não recicláveis se misturarem, pode levar a contaminação e perda de todo o lote que teve contato com o material contaminado (IS, 2022; HAHLADAKIS, 2018; ELSAWY, 2017).

Prejudicando ainda mais a imagem da reciclagem, um estudo recente descobriu que cerca de 13% dos plásticos reciclados são liberados na forma de microplásticos, elevando ainda mais a complexidade na gestão dos resíduos poliméricos. Esses fatos mostram a necessidade de uma mudança de foco em relação as soluções para os problemas causados pelos plásticos, já que as soluções apresentadas atualmente vêm levando o papel de apenas mitigá-los, mas não conseguem de fato resolvê-los (BROWN, 2023).

Mesmo com toda essa complexidade, a reciclagem do PLA ainda pode ser um caminho a se tomar, principalmente no ramo da impressão 3D, já que os usuários sabem exatamente qual material estão utilizando e conseguem separá-los devidamente. Além disso, estudos mostram que a prática desse processo tem demonstrado resultados promissores, contudo pode haver um caminho ainda melhor. (ANDERSON, 2017).

Narancic *et al.* (2018), em sua pesquisa, demonstraram que a mistura entre alguns tipos diferentes de plástico possa se decompor em composteiras domésticas, dentre elas a mistura de PLA com a Policaprolactona (PCL). Apesar do resultado promissor, isso vem com um porém, o PCL é obtido a partir do petróleo, um composto poluente e não renovável. Por esse motivo, essa pesquisa propõe a busca de um aditivo alternativo para o PLA, que traga os benefícios do PCL que, entretanto, seja provindo de fontes renováveis e seja mais benéfico ao meio ambiente.

2.4.2 Economia Circular

A economia circular tem emergido como uma abordagem promissora para enfrentar os desafios ambientais e econômicos associados ao uso excessivo dos plásticos. Ela promove a minimização de resíduos e a maximização da eficiência dos recursos, buscando fechar o ciclo de vida dos materiais por meio de reutilização, reciclagem e regeneração, como é possível ver seu ciclo representado na imagem abaixo (Figura 6). Isso pode contribuir para a redução da demanda por matérias-primas virgens, como petróleo, podendo levar a uma maior preservação desses recursos naturais e aliviar os impactos ambientais associados à exploração deles (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2021).

Além disso, sua abordagem sustenta a criação de empregos em várias indústrias, estendendo seus benefícios além dos âmbitos ambientais para os sociais. Além de incentivar a inovação na concepção de produtos, embalagens e processos de reciclagem, levando ao desenvolvimento de novos materiais mais sustentáveis e à adoção de tecnologias mais eficientes (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2021).

Figura 6 – O ciclo da economia circular



Fonte: Larissa D'otaviano (2023)

Contudo, para o sucesso da economia circular é de extrema importância uma mudança cultural em relação ao consumo e descarte. Isso requer tempo para que as pessoas se ajustem a novos hábitos e mentalidades. Contudo, sua grande dependência da reciclagem é uma fragilidade a se levar em consideração (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2021).

2.4.3 Bioplásticos

Os bioplásticos surgem como uma alternativa promissora aos plásticos convencionais. Oferecem a possibilidade de reduzir os impactos ambientais associados ao uso excessivo dos plásticos. Plásticos comuns são, em sua maioria, derivados de fontes não renováveis, ou seja, finitas, como o petróleo por exemplo. Já os bioplásticos são uma subcategoria que engloba os plásticos biodegradáveis ou provenientes de recursos naturais renováveis, como amido de milho, cana de açúcar e óleo de soja por exemplo. (FORTUNATI, VERMA, 2019). A biodegradabilidade e a origem natural renovável (bio-baseados) não precisam, necessariamente ocorrer de forma simultânea no material para que seja considerado um bioplástico. O termo engloba, portanto, os plásticos biodegradáveis e bio-baseados, os plásticos não biodegradáveis e bio-baseados e os plásticos biodegradáveis produzidos a partir de matérias-primas fósseis (NIAOUNAKIS, 2015).

Esses bioplásticos trazem consigo vários benefícios. Um deles é a redução de emissão de gases poluentes. Isso se deve tanto à sua produção, em comparação aos produzidos a partir de petróleo, quanto à captura de carbono durante o cultivo de suas matérias primas (FORTUNATI, VERMA, 2019).

Bioplásticos como o PLA, possuem características muito positivas que ajudam a mitigar o problema da poluição. A solução perfeita ainda não existe, mas é um passo no caminho certo, já que possuem menor potencial de prejudicar o meio ambiente e a nossa saúde ao se comparar a plásticos convencionais, que possuem inúmeras preocupações, podendo ser até cancerígenos. (ANDERSON, 2017; SHAH, 2021).

2.5 Termoplásticos

Termoplásticos compõem uma categoria de polímeros que permitiram uma grande evolução nas indústrias e no processo de fabricação de vários tipos de objetos que, com outros materiais, teriam uma grande complexidade ou grande custo de produção.

Os termoplásticos têm como uma de suas principais características a possibilidade de, ao ser aquecido, se tornar maleável e manter a forma desejada ao se resfriar. Isso se dá graças ao fato de possuírem cadeias longas e entrelaçadas, porém não ligadas permanentemente que, ao serem aquecidos, ocorre uma agitação molecular, reduzindo a união entre suas cadeias, levando mais flexibilidade e permitindo o material ser moldado em diferentes formas. Ao se resfriar, sua estrutura sólida é retomada, mantendo a nova forma. Esse processo pode ser feito e repetido por uma quantidade limitada de ciclos sem que ocorra degradação do material. Fato esse que dá aos termoplásticos características altamente versáteis e a possibilidade de serem reciclados, contribuindo para a redução do desperdício e possibilitando a economia circular.

Os termoplásticos encontraram aplicações diversas em diversos setores da economia, possibilitando o desenvolvimento de produtos, dependendo da aplicação e características buscadas, melhores, mais eficazes e mais baratos para o mercado de consumidores. Conforme a conscientização sobre a sustentabilidade cresce, tornam esses materiais uma parte crucial da economia global e do esforço contínuo em direção a abordagens mais sustentáveis em várias indústrias (HARPER, 2002; CALLISTER JR, 2012; MANO e MENDES, 1999; MANO, 2007).

2.6 O PLA

Os bioplásticos apresentam um conjunto de benefícios interessantes, incluindo a redução das emissões de carbono, e em sua grande maioria, a utilização de fontes renováveis e

a capacidade de degradação mais rápida. Um dos bioplásticos mais usados pela indústria é o poli(ácido lático), cuja sigla é PLA.

O PLA, além de ser um bioplástico tem vários outros pontos positivos. Ele é um termoplástico, pode ser fundido e moldado em qualquer forma possível. É um plástico de uma certa rigidez e resistência. Sua temperatura de transição vítrea, onde se inicia a mobilidade de cadeias na fase amorfa do plástico, e a temperatura de fusão cristalina, acima da qual o plástico se torna viscoso (MANO e MENDES, 1999), são mais baixas do que outros plásticos usados na indústria, levando a uma conformação mais fácil usando menos energia, o que também contribui para o meio ambiente. Seu índice de contração é baixo, ou seja, ele deforma pouco ao se esquentar e esfriar, acarretando uma menor perda na produção. (ZHU, ZHANG, CHEN, 2019)

Uma característica negativa presente em grande parte dos bioplásticos, incluindo o PLA, é a dificuldade na reciclagem, pois há propriedades que dificultam sua separação e o impossibilitam de ser misturado com outros tipos de plásticos por riscos de contaminação. Essas propriedades também prejudicam a sua degradação, que requer condições especiais, como uma tecnologia mais avançada para a sua separação e temperatura mais elevada para a sua degradação, encontradas somente em instalações de compostagem industriais específicas, que ainda são muito raras. (GRAPPLING, 2022; IS, 2022; GIRONI, PIEMONTE, 2012).

Contudo, o PLA vem ganhando espaço na indústria mundial, sendo muito utilizado em embalagens. Porém, foi na indústria da Impressão 3D que ele obteve um grande destaque. Suas características tiveram uma combinação harmônica com a ferramenta, onde vem sendo o material mais usado pelos usuários e possibilitando o avanço rápido dessa tecnologia. Contudo o benefício foi mútuo entre as duas partes. O PLA também obteve positivos avanços a partir da sua aditivação, se mostrando um material eficiente e versátil para recebê-las (POLYLACTIC, 2021).

2.7 Aditivação

A aditivação de plásticos é um processo de muita importância para a indústria de materiais plásticos. Consiste na introdução controlada de substâncias, denominadas aditivos, nos plásticos com o intuito de aprimorar suas propriedades e desempenho. O objetivo é adaptar o plástico para atender às necessidades específicas das aplicações, adequando-o de acordo com a necessidade de cada setor industriais que ele for usado (MARTURANO, CERRUTI, AMBROGI, 2017).

A partir de pequenas modificações, plásticos como o PLA podem se tornar mais rígidos, ou mais resistentes, ou mais flexíveis, ou ter mudanças de brilho (Figura 7), podendo ir do fosco ao brilho com efeito metálico, até resistência contra chamas. Além dessas existem muitas outras características que são passíveis de modulação nos plásticos a partir de aditivos, que também podem ser combinados, ganhando grande variedade de possibilidades para personalizar as propriedades dos plásticos e garantir que eles obtenham qualidades técnicas que melhor se apliquem à função que ele foi designado. (TELLIER, 2022)

Figura 7 – Comparação do brilho entre peças de PLA fosco e PLA silk



Fonte: Bambu Lab CA (2023)

Apesar de sua difícil separação, essas dificuldades que o PLA apresenta podem ser superadas pelos usuários da impressão 3D, desde que possuam o conhecimento de quais materiais estão sendo utilizados e consigam, portanto, separá-los mais facilmente, possibilitando sua reciclagem. Fato que já foi provado ser possível e apresentou resultados satisfatórios. (ANDERSON, 2017).

2.8 Explorando Alternativas para uma Solução Ideal

Contudo, há uma possível solução que pode ser ainda mais promissora. A mistura de aditivos e outros plásticos ao PLA se mostrou muito eficiente pela indústria da Impressão 3D, trazendo vários benefícios ao material. Um estudo recente descobriu uma blenda que torna o PLA degradável em instalações de compostagem comuns, inclusive domésticas e em águas marinhas. Entretanto, esse benefício vem acompanhado com uma complicação. O material usado foi a Policaprolactona (PCL), um outro tipo de plástico biodegradável e biocompatível, porém ele não é renovável, já que sua produção vem a partir do petróleo. Mesmo assim, já é um grande avanço e um indicativo na direção a ser tomada (NARANCIC *et al.*, 2018; TELLIER, 2022).

Um plástico que consegue se decompor em situações normais como o PCL é o acetato de celulose, que possui algumas propriedades parecidas com o PLA, porém seu processo de fabricação é complicado e oneroso (BIODEGRADABILITY, 2022). Esse material pode servir de comparação junto ao PLA e ao PCL e servir como base na pesquisa do modificador ideal (PULS, 2010; YADAV, HAKKARAINEN, 2021).

A descoberta desse modificador continua a ser uma preocupação central nas pesquisas acadêmicas. O desafio consiste em encontrar um aditivo que possa oferecer desempenho equivalente ao obtido com o uso do PCL e o acetato de celulose, mas que não esteja sujeito às desvantagens associadas a essas alternativas. Em um estudo conduzido por Wang *et al.* (2008), surgiu um candidato promissor. A pesquisa demonstrou que a combinação de óleo de mamona (*Ricinus communis* L.) e estireno

permitiu a produção de um polímero na forma de espuma, que exibiu uma notável capacidade de biodegradação em solo à temperatura ambiente. Esses achados levantam a possibilidade de que esse material possa ter potencial para ser combinado ao PLA e o proporcionar as propriedades necessárias para uma degradação mais eficaz e ambientalmente amigável.

O *Ricinus communis L.*, popularmente conhecido como mamona, é uma planta de grande relevância industrial devido à extração do óleo de rícino, um produto natural versátil e renovável. O seu óleo tem ampla aplicação em diversos setores, incluindo a fabricação de lubrificantes, tintas, cosméticos, medicamentos, plásticos e adesivos. Sua composição única, rica em ácido ricinoleico, confere propriedades químicas diferenciadas que possibilitam sua utilização como plastificante, agente emoliente e matéria-prima para a síntese de bioplásticos.

O PLA é um tipo de plástico feito a partir do ácido láctico, com uma estrutura mais rígida e que não se mistura facilmente com substâncias muito diferentes dele. Já o óleo de mamona é rico em Ácido Ricinoleico. Esse ácido possui uma parte solúvel em água (hidrofílica) e outra solúvel em óleo (hidrofóbica). Isso significa que ele pode interagir tanto com substâncias aquosas quanto oleosas. (PATEL *et al.*, 2016)

3 METODOLOGIA

3.1 Etapas Envolvidas

a) Levantamento de dados

- Levantamento bibliográfico: consultas a livros, artigos, dissertações além de revistas especializadas que abordem os conceitos trabalhados na pesquisa;
- Levantamento de casos de métodos de desenvolvimento do material estudado: consultas a artigos, periódicos onde tais casos foram divulgados.

b) Análise dos dados coletados

- Selecionar dentre os casos levantados, aqueles que foram descritos na pesquisa;
- Avaliação de propriedades do material;
- Mapeamento das possíveis aplicações do material.

c) Aditivação e caracterização

- Aplicar os estudos coletados em prática;
- Selecionar materiais compatíveis com o PLA;
- Produção de materiais de teste por meio da aditivação do PLA;
- Testar as amostras simultaneamente ao material original de controle;
- Comparar os resultados, características e testes dos materiais obtidos com as características dos materiais de referência.

d) Conclusão

- Elaboração de texto apresentando as análises e conclusões do trabalho proposto através de relatórios parciais e finais.

3.2 Materiais

3.2.1 Poli(ácido láctico) – PLA

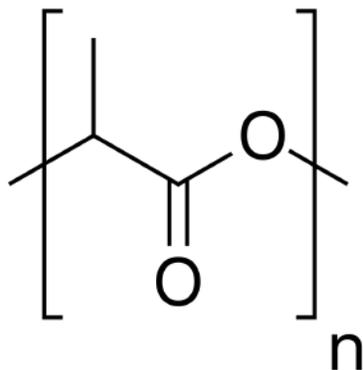
Para a execução da pesquisa, a escolha do material base foi o Poli(ácido láctico) (PLA). O material foi adquirido virgem, na cor natural e em formato de grãos (Pellets), fornecido pela empresa NatureWorks classe 3D850, uma classe para impressão 3D, através da distribuidora 3D Lab (Figura 8) e cuja estrutura química está ilustrada na Figura 9.

Figura 8 - Grãos de PLA



Fonte: Próprio Autor (2025)

Figura 9 – Estrutura Química do PLA



Fonte: Poliacido Láctico (2024)

3.2.2 Policaprolactona – PCL

Para os propósitos deste estudo, que busca o desenvolvimento de um material proveniente exclusivamente de fontes renováveis, o PCL não se mostra adequado, pois, apesar de sua biodegradabilidade, trata-se de um polímero sintético derivado do petróleo, uma fonte não renovável. Contudo, o PCL foi selecionado como material de referência para fins de comparação, uma vez que o trabalho de Narancic, *et al* (2018), utilizado como base para esse estudo, empregou esse plástico como modificador principal.

Para garantir uma melhor compatibilidade com o PLA, cujos pallets foram desenvolvidos para impressão 3D, a Policaprolactona, cuja estrutura química está ilustrada na Figura 10, foi adquirida em formato de filamento para impressão 3D e depois picotado em fragmentos de aproximadamente 5mm para facilitar a transformação do material de uso para a pesquisa.

Figura 10 – Policaprolactona (PLC) – Estrutura química

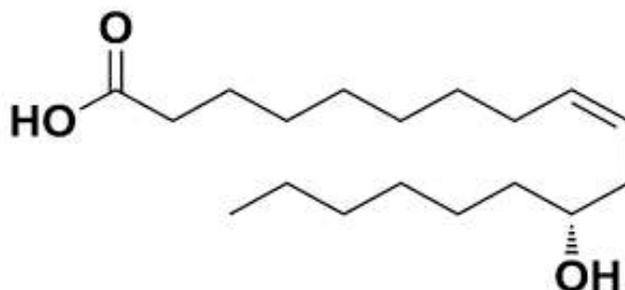


Fonte: Policaprolactona (2024)

3.2.3 Óleo de Rícino – *Ricinus Communis L.*

O aditivo principal escolhido para a execução da pesquisa foi o óleo de rícino (*Ricinus Communis L.*), cuja estrutura química esta ilustrada na figura 11, foi fornecido pela empresa Farmax em composição 100% pura.

Figura 11 – Estrutura Química Óleo de Rícino



Fonte: Njoroge (2013)

3.2.4 Poli(etileno glicol) – PEG

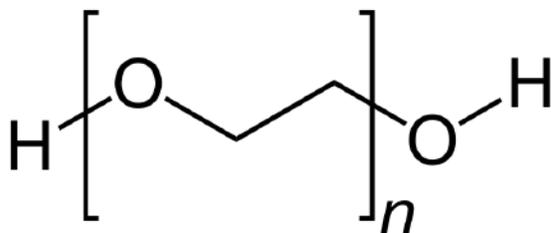
Por terem algumas características em comum, como certos grupos químicos que podem interagir entre si, o óleo de rícino e o PLA podem ter uma compatibilidade parcial. No entanto, como o PLA é mais rígido e menos miscível em óleos, a mistura entre os dois pode não ser completamente homogênea. Para melhorar essa compatibilidade, podem ser usados processos químicos que alteram o óleo de rícino ou adicionados agentes que ajudam a misturar melhor os materiais.

O agente escolhido para este estudo foi o PEG (polietilenoglicol), um polímero linear composto por unidades repetitivas de etileno glicol. O PEG, cuja estrutura química está ilustrada na figura 12, é altamente compatível com diversos plásticos e pode ser incorporado em formulações poliméricas sem comprometer suas propriedades. Neste trabalho, sua principal função é a de atuar como plastificante e auxiliar na melhora da processabilidade do sistema. Além disso, sua presença favorece a dispersão de aditivos como o óleo de rícino na matriz polimérica do PLA.

A principal característica que motivou a escolha do PEG como aditivo neste estudo foi sua capacidade de reduzir a tensão superficial dos materiais. A menor tensão superficial favorece a adesão entre os componentes da mistura, promovendo uma ligação mais eficaz entre o PLA e o óleo de rícino. Dessa forma, o PEG não apenas melhora a compatibilidade entre os materiais, mas também contribui para a formação de um sistema mais homogêneo, com melhores propriedades mecânicas e processabilidade

aprimorada. O PEG pode ser encontrado em várias massas molares, a utilizada para esse estudo foi a de 6000g/mol da marca Aldrich Chemistry.

Figura 12 – Poli(etileno glicol) – Estrutura química



Fonte: Polietilenoglicol (2023)

3.3 Amostras

Para a execução da pesquisa, foram elaboradas amostras a partir de quatro materiais diferentes. Em seu trabalho, Narancic *et al.* (2018) formou uma blenda entre PLA e PCL, usando a proporção de 80% do material base e 20% de PCL. Para fins de comparação, esse estudo usou a mesma porcentagem de modificadores em relação ao estudo de Narancic *et al.* (2018), com 20% do peso total da amostra. Para cada amostra criada, foram criadas três réplicas para o teste de biodegradação em solo, e cinco réplicas de cada para o teste de tração, seguindo o que é postulado pela norma ASTM D 638.

Foram criadas duas amostras de referência, sendo uma, o controle, feita por 100% de PLA Natural (PLA-100) e a outra seguindo o estudo de Narancic *et al.* (2018), com 80% de PLA Natural e 20% de PCL (PPCL-8020). A terceira amostra foi elaborada por 80% em peso de PLA Natural e 20% em peso óleo de rícino (POR-8020). A segunda, 80% em peso de PLA Natural, 10% em peso de óleo de rícino e 10% em peso de PEG (PORPEG-801010), seguindo a proporção de 20% de modificadores. Ao término do estudo, observou-se a necessidade de elaborar uma nova amostra composta exclusivamente por PLA e PEG, com o objetivo de compará-la às demais formulações e avaliar de maneira isolada a influência do PEG na matriz polimérica. Dessa forma, a amostra foi sintetizada e incorporada aos ensaios finais, possibilitando uma análise mais detalhada dos efeitos

do compatibilizante nas propriedades do material. Como o intuito da nova amostra é para a comparação com a amostra PORPEG-801010, e essa amostra contém somente 10% do peso total de Poli(Etileno Glicol), a nova amostra seguiu essa mesma proporção e foi preparada com uma composição de 90% PLA e 10% PEG (PPEG-9010), ficando em conformidade com a formulação anterior, onde o PEG estava presente em uma proporção de apenas 10%.

As amostras foram produzidas a partir da fusão controlada dos materiais que, após a pesagem foram colocados em um pote cerâmico e lentamente aquecidos em uma manta aquecedora da marca Fisatom Modelo 102E a temperatura aproximada de 150°C e misturados de forma mecânica manual com o auxílio de uma espátula até que os materiais encontrassem em forma pastosa e em homogeneidade.

Após a mistura ser concluída, o material ainda aquecido foi imediatamente transferido para um molde retangular de aço inoxidável com dimensões de 70 x 100 x 1,8mm protegido com folha Kapton e termoprensado utilizando uma Prensa aquecida da marca AX Plásticos a temperatura de 180°C por 30 segundos com 2 toneladas de pressão, e em seguida mais 60 segundos com pressão máxima possível, que variava entre 5 a 5,5 toneladas. Após esse processo a amostra foi resfriada naturalmente a temperatura ambiente e, após resfriar, desmoldada.

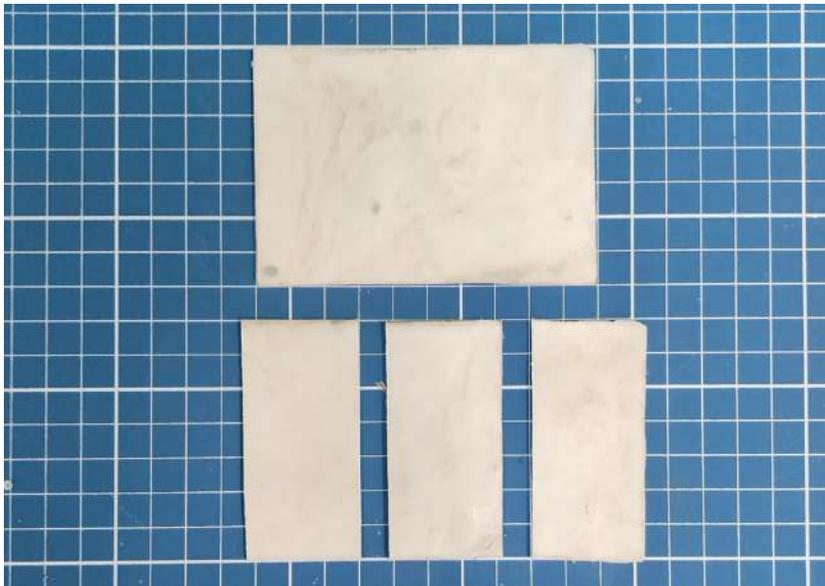
Esse procedimento foi repetido para todos os materiais e foram tiradas pelo menos duas amostras para cada material (Figura 13). Uma das amostras foi dividida em três partes iguais de aproximadamente 33mm x 70mm x 1,8mm para o teste de biodegradação (Figura 14). A segunda amostra foi usada para a obtenção das amostras seguindo os padrões da norma ASTM D 638, para o ensaio de tração.

Figura 13 – Amostras Obtidas



Fonte: Próprio Autor (2023)

Figura 14 – Divisão da Amostra (PPCL-8020)



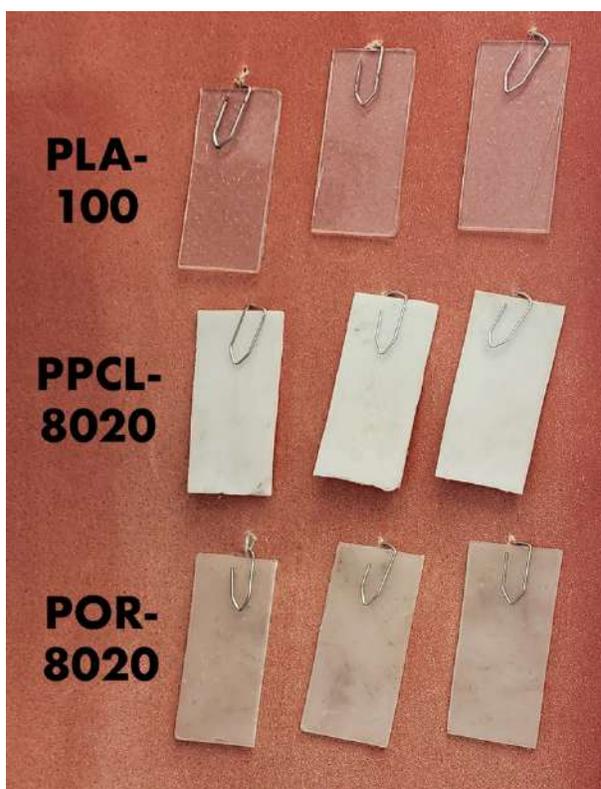
Fonte: Próprio Autor (2023)

3.4 Caracterizações

3.4.1 Fotodegradação

Foi realizada uma simulação da exposição das amostras dos materiais desenvolvidos à luz solar (Figura 15), expondo-os à duas lâmpadas TL UVA-1 100W-R/10 da marca Philips cujo espectro de emissão apresenta comprimento de onda na faixa de 350 nm em uma câmara de alumínio, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM G154-12A. Foram realizadas medições periódicas para análise da cor, sendo expostos todos os materiais desenvolvidos para o teste de biodegradação.

Figura 15 – Amostras Expostas à Radiação UV



Fonte: Próprio Autor (2023)

Esse procedimento teve como objetivo a avaliação do valor médio das medições e cálculo dos desvios padrões. A exposição das amostras consistiu em períodos alternados de presença e ausência da luz. Foram programados com o auxílio de um temporizador da

marca Metaltex, cinco ciclos diferentes totalizando 360 horas de exposição total. Os três primeiros ciclos foram formados por 7 horas e 30 minutos com as lâmpadas acesas e 2 horas e 30 minutos com as lâmpadas desligadas, repetindo-se por oito vezes até o tempo total de exposição chegar a 60 horas. O quarto ciclo foi feito com um total de 96 horas de exposição e o quinto e último ciclo com 84 horas totais de exposição, com um total final de 360 horas de exposição.

Após a conclusão de cada ciclo, as amostras foram analisadas e logo após retornadas a câmara e era dado início ao próximo ciclo. Para essa análise, foi utilizado o Espectrofotômetro da marca Konica Minolta modelo CM-600d (Figura 16), com escala espectral de 400 a 700nm, avaliando os comprimentos de onda que atravessam a amostra, medindo os parâmetros no espaço de cor CIE $L^*a^*b^*$ (L^* (luminosidade), a^* (coordenada vermelho/verde, sendo positivo indicando vermelho e negativo indicando verde) e b^* (coordenada amarelo / azul, sendo positivo indicando amarelo e negativo indicando azul), permitindo uma precisa análise da cor.

Figura 16 – Espectrofotômetro Konica Minolta CM-600d



Fonte: Próprio Autor (2023)

Observação: Após o terceiro ciclo, devido ao processo de fotodegradação, uma das amostras de PORPEG-801010 obteve uma pequena quebra. A parte menor foi então desconsiderada para a continuidade dos testes, não fazendo parte do teste de biodegradação.

3.4.2 Biodegradação em Solo

Para esse estudo foi utilizado a norma ASTM G160-12 – Prática padrão para avaliação da susceptibilidade microbiana de materiais não metálicos por enterro laboratorial em solo. Como especificado na norma, a susceptibilidade microbiana pode ser refletida em diversos fatores como a perda de massa e de propriedades mecânicas do material.

O solo foi composto por partes iguais por peso de solo fértil, areia e esterco de gado, misturados e peneirados de acordo com a norma e acomodado em um recipiente plástico de aproximadamente 375mm x 285mm x 170mm.

Com o auxílio de um Medidor de solo 3 em 1 (pH, umidade e iluminação ambiente) da Marca Hagra modelo 18530, o solo foi mantido com o pH entre 6,5 e 7,5 com umidade entre 20 e 30% mensurados. Os níveis de biodegradação de cada grupo de amostras foram mensurados com medições periódicas de perda de massa das amostras. Após a pesagem inicial, foi realizada uma pesagem após 30 dias e em seguida foram realizadas medições semanais até o período final de 120 dias.

Foram utilizadas três réplicas de amostra para cada material. As amostras possuem tamanho aproximado de 30 x 70 x 1,8 mm e foram enterradas com pelo menos 50mm de solo em todas as direções entre as amostras em si, as bordas, o fundo e o topo do recipiente (Figura 17).

Figura 17 – Amostras no Recipiente com Solo



Fonte: Próprio Autor (2023)

3.4.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR, do inglês *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) é uma técnica analítica utilizada para a identificação e caracterização de compostos químicos, especialmente materiais poliméricos. Baseia-se na interação da radiação infravermelha com as ligações químicas da amostra, resultando em um espectro que representa a absorção de diferentes comprimentos de onda em função da frequência vibracional das moléculas. Esse espectro funciona como uma "impressão digital" do material, permitindo a identificação de grupos funcionais e a análise de mudanças estruturais decorrentes de processos químicos, físicos ou de degradação. No contexto desse estudo, o FTIR desempenha um papel crucial na avaliação das interações entre o polímero base e os aditivos incorporados. Através dessa técnica, é possível verificar a presença e a dispersão dos aditivos, identificar possíveis reações químicas entre os componentes e monitorar alterações estruturais no polímero resultantes da modificação. Além disso, a FTIR auxilia na verificação da estabilidade

química do material, garantindo que a aditivação não comprometa propriedades fundamentais do polímero. Dessa forma, sua aplicação é essencial para validar a eficácia da modificação proposta e para otimizar a formulação do material, contribuindo para o desenvolvimento de novos polímeros com propriedades aprimoradas.

As mostras desenvolvidas foram investigadas por análise de FTIR empregando espectômetro de IR (Agilent Technologies), usando a técnica de refletância total atenuada (ATR), modo absorvância, com varredura de 4000-650 cm^{-1} , resolução de 8 cm^{-1} . Os espectros foram normalizados empregando a banda de 1750 cm^{-1} como banda de referência. O ensaio foi realizado com uma amostra de cada material antes e depois do teste de biodegradação em solo para fins de comparação.

3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de caracterização microestrutural que utiliza um feixe de elétrons para varrer a superfície de uma amostra, gerando imagens com alta resolução e grande profundidade de campo, permitindo a visualização de detalhes na escala nanométrica e assim, possibilitando a análise da morfologia, topografia e composição elementar dos materiais. A interação dos elétrons com a amostra resulta na emissão de diferentes tipos de sinais, como elétrons secundários e retroespalhados, que fornecem informações sobre a textura superficial e a heterogeneidade do material.

O MEV desempenha um papel essencial na caracterização da dispersão e da incorporação dos aditivos na matriz polimérica. Através dessa técnica, é possível avaliar a distribuição dos aditivos, a formação de aglomerados e a possível ocorrência de defeitos estruturais, como porosidades ou descontinuidades, que podem comprometer as propriedades mecânicas e químicas do material. Além disso, a análise da microestrutura permite correlacionar a morfologia do polímero modificado com suas propriedades finais, auxiliando na otimização da formulação e no desenvolvimento de materiais com desempenho aprimorado para aplicações específicas.

As imagens de MEV foram obtidas com uso de um microscópio eletrônico de varredura modelo de bancada Hitachi 4000 Plus, com feixe de elétrons operando a 5 kV, e capturadas usando o detector de elétrons retroespalhados (BSD). As amostras foram fixadas em um porta- amostra com auxílio de uma fita condutora de carbono.

3.4.5 Ângulo de Contato

O teste de ângulo de contato é uma técnica utilizada para avaliar a molhabilidade e a energia de superfície de um material sólido em contato com um líquido. Esse ensaio consiste na deposição de uma gota líquida sobre a superfície da amostra e na medição do ângulo formado entre a gota e a superfície do objeto. Um ângulo de contato baixo indica alta molhabilidade, o que sugere uma maior afinidade entre o líquido e o objeto sólido, enquanto um ângulo elevado indica menor interação, indicando uma maior hidrofobia do material. É uma análise importante para compreender fenômenos interfaciais, como adesão, espalhamento e interações químicas do material desenvolvido. O teste de ângulo de contato é fundamental para avaliar o impacto dos aditivos nas propriedades superficiais do material. O que possibilita avaliar a alteração da energia de superfície do polímero, que pode modificar sua interação com líquidos e influenciar propriedades como adesão, compatibilidade com outros materiais e resistência a agentes químicos.

As medidas do ângulo de contato da gota d'água na superfície das amostras foram realizadas utilizando um goniômetro DIGIDROP-DI (GBX Instruments). Os resultados serão representados pelas médias entre os ângulos direito e esquerdo, obtidos após deposição de gotas com volume padronizado (10 μ L). O software Surface Energy do software, foi utilizado na análise dos dados. As médias das medições em réplica e o desvio padrão foram calculados para avaliação.

3.4.6 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um teste mecânico feito para avaliar a resistência e a deformabilidade dos materiais submetidos. O ensaio se dá pela fixação de uma amostra padronizada em uma máquina universal de ensaios, onde é aplicada uma carga uniaxial crescente até a sua ruptura. A partir disso, é gradativamente registrada a relação entre a força aplicada e a deformação gerada. Com os dados obtidos, é possível traçar um gráfico de tensão-deformação, que permite determinar propriedades mecânicas fundamentais, como resistência do material à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura. Esses parâmetros são de grande valia para a melhor compreensão do comportamento do material em diferentes condições de aplicação.

No contexto desse estudo, o ensaio de tração desempenha um papel muito importante, permitindo analisar o impacto dos aditivos nas propriedades mecânicas do material, permitindo correlacionar as modificações estruturais e desempenho mecânico, auxiliando na formulação de novos polímeros com propriedades otimizadas. Além disso, os resultados dos ensaios permitem avaliar a viabilidade de aplicações específicas, garantindo que os polímeros modificados desenvolvidos atendam aos requisitos necessários para sua utilização em diferentes setores industriais do mercado.

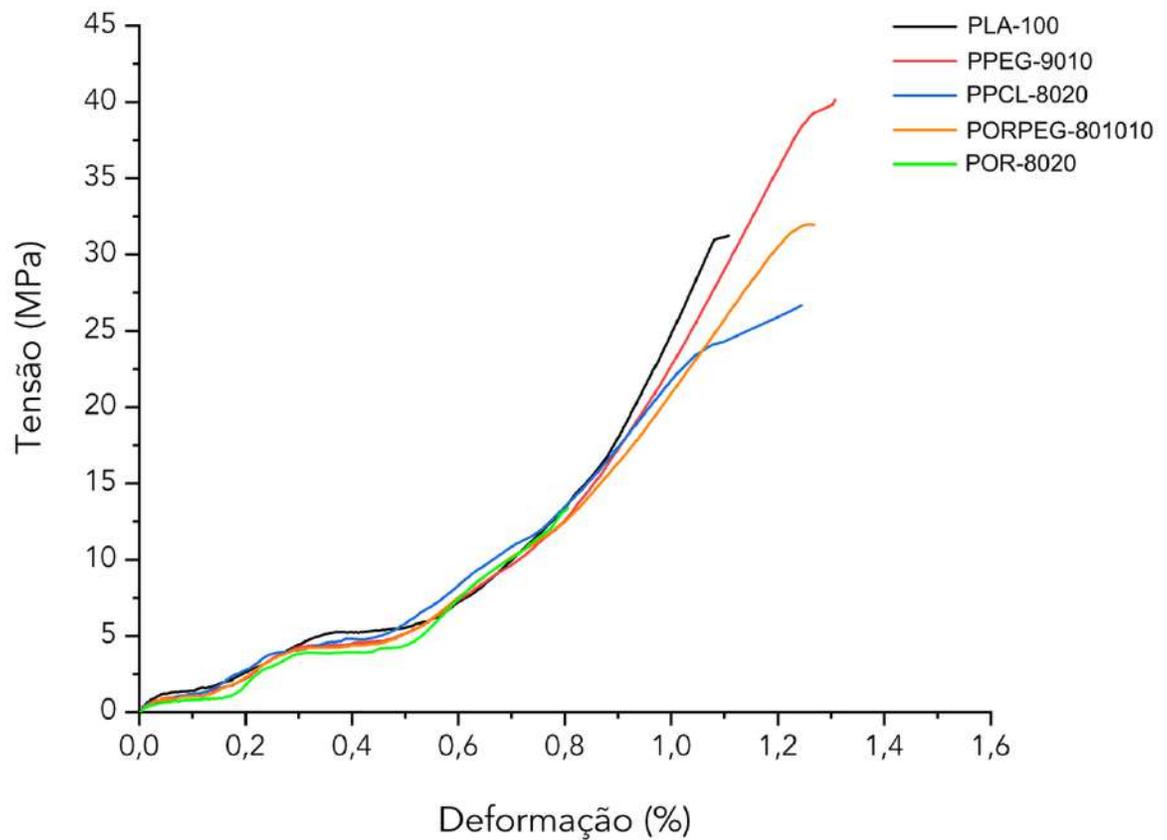
Os ensaios de tração foram realizados a partir de um equipamento de ensaios universais para testes mecânicos da marca EMIC modelo DL-3000 em temperatura ambiente, com velocidade de 20 mm/min, com célula de carga de 500 N e com distância entre garras de 13 mm. Os corpos de prova foram produzidos com medidas conforme a norma ASTM D 638, que normatiza o ensaio de tração para polímeros. O ensaio foi realizado com 5 réplicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades mecânicas

A figura 18 apresenta o gráfico de tensão em relação a deformação resultante do ensaio de tração realizado com as amostras PLA-100, PPEG-9010, POR-8020, PPCL-8020 e PORPEG-801010. A tabela 1 traz os valores numéricos máximos obtidos como resultado dos mesmos ensaios.

Figura 18: Gráfico Tensão x Alongamento das amostras submetidas ao ensaio de tração



Fonte: Próprio Autor (2025)

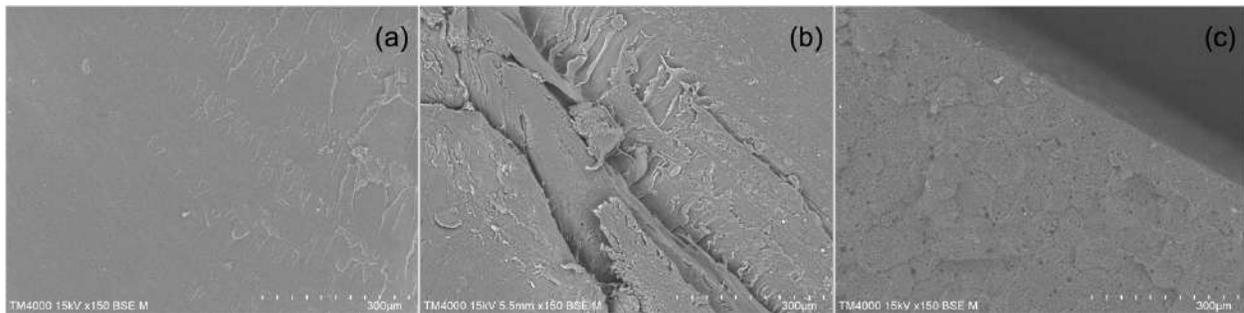
Tabela 1: Valores de Tensão Máxima e Alongamento das amostras

Amostras	PLA-100	PPEG-9010	POR-8020	PPCL-8020	PORPEG-801010
Tensão Máx. (MPa)	35,31 ± 4,43	44,24 ± 4,49	13,80 ± 2,14	27,35 ± 3,65	32,39 ± 3,50
Deformação (%)	1,13 ± 0,10	1,34 ± 0,09	0,82 ± 0,05	1,18 ± 0,12	1,27 ± 0,05

Fonte: Próprio Autor (2025)

Após análise dos resultados expostos na tabela 1 e na figura 18, foi identificado que as amostras com a presença do plastificante polietilenoglicol (PEG) — PPEG-9010 e PORPEG-801010 —, em relação ao PLA-100, apresentaram um ligeiro aumento na porcentagem de deformação das misturas, sendo PPEG-9010 a amostra que apresenta aumento mais significativo da deformação. Segundo Li et al. (2015) e Sungsanit & Bhattacharya (2011), esse comportamento é comum em materiais com plastificantes, uma vez que essas substâncias são incorporadas aos polímeros-matriz para melhorar sua ductilidade, flexibilidade e facilidade de processamento, alterando minimamente a resistência e a rigidez da mistura. O PEG é um plastificante amplamente utilizado pela indústria no PLA, devido à boa miscibilidade com este. Esse plastificante pode melhorar a hidrofiliabilidade do PLA, não só gerando uma melhor adesão entre carga e matriz, mas também agregando biocompatibilidade e biodegradabilidade aos polímeros (Li et al., 2015). Sendo assim, a presença do PEG nas amostras sugere uma diminuição da fragilidade dos materiais quando comparados ao polímero-matriz puro.

Figura 19: Imagens de MEV da fratura do (a) PLA-100, (b) PPEG-9010 e (c) PORPEG-801010 – magnificação de 150 vezes



Fonte: Próprio Autor (2025)

A figura 19, obtida por microscopia eletrônica de varredura da sessão fraturada das três amostras (PLA-100, PPEG-9010 e PORPEG-801010), corrobora os resultados de deformação obtidos, uma vez que a amostra de PLA-100 apresenta características de fratura frágil, com regiões mais lisas, enquanto as amostras de PPEG-9010 e PORPEG-801010 demonstram mais áreas de deformação superficial entre as partes fraturadas, demonstrando maior dificuldade de desconexão no momento da ruptura, compatível com maior alongamento.

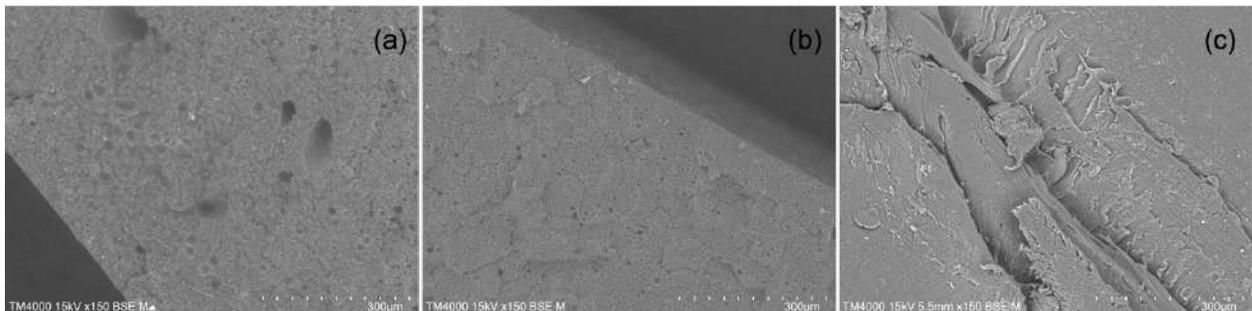
No entanto, de acordo com Li *et al.* (2015), o comportamento esperado das misturas com PEG, além do aumento da porcentagem da deformação, é a diminuição da resistência à tração, o que não ocorre no teste apresentado. A tensão máxima de ruptura das amostras PPEG-9010 e PORPEG-801010 atingiu, respectivamente, 44,24 ($\pm 4,49$) MPa e 32,39 ($\pm 3,50$) Mpa. A amostra PPEG-9010 apresentou o maior valor, enquanto a amostra PORPEG-801010 teve uma tensão máxima semelhante à do PLA-100, que foi de 35,31 ($\pm 4,43$) Mpa. Sungsanit & Bhattacharya (2011) justificam esse aumento relativo da resistência à tração pelo maior teor de cristalinidade da matriz PLA presente nesses materiais.

A amostra POR-8020, com 20% de óleo de ricino, apresentou alongamento e resistência à tração menores que o PLA-100 e PORPEG-801010. Segundo Qin *et al.* (2017), a diminuição da resistência é esperada, pois o óleo dificulta a interação entre as cadeias polímero-polímero. Quanto à menor porcentagem de alongamento, Bouti *et al.* (2022)

relata que, ao aumentar a concentração de óleo, pode-se ultrapassar o teor ótimo da mistura, levando ao excesso e a uma possível exsudação do plastificante.

A análise correlacionada dos valores obtidos nos ensaios das amostras POR-8020, PORPEG-801010 e PPEG-9010, que obtiveram respectivamente 0,82%, 1,27% e 1,34% de alongamento e 13,80 MPa, 32,39 MPa e 44,24 MPa de tensão máxima, é coerente com Bouti et al. (2022). A redução da porcentagem de óleo de rícino de 20% na amostra POR-8020 para 10% na amostra PORPEG-801010 apresenta melhores resultados de alongamento e tensão máxima. A ação combinada do PEG e do óleo de rícino no PLA, na amostra PORPEG-801010, propiciou valores próximos aos apresentados pela amostra PLA-100. A figura 20 traz o MEV da fratura das três amostras, onde ao centro (b) é visível a amostra PORPEG-801010, com características de menor quantidade e tamanho de espaços vazios em relação à POR-8020 (a) e áreas de deformação de ruptura similares à amostra PPEG-9010 (c).

Figura 20: Imagens de MEV da fratura do (a) POR-8020, (b) PORPEG-801010 e (c) PPEG-9010 – magnificação de 150 vezes



Fonte: Próprio Autor (2025)

Na amostra POR-8020(a), é possível observar a presença de bolhas. Foi inicialmente considerado a hipótese de que esse fenômeno pudesse estar relacionado à ebulição do óleo de rícino. No entanto, essa possibilidade foi descartada, uma vez que seu ponto de ebulição é de aproximadamente 313 °C, valor significativamente superior à temperatura de fusão do PLA, que ocorre em torno de 180 °C. Além disso, a ausência de bolhas na amostra PORPEG-801010(b), que também contém óleo de rícino, reforça a exclusão dessa hipótese. Assim, a presença de bolhas na amostra POR-8020(a) pode estar

associada ao processo de homogeneização mecânica dos materiais, que possivelmente incorporou bolhas de ar ao material.

Por fim, a amostra PPCL-8020 apresentou uma tensão de ruptura de 27,35 MPa e um alongamento de 0,82%, ambos valores inferiores ao do polímero puro. Fortelny *et al.* (2019), ao apresentar uma revisão de estudos publicados sobre blendas de PCL e PLA, relatam resultados que indicam a dificuldade desses polímeros em se misturarem. Segundo o artigo, é necessário o uso de compatibilizantes para que a blenda entre PCL e PLA alcance melhores propriedades mecânicas.

4.2 Fotodegradação por Exposição à Radiação Ultravioleta

O PLA é um material com baixa suscetibilidade à degradação por microrganismos em condições naturais. Com objetivo de realizar essa redução de massa, as amostras também foram submetidas a exposição a radiação UV e a biodegradação em solo, levando o PLA a sofrer uma quebra de cadeia, e assim obtendo uma menor massa molar. (ISHIKAWA *et al.*, 2015; OLEWNIK-KRUSZOWSKA *et al.*, 2015)

As tabelas abaixo apresentam a média com desvio padrão dos resultados obtidos de espectro de cor de cada amostra após cada ciclo de tempo de exposição a raios ultravioleta, sendo a tabela 2 os resultados das amostras de PLA-100, a tabela 3 do PPCL-8020, a tabela 4 POR-8020 e a Tabela 5 PORPEG-801010.

Foram feitos três escaneamentos de cada réplica de cada amostra para garantir uma maior precisão dos resultados. A partir dos valores que cada replica obteve foi feito uma nova média, resultando assim em um único valor para cada material junto ao seu desvio padrão, representado nas tabelas 2, 3, 4 e 5 abaixo como DP. Para melhor representação visual, as cores obtidas foram também representadas nas tabelas abaixo, a partir da conversão dos valores CIELAB obtidos para o modelo RGB. As cores resultantes foram representadas nas tabelas no campo RGB. Com essa melhor visualização de cor, é

possível compreender melhor a alternância das cores das amostras submetidas ao experimento e facilmente notar a redução da saturação nas cores das amostras.

Foi possível identificar efeitos semelhantes em outros estudos como em DA SILVA *et al.*, 2020; PAGNAN *et al.*, 2018; LIN, XIE, QIU, 2019 e YOUSIF, HADDAD, 2013 podendo assim, concluir que os objetivos desejados com a fotodegradação foram conquistados.

Tabela 2 – Medida de Cor PLA-100

Amostra		0hrs	DP	60hrs	DP	120hrs	DP	180hrs	DP	276hrs	DP	360hrs	DP
PLA-100	L	79.91	2.31	82.52	0.13	82.48	0.24	82.54	0.16	82.81	0.33	82.79	0.15
	a	1.37	0.01	1.41	0.01	1.46	0.03	1.46	0.01	1.40	0.00	1.40	0.03
	b	-1,76	0.25	-2.54	0.10	-2.74	0.11	-2.80	0.13	-3.01	0.31	-2.79	0.03
RGB													

Fonte: Próprio Autor (2025)

Tabela 3 – Medida de Cor PPCL-8020

Amostra		0hrs	DP	60hrs	DP	120hrs	DP	180hrs	DP	276hrs	DP	360hrs	DP
PPCL-8020	L	81.49	0.61	82.07	1.06	82.63	1.30	82.62	0.91	82.63	1.04	82.53	0.85
	a	0.74	0.08	0.79	0.17	0.84	0.11	0.71	0.11	0.67	0.11	0.68	0.07
	b	5.75	1.69	4.96	1.72	4.87	1.44	4.95	0.89	5.09	0.80	5.35	0.94
RGB													

Fonte: Próprio Autor (2025)

Tabela 4 – Medida de Cor POR-8020

Amostra		0hrs	DP	60hrs	DP	120hrs	DP	180hrs	DP	276hrs	DP	360hrs	DP
POR-8020	L	64.98	1.64	66.79	1.24	67.81	1.40	67.82	0.65	68.14	2.82	69.57	0.23
	a	0.17	0.20	0.31	0.22	0.40	0.23	0.53	0.16	0.46	0.32	0.36	0.12
	b	14.81	0.87	11.63	0.79	9.32	1.19	8.94	0.47	7.57	1.06	1.07	0.13
RGB													

Fonte: Próprio Autor (2025)

Tabela 5 – Medida de Cor PORPEG-801010

Amostra		0hrs	DP	60hrs	DP	120hrs	DP	180hrs	DP	276hrs	DP	360hrs	DP
PORPEG-801010	L	68.37	1.08	69.32	1.34	70.55	1.38	70.92	1.18	71.51	0.87	70.87	1.46
	a	-0.03	0.73	0.46	0.23	0.55	0.14	0.52	0.12	0.53	0.09	0.51	0.11
	b	8.31	1.31	4.98	1.38	3.49	1.54	2.72	0.99	2.15	0.92	1.88	1.02
RGB													

Fonte: Próprio Autor (2025)

É possível observar que todas as amostras apresentaram aumento nos valores de L^* , indicando um clareamento progressivo das superfícies ao longo do tempo de exposição. No eixo a^* , os materiais inicialmente tenderam para o vermelho, mas após determinado período, houve uma reversão parcial desse comportamento, com os valores retornando em direção ao verde. Já no eixo b^* , todas as amostras apresentaram uma tendência consistente de deslocamento em direção ao azul, evidenciado pela diminuição dos valores.

Ao aplicar os valores obtidos a equação 1 abaixo, foi possível calcular a mudança total da cor ΔE^* . (BALIARSINGH *et al.*, 2015)

Equação 1 - ΔE^*

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

As equações 2, 3 e 4 (BALIARSINGH *et al.*, 2015) correspondem a ΔL^* , Δa^* e Δb^* respectivamente, onde corresponde o 0 e o h ao tempo inicial e ao tempo final de exposição UV (60, 120, 180, 276 e 360 horas).

Equação 2 - ΔL^*

$$\Delta L^* = L^*_h - L^*_0;$$

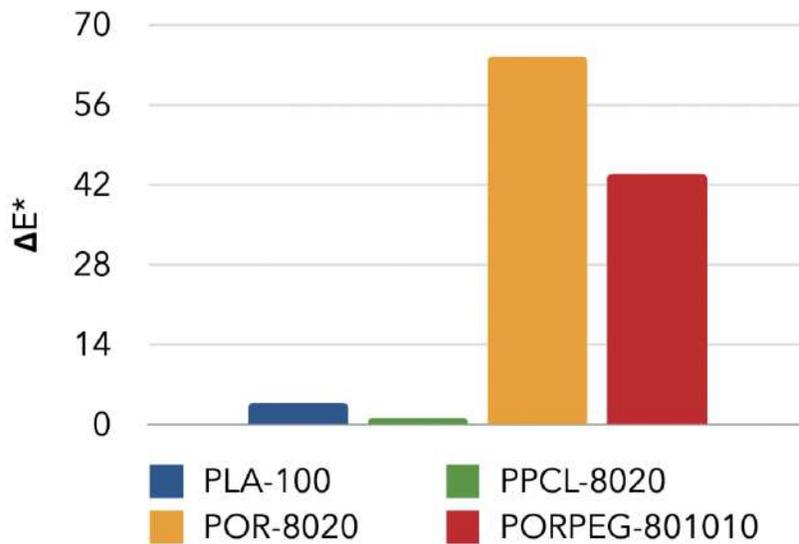
Equação 3 - Δa^*

$$\Delta a^* = a^*_h - a^*_0;$$

Equação 4 - Δb^*

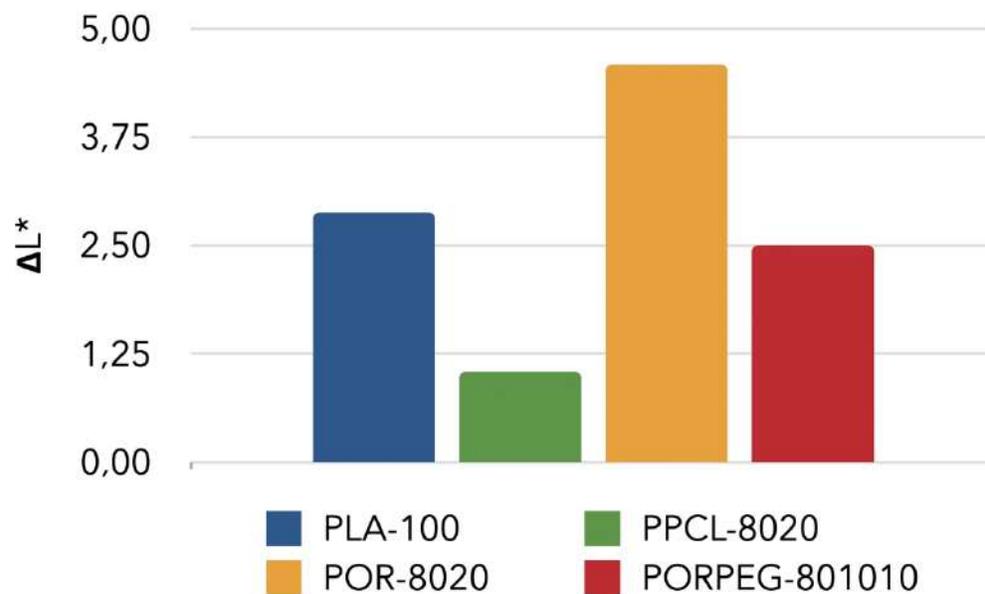
$$\Delta b^* = b^*_h - b^*_0,$$

Os valores de variação de cor ΔE^* são apresentados na figura 21.

Figura 21: ΔE^* 

Fonte: Próprio Autor (2025)

A figura 22 traz os valores de variação da luminosidade (ΔL^*) da última medição, de 360 horas.

Figura 22: ΔL^* 

Fonte: Próprio Autor (2025)

As amostras POR-8020 e PORPEG-801010 apresentaram maior variação total de cor, refletida pelos maiores valores de ΔE^* , demonstrando maior sensibilidade à radiação. Em relação à luminosidade (ΔL^*), todas as amostras ficaram mais escuras.

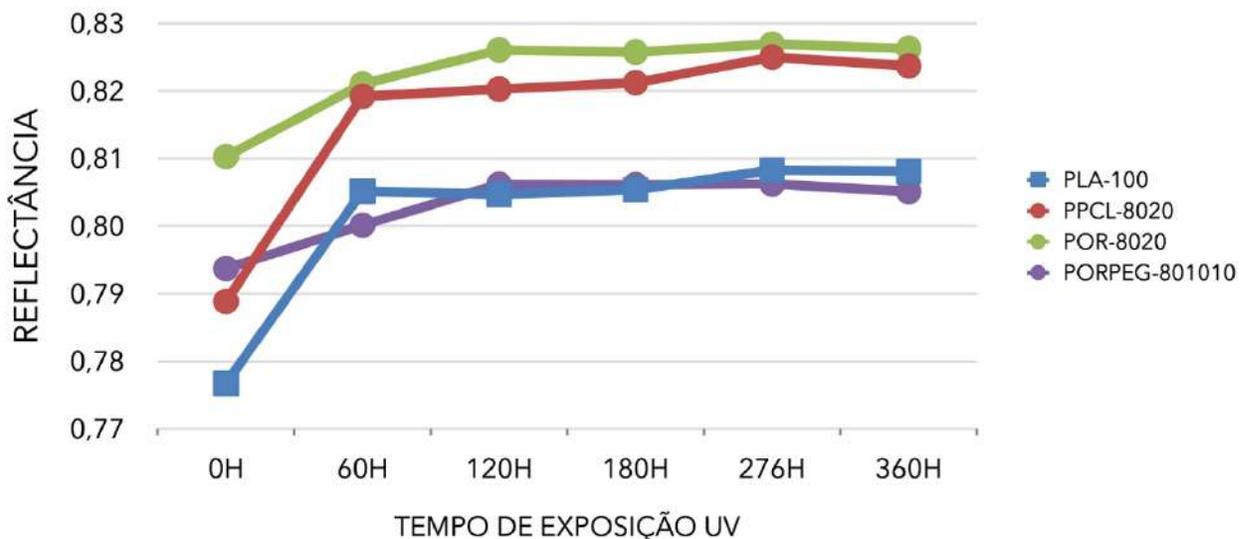
O cálculo da reflectância das amostras também foi realizado, correlacionando a cor, a transmitância e a reflectância dos materiais. Com o aumento da Reflectância, é esperado um crescimento da rugosidade superficial das amostras com a exposição UV (MICHEL; BILLINGTON, 2012). A relação entre a reflectância geral e sua equivalente cor RGB é calculada pela equação 5 abaixo:

Equação 5 - Reflectância

$$\text{Reflectância} = 0,2125 \times R + 0,7154 \times G + 0,0721 \times B$$

Onde R, G, e B são expressos como números entre 0 e 1,0, proporcionalmente à escala utilizada. Os valores da reflectância para as amostras dos seis materiais ao longo das 360 horas de exposição UV são apresentados comparativamente na figura 23.

Figura 23: Reflectância



Fonte: Próprio Autor (2025)

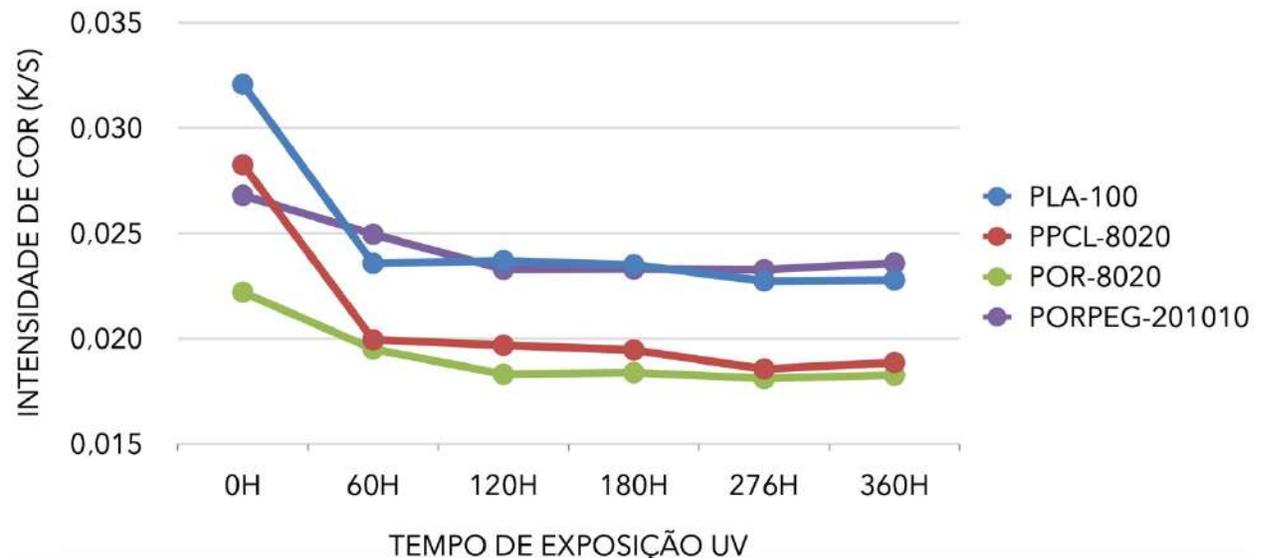
A intensidade da cor na região visível do espectro (400-700 nm) pode ser calculada a partir da reflectância por meio da equação 6 de *Kubelka-Munk* (KUBELKA; MUNK, 1931) abaixo:

Equação 6 – Equação de *Kubelka-Munk*

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

Onde K é o coeficiente de absorção, R é reflectância da amostra e S é o coeficiente de dispersão. A intensidade de cor (K/S) das amostras dos seis materiais ao longo das 360 horas de exposição UV são apresentados comparativamente na figura 24:

Figura 24: Intensidade de Cor (K/S)



Fonte: Próprio Autor (2025)

A opacidade de todas as amostras aumentou durante o processo de exposição, estabilizando-se após 120 horas, conforme indicado pela análise de reflectância. De forma semelhante, a intensidade de cor apresentou queda, evidenciando o desbotamento das amostras, também com estabilização após 120 horas, o que sugere que o pico de efetividade do teste de fotodegradação ocorreu nesse intervalo.

4.3 Biodegradação em Solo

A biodegradação no solo é um processo que se inicia no PLA pela quebra dos grupos éster, que envolve degradação físico-química e microbiana. (QI; REN; WANG, 2017). A avaliação desse processo foi a pesagem de 3 réplicas de cada amostra e a comparação das alterações de massa. A tabela 6 apresenta a média da alteração de massa das amostras para cada medição.

Tabela 6 – Evolução de massa das Amostras

DIA	1	35	48	55	63	70	77	84	93	102	108	115	120
pH	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Umidade	20%	25%	25%	30%	30%	20%	20%	20%	30%	20%	20%	20%	20%
PLA-100	4,996g	5,073g	5,036g	5,033g	5,030g	5,030g	5,030g	5,030g	5,033g	5,030g	5,026g	5,023g	5,023g
PPCL-8020	5,106g	5,126g	5,096g	5,086g	5,093g	5,083g	5,083g	5,083g	5,076g	5,073g	5,073g	5,080g	5,080g
POR-8020	4,983g	5,060g	5,040g	5,040g	5,020g	5,016g	5,020g	5,016g	5,003g	4,993g	4,996g	5,013g	5,013g
PORPEG-801010	4,760g	4,806g	4,610g [*]	4,606g	4,586g ^{**}	4,563g	4,520g	4,526g	4,496g	4,476g	4,466g ^{***}	4,480g	4,480g

Fonte: Próprio Autor (2025)

No dia 48 foi notado uma mudança de translucidez nas amostras PORPEG-801010 (Marcadas com *), que antes possuíam um tom translúcido e leitoso e passaram a ter um tom sólido e opaco (Figura 25).

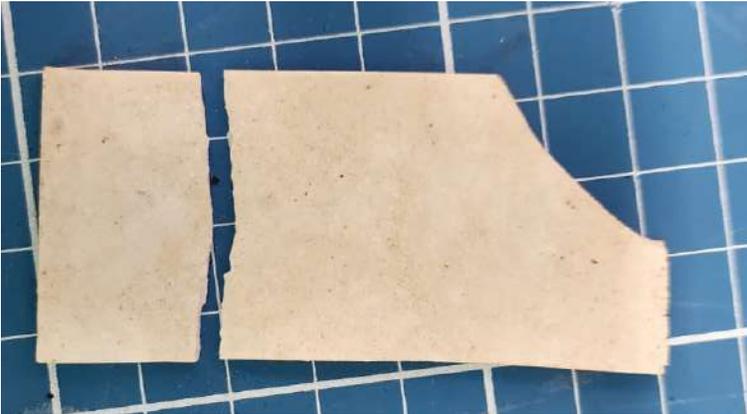
Figura 25 – Mudança de translucidez de PORPEG-801010



Fonte: Próprio Autor (2025)

No dia 63 a réplica 2 da amostra de PORPEG-801010 sofreu uma fratura (Figura 26), marcada na tabela com **.

Figura 26 – Quebra na réplica 2 de PORPEG-801010



Fonte: Próprio Autor (2025)

No dia 108 a mesma réplica da amostra PORPEG-801010 sofreu uma nova fratura (Figura 27), marcada na tabela com ***.

Figura 27 – Segunda quebra na réplica 2 de PORPEG-801010

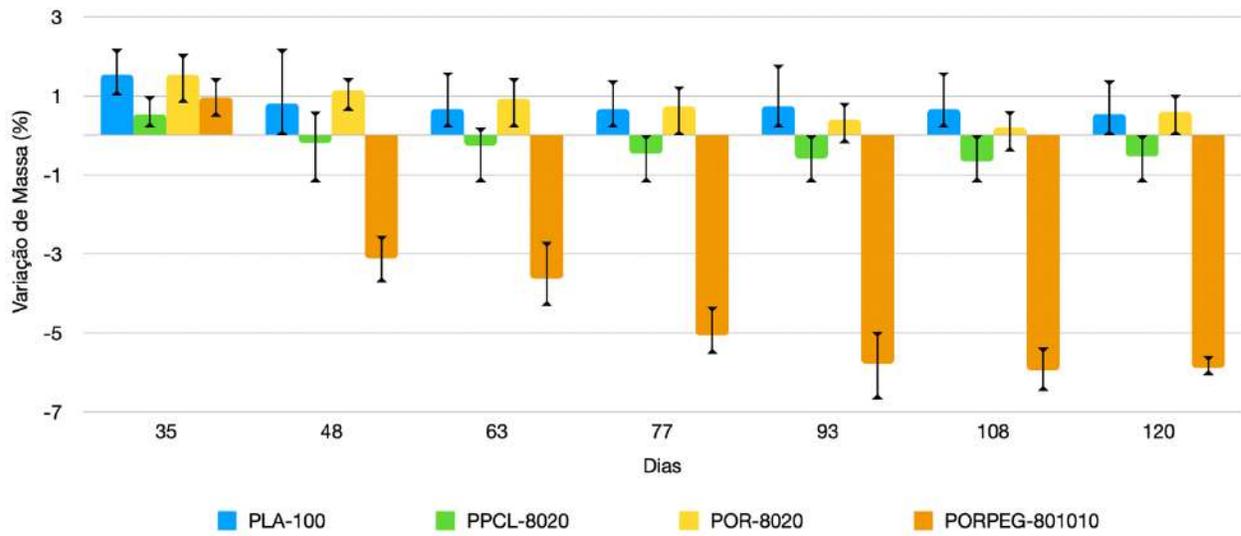


Fonte: Próprio Autor (2025)

O teste de biodegradação foi avaliado em um período total de 120 dias (4 meses). Anteriormente ao seu enterro, as amostras foram devidamente pesadas em uma balança com precisão de 0,01g para a avaliação precisa da sua evolução de peso. A primeira pesagem a partir do enterro foi feita após 35 dias e, a partir de então, tiveram sua medição feita uma vez a cada semana.

A partir da figura 28 é possível ver o gráfico com desvio padrão da evolução da variação de massa em porcentagem durante o teste de biodegradação. Os valores são em comparação ao peso inicial das amostras, referente ao dia 1 na tabela 6.

Figura 28: Gráfico de variação de massa das amostras durante a biodegradação



Fonte: Próprio Autor (2025)

Observou-se que a primeira medição realizada no dia 35, todas as amostras apresentaram os maiores valores positivos de variação de massa. Esse resultado corrobora o estudo de DOUKANI et al., 2023, onde aponta que, para que a biodegradação ocorra de maneira eficiente, o material inicialmente absorve umidade, resultando em um aumento de peso. Esse processo de absorção de umidade facilita a quebra das cadeias poliméricas e, ao longo do tempo, levando à redução da massa molar. Após esse aumento inicial de massa, é possível notar com a diminuição dos valores de variação de massa com o passar dos dias, o que mostra redução no peso das amostras. Isso afirma que o pico de absorção de umidade ocorre no primeiro mês após o enterro.

Posteriormente, todas as amostras apresentaram uma tendência contínua de perda de peso. Porém, dentro do período avaliado, o PLA-100 e POR-8020 não apresentaram uma massa final inferior a inicial, podendo indicar que esses materiais não sofreram biodegradação, ou que exijam um tempo de degradação maior que as outras amostras.

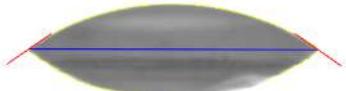
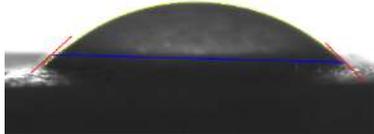
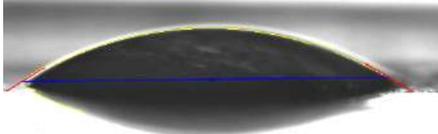
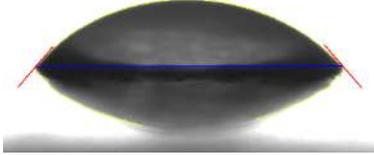
Em contrapartida, PPCL-8020, um material reconhecido por suas propriedades biodegradáveis, exibiu uma redução em seu peso, em concordância com o estudo de Narancic (2018), assim como PORPEG-801010.

Usando como material de comparação os estudos de Pagnan (2018), verificou-se que o PLA contendo apenas PEG apresentou comportamento similar, evidenciando que o PEG exerce um efeito significativo na aceleração do processo de biodegradação do PLA em condições ambientais naturais. Em seu estudo, a incorporação de PEG ao PLA resultou em uma perda de massa total de 1,69% ao longo de 90 dias. Com o presente estudo, comparando o mesmo intervalo de tempo, verificou-se que a perda média de massa das amostras de MPEG foi de 5,78%. Embora haja uma leve variação na concentração de PEG entre os estudos, a diferença expressiva na degradação pode sugerir que o fator adicional do óleo de rícino pode estar influenciando os resultados mais expressivos em relação ao estudo de Pagnan (2018).

Assim, a adição desse composto pode ter desempenhado um papel significativo no aumento da perda de massa observada. Esse achado reforça o potencial do óleo de rícino como um aditivo promissor na aceleração da biodegradação de polímeros, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

Como forma de buscar maior compreensão dos mecanismos de biodegradação, foi realizada a análise do ângulo de contato das amostras antes e após a biodegradação. Seus resultados são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Valores medidos por meio do ângulo de contato

Amostra	Ângulo de contato inicial	Ângulo de contato após 120 dias de biodegradação
PLA-100	41,09° ± 0,27 	36,20° ± 0,80 (↓) 
PPEG-9010	32,99° ± 2,62 	-
POR-8020	50,84° ± 0,59 	32,66° ± 3,28 (↓) 
PPCL-8020	43,69° ± 2,62 	31,17° ± 1,80 (↓) 
PORPEG-801010	45,53° ± 2,18 	53,21° ± 1,66 (↑) 

Fonte: Próprio Autor (2025)

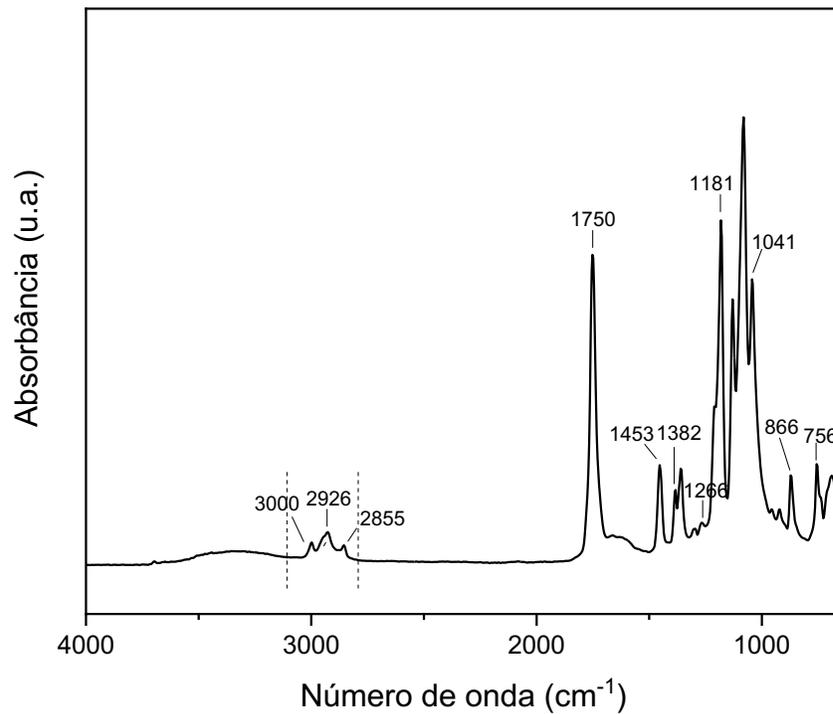
Existe uma tendência à redução do ângulo de contato, com maior tendência hidrofílica, após a exposição das amostras ao solo no processo de biodegradação em decorrência do ataque superficial (Lamparelli *et al.*, 2022). Este comportamento foi observado nas amostras de PLA-100, POR-8020 e PPCL-8020. A amostra POR-8020 foi a que apresentou maior valor de ângulo de contato previamente à exposição ao solo, provavelmente devido à maior presença do óleo de rícino, com características

hidrofóbicas. A adição de poli(etileno glicol) - PEG, um material com característica hidrofílica, em combinação ao óleo de rícino no PLA, na amostra PORPEG-801010 a deixa com o segundo maior valor de ângulo de contato dentre as amostras, precedido apenas da POR-8020, de forma coerente ao esperado.

Após a biodegradação, porém, diferentemente das outras amostras, a PORPEG-801010 apresentou aumento do valor de ângulo de contato. Tal comportamento pode dever-se ao consumo primário do PEG, que por sua hidrofiliidade terá maior interação com a umidade do solo, facilitando os processos de hidrólise das macromoléculas do polímero (Bardi e Rosa, 2007) e início da biodegradação (Morkhade *et al.*, 2017). Dessa forma, a proporção relativa do óleo de rícino aumenta em relação à proporção relativa do PEG, justificando um aumento no ângulo de contato conforme observado.

4.4 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

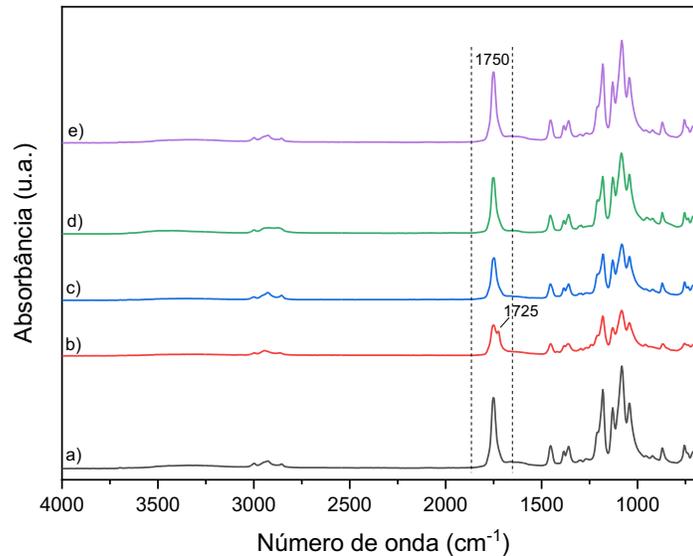
No presente trabalho o processo de biodegradação do PLA puro e modificado foi investigado através de análise de FTIR-ATR, conforme sugerido na literatura (CHOPRA *et al.*, 2023). A Figura 29 apresenta os espectro de FTIR do PLA-100, sendo observados os seguintes picos: 3000 cm^{-1} e 2926 cm^{-1} , referentes ao estiramento simétrico do grupo funcional O-H (CHOPRA *et al.*, 2023; DANTAS *et al.*, 2023); 1750 cm^{-1} relativo ao estiramento C=O do grupo funcional éster (GHOSH *et al.*, 2025; CHOPRA, *et al.*, 2023); 1453 cm^{-1} e 1382 cm^{-1} , dobramentos assimétrico e simétrico do grupo C-H; 1266 cm^{-1} e 1041 cm^{-1} , estiramento C-O; 866 cm^{-1} estiramento C-C; 756 cm^{-1} e 689 cm^{-1} oscilações do grupo C-H (CHOPRA *et al.*, 2023). Observa-se também uma banda discreta em 2855 cm^{-1} que não é característica do PLA, sendo essa atribuída a uma possível contaminação do material durante o processamento.

Figura 29: Espectro de FTIR do PLA-100

Fonte: Próprio Autor (2025)

Conforme observado na Figura 30 o espectro da amostra de PLA com adição do óleo de mamona é muito semelhante ao do PLA puro, o que está em concordância com o reportado na literatura (DANTAS *et al.*, 2023). Entretanto, nota-se também uma discreta redução da intensidade do pico em 1750 cm^{-1} , o que pode estar relacionado com a redução da fração cristalina do PLA devido a adição do óleo de mamona. Já no espectro de PPCL-8020, embora semelhantes, observa-se além da redução da intensidade do pico em 1750 cm^{-1} , um pico adicional estreito em 1725 cm^{-1} , atribuído a absorção da carbonila do grupamento éster do PCL (PHILLIPSON, HAY, JENKINS, 2014; FRANÇA *et al.*, 2018).

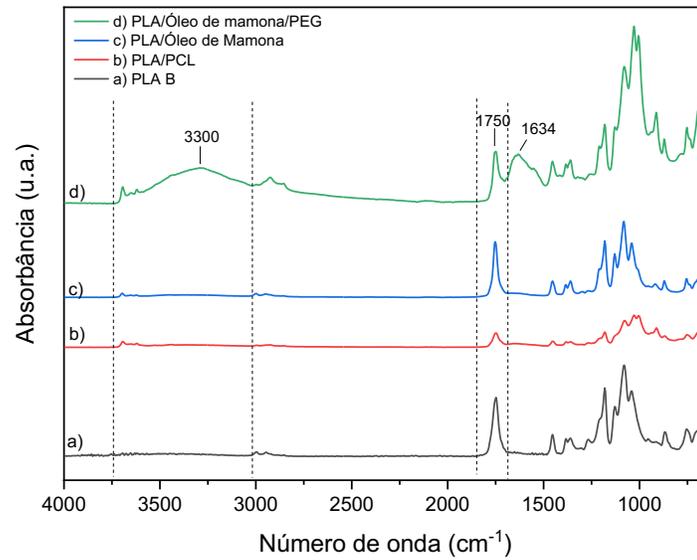
Figura 30: Espectros de FTIR: a) PLA-100, b) PPCL-8020, c) POR-8020, d) PORPEG-801010, e) PPEG-9010



Fonte: Próprio Autor (2025)

A Figura 30 apresenta os espectros de FTIR das amostras após os processos de foto e biodegradação. Em comparação ao PLA-100, nota-se uma menor intensidade de absorção em 1750 cm^{-1} em todas as amostras modificadas, o que pode indicar um processo mais acelerado de degradação, relacionado a quebra do grupo funcional éster. (SALAZAR-SÁNCHEZ *et al.* 2022; WANG *et al.*, 2022). A redução da intensidade desse pico no espectro do PLA-100, até o seu completo desaparecimento decorrente da biodegradação foi reportada no trabalho de Salazar-Sánchez *et al.* (2022). Dentre as amostras modificadas a redução da banda em 1750 cm^{-1} é mais evidente na amostra PPCL-8020. Entretanto, conforme apresentado na Figura 31, o aparecimento de duas bandas alargadas em 3300 cm^{-1} e 1634 cm^{-1} , atribuídas a absorção do grupo O-H (estiramento e dobramento, respectivamente) (WHULANZA *et al.* 2022), somada a redução da intensidade da banda em 1750 cm^{-1} , podem indicar que a amostra PORPEG-801010 sofreu o processo de degradação mais acelerado comparada as outras amostras modificadas e ao PLA-100.

Figura 31: Espectros de FTIR após processos de degradação: a) PLA-100, b) PPCL-8020, c) POR-8020, d) PORPEG-801010



Fonte: Próprio Autor (2025)

5 POSSÍVEIS APLICAÇÕES

Os resultados promissores obtidos com a aditivação do Poli(Ácido Lático) (PLA) com óleo de Rícino e Poli(Etileno Glicol) (PEG) indicam um amplo potencial de aplicações, especialmente em setores que demandam materiais com degradação acelerada em condições ambientais naturais. A crescente busca por alternativas sustentáveis aos polímeros convencionais, impulsionada pelas preocupações com os impactos ambientais do seu descarte, reforça a relevância dos materiais desenvolvidos nesta pesquisa. Nesse contexto, o PLA modificado se apresenta como uma solução atrativa ao combinar origem renovável, desempenho funcional e degradação mais eficiente.

O material desenvolvido demonstra potencial significativo para aplicação em embalagens destinadas a peças, acessórios e produtos com ciclo de vida reduzido, que necessitam de proteção durante etapas como o transporte, manuseio e armazenamento, mas que não exigem alta durabilidade ou resistência prolongada. Esse tipo de aplicação é comum em setores como eletrônicos, ferramentas, cosméticos e utilidades domésticas, nos quais é recorrente o uso de embalagens secundárias ou terciárias, tais como suportes moldados, bandejas, películas protetoras e caixas estruturadas. Tais componentes de embalagem têm como principal função preservar a integridade física e funcional dos produtos até que estes sejam comercializados ou utilizados, sendo descartados logo em seguida.

A biodegradabilidade do material desenvolvido pode ser particularmente vantajosa para aplicações em que o descarte rápido e ambientalmente seguro é desejável, como no caso de embalagens utilizadas para frutas, hortaliças e outros alimentos frescos. Essas embalagens, após o uso, poderiam ser descartadas em sistemas de compostagem doméstica ou industrial, promovendo uma destinação mais sustentável e compatível com práticas de economia circular. O uso de materiais que se degradam mais rapidamente em solo, sem necessidade de condições específicas de compostagem industrial, representa um avanço importante no desenvolvimento de soluções que visam minimizar o impacto ambiental gerado pelo consumo cotidiano de embalagens descartáveis.

Essas mesmas propriedades também se mostram promissoras para o uso em embalagens voltadas a refeições prontas, serviços de delivery, eventos e estabelecimentos de alimentação, onde há grande demanda por itens descartáveis, como talheres, potes e bandejas. Nesses contextos, a substituição dos plásticos convencionais por alternativas biodegradáveis pode contribuir significativamente para a redução do volume de resíduos acumulados em aterros sanitários e ambientes naturais. A incorporação de materiais com desempenho ambiental superior reforça a importância da pesquisa voltada ao desenvolvimento de soluções sustentáveis, capazes de aliar funcionalidade, viabilidade técnica e menor impacto ambiental

A viabilidade das aplicações propostas está diretamente relacionada à realização de estudos que avaliem, de forma mais aprofundada, propriedades como a permeabilidade a gases e umidade, a biocompatibilidade (quando aplicável), a resistência em condições reais de uso e a durabilidade ao longo do tempo. Além disso, análises do ciclo de vida, incluindo os custos de produção e os impactos ambientais associados à obtenção e utilização dos aditivos, são igualmente importantes. Esses aspectos representam ótimas opções para estudos futuros complementares a esta pesquisa, contribuindo para validar tecnicamente o uso do material desenvolvido e viabilizar sua aplicação em escala industrial.

Ainda assim, os resultados obtidos já fornecem uma base sólida e promissora para o desenvolvimento de materiais com biodegradabilidade aprimorada, alinhados às demandas por soluções ambientalmente mais sustentáveis. Nesses contextos, o uso de um material como o PLA aditivado pode representar uma alternativa viável aos polímeros convencionais, uma vez que oferece propriedades adequadas à proteção dos itens embalados, como resistência mecânica suficiente, leveza e conformabilidade. A versatilidade associada ao desempenho funcional do PLA aditivado amplia as possibilidades de aplicação em linhas industriais, que demandam soluções de embalagem de uso único, com requisitos técnicos específicos e prazos de vida útil restritos.

6 CONCLUSÃO

O poli(ácido láctico) (PLA) destaca-se como um bioplástico promissor na busca por alternativas mais sustentáveis aos plásticos convencionais derivados do petróleo e de outras fontes não renováveis. Apesar dos desafios e limitações que ainda existem, avanços científicos e tecnológicos têm ampliado suas aplicações e aprimorado suas propriedades. Com o crescimento da conscientização ambiental e da demanda por materiais ecologicamente responsáveis, o PLA apresenta um grande potencial para contribuir na redução do impacto ambiental dos plásticos e na transição para uma economia mais sustentável.

As estratégias atuais de mitigação, como a reciclagem e a implementação da economia circular, representam passos fundamentais para estender a vida útil dos materiais e minimizar a geração de resíduos, evitando impactos ambientais adversos. No entanto, apesar de serem abordagens promissoras, essas soluções não eliminam completamente os desafios trazidos pelos plásticos, funcionando mais como medidas paliativas. Dessa forma, tornam-se necessárias soluções mais abrangentes e sustentáveis a longo prazo para lidar com essa problemática de maneira mais eficaz.

Para enfrentar os desafios ambientais impostos pelos plásticos, torna-se essencial o grande investimento em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais. Esses estudos científicos devem priorizar a criação de plásticos que não apenas se biodegradam sem gerar resíduos tóxicos, mas que também sejam produzidos de forma sustentável. O desenvolvimento de plásticos capazes de se decompor em condições naturais, tanto no solo quanto em ambientes marinhos, e cuja fabricação seja baseada exclusivamente em fontes renováveis, é um caminho promissor para garantir a sustentabilidade ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Essa pesquisa apresentou resultados promissores, com grande potencial de aplicação prática, reforçando a viabilidade de soluções mais eficazes no enfrentamento dos impactos associados ao descarte inadequado de plásticos convencionais. O

desenvolvimento de um material com propriedades ajustadas para favorecer a degradação em condições ambientais naturais aponta para uma alternativa concreta frente aos desafios atuais relacionados ao uso intensivo desses plásticos. Uma contribuição relevante para o cenário de busca por materiais mais sustentáveis, alinhados aos princípios da responsabilidade ambiental e essenciais para a construção de um futuro mais equilibrado e ambientalmente consciente.

O investimento em pesquisas nessa área pode representar uma solução concreta para a crise dos plásticos, contribuindo significativamente para a preservação ambiental e para a manutenção da integridade dos ecossistemas globais. Nesse contexto, os resultados obtidos no presente estudo indicam que a aditivação do PLA constitui uma estratégia promissora para a melhoria de sua biodegradabilidade. Em particular, o óleo de rícino demonstrou um potencial significativo e, portanto, merece ser considerado em investigações futuras, voltadas para o desenvolvimento de plásticos mais sustentáveis e eficientes, podendo se buscar a otimização da formulação, explorando diferentes concentrações e proporções de óleo de rícino e PEG no PLA, visando identificar a combinação ideal que maximize a biodegradabilidade em condições ambientais naturais e em temperatura ambiente, ao mesmo tempo em que mantém ou aprimora as propriedades mecânicas desejadas.

7 REFERÊNCIAS

ACS American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. **Bakelite: The World's First Synthetic Plastic**. Disponível em:

<http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html>

Acesso em: 1 nov. 2022

ANDERSON, I. **Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid**, 2017. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0054>>. Acesso em: 19 jun. 2022

ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE ORTOPEDIA (AAOS). **Artroplastia total de joelho (Total Knee Replacement)**. OrthoInfo, 2015. Disponível em:

<https://orthoinfo.aaos.org/pt/treatment/artroplastia-total-de-joelho-total-knee-replacement/>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

AURAS, R. et al. **Poly(lactic acid): Synthesis, structures, properties, processing, and applications**. John Wiley & Sons (2011).

BALIARSINGH, S; BEHERA ,PC; JENA, J; DAS, T; DAS, N.B. **UV reflectance attributed direct correlation to colour strength and absorbance of natural dyed yarn with respect to mordant use and their potential antimicrobial efficacy**. Journal of Cleaner Production, 2015,102, 485-92.

BAMBU LAB CA. **PLA Silk** (2023). Disponível em: <<https://ca.store.bambulab.com/products/pla-silk>>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

BITTENCOUR, Vitória *et. al.* **Embalagens ativas como novas abordagens sustentáveis e ambientalmente corretas: uma revisão da literatura**. 2020. Disponível

em: <https://www.editoracientifica.com.br/articles/code/201102207> Acesso em: 17 nov. 2022

BIODEGRADABILITY of cellulose acetate. Daicel. Disponível em: <https://www.daicel.com/cell_ac/en/cellulose/ca_biodegradable.html>. Acesso em: 12 jun. 2022

BOUTI, Mohamed; IRINISLIMANE, Ratiba; BELHANECHÉ-BENSEMRA, Naima. **Properties investigation of epoxidized sunflower oil as bioplasticizer for poly (lactic acid).** Journal of Polymers and the Environment, v. 30, n. 1, p. 232-245, 2022.

BROWN, Erina. et al. **The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness,** 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100309>>. Acesso em: 03 Jun 2023

BURATTI, Eliana; LORENA, Letícia. **A cultura do vinil segue viva pela experiência sonora.** 2018. Disponível em: <https://www.entrevos.com.br/single-post/2018/04/18/A-Cultura-dos-discos-de-vinil-na-era-digital#:~:text=Ainda%20que%20dependa%20do%20gosto,mat%C3%A9rias%20sobre%20os%20velhos%20bolach%C3%B5es>. Acesso em: 15 nov. 2022

CAIXETA, Eliane. **A importância da música na formação do sujeito a partir da psicologia histórico-cultural.** 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/33481> Acesso em: 15 nov. 2022

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 7 ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2012, 705 p.

CHOPRA, S. *et al.* **Explication of mechanism governing atmospheric degradation of 3D-printed poly(lactic acid) (PLA) with different in-fill pattern and varying in-fill**

density. RSC Adv., v. 13, e7135, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d2ra07061h>. Acesso em: Mar. 2025.

DANTAS, L. *et al.* **Degradation kinetics of PLA compounds with castor oil.** Journal of Applied Polymer Science, v. 141, n. 21, e55408, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.55408>. Acesso em: Mar. 2025.

DA SILVA, A. P. *et al.* **PLA/Coffee Grounds Composites: A Study of Photodegradation and Biodegradation in Soil.** MS Journal, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/masy.202000091>. Acesso em: dez. 2024.

DE SOUZA, Amélia B. *et al.* **Plástico no Mar: Polímeros à Deriva!**, 2022. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc44_3/08-RSA-06-21.pdf Acesso em: 5 Dez. 2022

DORA, Manoj. IACOVIDOU, Eleni. **Why some plastic packaging is necessary to prevent food waste and protect the environment**, 2019. Disponível em: <https://theconversation.com/why-some-plastic-packaging-is-necessary-to-prevent-food-waste-and-protect-the-environment-117479> Acesso em: 17 nov. 2022.

D'OTAVIANO, Larissa. **Os princípios da economia circular.** Conecta Verde (2023). Disponível em: <https://conectaverde.com.br/os-principios-da-economia-circular/>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

DOUKANI, K., *et al.* 2023. **Fundamentals of Biodegradation Process.** In: Ali, G.A.M., Makhoulf, A.S.H. (eds) Handbook of Biodegradable Materials. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09710-2_73. Acesso em: 20 Dec. 2024

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular Economy Introduction**, 2021. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> Acesso em: 05 Jun 2023

ELSAWY, Moataz, *et al.* **Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.143>>. Acesso em: 18 jun. 2022

EUROPEAN BIOPLASTICS. **What are Bioplastics**, 2022. Disponível em: <https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf> Acesso em: 1 de dezembro de 2023.

FORTELNY, Ivan et al. **Phase structure, compatibility, and toughness of PLA/PCL blends: A review**. *Frontiers in Materials*, v. 6, p. 206, 2019.

FORTUNATI, Elena. VERMA, Deepak. **Biobased and Biodegradable Plastics**, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-68255-6_103> Acesso em: 15 Jun 2023

FRANÇA, D. C. *et al.* **Photodegradation Mechanisms on Poly(ϵ -caprolactone) (PCL)**. *Materials Research*, v. 21, n. 3, e20170837, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0837>. Acesso em: Mar. 2025.

GIRONI, Fausto. PIEMONTE, Vincenzo. **Life cycle assessment of polylactic acid and polyethylene terephthalate bottles for drinking water**, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ep.10490>>. Acesso em: 16 jun. 2022

GHOSH, K. *et al.* **Effect of renewable castor-oil based thermoplastic polyurethane elastomer on the thermomechanical and biodegradation properties of poly (lactic acid)**. *Materials Today Communications*, v. 43, e111738, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111738>. Acesso em: Mar. 2025.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução aos plásticos**. *Revista plástico industrial*, v.10, n.09, 2003.

GRAPPLING with the infamous #7 PLA recycling code. McGill Compost. Disponível em: <<https://mcgillcompost.com/resources/grappling-with-the-infamous-7-pla-recycling-code/>>. Acesso em: 19 jun. 2022

GRIFFIN, Melanie. **Is PLA Recyclable? – Simply Answered.** ALL3DP, 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/is-pla-recyclable/#:~:text=Going%20Further,same%20bundle%20with%20the%20re> st>. Acesso em: 12 jun. 2022

HARPER, C. A. **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites.** McGraw-Hill, 2002.

ISHIKAWA, Daitaro, *et al.* High-speed monitoring of the crystallinity change in poly(lactic acid) during photodegradation by using a newly developed wide area NIR imaging system (Compovision). *Anal Bioanal Chem*, (2015), 407, 397- 403.

HAHLADAKIS, J. N. *et at.* **An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>> Acesso em: 03 Jun 2023

HALDEN, R. U. **Plastics and health risks.** *Annual Review of Public Health*, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.012809.103714>> Acesso em: 02 Jun 2023.

HOPEWELL, J. DVORAK, R. KOSIOR, E. **Plastics Recycling: Challenges and Opportunities**, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>> Acesso em: 13 Jun 2023

IS biodegradable plastic compostable plastic? McGill Compost. Disponível em: <<https://mcgillcompost.com/resources/is-biodegradable-plastic-compostable-plastic/>>. Acesso em: 19 jun. 2022

JAMBECK, J. R., *et al.* **Plastic waste inputs from land into the ocean**, 2015. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1260352>> Acesso em: 02 Jun 2023.

JIN, Mengke. **Microplastics contamination in food and beverages: Direct exposure to humans**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1750-3841.15802>>. Acesso em: 12 jun. 2022.

KUBELKA, P.; MUNK, F. **Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche**. Zeitschrift für Technische Physik, v. 12, p. 593–601, 1931.

LI, Feng-Jiao et al. **Tensile properties of polylactide/poly (ethylene glycol) blends**. Journal of Polymers and the Environment, v. 23, p. 407-415, 2015.

LIN, W.; XIE, G.; QIU, Z. **Effects of Ultraviolet Aging on Properties of Wood Flour–Poly(Lactic Acid) 3D Printing Filaments**. BioResources, 2019. Disponível em: [<https://doi.org/10.15376/biores.14.4.8689-8700>]. Acesso em: dez. 2024.

MAGALHÃES, Vanessa. **A Importância do Cinema como Lazer Popular e as suas Formas de Inclusão**. 2015. Disponível em: https://paineira.usp.br/celacc/sites/default/files/media/tcc/artigo_pos_pdf.pdf Acesso em: 16 nov. 2022

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. São Paulo, BR: Editora Blücher, 2007, 197 p.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Claudio. **Introdução a polímeros**. São Paulo, BR: Editora Blücher, 1999, 191 p.

MARKETS AND MARKETS. **Biopolymers & Bioplastics Market by Type, End-use, Region - Global Forecast to 2027**. Disponível em:

<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biopolymers-bioplastics-market-88795240.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiApaarBhB7EiwAYiMwqi9FKtcZNKmdRoWYilSOSjA9JxczoMZ5uppqEMB0NFCmMTjxmlSLrRoC2TsQAvD_BwEL>. Acesso em: 1 Fev 2023.

MARTURANO, V. CERRUTI, P. AMBROGI, V. **Polymer Additives**, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/psr-2016-0130>>. Acesso em: 25 Set 2023.

MCCUE, T.J. **Wohlers Report 2018: 3D Printer Industry Tops \$7 Billion**. Forbes, 2018. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2018/06/04/wohlers-report-2018-3d-printer-industry-rises-21-percent-to-over-7-billion/?sh=20eab2492d1a>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

MELLO, Adriana. SOTO, Jorge. VIVEIRO, José Augusto. **Polímeors Verdes – Tecnologia para Promoção do Desenvolvimento Sustentável**, 2020. Disponível em: < <https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso6-PolimerosVerdes.pdf>> Acesso em: 13 Jun 2023

MERCHAN, A. L. *et al.* **Chemical recycling of bioplastics: technical opportunities to preserve chemical functionality as path towards a circular economy**, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/d2gc02244c>> Acesso em: 02 Jun 2023

MICHEL, A. T.; BILLINGTON, S. L. **Characterization of poly-hydroxybutyrate films and hemp fiber reinforced composites exposed to accelerated weathering, Polymer Degradation and Stability**. 2012, 97, 870-878.

MURARIU, Marius. DUBOIS, Philippe. **PLA composites: From production to properties**, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>>. Acesso em: 13 jun. 2022

NARANCIC, Tanja, *et al.* **Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution**, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02963>>. Acesso em: 12 jun. 2022

NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL. **Microplásticos estão em nossos corpos: quanto eles nos prejudicam**. National Geographic Brasil (2022). Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/04/microplasticos-estao-em-nossos-corpos-quanto-eles-nos-prejudicam>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

NIAOUNAKIS, Michael. **Biopolymers: applications and trends**. Oxford: William Andrew, 2015.

NJOROGE, D. W. **Physicochemical characteristics of crude and refined castor oil biodiesel**. 2013. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Physicochemical-Characteristics-Of-Crude-And-Castor-Njoroge/4d57d8e113847e2938d1b82ebcfe69d3f0717859>. Acesso em: 6 abr. 2025.

O'CONNELL, Jackson. **ABS vs PLA: comparando filamentos de impressão 3D**. All3DP, 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/pt/2/pla-vs-abs-filamento-impressao-3d/>>. Acesso em: 20 jun. 2022

O DESPERDÍCIO de alimentos no mundo e no brasil. Akatu.org, 2020. Disponível em: <https://akatu.org.br/novopf/wp-content/uploads/2020/02/desperdicio-de-alimentos-no-brasil-e-no-mundo.pdf> Acesso em: 17 nov. 2022

OLEWNIK-KRUSZKOWSKA, Ewa; KOTER, Izabela; SKOPINSKA-WISNIEWSKA, Joanna; RICHERT, Józef. **Degradation of polylactide composites under UV radiation at 254 nm**, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2015.

O'ROURKE, Dara; CONNOLLY, Sarah. **Just Oil? The Distribution of Environmental and Social Impacts of Oil Production and Consumption**, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105617>> Acesso em: 25 set. 2023.

PAGNAN, C. S. *et al.* **Annatto-colored Poly(3-hydroxybutyrate): a comprehensive study on photodegradation**. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1026-1>. Acesso em: dez. 2024.

PATEL *et al.* **Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production**, 2016. DOI: 10.4137/Lpi.s40233. Acesso em: 30 de mai. 2024.

PHILLIPSON, K.; HAY, J. N.; JENKINS, M. J. **Thermal analysis FTIR spectroscopy of poly(ϵ -caprolactone)**. *Thermochimica Acta*, v. 595, p. 74-82, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.027>. Acesso em: Mar. 2025.

PICCINO, Evaldo. **Um breve histórico dos suportes sonoros analógicos**. Sonora. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas / Instituto de Artes, vol. 1, n. 2, 2003. JENKINS (2019)

PLANETA PLÁSTICO, o século sintético. Produtor Executivo: Erik Nelson. Estados Unidos: Discovery Science, 2002.

POLIÁCIDO LÁCTICO. In: **WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2024. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Poli%C3%A1cido_l%C3%A1ctico&oldid=68871994>. Acesso em: 23 out. 2024.

POLICAPROLACTONA. In: **WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2024. Disponível em:

<<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Policaprolactona&oldid=68776449>>. Acesso em: 7 out. 2024.

POLIETILENOGLICOL. In: **WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2023. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Polietilenoglicol&oldid=66667313>>. Acesso em: 26 set. 2023.

POLYLACTIC Acid Market (By Raw Material: Corn starch, Sugarcane & sugar beet, Cassava, and Others; By Application: Packaging, Agriculture, Transport, Electronics, Textiles, Others) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends Analysis, Regional Outlook and Forecasts, 2021 – 2030. Precedence Research, 2021. Disponível em: <<https://www.precedenceresearch.com/polylactic-acid-market>>. Acesso em: 20 jun. 2022

PULS, Juergen. **Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review**, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10924-010-0258-0>>. Acesso em: 12 jun. 2022

QI, Xiang; REN, Yiwei; WANG, Xingzu. **New advances in the biodegradation of Poly(lactic) acid, International Biodeterioration & Biodegradation**, 2017.

QIN, Yuyue et al. **Development of active packaging film made from poly (lactic acid) incorporated essential oil**. Progress in Organic Coatings, v. 103, p. 76-82, 2017.

QURESHI, Waqas. **Compostable packaging may allow longer shelf life for vegetables than conventional plastic, studies find**. Packaging News, 2021. Disponível em: <https://www.packagingnews.co.uk/news/markets/food/compostable-packaging-may-allow-longer-shelf-life-vegetables-conventional-plastic-studies-find-19-07-2021>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

RECICLAGEM No Brasil: Panorama Atual E Desafios Para O Futuro. FMU, 2021. Disponível em: <<https://portal.fmu.br/noticias/reciclagem-no-brasil-panorama-atual-e-desafios-para-o-futuro/>>. Acesso em: 12 jun. 2022

REDAÇÃO PENSAMENTO VERDE. **Pensamento Verde**, 2017. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/10-0-1-3clientesgrupo-fragmapensamentoverdeconteudopautas-seo201712-dezembrotexto-13/>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

SALAZAR-SÁNCHEZ, M. R. *et al.* **Soil Biodegradation of a Blend of Cassava Starch and Polylactic Acid.** , v. 42, n. 3, e93710, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.93710>. Acesso em: Mar. 2025.

SHAH, Manali. *et al.* **Bioplastic for future: A review then and now**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.9.2.0054>>. Acesso em: 17 jun. 2022

SMITH *et al.* **Microplastics in Sea food and the Implications for Human Health**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>. Acesso em: 12 jun. 2022

SPIVACK, Emily. **Stocking Series, Part 1: Wartime Rationing and Nylon Riots.** 2012. Disponível em: <https://www.smithsonianmag.com/arts-culture/stocking-series-part-1-wartime-rationing-and-nylon-riots-25391066/#:~:text=On%20May%2016%2C%201940%2C%20officially,sold%20out%20within%20two%20days>. Acesso em: 20 nov. 2022

SUNGSANIT, KULLAWADEE; KAO, Nhol; BHATTACHARYA, S. N. **Properties of linear poly (lactic acid)/polyethylene glycol blends.** Polymer engineering & science, v. 52, n. 1, p. 108-116, 2012.

TELLIER, Charles. **Different Types of PLA Filaments.** 3D Tech Valley, 2022 Disponível em: <<https://www.3dtechvalley.com/types-of-pla-filaments/>>. Acesso em: 19 jun. 2022

TEUTEN, E. L., *et al.* **Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife**, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284>> Acesso em: 15 Jun 2023.

THOMPSON, R. C., *et al.* **Lost at sea: Where is all the plastic?**, 2009. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1094559>> Acesso em: 02 Jun 2023.

VASCONSELOS, Yuri. **Que animais ainda são usados para fazer casacos de pele? Mundo Estranho.** Superinteressante, 2020. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/que-animais-ainda-sao-usados-para-fazer-casacos-de-pele/>. Acesso em: 30 Nov. 2023.

WANG, F. *et al.* **Characterization of degradation behaviors of PLA biodegradable plastics by infrared spectroscopy.** Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, v. 279, e121376, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121376>. Acesso em: Mar. 2025.

WANG, H; *et al.* **Biodegradable Foam Plastics Based on Castor Oil**, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.9.2.0054>>. Acesso em: 17 mar. 2023

WELDEN, Natalie. **Chapter 8 - The environmental impacts of plastic pollution**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00008-6>>. Acesso em: 15 jun. 2022

WHULANZA, Y. *et al.* **Tailoring mechanical properties and degradation rate of maxillofacial implant based on sago starch/poly lactid acid blend.** Heliyon, v. 8, e08600, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08600>. Acesso em: Mar. 2025.

YADAV, Nisha. HAKKARAINEN, Minna. **Degradable or not? Cellulose acetate as a model for complicated interplay between structure, environment and degradation**, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128731>>. Acesso em: 12 jun. 2022

YODERS, Jeff. **What Material Does a 3D Printer Use? Plastic, Metal, and More**. Autodesk, 2021. Disponível em: <<https://redshift.autodesk.com/articles/what-materials-are-used-in-3d-printing>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

YOUSIF, E.; HADDAD, R. **Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review**. SpringerPlus, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>. Acesso em: dez. 2024.

ZHU, XiuFang; ZHANG, Jun; CHEN, BingChong. **Study on Synthesis and Thermal Properties of Polylactic Acid**. Journal of Physics: Conference Series, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1176/4/042003. Acesso em: 30 de mai. 2025.