



**PGDESIGN** | Programa de Pós-Graduação  
Mestrado | Doutorado



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN**

**SINARA NUNES TERRA DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DE RECICLAGEM DE FILAMENTO PLA CONDUTOR E POTENCIAL DE  
REUTILIZAÇÃO CONDUTORA: caracterização para o ecodesign**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2023

SINARA NUNES TERRA DE OLIVEIRA

**Estudo da reciclagem de filamento PLA condutor e potencial de reutilização  
condutora: caracterização para o ecodesign**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido.

Porto Alegre

2023

## CIP - Catalogação na Publicação

Oliveira, Sinara Nunes Terra de  
Estudo da reciclagem de filamento PLA condutor e  
potencial de reutilização condutora: caracterização  
para o ecodesign / Sinara Nunes Terra de Oliveira. --  
2023.  
89 f.  
Orientador: Dr. Luis Henrique Alves Cândido.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Ecodesign. 2. ESG. 3. Ciclo de reciclagem de  
materiais. 4. PLA condutor elétrico. 5. Polímero  
condutor. I. Cândido, Dr. Luis Henrique Alves, orient.  
II. Título.

**Sinara Nunes Terra de Oliveira**

**Estudo da reciclagem de Filamento PLA condutor e potencial de reutilização condutora: caracterização para o ecodesign**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 06 de setembro de 2023

---

**Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: **Prof. Dr. Luis Henrique Alves Cândido**

Programa de Pós-Graduação em Design - PGDESIGN/UFRGS

---

**Prof. Dr. Renan Demori**

Materiais Poliméricos – UCS – Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior**

Programa de Pós-Graduação em Design - PGDESIGN/UFRGS

---

**Profa. Dra. Mariana Pohlmann de Oliveira**

Programa de Pós-Graduação em Design - PGDESIGN/UFRGS

## AGRADECIMENTOS

Gratidão ao meu pai e minha mãe por me permitirem ir além das minhas circunstâncias.

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio nas horas de cansaço;

Às professoras da Faculdade de Moda, pelo incentivo e apoio na minha escolha acadêmica; Prof. Dr<sup>a</sup> Lucia Isaía, Prof. Dr<sup>a</sup> Debora Elman, Prof. Dr<sup>a</sup> Renata Fratton Noronha, Prof. Msc. Nicele de Davi Branda; Prof. Msc. Luciene Machado.

Agradeço aos integrantes da minha Banca de Qualificação, pelo encaminhamento claro, num momento de insegurança e dúvidas;

Agradeço ao meu orientador, Prof. Cândido, pela paciência e absoluta sabedoria em me conduzir até aqui.

Ao nosso Decano, Prof. Dr. Wilson, agradeço por me receber como integrante da sua equipe.

Agradeço à Professora Dra. Anelise Alves do LACER, e ao Professor Dr. Roberto Homrich do LMEA, pelo auxílio nas análises térmicas e elétricas;

Agradeço a Mestranda Diana Bulcão, pelo auxílio nas análises físico-químicas realizadas no Instituto de Química, Laboratório k218, da UFRGS;

Aos meus bravos colegas de LDSM, agradeço a parceria diária, em especial aos colegas Jaque, Sil, Fernando, Guilherme, Henrique, Vítor, Ane, Suzane;

A todos aqueles que direta ou indiretamente estiveram comigo ao longo desse caminho,

Muito Obrigada!

## O Tempo

A vida é o dever que nós trouxemos para  
fazer em casa.

Quando se vê, já são seis horas!

Quando de vê, já é sexta-feira!

Quando se vê, já é natal...

Quando se vê, já terminou o ano...

Quando se vê perdemos o amor da nossa  
vida.

Quando se vê passaram 50 anos!

Agora é tarde demais para ser reprovado...

Se me fosse dado um dia, outra  
oportunidade, eu nem olhava o relógio.

Seguiria sempre em frente e iria jogando  
pelo caminho a casca dourada e inútil das  
horas...

Seguraria o amor que está a minha frente e  
diria que eu o amo...

E tem mais: não deixe de fazer algo de que  
gosta devido à falta de tempo.

Não deixe de ter pessoas ao seu lado por  
puro medo de ser feliz.

A única falta que terá será a desse tempo  
que, infelizmente, nunca mais voltará.

Mário Quintana

## RESUMO

OLIVEIRA, S. N. T. de. 2023. 89 f. **Estudo da Reciclagem de Filamento PLA Condutor e Potencial de Reutilização Condutora**: caracterização para o ecodesign. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

Para avaliar o ciclo de reciclagem de polímero condutor elétrico com matriz em PLA, foram utilizados dois materiais: PLA virgem e um PLA condutor elétrico. O material condutor elétrico foi obtido a partir de um filamento condutor comercial, matriz em PLA com adição de carga de negro de fumo. A teoria da percolação elétrica, aplicada aos polímeros condutores, foi utilizada como base para este estudo. O PLA condutor comercial, foi submetido à simulação de ciclo de reciclagem, através da formulação de quatro preparados de PLAv + PLAc, nas proporções de 20%, 25%, 50% e 75%. Os preparados foram submetidos a um ciclo de reciclagem mecânica por extrusão, resultando em quatro materiais com mesma composição e com diferentes concentrações volumétricas. Os preparados foram processados em extrusora monorosca, com velocidade de 40 rpm, 03 zonas de aquecimento, com valores nominais de temperatura em 23 °C, 85°C e 110 °C. O material foi extrudado em formato filamentado, com diâmetro de 1,75 mm. De cada concentração volumétrica, foram extraídas dez amostras e preparados corpos de prova padronizados, com dimensões de 40 mm x 1,75 mm. Os corpos de prova foram submetidos a diferentes técnicas de caracterizações – Análise Termogravimétrica (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e Prova de Condutividade Elétrica. Foram avaliadas a composição dos materiais e seu comportamento químico antes e depois do reprocessamento por extrusão. Foram realizados testes para avaliação do perfil térmico dos materiais, incluindo a medição das temperaturas de degradação, acompanhando as variações de massa e temperatura do material. Determinou-se também, via DSC, as curvas endotérmicas e exotérmicas dos materiais estudados. Esses valores possibilitaram o conhecimento das temperaturas de transição vítrea (Tg) e da temperatura de fusão (Tm), dos polímeros resultantes. A prova de condutividade elétrica foi verificada num circuito DC em paralelo, utilizando um multímetro como voltímetro, fazendo parte do circuito. Foram realizadas dez medições

de cada material, utilizando-se uma fonte de 1,5 v. Com o acompanhamento das medições, foi apurada a média dos valores de condutividade elétrica de cada material obtido. As zonas de manutenção das características condutoras do PLA condutor, foram apresentadas em gráfico de dispersão. A identificação do comportamento do material possibilitou reconhecer zonas de manutenção das características condutoras do material original no produto reciclado e zonas sem resposta condutora.

**Palavras-chave:** Ecodesign. ESG. Ciclo de reciclagem de materiais. PLA condutor elétrico. Polímero condutor. Seleção de materiais.



## ABSTRACT

OLIVEIRA, SNT de. 2023. 89 f. **Study of Conductive PLA Filament Recycling and Conductive Reuse Potential**: characterization for ecodesign . Dissertation (Master's in Design) – School of Engineering / Faculty of Architecture, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

In order to evaluate the recycling process of an electrically conductive polymer with a PLA matrix, two materials were used: virgin PLA and an electrically conductive PLA. The electrically conductive material was obtained from a commercial conductive filament, a PLA matrix with the addition of carbon black filler. The theory of electrical percolation, applied to conductive polymers, was used as a basis for this study. The commercial conductive PLA was subjected to a recycling cycle simulation, through the formulation of four PLAv + PLAc preparations, in proportions of 20%, 25%, 50% and 75%. The preparations were subjected to a mechanical recycling cycle by extrusion, resulting in four materials with the same composition and different volumetric concentrations. The preparations were processed in a single-screw extruder, with a speed of 40 rpm, 3 heating zones, with nominal temperature values of 23°C, 85°C and 110°C. The material was extruded in filament format, with a diameter of 1.75 mm. From each volumetric concentration, ten samples were extracted and standardized specimens were prepared, with dimensions of 40 mm x 1.75 mm. The specimens were subjected to different characterization techniques – Thermogravimetric Analysis (TGA), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Electrical Conductivity Test. The composition of the materials and their chemical behavior were evaluated before and after reprocessing by extrusion. Tests were carried out to evaluate the thermal profile of the materials, including measuring degradation temperatures, monitoring variations in the mass and temperature of the material. The endothermic and exothermic curves of the materials studied were also determined via DSC. These values made it possible to understand the glass transition temperatures ( $T_g$ ) and melting temperature ( $T_m$ ) of the resulting polymers. The electrical conductivity test was verified in a DC circuit in parallel, using a multimeter as a voltmeter, as part of the circuit. Ten measurements were taken of each material, using a 1.5 v source. By monitoring the measurements, the average electrical

conductivity values of each material obtained were determined. The areas where the conductive characteristics of the conductive PLA are maintained were presented in a scatter plot. The identification of the behavior of the material made it possible to recognize areas where the conductive characteristics of the original material were maintained in the recycled product and areas without a conductive response.

**Keywords:** Ecodesign. ESG. Material Recycling Process. Electrically Conductive PLA. Conductive Polymer. Material Selection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Agentes no ciclo de reciclagem.....	16
Figura 2: Environmental, Social and Governance (ESG) .....	17
Figura 3: Estrutura de Pesquisa .....	22
Figura 4: Processo de preparo e de extrusão dos materiais .....	28
Figura 5: Extrusora monorosca .....	28
Figura 6: Fórmula $(C_3H_4O_2)_n$ .....	30
Figura 7: Processo de polimerização do ácido láctico .....	31
Figura 8: Sistema Condutor bifásico .....	33
Figura 9: Percolação elétrica.....	36
Figura 10: Técnicas de caracterização de materiais .....	38
Figura 11: Fluxograma 1 – Processo de preparo e obtenção das misturas .....	46
Figura 12: Fluxograma 2 – Esquema de extrusão e análises das misturas. ....	47
Figura 13: PLA virgem.....	48
Figura 14: PLA condutor .....	48
Figura 15: Filamento condutor comercial fornecido pela empresa Proto-pasta .....	49
Figura 16: Ciclo de reciclagem de material por extrusão no estado fundido .....	49
Figura 17: Concentrações volumétricas das misturas PLAv + PLAc.....	51
Figura 18: Extrusora monorosca localizada no LDSM .....	52
Figura 19: Processos de caracterização dos materiais .....	53
Figura 20: Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier .....	54
Figura 21: Representação de segmento de filamento (40mm x 1,75mm).....	55
Figura 22: Suporte padrão para corpo de prova.....	56
Figura 23: Circuito DC em paralelo .....	57
Figura 24: Registros de Medição de Resposta Elétrica.....	57
Figura 25: Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura.....	65

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva teórica de caracterização termofísica de materiais por Análise Termogravimétrica .....	41
Gráfico 2: Curva teórica de caracterização termofísica de materiais por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC).....	42
Gráfico 3: Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR (cm-1) .....	60
Gráfico 4: Análise Termogravimétrica – TGA.....	62
Gráfico 5: Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC .....	64
Gráfico 6: Valores de Condutividade Amostras Materiais .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Configurações temperaturas e velocidade da extrusora monorosca.....	52
Tabela 2: Dimensões do filamento condutor reprocessado .....	56
Tabela 3: Dimensões corpos de prova.....	56
Tabela 4: Espectroscopia por Energia Dispersiva – EDS .....	59
Tabela 5: Resultados da análise de FTIR por regiões delimitadas nas curvas .....	61
Tabela 6: Análise Termogravimétrica – TGA.....	63
Tabela 7: Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC.....	63
Tabela 8: Condutividade elétrica.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CRM	Ciclo de Reciclagem dos Materiais
CB	Negro de Fumo
CES	Cambridge Engineering Selection
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
ESG	Environmental, Social and Governance
FDM	Modelagem de Deposição Fundida
FTIR	Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier
IR	Espectro de Infravermelho
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LDSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPM	Mapa de Propriedade de Materiais
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PLA	Ácido Polilático
PLAc	Ácido Polilático Condutor
PLAr	Ácido Polilático Reciclado
PLAv	Ácido Polilático Virgem
PLA-CB	Ácido Polilático com Negro de Fumo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TGA	Análise Termogravimétrica
Tg	Temperatura de transição vítrea
Tm	Temperatura de fusão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>20</b>
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	20
1.3 JUSTIFICATIVA .....	21
1.4 HIPÓTESE .....	22
1.5 ESTRUTURA DE PESQUISA .....	22
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>24</b>
2.1 ECODESIGN E SELEÇÃO DE MATERIAIS .....	24
2.2 RECICLAGEM.....	26
<b>2.2.1 Reciclagem mecânica por extrusão</b> .....	<b>27</b>
2.3 POLIÁCIDO LÁTICO – PLA .....	29
2.4 PLA CONDUTOR ELÉTRICO .....	32
<b>2.4.1 Teoria da Percolação Elétrica</b> .....	<b>35</b>
2.5 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS .....	36
<b>2.5.1 Análises químicas</b> .....	<b>38</b>
2.5.1.1 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) .....	38
2.5.1.2 Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	39
<b>2.5.2 Análises físicas</b> .....	<b>40</b>
2.5.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA) .....	40
2.5.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	41
2.5.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	43
2.5.2.4 Condutividade e Resistência Elétrica .....	43
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>46</b>
3.1 MATERIAIS .....	47
<b>3.1.1 PLA virgem</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1.2 PLA condutor</b> .....	<b>48</b>
3.2 MÉTODO – CICLO DE RECICLAGEM DE MATERIAIS (CRM) .....	49
<b>3.2.1 Moagem</b> .....	<b>50</b>
<b>3.2.2 Pesagem e preparação das misturas</b> .....	<b>50</b>
<b>3.2.3 Secagem das misturas</b> .....	<b>51</b>

<b>3.2.4 Extrusão das misturas</b> .....	<b>51</b>
<b>3.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO</b> .....	<b>53</b>
<b>3.3.1 Caracterizações químicas</b> .....	<b>53</b>
3.3.1.1 Espectroscopia por Energia Dispersiva – EDS .....	53
3.3.1.2 Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	54
<b>3.3.2 Caracterizações físicas do material</b> .....	<b>54</b>
3.3.2.1 Análise Termogravimétrica – TGA.....	54
3.3.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC.....	54
3.3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV .....	55
<b>3.3.3 Condutividade Elétrica</b> .....	<b>55</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>58</b>
4.1 EXTRUSÃO MISTURAS .....	58
4.2 CARACTERIZAÇÕES QUÍMICAS .....	58
<b>4.2.1 Espectroscopia por energia dispersiva – EDS</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2.2 Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR</b> .....	<b>60</b>
4.3 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS .....	62
<b>4.3.1 Análise Termogravimétrica – TGA</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3.2 Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC</b> .....	<b>63</b>
<b>4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV</b> .....	<b>64</b>
4.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA .....	66
<b>4.4.1 Voltimetria - Circuito DC 1,5v</b> .....	<b>66</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>68</b>
5.1 CONCLUSÃO.....	68
5.2 SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS .....	68
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>
<b>APÊNDICE A – ANÁLISES DE FTIR</b> .....	<b>76</b>
<b>APÊNDICE B – ANÁLISES DE TGA</b> .....	<b>78</b>
<b>APÊNDICE C – ANÁLISES DE DSC</b> .....	<b>80</b>
<b>APÊNDICE D – EDS PLAC</b> .....	<b>83</b>
<b>ANEXO A - FICHA TÉCNICA PLA CONDUTOR</b> .....	<b>88</b>



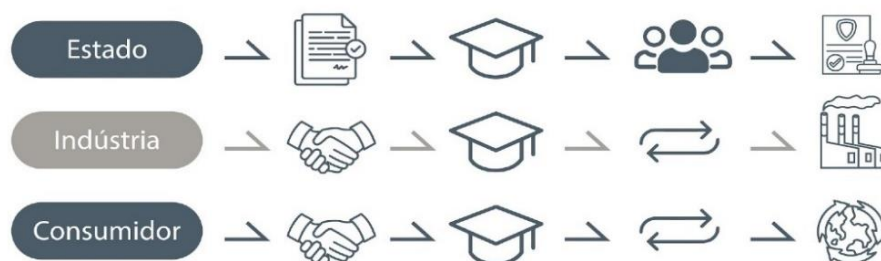
## 1 INTRODUÇÃO

A partir do momento em que o descarte de materiais e produtos passou a demandar a utilização dos espaços urbanos para abrigar aterros sanitários, causando degradação ambiental, percebeu-se o problema social advindo da cadeia produtiva desses materiais e produtos (INSTITUTO AKATU, 2022). Devido ao agravamento da poluição ambiental, aliado a diminuição dos recursos fósseis, os países têm aumentado o montante de investimento em pesquisas acerca de materiais biocompatíveis e de processos de produção menos agressivos ao meio ambiente (UNIFESP, 2022).

Para que esse problema seja atenuado, tem sido observada a necessidade de ações coordenadas envolvendo três agentes distintos: consumidores, indústria e Poder Público (BRASIL, 2010). Cabendo a cada um deles funções convergentes específicas.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos é compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos (Poder Público); caracterizando-se pelo conjunto de atribuições individualizadas de cada um dos agentes envolvidos com o objetivo de diminuir o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como conter os males causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos (Figura 1).

Figura 1: Agentes no ciclo de reciclagem



Fonte: A autora (2023).

É de interesse do Poder Público promover a educação do cidadão sobre sua responsabilidade nas relações de consumo, desde o uso ao descarte; bem como regulamentar e fiscalizar a atuação do setor industrial, tanto em termos de produção

quanto de responsabilidade socioambiental. Nesse sentido, o Estado tem o dever de fiscalizar tanto o comportamento dos consumidores quanto das indústrias, em relação à gestão dos resíduos sólidos, podendo aplicar medidas coercitivas como multas e intervenções, por exemplo (BRASIL, 2010).

Aos consumidores compete fazer escolhas conscientes em suas relações de consumo, elegendo produtos ecocompatíveis, dando a destinação correta de seus rejeitos de pós-consumo e, sempre que possível, possibilitando a reutilização ou reciclagem dos descartes (BRASIL, 2010; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022). De acordo com a legislação vigente, o consumidor deve, após o uso, retornar, aos comerciantes e distribuidores, os produtos e embalagens provenientes de:

- I - Agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, assim como outros produtos cuja embalagem, após o uso, constitua resíduo perigoso, observadas as regras de gerenciamento de resíduos perigosos previstas em lei ou regulamento, em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama, do SNVS e do Suasa, ou em normas técnicas;
- II - Pilhas e baterias;
- III - Pneus;
- IV - Óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens (BRASIL, 2010, Art. 33).

Dos setores industriais são esperadas maiores responsabilidades sobre sua cadeia produtiva, a adoção de práticas que diminuam o impacto de seu desempenho no meio ambiente, tais como: reduzir a emissão de gases poluentes, racionar o uso de energias finitas, adotar políticas de logística reversa e otimizar fluxos de trabalho e projetos – ESG (BRASIL, 2010; ONU, 2017) (Figura 2).

Figura 2: Environmental, Social and Governance (ESG)



Fonte: A autora (2023).

É incumbência do Estado, em conjunto com os setores industriais, fornecer os meios necessários para viabilizar a circularidade dos materiais, ou seja, criar condições para que os produtos pós-consumo sejam recolhidos e reintroduzidos no ciclo produtivo. Isso implica estabelecer sistemas eficientes de coleta, transporte, armazenamento e recuperação dos resíduos sólidos, de modo a garantir sua correta destinação, oportunizando, assim, a logística reversa dos produtos, definida segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, promulgada pela Lei nº 12.305/2010, como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010, ART. 3º).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2015), há uma necessidade real de uma melhor utilização dos recursos naturais. A organização estabeleceu a Agenda 2030, que visa alcançar o desenvolvimento sustentável do planeta até essa data, por meio de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas. Entre esses objetivos, destaca-se a proteção do planeta por meio do consumo e produção sustentáveis, bem como a gestão adequada dos recursos naturais. A agenda 2030 é um acordo firmado entre 193 estados membros, constituindo um empreendimento global que visa redefinir positivamente o mundo (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015). No Brasil, o poder judiciário foi o precursor na institucionalização da agenda através da inclusão dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável em suas ações (STJ, 2021).

Seguindo pelo mesmo caminho, a Ciência do Design, no desempenho de seu papel de Ciência Social Aplicada, apresenta como alternativa o ecodesign, que se caracteriza por ser um processo de Design direcionado para adoção de práticas de produção não lesivas ao meio ambiente, que propõe adequações nos processos de produção, consumo e descarte, bem como a ótima utilização dos materiais disponíveis, visando o prolongamento de sua vida útil, criando, assim, alternativas sustentáveis às necessidades humanas (KARLSSON; LUTTROPP, 2006).

Apresentando-se como uma opção aos meios de produção vigentes, o processo do ecodesign adota métodos projetuais, que levam em consideração o impacto ambiental de um produto, atentando-se a todas as etapas do ciclo de vida de

um produto, desde a concepção do projeto até a reciclagem/reuso, buscando sempre por soluções que minimizem os prejuízos ecológicos (PAZMINO, 2007).

O aumento na demanda pela sustentabilidade nas relações de consumo, em que o consumidor deseja unir utilidade e beleza com o menor impacto ambiental, vem impulsionando o conceito de economia circular. Segundo Ellen MacArthur Foundation (2013), economia circular é um sistema que busca intencionalmente a restauração e regeneração em suas concepções, através da utilização de energia renovável, eliminação do uso de produtos químicos tóxicos e a erradicação do desperdício por meio do aprimoramento do design de materiais e produtos, bem como dos sistemas e modelos de negócio.

Como nesse modelo de economia o objetivo é eliminar o desperdício, a projeção de produtos deve ser otimizada para um ciclo de reutilização (ELLEN MACARTHUR FOUNDATIONS, 2013) e a abordagem projetual do ecodesign deve ser guiada por ele.

Essa perspectiva vem acarretando o aumento da demanda por materiais originados de fontes renováveis e, paulatinamente, a substituição de matérias-primas de fontes fósseis (CÂNDIDO, 2011). Diante disso, evidencia-se a necessidade de se conhecer a respeito das vantagens e desvantagens dos materiais disponíveis, o que abre espaço para que haja uma crescente procura por pesquisas voltadas ao processo de Design.

A reutilização de resíduos poliméricos, excedentes da produção e provenientes de pós-consumo, possibilita a obtenção de selo de logística reversa, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estimulando a economia circular.

Neste cenário que emerge, destaca-se o Ácido Polilático (PLA), um polímero termoplástico proveniente de fonte renovável. O PLA é biocompatível, compostável e possui baixa temperatura de fusão. Além disso, é um dos materiais mais utilizados no mercado de filamentos para impressão 3D por FDM (modelagem de deposição fundida), devido às suas características favoráveis e baixo custo de produção. Em decorrência desses atributos, há o exponencial interesse no material, impulsionando a busca por novas formas de apresentação e aplicações.

Nesse contexto, as pesquisas sobre compostos poliméricos que utilizam o PLA como base têm tomado lugar de destaque. E é justamente nessa conjuntura que surge o presente trabalho: um relato sobre as atividades de pesquisa acerca do Ciclo de Reciclagem do PLA condutor, realizadas no Mestrado em Design, desenvolvidas no

Laboratório de Design e Seleção de Materiais, vinculado ao Departamento de Design e Expressão Gráfica, da Faculdade de Arquitetura e ao Departamento de Materiais da Escola de Engenharia, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e os específicos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Elaborar estudo acerca da viabilidade da reciclagem mecânica de material polimérico condutor base PLA com carga de Negro de Fumo, capaz de produzir filamento condutor elétrico para uso em impressoras 3D.

### 1.1.2 Objetivos específicos

A aplicação do Ciclo de Reciclagem de Materiais (CRM) do PLA condutor foi analisada percorrendo os objetivos específicos a seguir elencados:

- a) Identificar as propriedades físicas e químicas do polímero padrão;
- b) Conhecer as propriedades físicas e químicas do compósito com carga condutora;
- c) Aplicar o CRM ao poliácido láctico com carga condutora;
- d) Medir as propriedades físicas, químicas e térmicas do material reciclado;
- e) Detectar as zonas de retenção das características condutoras do compósito reciclado.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Para realização da presente pesquisa, foi delimitado como escopo de estudo o Ciclo de Reciclagem de Material Polimérico Condutor em base PLA. Para o preparo das blendas foram utilizados o PLA virgem (PLAv) originário da 3M2D Consultoria e Serviços Ltda, Novo Hamburgo, RS, e o filamento condutor adquirido da Protoplant, Inc - Maker of Proto-pasta, Vancouver, Canadá.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A reciclagem de misturas envolvendo polímeros e polímeros condutores é uma alternativa para melhorar a eficiência do gasto energético empregado na produção do material condutor (CÂNDIDO, 2011; SPINACÉ; PAOLI, 2005). No entanto, é muito mais que um simples reaproveitamento de matérias-primas; constitui-se em uma técnica que racionaliza os recursos naturais, desde a escolha da matéria-prima, para um novo produto, uma vez que sua operacionalização reduz o acúmulo progressivo de resíduos, diminui a emissão de gases, bem como o comprometimento do solo, ar e água (DONATO; BARBOSA; BARBOSA, 2015).

Sob o aspecto econômico, a reciclagem contribui para o uso mais eficiente dos recursos naturais e para a reposição daqueles recursos que são passíveis de reaproveitamento. Por outro lado, socialmente, não apenas proporciona uma melhor qualidade de vida, como também tem gerado muitos postos de trabalho e rendimento para pessoas que vivem nas camadas mais pobres, ao estimular uma economia circular de reutilização e ressignificação dos materiais (CÂNDIDO, 2011; DONATO; BARBOSA; BARBOSA, 2015).

A reciclagem de materiais permite um melhor aproveitamento do polímero adotado, com o objetivo de produzir elementos que conservem as propriedades elétricas dos polímeros condutores e as boas propriedades mecânicas dos polímeros tradicionais. No entanto, não se pode perder de vista que os polímeros, não sendo bem gerenciados, também se transformam em resíduos (DONATO; BARBOSA; BARBOSA, 2015).

O material condutor plástico representa uma alternativa aos materiais metálicos, pois combina as características do PLA – baixo custo, fácil processabilidade e compostabilidade – com as características condutoras encontradas nos metais.

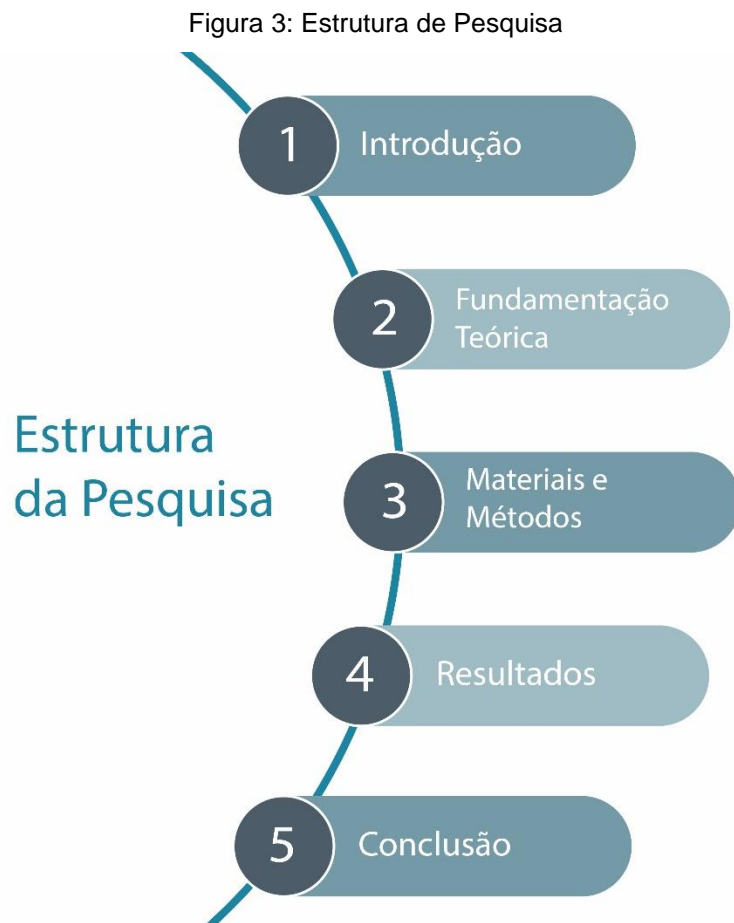
Considerando que o uso de polímeros especiais pode melhorar e incorporar novos conceitos de design em produtos e em funcionalidades, o conhecimento desses materiais beneficia a pesquisa e as indústrias – através do desenvolvimento de novas tecnologias, maior leveza, condutividade, desenvolvimentos para eletrificação, dentre outros – nesse ínterim, os plásticos condutores podem se apresentar como alternativa eficaz às matérias-primas habitualmente utilizadas, justificando, assim, a importância do presente estudo.

## 1.4 HIPÓTESE

Se para a formação de um sistema polimérico condutor é preciso de uma matriz polimérica, e um aditivo com características condutoras, então, em um processo de reciclagem por extrusão é possível a retenção das características condutoras do material primário no material resultante da reciclagem?

## 1.5 ESTRUTURA DE PESQUISA

A presente dissertação foi estruturada conforme ilustra a Figura 3, a fim apresentar de maneira lógica e cronológica o caminho metodológico escolhido.



Fonte: A autora (2023).

A estrutura de uma pesquisa quantitativa é organizada de maneira a apresentar a lógica do conteúdo proposto, descrevendo desde o porquê da realização do

trabalho, apresentando o problema e descrevendo os objetivos. A estruturação do texto passa pelos procedimentos metodológicos, resultados e discussões. A disposição estruturada dos tópicos, possibilita a apresentação um novo conhecimento científico, de forma lógica e fundamentada.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na fundamentação teórica estão dispostos os conceitos que norteiam o corpo conceitual do presente estudo.

### 2.1 ECODESIGN E SELEÇÃO DE MATERIAIS

Na busca pelo equilíbrio entre interesses comerciais, ambientais e sociais; a sustentabilidade, enquanto processo, tem ainda um longo caminho a percorrer dentro das indústrias. Na procura pela harmonia entre interesses tão distintos, o Design apresenta um método sistêmico, que busca incluir parâmetros ambientais no processo de projeção de um produto, o ecodesign. Concepção que teve origem em 1971, com o lançamento do livro *Design For The Real World*, do designer austríaco Victor Papanek, até hoje considerado referência na área (PAPANEK, 2005).

Para Manzini e Vezzoli (2016), o ecodesign trata o ciclo de vida de um produto como um conjunto de atividades e processos no qual cada etapa requer uma quantidade de matéria e de energia que são transformadas. Segundo Mattioda (2017), é uma maneira de projetar e fabricar produtos de forma sustentável, evitando perdas e promovendo a continuidade do ciclo de vida dos materiais.

Em outras palavras, no ecodesign a fabricação de um bem é orientada para evitar o desperdício e todas as fases de produção são guiadas pela sustentabilidade. O principal objetivo é prolongar o ciclo de vida do material escolhido, seja por meio da reciclagem ou do reuso (KARLSSON; LUTTROP, 2006; PAZMINO, 2007).

Sob essa nova perspectiva, as estratégias consistem em se fazer uma escolha de recursos e de processos que resultem em baixo impacto ambiental, propor a otimização da vida dos produtos e a extensão da vida dos materiais com facilidade de desmontagem (MATTIODA, 2017; NAVEIRO; PACHECO; MEDINA, 2005).

Assim, as questões de eficiência, reciclabilidade e reuso são avaliadas em todas as etapas do projeto de desenvolvimento de um produto. Neste sentido, os responsáveis pelos projetos de novos produtos devem adotar metodologias inovadoras para o desenvolvimento de produtos que atendam aos requisitos da sustentabilidade através de uma visão singular a respeito do projeto (NAVEIRO; PACHECO; MEDINA, 2005; PLATCHECK, 2012).

Depreende-se, então, que o ecodesign tem por propósito gerar bons produtos com o mínimo de recursos, tanto materiais quanto energéticos, propiciando à diminuição na geração de resíduos e, por consequência, na poluição ambiental (NAVEIRO; PACHECO; MEDINA, 2005). Segundo Cândido (2011), a escolha pelo ecodesign está fundamentada na premissa de redução, buscando conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente. Desta forma, entende-se que a seleção do material é de extrema importância, uma vez que o projeto é desenvolvido com foco no reaproveitamento ou na reciclagem, sendo uma das primeiras decisões a serem tomadas pelo designer comprometido com o ecodesign (CÂNDIDO, 2011; NAVEIRO; PACHECO; MEDINA, 2005).

A busca por materiais ecologicamente aptos é norteada por características técnicas, sendo que a descrição pormenorizada de seus atributos técnicos é de fundamental importância, pois estes servirão como base de dados para que o projetista defina as características do produto (ASHBY; JOHNSON, 2011). Dados como degradação, capacidades térmica e mecânica, de acordo com as características pretendidas, são informações essenciais para que o produto em projeto consiga alcançar um bom desempenho (ASHBY; JOHNSON, 2011).

Ao realizar a análise de um material, descobre-se como ele pode ser usado, quais suas características na decomposição, como e quais resíduos serão gerados. Para a seleção de materiais é valorizado o uso de matérias-primas renováveis e recicláveis visando a diminuição da produção de resíduos e a captação de carbono.

Segundo Manzini e Vezzoli (2016), o momento da escolha de materiais, como o PLA, a exemplo dessa pesquisa, estaria na fase de pré-produção – fase em que são produzidos os materiais, escolhidas as matérias-primas e utilizadas para a produção dos componentes – portanto, nessa etapa, é essencial que se considere a aquisição dos recursos, o transporte e a transformação desses materiais em produtos.

É válido destacar que, no processo da escolha de materiais, o índice de reciclabilidade de um material é um padrão norteador, pois indica o quanto esse material é reciclável, qual seu limite de utilização e até que ponto manterá as qualidades mais próxima do original, sem grande descaracterização (AGUIAR *et al.*, 2014).

Em relação à origem, o material pode ser oriundo de recursos primários – materiais virgens, ou recursos secundários – os materiais reciclados. Os recursos primários provêm diretamente da natureza (biosfera) e podem ser classificados em

recursos primários renováveis ou não renováveis, sendo que em ambos os casos as matérias adquiridas passam por processamento (MARIS *et al.*, 2018).

Os recursos secundários provêm dos descartes e dos refugos dos processos produtivos, e das atividades de consumo, sendo classificados de acordo com o momento em que são recuperados como resíduos de pré e de pós-consumo (MARIS *et al.*, 2018).

No intuito de facilitar esse processo, foram desenvolvidas ferramentas que permitem selecionar as propriedades de novos materiais em bancos de dados, tais como bibliotecas e relatórios de propriedades físicas, químicas e mecânicas – a exemplo do Mapa de Propriedade de Materiais (MPM) - trabalho da *Cambridge Engineering Selector* (CES) (ALLIONE *et al.*, 2012; ASHBY; JOHNSON, 2011).

## 2.2 RECICLAGEM

Reciclagem é a recuperação e o aproveitamento de rejeitos dos processos produtivos e de consumo, bem como os procedentes de produtos descartados (CÂNDIDO, 2011), com o intuito de reiniciar seu ciclo de produção, fazendo o fluxo cíclico, sem descarte.

A classificação da reciclagem que toma como base a origem dos resíduos, o grau de contaminação e as tecnologias utilizadas pode ser: primária, secundária, terciária e quaternária (MARIS *et al.*, 2018).

Entende-se como reciclagem primária os processos de reintrodução de materiais com baixo índice de contaminação oriundos da indústria, o método acontece enquanto o material ainda está sendo fabricado – como: restos, lascas, aparas, erros, dentre outros provenientes da linha de produção (CÂNDIDO, 2011; SPINACÉ; PAOLI, 2005), caso em que o material reciclado deve ter características análogas à matéria-prima virgem (CÂNDIDO, 2011).

A reciclagem secundária consiste no processo de reintrodução de materiais que já possuem certo grau de contaminação e decomposição provenientes de descartes sólidos urbanos. A matéria-prima originada por esse processo tem propriedades inferiores ao material virgem original (CÂNDIDO, 2011; SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Por reciclagem terciária tem-se o processo de reintrodução de materiais que se encontram em decomposição ou despolimerização, advindos de resíduos sólidos urbanos ou industriais (SPINACÉ; PAOLI, 2005). Já a reciclagem quaternária é

definida pelo processo de reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos ou industriais que são transformados em fontes de energia (CÂNDIDO, 2011; SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Em relação à tecnologia de processamento, a reciclagem dos polímeros pode ser classificada em: mecânica, química ou energética (SPINACÉ; PAOLI, 2005). A reciclagem mecânica consiste na separação dos materiais a serem reciclados por meio de processos manuais ou mecânicos de extrusão, injeção ou termoformagem, podendo haver a necessidade de lavar e homogeneizar o material, bem como a incorporação de material virgem para o melhoramento de suas propriedades (CÂNDIDO, 2011).

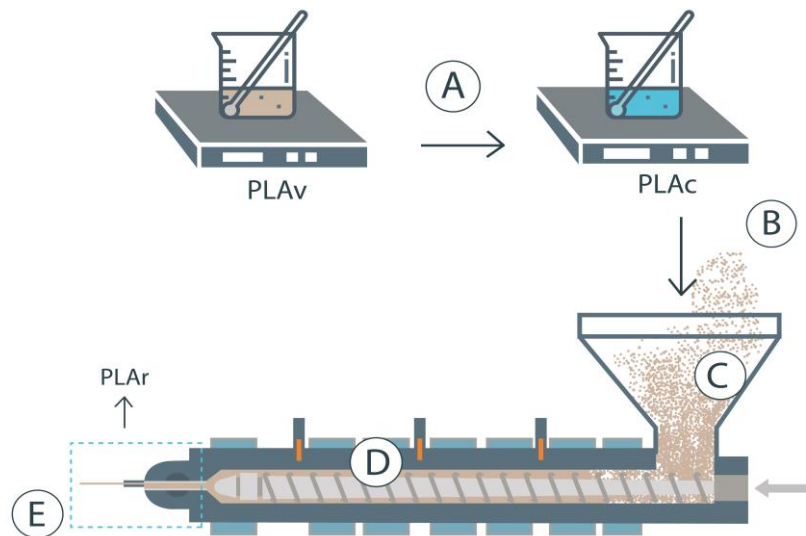
Por sua vez, a reciclagem química ocorre em processos industriais em que as cadeias de polímeros são quebradas fazendo com que a matéria gerada sirva como elemento constitutivo de um novo composto (CÂNDIDO, 2011). Já a reciclagem energética consiste na queima de resíduos, que podem ser advindos tanto da reciclagem mecânica quanto da química, com o objetivo de gerar calor ou energia (CÂNDIDO, 2011; SPINACÉ; PAOLI, 2005).

O material condutor objeto deste estudo foi submetido ao método mecânico de extrusão; por se tratar de material sem uso prévio, classificado como reciclagem primária.

### **2.2.1 Reciclagem mecânica por extrusão**

A extrusão é um processo de moldagem de termoplásticos, submetidos a pressão e cisalhamento através de uma matriz aberta. Um parafuso mecânico, ou rosca, impulsiona o material peletizado através de uma câmara, onde ele é compactado, derretido e formado em uma carga contínua de fluido viscoso. A extrusão ocorre quando essa massa fundida é forçada através do orifício da matriz. A solidificação do comprimento extrudado é facilitada por resfriamento, por imersão ou por ventilação. A técnica é especialmente adaptada para produzir comprimentos contínuos com geometrias transversais constantes, como hastes, tubos, mangueiras, folhas e filamentos (CALLISTER; RETHWISCH, 2018) (Figura 4).

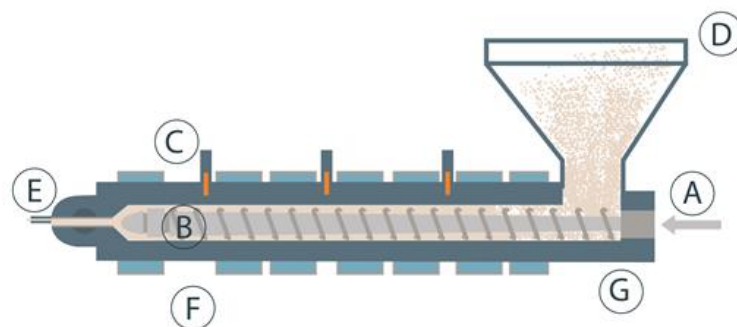
Figura 4: Processo de preparo e de extrusão dos materiais



Fonte: A autora (2023).

Em (a) os elementos são pesados e misturados, em (b) realizada a secagem das misturas, em (c) a zona de alimentação da extrusora, em (d) temos as áreas de aquecimento e processamento das misturas, e em (e) extração do filamento reprocessado. A extrusão de PLA é o primeiro passo antes de qualquer outro processamento de PLA, como injeção, termoformagem ou fiação. A extrusora fornece o calor para derreter as resinas por faixas de aquecimento enroladas ao redor do canhão; e parte do calor é fornecido pelo atrito da resina entre o parafuso e o canhão, conforme (Figura 5).

Figura 5: Extrusora monorosca



Fonte: Adaptado de Aguirre *et al.* (2016).

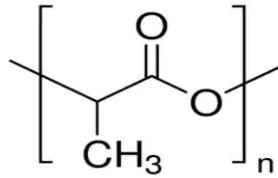
Na Figura 5, apresentamos um corte medial da extrusora, onde em “A” e o sentido do movimento da monorosca, em “B” a monorosca, em “C” as zonas de aquecimento da extrusora, em “D” o funil de alimentação da extrusora, em “E” a matriz de extrusão, em “F” as zonas de controle de temperaturas, e em “G” acionamento do motor da máquina. No processo de extrusão, o material é exposto a altas temperaturas e condições de cisalhamento extremas, o que afeta a reologia e a degradação dos polímeros. Os principais parâmetros que devem ser observados, no processo de extrusão, são: o perfil da rosca, a velocidade de rotação e a temperatura de processamento dos materiais utilizados.

Extrusão de PLA em altas temperaturas podem causar degradação térmica, motivo pelo qual o perfil de temperatura, durante a extrusão do PLA, deve ser rigidamente controlado. Essa degradação térmica do PLA pode ser atribuída a vários fatores, como: hidrólise por pequenas quantidades de água (umidade), despolimerização e cisão da cadeia principal. Assim, para garantir que todos os domínios cristalinos do PLA semicristalino sejam fundidos; e para atingir uma viscosidade de fusão ideal para processamento, os aquecedores são geralmente ajustados em 40 a 50 °C mais altos, do que a temperatura de fusão ( $T_m$ ). A frequência de rotação do motor da extrusora tem capacidade de 40 rpm.

### 2.3 POLIÁCIDO LÁTICO – PLA

Poliácido lático (PLA) é um polímero commodity, biocompatível, biodegradável e processável por fusão, com propriedades mecânicas satisfatórias, que tem sido amplamente estudado como um substituto para polímeros não biodegradáveis. Tanto o PLA quanto os compostos de PLA estão sendo desenvolvidos para diversas aplicações, como vestuário, têxteis, médicos e produtos descartáveis (SILVA *et al.*, 2021).

O PLA apresenta potencial em áreas como dispositivos vestíveis, sensores capacitivos, baterias de íon de lítio impressas em 3D, sensores de pressão flexíveis e revestimentos funcionais para têxteis. Esse polímero é constituído por moléculas de ácido lático – um ácido orgânico de origem biológica que é obtido a partir de recursos renováveis, como é ilustrado na representação da fórmula química apresentada na Figura 6.

Figura 6: Fórmula  $(C_3H_4O_2)_n$ 

Número CAS: 26100-51-6  
 Fonte: Sigmaaldrich (2022).

A consciência global com relação à sustentabilidade dos materiais utilizados na cadeia de produção aumentou a demanda por polímeros de base biológica, ou seja, polímeros obtidos de fontes naturais, como milho ou batata, por exemplo. O poliácido láctico (PLA) é visto como uma alternativa viável aos polímeros de base fóssil, pois sua obtenção importa em menor impacto ambiental para produção, tendo em vista que as fontes fósseis se exaurem, ao passo que as biodegradáveis são renováveis.

PLA é um poliéster alifático (Figura 6) produzido principalmente por policondensação industrial de ácido láctico, ou polimerização de lactídeo, por abertura de anel alifático (Figura 6) (AGUIRRE *et al.*, 2016). Os polímeros de PLA são biodegradáveis, produzidos a partir de recursos renováveis, oferecem uma carga de carbono reduzida em comparação com outros plásticos tradicionais. O PLA virgem (PLAv) é o material polimérico que não contém aditivos, possui alto grau de pureza e concentração próximas a 100% do material base.

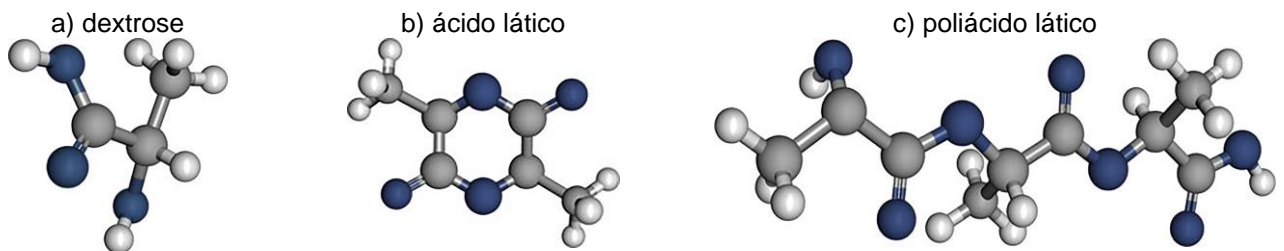
Não obstante, o PLA, por ser um material jovem e ainda em fase de estudo, necessita de algum tempo para se estabelecer como um biopolímero de referência no mercado, ou para ser produzido com propriedades sob medida, da mesma maneira que a diversidade de materiais disponíveis. Em contrapartida, os desafios ambientais, econômicos e de segurança têm levado os cientistas e produtores a substituir os polímeros de base petroquímica por biopolímeros de ambas as categorias: biodegradáveis ou não-biodegradáveis.

Para as indústrias de polímeros, o PLA é um polímero relativamente novo, a primeira planta industrial para produção em larga escala foi iniciada em 2002 – 140.000 toneladas por ano – empresa NatureWorks – situada na cidade de Blair, Nebraska, EUA (NATUREWORKS, 2022). Desde então, há um crescente interesse no material, haja vista os inúmeros artigos científicos e revisões ligados à sua fabricação, modificação, processamento, reciclagem/reuso e descarte final.

Atualmente, com o crescimento da demanda de mercado, houve um implemento na produção do PLA, que passou a contar com novas plantas de produção da tecnologia. Como exemplo, a Total Energies Corbion que produz, em sua planta em Rayong, na Tailândia, 75.000 toneladas por ano do polímero (CORBION, [202-]).

De acordo com a NatureWorks (2022), primeira produtora em larga escala de Polilactídeos, a produção acontece, resumidamente, da seguinte forma: as plantas selecionadas passam por um processo de moagem no qual é extraído o amido. Enzimas são adicionadas para converter a glicose em dextrose, através de um processo chamado hidrólise. Os microrganismos, então, fermentam essa dextrose em ácido láctico (Figura 7)

Figura 7: Processo de polimerização do ácido láctico



Fonte: NatureWorks (2022).

Um processo químico transforma as moléculas de ácido láctico em anéis de lactídeo (Figura 7). No processo de polimerização, o anel lactídeo é aberto e ligado para formar a longa cadeia de polímero PLA (Figura 7).

Tal qual os polímeros tradicionais, o PLA é um material passível de moldagem por injeção, compressão, extrusão, fiação e é devido às suas propriedades, que o material apresenta forte potencial para ocupar posição de destaque no mercado de biopolímeros (SILVA *et al.*, 2021). Importante ressaltar que o PLA comercial tem alto teor de plastificante, o que garante sua processabilidade e estabilidade no desenvolvimento dos produtos. Sendo o processamento por fusão a principal técnica utilizada para a produção em massa de produtos PLA, para as indústrias médicas, têxteis, plásticas, de embalagens e artigos técnicos.

As peças poliméricas do PLA podem ser expostas a diferentes ambientes durante sua vida útil, o que pode promover sua degradação. A deterioração leva a alterações irreversíveis do polímero até que ele falhe gradualmente, devido à perda de suas propriedades. Tal perda pode ocorrer sob diferentes mecanismos, incluindo



hidrólise química, degradação microbiana, fotoquímica, térmica e enzimática (CÂNDIDO, 2011).

A degradação do PLA, dependendo da aplicação, pode ser uma vantagem ou desvantagem. No caso de embalagens contaminadas, a degradação por diferentes mecanismos é uma das vantagens do PLA (AGUIRRE *et al.*, 2016), tendo em vista que quanto mais rápido o material contaminado se degrada, menos tempo ele fica exposto, poluindo o meio ambiente.

O PLA é um material inovador, considerando sua fonte de obtenção e o amplo espectro de aplicações e mercados, podendo ser utilizado desde embalagens, potes, copos, tampas e utensílios de uso único, bens de consumo, fibras e automotivos, até aplicações biomédicas. Por apresentar grades com baixa temperatura de fusão (cerca de 145 °C) é utilizado em grande escala nos processos de impressão 3D, sendo sua principal aplicação.

## 2.4 PLA CONDUTOR ELÉTRICO

Para maximizar as qualidades e a versatilidade do PLA é necessário entender e combinar a relação entre as propriedades da matriz de poliéster e as características das fases dispersas, sejam fibras de reforço, micro ou nano cargas, ou qualquer outro aditivo que venha agregar características ao polímero.

A adição de carga em substâncias poliméricas tem por objetivo acrescentar características que originariamente são ausentes no material matriz. De acordo com esse princípio, é possível o preparo de compósito polimérico que terá as características do elemento adicionado (BECKER *et al.*, 2015; MAMUNYA *et al.*, 2002).

Os polímeros condutores extrínsecos são formados a partir de um sistema bifásico, formado por um polímero isolante que recebe adição de uma carga condutora, o material adquire, assim, valores de condutividade a partir de uma concentração crítica de carga.

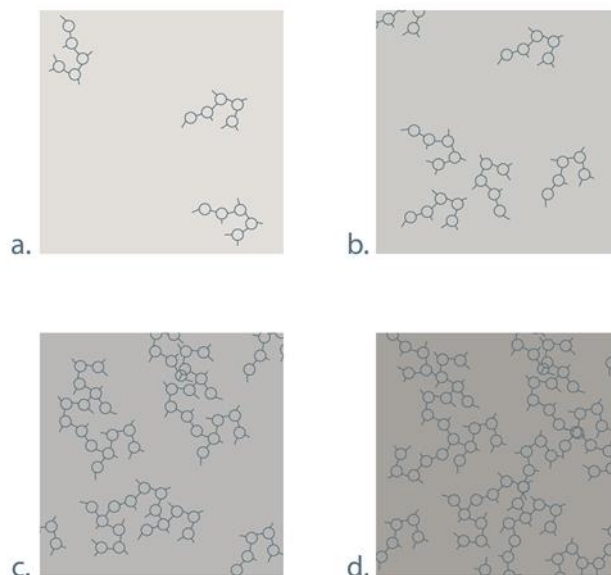
Devido às suas propriedades intrínsecas, o grafite e seus derivados, como o negro de fumo (CB), são amplamente utilizados como cargas em várias formulações de polímeros, incluindo o PLA. Esses materiais despertam o interesse devido ao alto potencial tecnológico oferecido por suas cargas condutoras. Dentre as diferentes matrizes e cargas condutoras orgânicas e inorgânicas estudadas, os compósitos que

contém polímeros condutores têm recebido máxima atenção por possuírem propriedades diferenciadas e aplicações diversas (HEEGER, 2001; WANG *et al.*, 2018).

De acordo com a teoria da percolação, existe uma certa concentração de cargas chamada concentração crítica, ou limiar de percolação, em que um caminho de condução é estabelecido no material compósito, transformando-o de isolante em condutor (HUANG *et al.*, 2019). Dessa forma, a utilização de matrizes isolantes em combinação com cargas condutoras, como negro de fumo, dopado com polianilina, dopado com polipirrol, nanotubos de carbono e partículas metálicas, originam compósitos condutores.

À medida que a concentração de carga condutora aumenta proporcionalmente ao volume, ocorrem caminhos condutores na matriz polimérica, resultando em um aumento da condutividade do material. Esse comportamento é conhecido como limiar de percolação elétrica, que representa a concentração mínima de material condutor necessária para alterar a capacidade condutora da matriz. Quando o valor crítico de concentração de carga condutora é atingido, a mistura apresenta comportamento condutor, de acordo com a proporção (HUANG *et al.*, 2019).

Figura 8: Sistema Condutor bifásico



Fonte: A autora (2023).

A distribuição da carga de aditivo na matriz polimérica pode ser representada esquematicamente pela Figura 8. Em "a" tem-se uma quantidade de carga incapaz de

criar caminhos condutivos no interior do polímero matriz. Em "b", o sistema apresenta segregação de material condutor de maneira não uniforme – o que impossibilita a condução elétrica no interior do material polimérico. Em "c", o sistema apresenta uma situação ótima, com o seu potencial máximo de condução elétrica. Já em "d", tem-se um sistema bifásico saturado, ou seja, a capacidade condutora é alcançada e o acréscimo de aditivo condutor não resulta em uma modificação significativa em relação à situação "c".

Ao analisar as representações gráficas de sistemas condutores bifásicos, percebe-se: em "a", uma situação isolante; em "b", um sistema com características condutoras em crescimento, em "c" há a indicação do limiar de percolação, em que a capacidade condutora é alcançada; e em "d", uma situação de saturação do aditivo condutor, sem acréscimo significativo na resposta condutora, em comparação à situação condutora em "c".

A obtenção do material condutor pode ser realizada via mistura mecânica, a qual pode ocorrer a partir do estado fundido com o auxílio de misturadores e extrusoras – técnica adotada neste estudo. A produção desses compósitos condutores pode ser realizada por diferentes técnicas, tais como: por dissolução, codissolução ou a partir do estado fundido (CAO *et al.*, 1992; PUD *et al.*, 2003). O elemento condutor utilizado nesta pesquisa foi um filamento com base de PLA que recebeu um aditivo de negro de fumo (carbono), tornando o material capaz de apresentar comportamento condutor elétrico.

Para a mistura e homogeneização, foi empregada a técnica de mistura mecânica fundida, realizada em extrusora monorosca. Segundo Xie e Zhu (2018), O estado de dispersão dentro da matriz é considerado um aspecto importante para a composição final, limiar de percolação elétrica e estabilidade térmica dos compostos.

Destarte, a condutividade elétrica de compósitos poliméricos contendo partículas condutoras depende de fatores como a proporção das partículas, o estado de dispersão, sua distribuição e a condutividade da partícula adicionada. São considerados, também, a cristalinidade da matriz, a tensão superficial do polímero e a integridade da partícula condutora (XIE; ZHU, 2018).

O PLA condutor é uma opção para aplicações em circuitos de baixa tensão, projetos de sensores táteis e em impressões de interfaces com telas de toque de baixa condutividade. Como regra geral, em qualquer sistema que necessite de um resistor de 1 K, é possível utilizar o material condutor impresso em 3D (PROTO-PASTA, 2018).

### 2.4.1 Teoria da Percolação Elétrica

Segundo o Dicionário Porto Editora (2023), percolar vem do latim percolāre, e significa coar; filtrar. Percolar é filtrar as características de um material pelo interior de outro. Quando se filtra café, percola-se o café pelo filtro de papel, quando há uma infiltração em uma laje de concreto, a água percola a laje, sendo (in)filtrada para o outro lado da laje. Analogamente, é possível filtrar as qualidades de um material condutor de eletricidade, através de outro isolante.

A condição para que a percolação elétrica aconteça é atingir uma concentração mínima de carga que permita a formação de um caminho condutor contínuo, conhecido como percolação (HUANG *et al.*, 2019). A teoria de percolação aplica-se a sistemas binários, ou seja, sistemas compostos de dois elementos, sendo um veículo isolante (HUANG *et al.*, 2019).

Para sistemas que apresentam comportamento percolativo, a condutividade depende de uma lei de potência da concentração  $p$  do componente condutor segundo um expoente crítico  $t$ .

O fenômeno de percolação é verificado por meio de uma curva de condutividade elétrica, traçada a partir da relação da fração volumétrica de carga condutora adicionada na matriz polimérica isolante (AGUIAR *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2018).

Quando uma matriz polimérica, com uma condutividade “1”, é preenchida com enchimento disperso tendo uma condutividade “Fc<sup>1</sup>”, o compósito preparado ganha um valor de condutividade. Quando a fração de enchimento de volume de “Fc<sup>1</sup>” atinge um valor crítico “Fc”, o chamado limiar de percolação é alcançado, a partir deste ponto tem-se uma resposta exponencial da condutibilidade do compósito, com pouco acréscimo de preenchimento (AGUIAR *et al.*, 2014; HUANG *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2018).

À medida que a concentração de carga aumenta de “Fc<sup>2</sup>” até o limite de enchimento “F”, o valor da condutibilidade aumenta rapidamente em várias ordens de grandeza, desde o valor “Fc” no limiar de percolação para o máximo valor “Cc<sup>2</sup>” (AGUIAR *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2018).

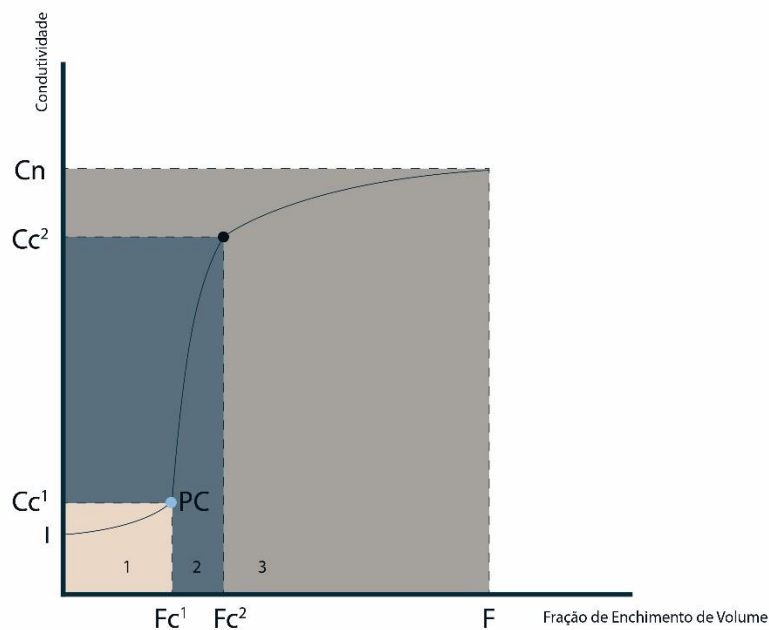
Entre os pontos “Cc<sup>2</sup>” e Cn o acréscimo de enchimento não provoca uma mudança na resposta condutível, contudo o acréscimo de elemento condutor após

“ $Cc^2$ ” causa diminuição nas qualidades mecânicas do sistema (AGUIAR *et al.*, 2014; HUANG *et al.*, 2019).

Abaixo do limite de percolação, a condutividade à mudança é insignificante e a condutividade do compósito é igual à condutividade do polímero ou ligeiramente superior. A dependência típica do logaritmo de condutividade na fração de volume de enchimento é mostrada na Figura 9 (MAMUNYA *et al.*, 2002). O valor do expoente crítico depende da proporção do preenchimento, e da capacidade condutora do material de preenchimento.

Neste estudo, o PLA e um elemento condutor – um filamento de PLA enriquecido com negro de fumo – são associados a diversas propriedades desses sistemas, tais como: o magnetismo, permeabilidade a líquidos, elasticidade e a capacidade de condução elétrica do material.

Figura 9: Percolação elétrica



Fonte: Adaptado de Mamunya *et al.* (2002).

## 2.5 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Para compreender como ocorrem os processos de transformação das características e propriedades de um material, é de suma importância analisar o comportamento dos materiais levando em consideração suas particularidades, desde o nível subatômico à escala macroscópica. A caracterização dos materiais permite

descobrir a viabilidade de transformar esses materiais em produtos finais, considerando que um material pode absorver as características de outro com propriedades mecânicas drasticamente diferentes (BOEIRA; BECK, 2007). Assim, caracterizar um material significa descrever suas características de composição, bem como sua estrutura, levando em consideração o contexto para o processo, produto ou propriedade específica.

Segundo Callister e Rethwisch (2018), cada material responde de maneira única a estímulos externos específicos. A partir dessas respostas, é possível identificar as propriedades que estão relacionadas, direta ou indiretamente, às suas microestruturas. É por meio de técnicas de caracterização dos materiais que se mensuram suas propriedades.

Os autores também destacam a existência de características que definem a utilização de um material: mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas e deterioração. As propriedades mecânicas são medidas de acordo com as respostas apresentadas pelo material quando submetido a tração, compressão ou cisalhamento. A resistência ou a capacidade de conduzir cargas são propriedades elétricas de um material. As propriedades térmicas são, em geral, avaliadas por meio da capacidade do material de conduzir calor, bem como por seus pontos de transição vítrea e de fusão, por exemplo. Os materiais quando expostos sob campo magnético ou elétrico podem responder de forma que, após retirar o campo magnético externo, o material permanece com magnetismo. Em se tratando da deterioração, é um aspecto importante no que diz respeito à degradação do material, determinando a vida média útil do produto em sua função (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

De acordo com Queiroz *et al.* (2012), ao se caracterizar um material busca-se compreender como será seu comportamento no futuro, bem como clarificar fenômenos físicos, químicos ou biológicos característicos de cada material, sejam de natureza orgânica ou inorgânica. As diversas técnicas de caracterização emitem a identificação química e física da referida matéria, permitindo, assim, que se conheça suas características intrínsecas e quais as aplicações possíveis para o material (SANTANA *et al.*, 2018).

Para o presente estudo, os materiais foram submetidos a análises químicas, EDS e FTIR, bem como a análises físicas, que avaliam as características físicas do material: MEV, TGA, DSC e prova de condutibilidade elétrica. Foram escolhidos esses métodos de caracterização devido à conexão direta entre a característica de

condutibilidade do material e suas propriedades físicas, como características térmicas e condutivas (Figura 10).

Figura 10: Técnicas de caracterização de materiais



Fonte: A autora (2023).

## 2.5.1 Análises químicas

### 2.5.1.1 Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

Espectroscopia por Energia Dispersiva é uma caracterização qualitativa dos elementos químicos de uma amostra. Trata-se de uma identificação química do material, que é baseada na interação de um feixe de partículas carregadas de alta energia gerando uma fonte de raio X que excita uma amostra (MALISKA, [s.d.]). Ao serem analisados, os elementos químicos produzem sinais de absorção e emissão, possibilitando a identificação dos componentes na superfície da amostra. A EDS é uma ferramenta poderosa para determinar a composição elementar de materiais em diversas áreas da ciência e da indústria.

O EDS é um aparelho acoplado a outros instrumentos que detecta e processa raios X, convertendo-os em dados expressos em um histograma. Esse espectro consiste numa série de picos que representam o tipo e a quantidade de cada elemento presente na amostra (VIEIRA *et al.*, 2021).

Seu princípio é que cada elemento tem estrutura atômica única, permitindo um conjunto de picos em seu espectro de emissão. O EDS, quando acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), é profícuo para conhecer os elementos químicos presentes a nível microscópico em uma amostra. A técnica é muito utilizada em identificação e análise de falhas de polímeros e compósitos, mas também em pesquisa e desenvolvimento de materiais, podendo identificar a composição química de partículas a partir de cinco microns de tamanho (VIEIRA *et al.*, 2021).

### 2.5.1.2 Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Espectrometria por Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica para identificação de materiais orgânicos, rápida e fácil de usar, caso haja uma substância desconhecida a ser comparada com uma referência.

A técnica baseia-se na análise comparativa do comportamento, conhecido previamente, das ligações e grupamentos químicos de determinado material e na observação de como vibram em faixas de frequência específicas do comprimento de onda de luz – absorção da radiação de diferentes frequências. Para que ocorra a absorção de radiação, as vibrações fundamentais das moléculas devem ter a mesma frequência da radiação incidente que as excita. Isso ocorre quando há uma variação no momento dipolar da espécie – grandeza que indica a separação de cargas elétricas dentro de uma molécula. Essa variação no momento dipolar está relacionada com a absorção da radiação (SALA, 2008).

Os diferentes tipos de vibrações moleculares correspondem a diferentes frequências de absorção. Cada vibração está associada a um modo de vibração específico das ligações químicas presentes na molécula. Assim, a identificação das frequências de absorção características de uma molécula permite a determinação de sua estrutura e composição química.

Por meio dessa técnica, é possível identificar e caracterizar polímeros e materiais orgânicos com base nas características das ligações químicas presentes (CANEVAROLO, 2017). Através da Espectroscopia, é possível obter informações sobre a composição química e a estrutura molecular dos materiais, auxiliando na sua identificação e no estudo de suas propriedades.

Um banco de dados permite a identificação de substâncias desconhecidas como, por exemplo, a biblioteca da *Sadtler Division of Bio-Rad*, que contém mais de 150.000 espectros IR. Em número de espectros arquivados, a segunda é a da *Aldrich Chemical Company*, com mais de 50.000 espectros IR. No procedimento padrão, recomenda-se comparar o espectro de infravermelho (IR) da amostra desconhecida com o espectro IR de um composto conhecido e contido em uma biblioteca de referência. Se os dois espectros forem semelhantes, considera-se que as moléculas presentes nas duas amostras são similares. Essa comparação é realizada para identificar os grupos funcionais presentes na amostra desconhecida e auxiliar na sua caracterização química (ANDRADE, 2010; WILEY SCIENCESOLUTIONS, 2022).



As análises de Espectrometria por Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) abrangem uma faixa de comprimento de ondas de 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . As diferentes forças de ligação e absorções são explicadas com base em sua força de ligação, que se deve ao aumento do caráter dessas ligações. Para a molécula orgânica, o espectro infravermelho geralmente pode ser dividido em quatro partes, conforme Khan *et al.* (2018): 4000–2500  $\text{cm}^{-1}$ , absorção de ligações simples de hidrogênio, O-H, N-H e C-H; 2000–2500  $\text{cm}^{-1}$ , absorção de ligações triplas,  $\text{C} \equiv \text{C}$  e  $\text{C} \equiv \text{N}$ ; 1500–2000  $\text{cm}^{-1}$ , absorção de ligações duplas,  $\text{C}=\text{C}$  e  $\text{C}=\text{O}$ , 700–400  $\text{cm}^{-1}$ ,.

A norma ASTM E1252, estabelece a técnica padrão de análise qualitativa, realizada por FTIR.

## 2.5.2 Análises físicas

### 2.5.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

Termogravimetria ou Análise Termogravimétrica (TGA) é uma técnica de análise térmica que tem por finalidade traçar o perfil de degradação térmico dos materiais estudados, em que a variação de massa de um material – perda ou ganho – é determinada em função de temperatura, tempo, taxa de aquecimento e atmosfera (oxidativa ou inerte). Para que seja possível conhecer essa variação, a amostra é submetida a condições de temperatura e atmosfera controladas (BANERJEE, 1993).

No método termogravimétrico, são registradas curvas de massa da amostra ( $m$ ) em função da temperatura ( $T$ ) ou do tempo ( $t$ ), conforme a equação:

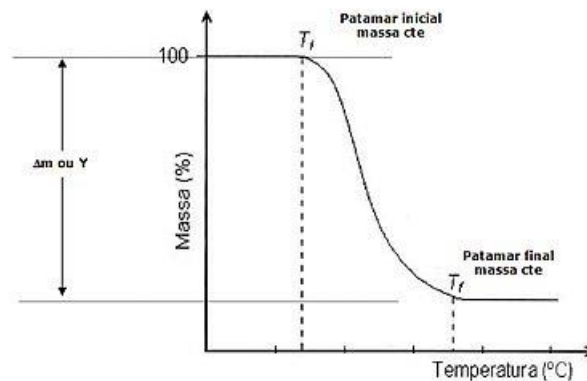
$$m = f(T_{out}) \quad (1)$$

A norma ASTM E 2550-11 estabelece diretrizes para a determinação precisa das temperaturas iniciais e finais em análises termogravimétricas, garantindo assim uma metodologia padronizada e confiável para essa caracterização térmica dos materiais.

De acordo com essa norma, a temperatura inicial ( $T_i$ ) é a menor temperatura em que pode ser detectado o início da variação de massa para um determinado conjunto de condições experimentais. Essa temperatura representa o ponto em que ocorre a primeira alteração significativa na massa do material em estudo.

Por outro lado, a temperatura final ( $T_f$ ) é a menor temperatura indicando que o processo responsável pela variação de massa foi concluído. Nesse ponto, a variação de massa do material atinge seu equilíbrio e não ocorrem mais alterações significativas (Gráfico 1).

Gráfico 1: Curva teórica de caracterização termofísica de materiais por Análise Termogravimétrica



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2017).

A análise de TGA é igualmente útil para se observar reações de decomposição de materiais e, quando aplicável, as amostras são analisadas por vários métodos, conforme as seguintes normas: ASTM E1131, ISO 11358, ASTM D3850, ASTM E2402, por exemplo.

#### 2.5.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é uma técnica de caracterização de materiais utilizada para medir a diferença de energia entre uma amostra e um material de referência em função de um programa de aquecimento ou resfriamento com parâmetros controlados (BANERJEE, 1993). O fluxo de calor ocorre com mais frequência quando os materiais sofrem mudança de fase. Por meio da curva de DSC, é possível obter temperaturas de transição dos polímeros como ponto de fusão, ponto de cristalização, temperatura de transição vítrea – indicada pela mudança na linha de base; além do calor específico, entalpia de fusão, cinética de reação e estabilidade (BANERJEE, 1993).

O ponto de cristalização é a temperatura na qual um material em estado líquido começa a se solidificar. Nesse caso, ocorre uma liberação de calor, o que é representado por um pico exotérmico na curva de DSC. A temperatura em que

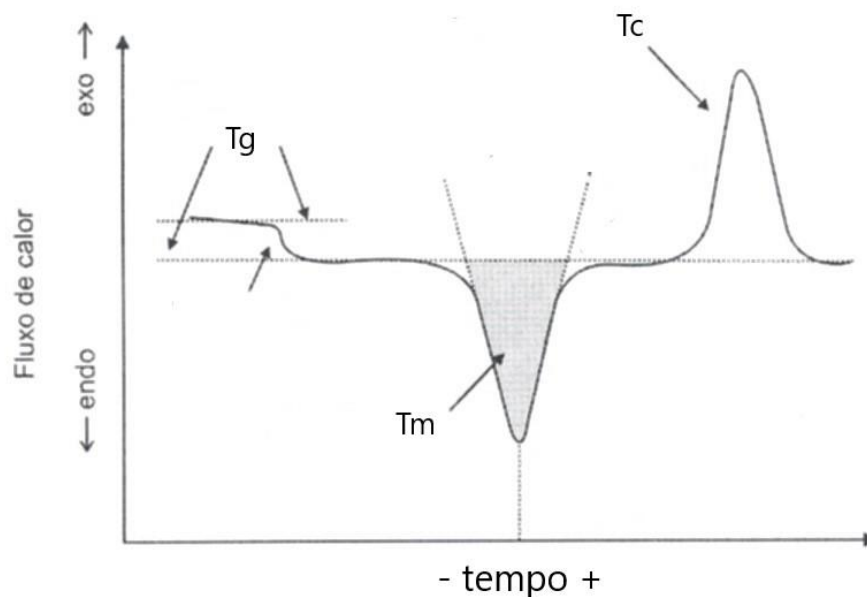
desaparece totalmente a cristalinidade é referida como ponto de fusão do material e corresponde, aproximadamente, ao máximo do pico endotérmico na curva de DSC (BANERJEE, 1993).

A temperatura de transição vítrea é uma característica importante dos polímeros e indica a transição entre os estados vítreo e elastomérico. Essa transição não envolve mudanças na estrutura cristalina do material, mas sim alterações nas propriedades físicas e viscoelásticas. Essa transição é detectada como uma mudança na linha base da curva de DSC.

Além disso, a curva de DSC também pode fornecer informações sobre o calor específico do material, que está relacionado à quantidade de calor absorvida ou liberada durante uma transição térmica. A entalpia de fusão é a quantidade de calor absorvida ou liberada durante o processo de fusão de um material.

A análise da cinética de reação e da estabilidade de um material também pode ser avaliada por meio da curva de DSC. As mudanças nas taxas de reação e a estabilidade térmica do material podem ser observadas a partir das alterações na curva de DSC ao longo do tempo (Gráfico 2).

Gráfico 2: Curva teórica de caracterização termofísica de materiais por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)



Fonte: Adaptado de Canevarolo (2017).

Uma análise típica de DSC mede a diferença na taxa de fluxo de calor ( $\text{mW} = \text{mJ/sec}$ ) entre uma amostra e a referência inerte, em função de tempo e temperatura.

As normas ASTM para determinar a temperatura e a entalpia de fusão são: ASTM E794-06 e E793-06, ASTM D3418, por exemplo.

### 2.5.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Microscópio Eletrônico de Varredura é um microscópio que permite produzir imagens de alta resolução da superfície de materiais sólidos. Devido a maneira como as imagens são criadas, imagens de MEV têm uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura e superfície de uma dada amostra.

Essa técnica é utilizada para obtenção de imagens em alta resolução tanto de superfícies polidas como rugosas. O MEV é utilizado para análises e observações de características microestruturais de diversos tipos de componentes sólidos. O modo de análise pela captação de elétrons provenientes do material analisado permite a visualização superficial em grande aumento das estruturas em análise, com a utilização do modo que capta os elétrons retroespalhados da matéria.

A técnica permite identificar a orientação cristalina de diversos tipos de componentes sólidos, bem como a diferenciação de fases, quando presente (QUEIROZ *et al.*, 2012). O MEV produz imagens com alta resolução da superfície de uma amostra, com aparência tridimensional e ampliação podendo chegar em 300.000 vezes, sendo útil para avaliar a estrutura superficial estudada (QUEIROZ *et al.*, 2012).

O MEV com o acoplamento de EDS (Detector de Energia Dispersa) é muito utilizado na Ciência dos Materiais e fornece informações sobre a topografia e a composição química da superfície das amostras analisadas.

### 2.5.2.4 Condutividade e Resistência Elétrica

Condutividade é uma propriedade elétrica dos materiais que corresponde ao inverso da resistividade ( $\rho$ ). Uma alta condutividade em um material indica grande capacidade de transportar cargas elétricas com facilidade, mediante a aplicação de uma diferença de potencial entre dois pontos. A unidade de medida da condutividade é o siemens por metro (S/m), que corresponde a  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ .

A condutividade elétrica é a grandeza física que mede a capacidade inerente a algum material de transportar cargas elétricas quando sujeito a uma diferença de potencial elétrico. Essa característica dos materiais leva em conta aspectos

microscópicos, tais como a disponibilidade e a mobilidade dos elétrons livres, que podem ser entendidos, respectivamente, como a quantidade de elétrons fracamente ligados aos núcleos atômicos, e a velocidade em que os elétrons podem ser conduzidos entre os átomos da rede cristalina do material, sem colidir com esses últimos.

A condutividade elétrica é uma característica dos materiais que pode ser definida pela facilidade com que as cargas elétricas conseguem atravessar um material quando conectado a uma tensão elétrica. Quanto maior for o valor da condutividade, melhor condutor elétrico, quanto menor o valor da condutividade, melhor isolante elétrico o material será.

A unidade de medida da condutividade elétrica é o inverso da unidade de medida da resistividade ( $\Omega \cdot m$ ), sendo, portanto,  $1/\Omega \cdot m$  ou, ainda,  $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$  (HELERBROCK, 2023).

Resistividade ou condutividade da superfície é considerada relacionada às propriedades do material quando a contaminação está presente, mas não é uma propriedade do material de isolamento elétrico no sentido usual (ASTM, 2014).

Os métodos de teste ASTM D-257 abrangem técnicas para a medição da resistividade volumétrica e da resistividade de superfície de materiais isolantes. Esse método de teste é aplicável para medições de resistividade geralmente acima de  $10^{19} \Omega \cdot m$  ou  $10^{21} \Omega \cdot m$ .

A prova de condutividade elétrica tem por função determinar qual é a capacidade condutiva do material. Os valores de resistividade dos materiais poliméricos podem ser utilizados como um auxílio na seleção de materiais para aplicações específicas, em que características de isolamento ou condutividade elétrica são necessárias. A determinação da resistividade volumétrica de produtos que entram em contato com energia elétrica é importante para um dimensionamento seguro dentro dos padrões de segurança. Além disso, a análise da resistividade superficial pode ser útil na especificação de dispositivos que precisam dissipar eletricidade estática em suas superfícies.

Um dos métodos mais utilizado para a medida da resistividade em sólidos é o método de duas pontas, também conhecido como método de dois terminais que é um padrão recomendado pela ASTM (D257-99) para materiais com resistência elétrica acima de 106 e o método da sonda de quatro pontas (ASTM, 2020).

As resistências ou condutâncias dielétricas dependem do tempo de eletrificação e do valor da tensão aplicada (além das variáveis ambientais usuais). Esses devem ser conhecidos e relatados para tornar o valor medido de resistência ou condutância significativo. Dentro da indústria de materiais de isolamento elétrico, o adjetivo “aparente” é geralmente aplicado a valores de resistividade obtidos em condições de tempo de eletrificação arbitrariamente selecionadas. A resistência ou condutância da superfície muda rapidamente com a umidade, enquanto a resistência ou condutância do volume muda lentamente com a mudança total sendo maior em alguns casos.

Um dos parâmetros físicos de grande importância, para que se determine a capacidade utilização de um material, é a caracterização elétrica verificada através da resistividade elétrica DC, que é uma propriedade física de cada material. É possível definir a resistência entre dois pontos de um material, aplicando-se uma diferença de potencial  $V$  (ou tensão elétrica) entre estes pontos e medindo a corrente elétrica  $i$  que flui entre eles. Desta forma, a resistência do material será dada pela equação:

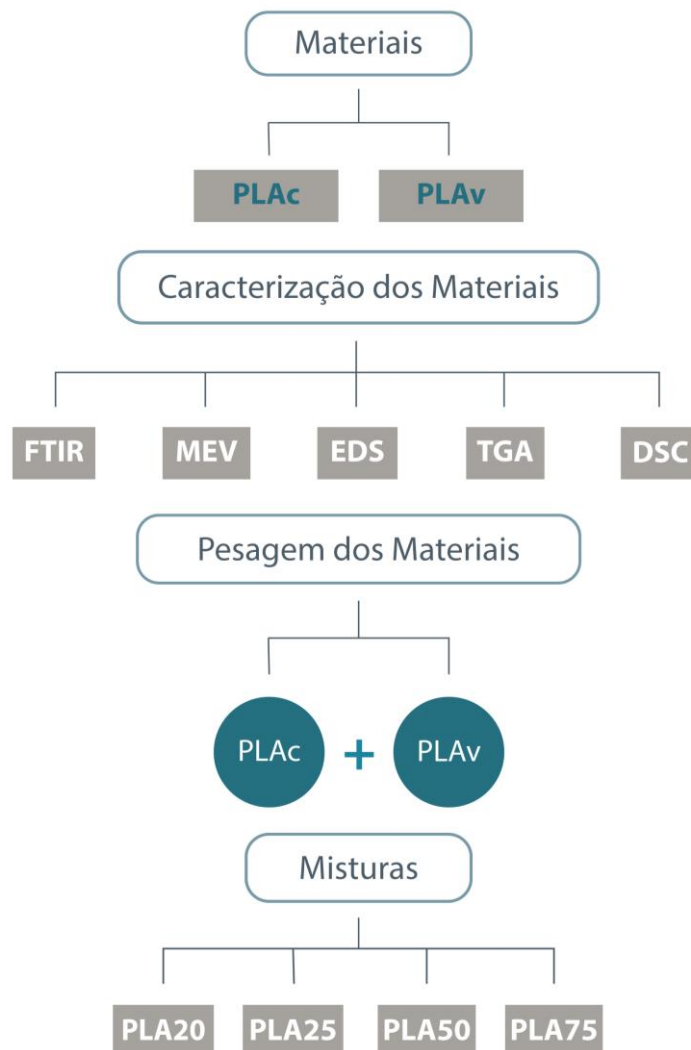
$$R = V/i \tag{2}$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem qualitativa, de objetivo exploratório, tendo sido usado como procedimento o método de pesquisa experimental. A seguir estão elencados os materiais utilizados e os métodos percorridos, conforme especificados nas Figuras 11 e 12.

No fluxograma 1 (Figura 11) têm-se o processo de obtenção das misturas, no fluxograma 2 (Figura 12) estão elencadas as análises feitas das misturas após extrusão em extrusora monorosca.

Figura 11: Fluxograma 1 – Processo de preparo e obtenção das misturas



Fonte: A autora (2023).

Figura 12: Fluxograma 2 – Esquema de extrusão e análises das misturas.



Fonte: A autora (2023).

### 3.1 MATERIAIS

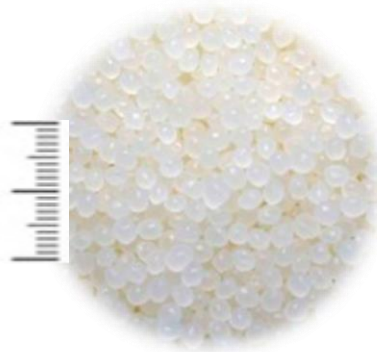
O material selecionado para a realização da presente pesquisa foi o poliácido láctico (PLA) utilizado em duas diferentes apresentações, quais sejam: PLA virgem peletizado (PLAv) e PLA Filamento condutor (PLAc).



### 3.1.1 PLA virgem

Para o presente trabalho foi utilizado PLA peletizado virgem (Figura 13), marca INGEO Premiun®, produzido por NatureWorks e fornecido pela indústria 2M3D Consultoria e Serviços Ltda, Novo Hamburgo, RS.

Figura 13: PLA virgem



Fonte: A autora (2023).

### 3.1.2 PLA condutor

Para o presente estudo, foi utilizado o PLA filamentado condutor, fornecido por Protoplant, Inc. Makers of Proto-pasta, Vancouver, Canadá (Figura 14 e 15). De acordo com informações fornecidas na ficha técnica do material, apresenta temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de 60 °C e temperatura de fusão ( $T_m$ ) em 155 °C, aditivado com partículas de tamanho máximo em 0,1 mm.

Figura 14: PLA condutor



Fonte: A autora (2023).

Figura 15: Filamento condutor comercial fornecido pela empresa Proto-pasta



Fonte: Proto-pasta (2018).

Conforme informações do fabricante Proto-pasta o filamento condutor é composto químico, pelos elementos CAS Nº 9051-89-2, Políácido láctico 65%, CAS nº 1333-86-4, Negro de Fumo 21,43% e 12,7 % de polímeros inespecíficos.

### 3.2 MÉTODO – CICLO DE RECICLAGEM DE MATERIAIS (CRM)

Para que os polímeros escolhidos pudessem ser reprocessados mecanicamente por extrusão, o material foi submetido aos procedimentos de: moagem, pesagem, secagem e, por fim, o reprocessamento mecânico por extrusão (Figura 16).

Figura 16: Ciclo de reciclagem de material por extrusão no estado fundido



Fonte: A autora (2023).

Os preparados foram extrudados em extrusora monorosca, em formato filamentado, e cada processado foi submetido às técnicas de caracterização: Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e Prova de Condutividade Elétrica.

A realização destas etapas sucessivas foi necessária para que o material reciclado preservasse as propriedades mecânicas e condutivas do material originário.

### **3.2.1 Moagem**

Tendo em vista que a diminuição volumétrica do material permite uma melhor miscibilidade entre as fases do sistema submetido ao reprocessamento, e no intuito de reduzir o tamanho das partículas do sistema reprocessado, realizou-se o processo de moagem. A moagem dos materiais escolhidos foi realizada em moedor de hélice, localizado no Laboratório de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura da UFRGS.

### **3.2.2 Pesagem e preparação das misturas**

Após a moagem dos materiais, foi realizada a pesagem das fases do sistema polimérico estudado em Balança Analítica, Quimis Q500L210C, localizada no LDSM, Escola de Engenharia, UFRGS. Processo em que os percentuais volumétricos dos materiais foram quantificados para a formação das misturas poliméricas pesquisadas.

Para a produção das amostras foi estipulado o volume máximo de 500 gramas para cada concentração. Auferiu-se a capacidade máxima de condutividade do polímero condutor, sendo o resultado o referencial Ponto Máximo de resposta elétrica do material. Em contrapartida, o PLA virgem é o Ponto Zero.

Após a pesagem, dos materiais PLAv e PLAc, foi realizado o preparo das misturas utilizando as seguintes concentrações de material condutor: 20%, 25%, 50% e 75%, de cada preparado. As misturas foram realizadas por agitação manual, conforme Figura 17.

Figura 17: Concentrações volumétricas das misturas PLAV + PLAC



Fonte: A autora (2023).

### 3.2.3 Secagem das misturas

A fim de evitar uma diminuição nas qualidades mecânicas do material extrudado, os preparados foram desumidificados em estufa de secagem e esterilização, marca DeLeo, localizada no Laboratório de Design e Seleção de Materiais, UFRGS. O tempo de permanência foi de 2 horas, a 50 °C. Após a secagem, o material foi embalado em envelope plástico com fechamento hermético, junto com dessecante sílica gel.

### 3.2.4 Extrusão das misturas

Após o preparo e a desumidificação, as misturas foram submetidas ao reprocessamento por extrusão, em temperaturas escolhidas entre as temperaturas de transição vítrea e temperatura de fusão, utilizando o intervalo de temperatura obtido pela TGA e pela DSC. Foram realizadas quatro extrusões, uma para cada concentração de material: PLA20, PLA25, PLA50 e PLA75.

Entre uma extrusão e outra, foi preciso fazer a purga da extrusora para limpar o interior da máquina, eliminando assim, o material que havia sido anteriormente reprocessado. Essa limpeza da rosca entre extrusões evita a contaminação do material, o que poderia gerar alterações nas concentrações do preparado, e conseqüente erro nos resultados.

Para realização das extrusões foram utilizadas baixas temperaturas – nas zonas 01, 02 e 03 – e baixa velocidade de rotação do eixo – rosca de extrusão apenas ligada, respondendo ao calor do material em extrusão, com velocidade oscilante entre 0 e 25 rpm.

Anteriormente à extrusão das blendas, foram realizadas diversas extrusões no PLA virgem, definiu-se as temperaturas das zonas de aquecimento e a frequência de

rotação da rosca, para que o material plastificar e ter maior fluidez dentro da máquina. As configurações estabelecidas permitiram uma melhor distribuição das temperaturas ao longo da rosca, resultando assim a extrusão de um filamento com dimensões uniformes (Tabela 1).

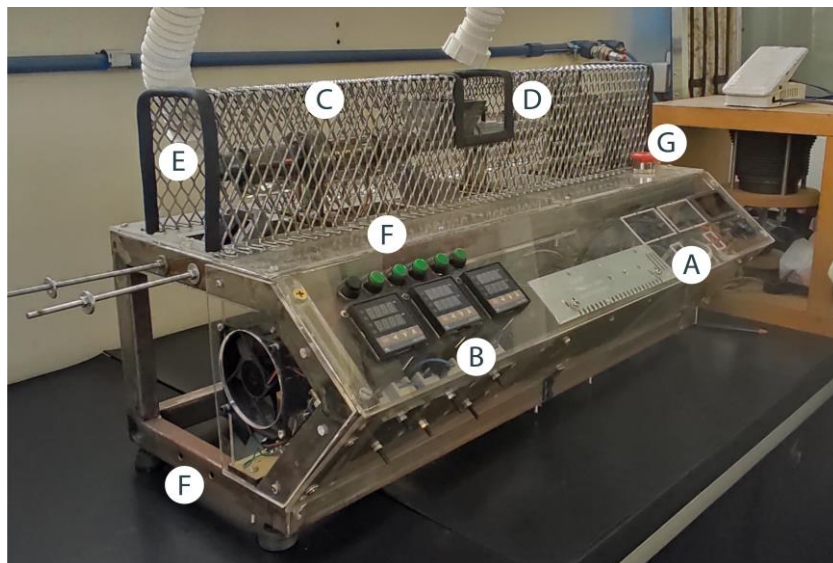
Tabela 1: Configurações temperaturas e velocidade da extrusora monorosca

<b>Temperaturas e velocidade da extrusora monorosca</b>	
Temperatura Zona 01	34 °C
Temperatura Zona 02	85 °C
Temperatura Zona 03	110 °C
Velocidade $\leq$ 40 rpm	0 – 25

Fonte: A autora (2023).

Todas as misturas foram extrudadas em extrusora monorosca (Figura 18) que está localizada no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS.

Figura 18: Extrusora monorosca localizada no LDSM



Fonte: A autora (2023).

Na Figura 18, estão indicadas as áreas de comando e controle da extrusora monorosca de mesa utilizada para o reprocessamento dos materiais poliméricos. Em 'A', temos botão ligar e botão de controle de velocidade do motor; em 'B' painel de controle de zonas de aquecimento, em 'C' as 03 zonas de aquecimento, 'D' funil de alimentação da extrusora, em 'E' temos a matriz de extrusão, em 'F' o sistema de resfriamento por ventoinhas e em 'G' o botão de segurança, de parada de sistema.

### 3.3 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para essa pesquisa, levando em consideração as peculiaridades do material, foram julgadas como técnicas de caracterização cabíveis as seguintes análises químicas, físicas e térmicas apresentadas na Figura 19: Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Análise Termogravimétrica (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e Prova de Condutibilidade e Resistência Elétrica.

Figura 19: Processos de caracterização dos materiais



Fonte: A autora (2023).

As provas foram realizadas nas duas apresentações selecionadas, PLAv e PLAc, durante a fase de caracterização de materiais e preparo das misturas. Os resultados extrudados de PLA reciclado (PLAr) – PLA20, PLA25, PLA50 e PLA75 –, foram submetidos às mesmas análises realizadas nos materiais que compõem o sistema condutor.

#### 3.3.1 Caracterizações químicas

Esta seção apresenta as caracterizações químicas.

##### 3.3.1.1 Espectroscopia por Energia Dispersiva – EDS

As amostras foram submetidas ao Espectroscópio por Energia Dispersiva de Raios X (EDS), modelo SwiftED 3000, Localizado no LDSM, Laboratório de Seleção de Materiais, Escola de Engenharia.

### 3.3.1.2 Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As amostras foram analisadas em um espectrômetro marca PerkinElmer – Spectrum 100, localizado no Laboratório de Seleção de Materiais – LDSM, Escola de Engenharia, com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$ . Foram realizadas 16 varreduras por amostra, na região de  $4000$  a  $650\text{ cm}^{-1}$ . As amostras foram analisadas na forma original do produto da extrusão (Figura 20).

Figura 20: Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier



Fonte: A autora (2023).

## 3.3.2 Caracterizações físicas do material

Esta seção apresenta as caracterizações químicas físicas do material.

### 3.3.2.1 Análise Termogravimétrica – TGA

A técnica foi realizada em um aparelho TA modelo Q50, localizado no Laboratório de Polímeros Avançados, do Instituto de Química da UFRGS, sob atmosfera de nitrogênio, utilizando em torno de 10 mg de amostra, as quais foram submetidas a uma taxa de aquecimento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC

Para determinar a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), a temperatura de fusão ( $T_m$ ) e a temperatura de cristalização ( $T_c$ ), segmentos dos filamentos extrudados foram submetidos a DSC. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais

Cerâmicos – LACER, da UFRGS, em um equipamento da marca Shimadzu, modelo TGA-50, taxa de aquecimento de 10 °C/min, de 10 °C até 600 °C, sob atmosfera de nitrogênio.

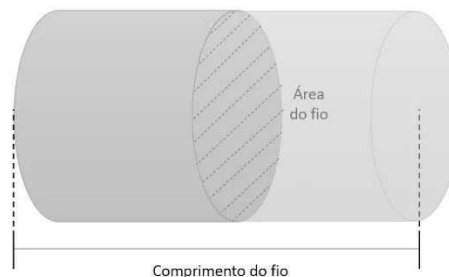
### 3.3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

As varreduras microscópicas foram feitas nas diferentes concentrações do PLA reciclado - PLA20, PLA25, PLA50 e PLA75-, no PLA virgem e no filamento condutor, em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM3000, do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, Escola de Engenharia, UFRGS.

### 3.3.3 Condutividade Elétrica

Para a realização das medições da capacidade condutiva de cada um dos materiais produzidos, foram produzidos dez corpos de prova de cada concentração, com as mesmas dimensões de diâmetro e comprimento. A padronização dos corpos de análise possibilita que a condutividade do material seja auferida, desconsiderando as variações volumétricas dos corpos avaliados.

Figura 21: Representação de segmento de filamento (40mm x 1,75mm)



Fonte: A autora (2023).

Os corpos de prova foram padronizados estabelecendo-se o tamanho de 40 mm de comprimento de segmento do filamento e 1,75 mm de diâmetro, conforme Figura 21. Por essas dimensões, calculou-se a área padrão dos corpos de prova. Os corpos de prova de cada material, após a padronização, foram submetidos a um mesmo circuito DC, e a uma mesma fonte de 1,5 V – uma pilha AA. Os valores de condutividade encontrados em cada um dos corpos foram apurados para as concentrações de 20%, 25%, 50% e 75%, e para o filamento condutor referência. Com



esses valores, apuramos a capacidade de transporte de campo elétrico do material, ou seja, a capacidade de condutividade de cada material (Tabela 2).

Tabela 2: Dimensões do filamento condutor reprocessado

Comprimento	<b>L = 40 mm</b>
Diâmetro	$\Phi = 1,75 \text{ mm}$
Raio Filamento	$r = 0,875 \text{ mm}$
Área Filamento	$2,4040625 \text{ mm}^2$

Fonte: A autora (2023).

O cálculo para determinar a área do filamento deu-se a partir da equação:

$$Area = 2\pi \cdot r^2 \quad (3)$$

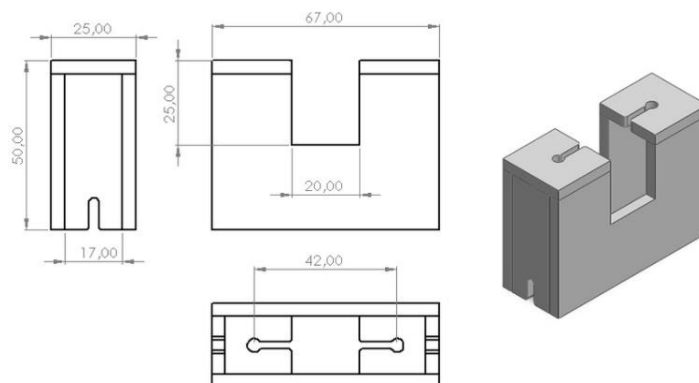
Os corpos de prova foram projetados com as dimensões conforme Tabela 3, o suporte padrão para os corpos de prova está demonstrado na Figura 22. O suporte foi construído em acrílico cortado à laser, no Laboratório de Modelos e Protótipos da Faculdade de Arquitetura, nas dimensões apresentadas na Tabela 3 e desenho descritivo, Figura 22.

Tabela 3: Dimensões corpos de prova

Face	Dimensões
<b>Altura total</b>	50 mm
<b>Largura lateral</b>	25 mm
<b>Largura frontal</b>	67 mm
<b>Distância entre conectores</b>	42 mm

Fonte: A autora (2023).

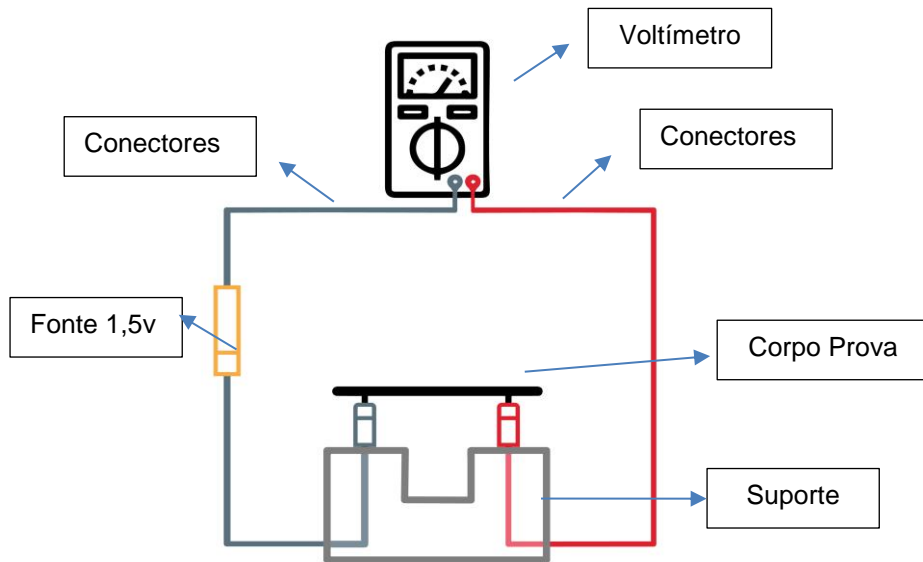
Figura 22: Suporte padrão para corpo de prova



Fonte: A autora (2023).

A prova de condutividade elétrica foi verificada em um circuito DC em paralelo, utilizando um multímetro como voltímetro, fazendo parte do circuito (Figura 23).

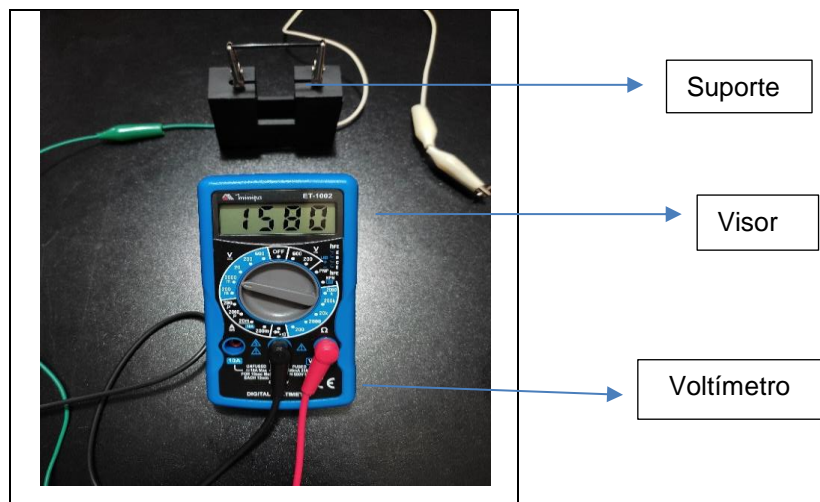
Figura 23: Circuito DC em paralelo



Fonte: A autora (2023).

Esse método é comum e também de simples aplicação. Conhecendo-se as dimensões do material, podemos fazer uma medida direta da condutividade elétrica medindo-se a diferença de potencial e a corrente elétrica que flui através da amostra sob a ação de um campo elétrico dc aplicado (Figura 24).

Figura 24: Registros de Medição de Resposta Elétrica



Fonte: A autora (2023)

## 4 RESULTADOS

Através das análises dos filamentos reciclados produzidos, aferiu-se a preservação das qualidades químicas, físicas e condutivas do material condutor no material reprocessado.

### 4.1 EXTRUSÃO MISTURAS

O processo de extrusão está sujeito a muitas variáveis que influenciam na qualidade final do produto extrudado, os perfis de temperatura nas zonas de aquecimento da extrusora são os responsáveis pela degradação dos polímeros que estão sendo extrudados. Temperaturas muito baixas provocam maior tensão de cisalhamento dentro da rosca, ao passo que temperaturas muito altas causam maior degradação no produto, bem como uma queda nas propriedades mecânicas do material (LAURO; FARIA JÚNIOR, 2019). Além disso, para o processo ser bem sucedido a secagem do material antes do procedimento é essencial tendo em vista que a presença de umidade dentro do polímero a ser processado é responsável pela degradação polimérica (LAURO; FARIA JÚNIOR, 2019).

Para obtenção dos filamentos reciclados, usou-se a técnica de reciclagem mecânica por extrusão, as temperaturas de 34 °C para zona 01, 85 °C na zona 02 e 110 °C na zona 03, com frequência de rotação oscilante entre 0 e 25 rpm. Foram realizadas quatro extrusões, uma para cada concentração de material e destas resultaram os conjuntos de corpos de prova com 40 mm de comprimento de segmento filamental, e 1,75 mm de diâmetro.

### 4.2 CARACTERIZAÇÕES QUÍMICAS

Esta seção apresenta as caracterizações químicas.

#### 4.2.1 Espectroscopia por energia dispersiva – EDS

As análises de EDS possibilitaram identificar os elementos químicos componentes do material matriz e do condutor, bem como dos materiais resultantes, reprocessados por extrusão, conforme demonstra a Tabela 4.

Nas análises de PLAv, PLA25, PLA50 e PLAc observa-se a presença de somente dois átomos: oxigênio e carbono. A técnica não permite a detecção do elemento hidrogênio, e, portanto, os resultados encontrados são compatíveis com os elementos que compõem a matriz de PLA cuja fórmula molecular é:

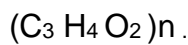


Tabela 4: Espectroscopia por Energia Dispersiva – EDS

%Concentração	% CO <sub>2</sub>	% O	%Na	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO
PLAv	79.677	20.32	Null	Null	Null	Null
PLA20	Null	25.814	74.186	Null	Null	Null
PLA25	27.292	72.708	Null	Null	Null	Null
PLA50	27.292	72.708	Null	Null	Null	Null
PLA75	Null	44.602	Null	13.013	21.765	20.620
PLAc	53.14	46.86	Null	Null	Null	Null

Fonte: A autora (2023).

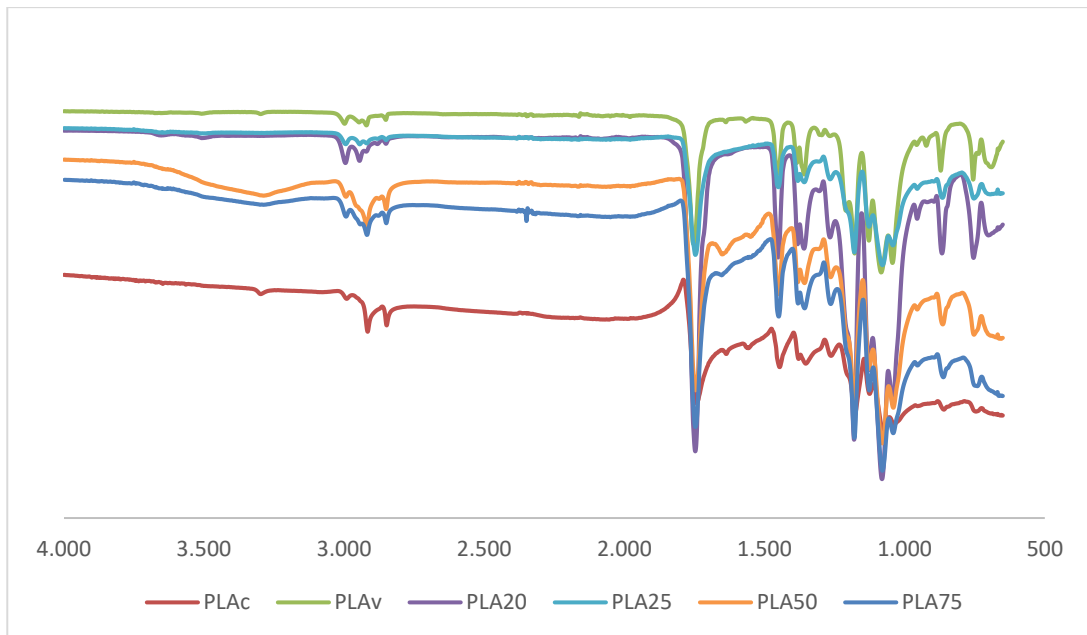
Além disso, a inobservância de outros elementos químicos em PLAv e em PLAc, indica que a matriz polimérica e o aditivo condutor, não apresentam contaminantes. Destacamos as ocorrências em PLA20, e em PLA75, onde temos 74,186% de Sódio (Na); 13.013% de Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e 21,765% de Óxido de Silício (SiO<sub>2</sub>), respectivamente. A presença de óxidos pode indicar a presença de aditivo polimérico, decomposto durante o processo de fusão. Elementos como o Silicato de Cálcio (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), Silicatos de Sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), a Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Calcites (CaCO<sub>3</sub>) são comumente utilizados no preparo de tintas, corantes, colas, elementos refratários e aglutinadores. A origem exata dos elementos necessita e aglutinadores. A origem exata dos elementos necessita um método de análise mais acurado da composição das amostras discordantes.

#### 4.2.2 Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR

A técnica de FTIR é amplamente utilizada para identificar os grupos funcionais presentes na estrutura orgânica de um material. No Gráfico 3, obtido por meio dessa técnica, é possível observar as variações na intensidade das bandas de absorção de infravermelho em relação ao número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ). Isso foi possível porque os átomos que compõem o material possuem frequências específicas que variam de acordo com a sua estrutura.

Essas variações são acompanhadas pelas mudanças no espectro de infravermelho, que abrange uma faixa de  $4000 \text{ cm}^{-1}$  a  $650 \text{ cm}^{-1}$ .

Gráfico 3: Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR ( $\text{cm}^{-1}$ )



Fonte: A autora (2023).

Os resultados verificados por regiões delimitadas nas curvas do espectro de Infravermelho, grupos funcionais e respostas vibracionais apresentadas nas caracterizações químicas por FTIR, conforme Tabela 5:

Tabela 5: Resultados da análise de FTIR por regiões delimitadas nas curvas

<b>Materiais</b>	<b>Região 1</b>	<b>Região 2</b>	<b>Região 3</b>	<b>Região 4</b>	<b>Região 5</b>
<b>PLAv</b>	2996	1745.36	1451	1180	867
	2945		1381	1128	755
<b>PLA20</b>	2995.63 2945.35	1747.36	1357	1079	955.67 866.92 754.42 701.03
			1041	1180.56	
			1451.83	1127.58	
			1381.80	1042.80	
<b>PLA25</b>	2995.63 2945.35	1747.36	1359.37	1180.56	955.67 866.92 754.42 701.03
			1266.45	1127.58	
			1451.83	1042.80	
			1381.80		
<b>PLA50</b>	3288.02 2919.27 2850.46	1745.96 1651.59	1357.36	1179.84	864.22 752.86
			1264.18	1126.92	
			1450.47	1040.56	
			1381.10		
<b>PLA75</b>	3288.02 2919.27 2850.46	1745.96 1651.59	1357.36	1179.84	864.22 752.86
			1264.18	1126.92	
			1450.47	1040.56	
			1381.10		
<b>PLAc</b>	2916.39 2848.67 2054.85	1743.91	1446.40	1177.91	859.97
			1353.09	1125.31	
			1262.87		

Fonte: A autora (2023).

Os picos contidos na faixa de valores na Região 1 correspondem ao estiramento -CH (grupo CH<sub>3</sub>). As bandas na Região 2 foram associadas ao estiramento carbonila (C=O) e ácido carboxilo (CO-O) do PLA. O intervalo observado na Região 3, de acordo com o padrão apresentado por Choksi e Desai (2017) (1375 cm<sup>-1</sup> a 1475 cm<sup>-1</sup>), está relacionado às vibrações de flexão CH<sub>3</sub>. Na Região 4, são encontrados espectros classificados como o estiramento C-O-C. A Região 5, apresenta uma banda em 867 cm<sup>-1</sup> que, segundo CUIFFO *et al.* (2017), equivale à vibração C-COO, e outra em 775 cm<sup>-1</sup>, contida no intervalo entre 733 e 756 cm<sup>-1</sup> descrito por Xu, Xie e Lei (2017) (como vibrações esqueléticas dos grupos metileno).

Os picos de absorção que o PLA original apresenta, mostram as frequências de alongamento de ligações características para C=O, em 1746, -CH 3 assimétrico, em 2995, -CH<sub>3</sub> simétrico, em 2946 e C-O, em 1080 cm<sup>-1</sup>, respectivamente.

As frequências de flexão para -CH 3 assimétrico e -CH 3 simétrico foram identificadas em 1452 e 1361 cm<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para todos os materiais obtidos, os espectros são similares aos materiais utilizados, não sendo observadas variações significativas após o processamento por extrusão das misturas. Afere-se que não há nenhuma nova ligação formada ou interação química dentro das misturas.

Todas essas bandas são características da função éster na estrutura química do PLA. A ausência de uma banda intensa na região 3500- 3000  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento do grupamento O-H) é um indicativo da ausência de subprodutos de hidrólise do PLA (DRUMMOND; WANG; MOTHÉ, 2004), sugerindo que as condições de fabricação utilizadas não alteraram os grupos funcionais presentes e não promoveram deslocamentos que permitam identificar modificações químicas e a presença de agentes contaminantes nos polímeros.

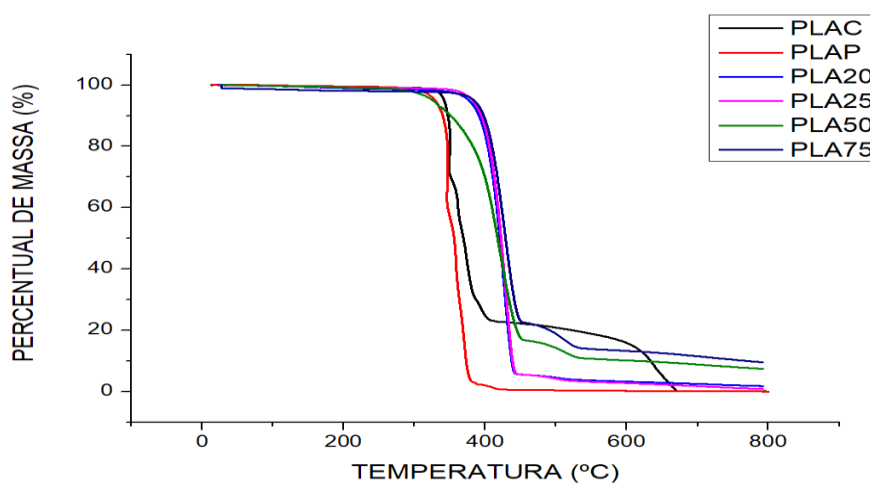
### 4.3 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS

Inicialmente são apresentados os resultados da análise de TGA realizada nos materiais virgens e nos extrudados. Com base nas curvas resultantes, as quais relacionam a variação do percentual de massa em função da temperatura, foram observadas as temperaturas de decomposição dos materiais. Em seguida, por meio da análise de DSC, auferiu-se as temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) e de fusão ( $T_m$ ).

#### 4.3.1 Análise Termogravimétrica – TGA

A partir das curvas da TGA, conforme Gráfico 4 e Tabela 6, foram obtidas as temperaturas de degradação das amostras.

Gráfico 4: Análise Termogravimétrica – TGA



Fonte: A autora (2023).

Na análise termogravimétrica o PLAv, PLA20, PLA25 apresentam mesmo desenho de curva de decomposição, com temperaturas de degradação de 375,18°C, 447,92°C e 449,12°C, respectivamente. A presença de aditivo condutor em PLA20 e PLA25 eleva a temperatura de degradação para a faixa de 450°C, em comparação a faixa de 400°C apresentada por PLAv. Todos os materiais possuem estabilidade térmica até os 300°C.

Em PLAc a curva de decomposição térmica apresenta uma faixa de manutenção de volume de massa do material, na faixa de 400°C e 600°C, onde retorna a perda de massa da amostra.

Para PLA50 e PLA75, a curva de manutenção de massa também se repete, contudo em uma faixa mais estreita de temperatura, entre 450°C e 500°C. Na Tabela 6, os valores estão impressos em graus Celsius.

Tabela 6: Análise Termogravimétrica – TGA

<b>Material</b>	<b>T max degr °C</b>	<b>T 10% °C</b>
<b>PLAv</b>	375,18	373,90
<b>PLA20</b>	447,92	391,47
<b>PLA25</b>	449,12	394,81
<b>PLA50</b>	457,99	351,24
<b>PLA75</b>	456,57	397,81
<b>PLAc</b>	422,68	371,56

Fonte: A autora (2023).

#### 4.3.2 Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC

Através da DSC, foram determinadas as temperaturas de transição vítrea (Tg) e de fusão (Tm), demonstradas na Tabela 7 e no Gráfico 5 onde os valores estão impressos em graus Celsius.

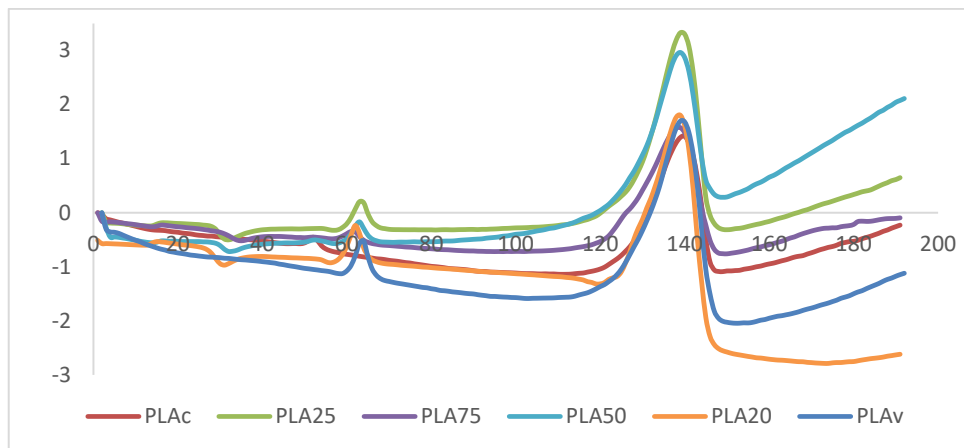
Tabela 7: Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC

<b>Material</b>	<b>Tg °C</b>	<b>Tm °C</b>
<b>Plav</b>	63	139
<b>PLA20</b>	62	138
<b>PLA25</b>	63	139
<b>PLA50</b>	64	140
<b>PLA75</b>	62	138
<b>PLAc</b>	53	139

Fonte: A autora (2023).



Gráfico 5: Calorimetria Exploratória Diferencial – DSC



Fonte: A autora (2023).

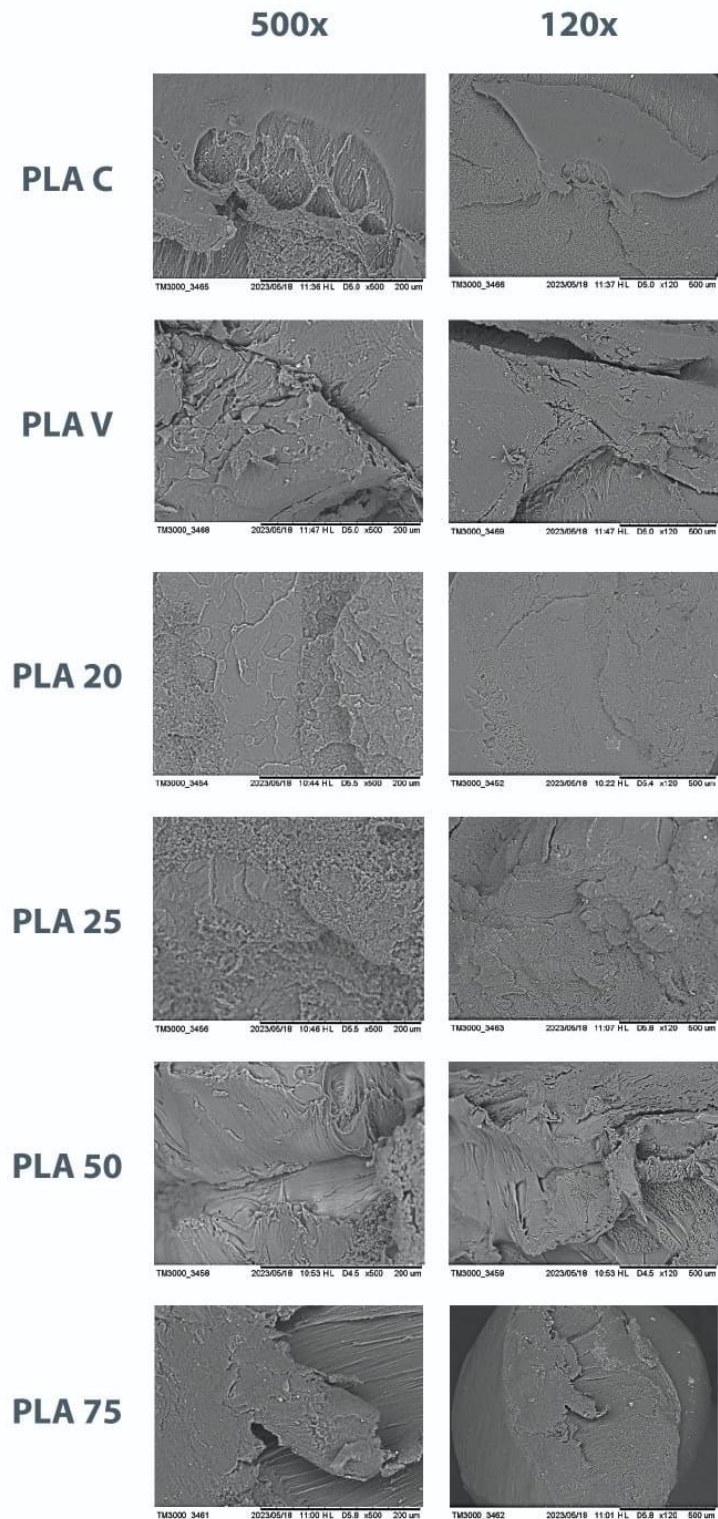
No Gráfico 5, estão representados os termogramas de DSC obtidos para o PLA, tanto na forma de filamento inicial quanto nas concentrações reprocessadas por extrusão. Os resultados da análise estão sumarizados na Tabela 7. A partir das informações obtidas com os materiais em sua forma inicial, foi possível identificar o PLA como um polímero semicristalino.

As temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) e de fusão ( $T_m$ ) do filamento de PLA encontradas foram 63 °C e 139 °C, respectivamente. Esses valores estão próximos aos relatados por Santana *et al.* (2018) que encontraram uma  $T_g$  de aproximadamente 65 °C para filamentos de PLA pigmentados e 62 °C para um filamento virgem, e uma  $T_m$  entre 174 °C e 175 °C para os filamentos coloridos e 158 °C para o filamento virgem (CHIENG *et al.*, 2014). Esses estudos também caracterizaram o material resultante do reprocessamento, com uma  $T_g$  igual a 61 °C e uma  $T_m$  de 168 °C.

#### 4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura é a identificação visual que gera imagens detalhadas da superfície do material. Na Figura 25, imagens realizadas da seção de topo dos materiais extrudados, as análises possibilitaram uma visualização microscópica oportunizada por elétrons retroespalhados, obtidas por aproximação de 500x, 120x e 100x. Em todas foram identificadas a existência de planos de clivagem, formados na fratura do filamento reciclado, o que evidencia a fragilidade do material reprocessado.

Figura 25: Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura



Fonte: A autora (2023).

O conjunto de imagens apresenta uniformidade na aparência dos materiais estudados. As ocorrências no interior dos materiais foram discretas sem aparecimento

de bolhas ou falhas. Estas características evidenciam a não degradação do material durante o reprocessamento.

Nos materiais PLAc, PLA50 e PLA 75 a sessão de Topo apresentou aparência de fratura tenaz devido à presença de plastificantes e aditivos dos materiais utilizados, já em PLAv, pela 20, pela 25 a sessão observamos aparência de fratura frágil na sessão de topo.

Todo o grupo de imagens apresentou sinais de quebra de material resultado do modo de preparo da amostra, cortado com tesoura.

#### 4.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Esta seção apresenta a condutividade elétrica.

##### 4.4.1 Voltimetria - Circuito DC 1,5v

Dentro de cada uma das extrusões, dentro da mesma concentração, existem segmentos de filamento que respondem eletricamente e segmentos que não respondem eletricamente (Gráfico 6). Esse fenômeno foi ocasionado pela baixa uniformidade das misturas, já que o processo não permite o controle preciso das variáveis envolvidas: temperatura material, temperatura da rosca de extrusão e velocidade de rotação do eixo. A resposta elétrica é oscilante dentro das zonas de condução positiva.

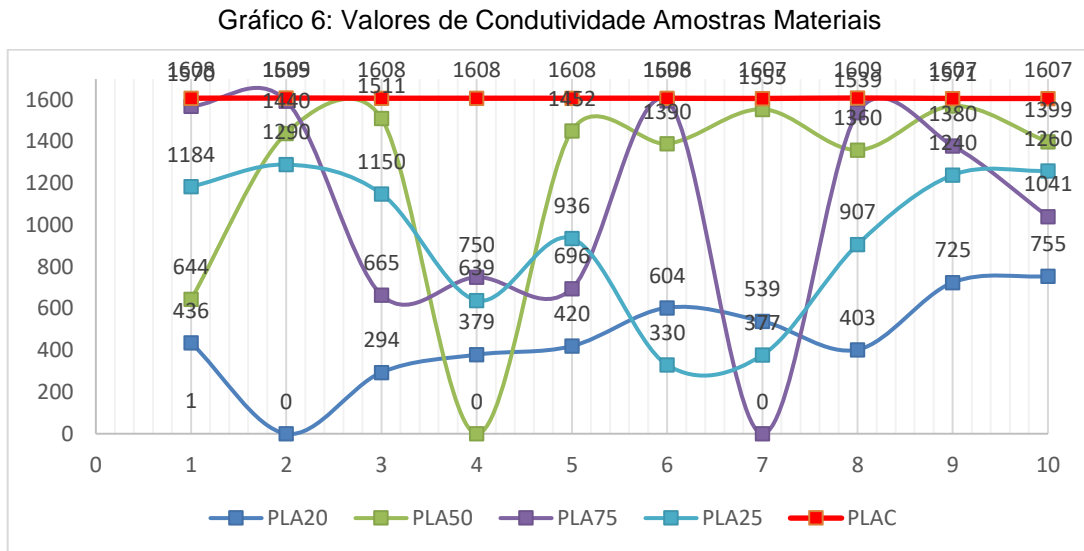
Na Tabela 8, apresentamos os valores da corrente em cada um dos corpos de prova, expressos em mV.

Tabela 8: Condutividade elétrica

<b>Material</b>	<b>PLA20</b>	<b>PLA25</b>	<b>PLA50</b>	<b>PLA75</b>	<b>PLAc</b>
<b>Amostra 01</b>	436	1184	644	1570	1608
<b>Amostra 02</b>	Null	1290	1440	1595	1609
<b>Amostra 03</b>	294	1150	1511	665	1608
<b>Amostra 04</b>	379	639	Null	750	1608
<b>Amostra 05</b>	420	936	1452	696	1608
<b>Amostra 06</b>	604	330	1390	1596	1608
<b>Amostra 07</b>	539	377	1555	Null	1607
<b>Amostra 08</b>	403	907	1360	1539	1609
<b>Amostra 09</b>	725	1240	1571	1380	1607
<b>Amostra 10</b>	755	1260	1399	1041	1607

Fonte: A autora (2023).

Os valores de condutividade registrados pelas amostras dos diferentes materiais, não mantêm entre si, relações de ocorrência. Os valores registrados, correspondem ao primeiro valor indicado pelo voltímetro do circuito DC, de 1,5v.



Fonte: A autora (2023).

Os valores foram incluídos na tabela 8, por ordem de ocorrência, o que explica a curva oscilante e aleatória obtida no Gráfico 6, onde valores expressos estão em mV.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção apresenta a conclusão e as sugestões de futuros trabalhos.

### 5.1 CONCLUSÃO

O material reprocessado apresentou propriedades térmicas semelhantes às descritas na literatura e não foi observada a presença de contaminantes no material a partir das análises de FTIR e EDS.

Quanto às características térmicas aferidas por DSC e TGA, os valores foram compatíveis com os polímeros originários, sem apresentar alterações do perfil térmico.

O material reprocessado apresenta características químicas, aferidas por EDS e FTIR, compatíveis com os polímeros originários, sem alterações na composição química.

O material reprocessado apresenta resposta de condutividade elétrica, medida por voltímetro, nas apresentações de PLA20, PLA25, PLA50, PLA75.

O material reprocessado apresenta espectros FTIR similares aos materiais utilizados, não sendo observadas variações significativas após o processamento por extrusão das misturas.

### 5.2 SUGESTÕES DE FUTUROS TRABALHOS

- a) Avaliar o processo de homogeneização química no ciclo de reciclagem do PLA condutor elétrico;
- b) Avaliar quimicamente o compósito condutor presente no PLA condutor elétrico.
- c) Avaliar outros métodos de granulometria e mistura das fases condutora e matriz no ciclo de reciclagem do PLA condutor elétrico.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Jessica *et al.* A design tool to diagnose product recyclability during product design phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 219-229, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.074 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616314159?via%3Di> hub. Acesso em: 23 ago. 2022.
- AGUIRRE, Edgar *et al.* Poly (lactic acid) —Mass production, processing, industrial applications, and end of life. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v.107, p. 333-366, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X16300965?via%3Di> hub#!. Acesso em: 01 set. 2022.
- ALLIONE, Cristina *et al.* From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. **Energy**, v. 39, p. 90-99, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544211005950?via%3Di> hub. Acesso em: 28 ago. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D149**: Standard Test Method For Dielectric Breakdown Voltage And Dielectric Strength Of Solid Electrical Insulating Materials At Commercial Power Frequencies USA: ASTM. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D257**: Standard Test Method for DC Resistance or Conductance of Insulating Material. USA: ASTM. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D2579**: Standard Test Methods for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Under Direct-Voltage Stress. USA: ASTM. 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM E2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry ASTM, 2021.
- ANDRADE, João Carlos de. Bases de Dados Espectrais e Ferramentas de Software para Ensino e Pesquisa Acadêmica. **Revista de Química Industrial**, Rio de Janeiro, p. 17, 2010. Disponível em: <http://www.abq.org.br/rqi/2010/727/RQI-727-pagina17-Bases-de-Dados-Espectrais-e-Ferramentas-de-Software-para-Ensino-e-Pesquisa-Academica.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2022.
- ASHBY, Michael; JOHNSON, Kara. **Materiais e design**: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- BANERJEE, Debjani. Experimental techniques in thermal analysis thermogravimetry (TG) & differential scanning calorimetry (DSC). **Analytical Proceedings**, v. 12. 1993. Disponível em: <https://www.iitk.ac.in/che/pdf/resources/TGA-DSC-reading-material.pdf>. Acesso em: 03 set. 2022.

BECKER, Daniela *et al.* Estudo da morfologia e condutividade elétrica de blendas de poli ácido láctico, polianilina e nanotubo de carbono. In: SIC UDESC, n. 25, 2015, Florianópolis: UDESC, 2015. Disponível em: [https://www1.udesc.br/arquivos/id\\_submenu/2252/68.pdf](https://www1.udesc.br/arquivos/id_submenu/2252/68.pdf). Acesso: 16 ago. 2022.

BOEIRA, Alexandre Pitol; BECK, Daniel. **Tecnologia dos Materiais**. Passo Fundo: Ministério da Educação Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas - RS, 2007. Disponível em: [http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2\\_Mecatr%C3%B4nica/Materiais\\_1\\_Meca\\_2/Tecnologia%20dos%20Materiais\\_Complementar.pdf](http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatr%C3%B4nica/Materiais_1_Meca_2/Tecnologia%20dos%20Materiais_Complementar.pdf). Acesso em: 13 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2 ago. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 15 mar. 2023.

CÂNDIDO, Luis Henrique Alves. **Estudo do ciclo de reciclagem de materiais em blendas acrilonitrila-butadieno-estireno/policarbonato**. 129 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CAO, Yong *et al.* Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers. **Nature**, v. 357, p. 477- 479, 1992. Disponível em <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/chin.199302284> Acesso em: 29 ago. 2022.

CANEVAROLO, Sebastião Vicente. **Técnicas De Caracterização de Polímeros**. 3. ed. São Paulo: Artiber, 2017.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering**: na introduction. 10th. ed. The University of Iowa, 2018. Disponível em: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwish%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Introduction%20by%20William%20D.%20Callister,%20Jr.,%20David%20G.%20Rethwish%20(z-lib.org).pdf). Acesso em: 18 abr. 2023.

CHIENG, Buong Woei *et al.* SettingsOrder Article Reprints Open AccessArticle Epoxidized Vegetable Oils Plasticized Poly (lactic acid) Biocomposites: Mechanical, Thermal and Morphology Properties. **Molecules**, [s. l.], v. 19, n. 10, p. 16024-16038, 8 out. 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/19/10/16024>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHOKSI, Nikita; DESAI, Hemangi. Synthesis of Biodegradable Polylactic Acid Polymer By Using Lactic Acid Monomer. **International Journal of Applied Chemistry**, Índia, v. 13, n. 2, p. 377-384, 2017. Disponível em: [http://www.ripublication.com/ijac17/ijacv13v2\\_19.pdf](http://www.ripublication.com/ijac17/ijacv13v2_19.pdf). Acesso em: 16 fev. 2023.

CORBION. **Corbion**. Holanda: Corbion, [202-]. Disponível em: <https://www.corbion.com/>. Acesso em: 16 fev. 2021.

CUIFFO, Michael Arthur *et al.* Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) **Chemistry and Structure. Applied Sciences**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 579, 4 jun. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dpWDvBJzSXYtzbKnJdDqHVg/?lang=pt&format=html#>. Acesso em: 17 abr. 2023.

DICIONÁRIO PORTO EDITORA. **Dicionário da Língua Portuguesa**: Infopedia, Porto: Porto Editora, 2023. Disponível em: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/percolar>. Acesso em: 18 abr. 2023.

DONATO, Laryssa de Almeida; BARBOSA, Maria de Fátima Nóbrega; BARBOSA, Erivaldo Moreira. Reciclagem: o caminho para o desenvolvimento sustentável. **Polêmica**, [s. l.], v. 15, n. 2, 2015. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/polemica/article/view/17838>. Acesso em: 18 abr. 2023.

DRUMMOND, W. S.; WANG, S. H.; MOTHÉ, C. G. Síntese e caracterização do copolímero poli (Ácido Láctico-B-Glicol Etilênico). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 74-79, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/QYWkx6y8jHsPQgzknmFTRgt/?lang=pt>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy** : an economic and business rationale for an accelerated transition. Reino Unido: Seacourt, v. 1, 2013. Disponível em: [https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport\\_McKinsey-Towards\\_A\\_Circular\\_Economy.pdf](https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf). Acesso em: 05 abr. 2023.

GIROTTI, Emerson M. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 639-647, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/PxrHmw3ywzdDRJpymSZ55Pr/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

HEEGER, Alan. Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 105, n. 36, p. 8475–8491, 2001. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jp011611w>. Acesso em: 20 ago. 2022.

HELERBROCK, Rafael. Condutividade. **Brasil Escola**, 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/condutividade.htm>. Acesso em: 18 fev. 2023.

HUANG, Yao *et al.* Conductive Polymer Composites from Renewable Resources: An Overview of Preparation, Properties, and Applications. **Polymers**: (Basel), [s. l.], v. 11, n. 2, p. 187, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30960171/>. Acesso em: 03 jul. 2021.



INSTITUTO AKATU. Akatu. **Pesquisa Vida Saudável e Sustentável**. [S.l.]. Instituto Akatu, 2022. Disponível em: <https://akatu.org.br/pesquisa-vida-saudavel-e-sustentavel-2022/>. Acesso em: 16 mar. 2023.

KARLSSON, Reine; LUTTROPP, Conrad. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15-16, p. 1291-1298, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652605002374>. Acesso em: 05 mar. 2023.

KHAN, Shahid Ali *et al.* Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization. **In book: Handbook of Materials Characterization**. Publisher: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, p. 317-344, 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/327779563\\_Fourier\\_Transform\\_Infrared\\_Spectroscopy\\_Fundamentals\\_and\\_Application\\_in\\_Functional\\_Groups\\_and\\_Nanomaterials\\_Characterization](https://www.researchgate.net/publication/327779563_Fourier_Transform_Infrared_Spectroscopy_Fundamentals_and_Application_in_Functional_Groups_and_Nanomaterials_Characterization). Acesso em: 01 set. 2022.

LAURO, Arthur Morerira; FARIA JÚNIOR, Max Araújo. **Estudo para viabilidade técnica de produção de filamento reciclado de PLA e PET para impressão 3D**. 2019. 102 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - UnB, Brasília, 2019. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/24854>. acesso em: 04 maio 2023.

MALISKA, Ana Maria. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. [s.d.]. Apostila. Disponível em [http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV\\_Apostila.pdf](http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf). Acesso em: 22 ago. 2022.

MAMUNYA, Yevgen. P. *et al.* Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. **European Polymer Journal**, Kidlington, v. 38 n. 9, p. 1887-1897, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014305702000642?via%3Dihub>. Acesso em: 15 abr. 2022.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **Design for Environmental Sustainability**. Londres, Springer-Verlag, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84800-163-3>. Acesso em: 27 ago. 2022.

MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. 4. ed. São Paulo: Edusp, 2016.

MARIS, Joachim *et al.* Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. **Polymer degradation and stability**, v.147, p. 245-266, 2018.

MATTIODA, Rosana Adami. **Estratégias da dimensão social na concepção de produtos sustentáveis**. 2017. 206 f. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. **Coleta Seletiva Cidadã**. [S. I.], 2022. Disponível em: [https://sinir.gov.br/perfis/coleta\\_seletiva\\_cidada/](https://sinir.gov.br/perfis/coleta_seletiva_cidada/). Acesso em: 23 jan. 2023.

NATUREWORKS. **How ingeo is made**. 2022. Disponível em: <https://www.natureworksllc.com/What-is-Ingeo/How-Ingeo-is-Made>. Acesso em: 29 ago. 2022.

NAVEIRO, Ricardo M.; PACHECO, Elen. B. A. V.; MEDINA, Heloísa D. V. Ecodesign: O desenvolvimento de projeto de produto orientado para reciclagem. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 5., 2005. **Anais [...]**. Curitiba, 2005. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2005/CAC00050006.pdf> Acesso em: 13 abr. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Nações Unidas Brasil. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [S.I.]. Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 07 abr. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **NAS3**: Eficiência de Recursos e Prevenção e Gestão da Poluição. Washington: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 2017. Disponível em: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/837721522762050108-0290022018/original/ESFFramework.pdf#page=53&zoom=80>. Acesso em: 07 abr. 2023.

PAPANEK, Victor. **Design for the Real World**: Human Ecology and Social Change. 2. ed. Chicago: Chicago Review Press, 2005.

PAZMINO, Ana Verónica. Uma reflexão sobre Design Social, Eco Design e Design Sustentável. . In: I INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE DESIGN | I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 1., 2007, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: UFPR, 2007. Disponível em: [https://www.academia.edu/10897848/Uma\\_reflex%C3%A3o\\_sobre\\_Design](https://www.academia.edu/10897848/Uma_reflex%C3%A3o_sobre_Design). Acesso em: 03 mar. 2023.

PLATCHECK, Elizabeth Regina. **Design industrial**: metodologia de ecodesign para o desenvolvimento de produtos sustentáveis. São Paulo: Atlas, 2012.

POWER ENGINEERING SOCIETY OF THE INSTITUTE OF ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement**. IEEE Std 118-1978, IEEE Standards Board, 1978. Disponível em: [https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab12/IEEEstd\\_118.pdf](https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab12/IEEEstd_118.pdf). Acesso em: 20 ago. 2023.

PROTO-PASTA. Protopasta. **Electrically Conductive Composite PLA**. Canadá: GHS compliance, 2018. Protoplant Inc. Disponível em: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/CFP1xxxx\\_SDS.pdf?1992606272897634343](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/CFP1xxxx_SDS.pdf?1992606272897634343). Acesso em: 10 set. 2021.

PUD, Alexander *et al.* Some aspects of preparation methods and properties of polyaniline blends and composites with organic polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 28, 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/303249376\\_Progress\\_in\\_Polymer\\_Science](https://www.researchgate.net/publication/303249376_Progress_in_Polymer_Science). Acesso em: 30 ago. 2022.

QUEIROZ, José Renato Cavalcanti *et al.* Métodos de caracterização de materiais para pesquisa em odontologia. **Revista da Faculdade de Odontologia**, Passo Fundo, v.17, n.1 jan./abr. 2012. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/rfo/article/view/1868>. Acesso em: 03 set. 2022.

SALA, Oswaldo. **Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho**. 2. ed. São Paulo: Ed UNESP, 2008.

SANTANA, Leonardo *et al.* Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dpWDvBJzSXYtzbKnJdDqHVg/?lang=pt&format=html#>. Acesso em: 17 abr. 2023.

SIGMAALDRICH. Merk. **Darmstadt, Alemanha**: Merck KGaA, 2022. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/search/pla?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=pla&type=product>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SILVA, Mariana M. *et al.* Polylactic Acid/Carbon Nanoparticle Composite Filaments for Sensing. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 6, 9 mar. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/6/2580>. Acesso em: 20 mar. 2023.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI, Marco Aurelio de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, ano 2005, v. 28, n. 1, 1 fev. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bTLkNHWGnpsj4SWWjgLB49L/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

STJ. Supremo Tribunal de Justiça. **Agenda 2030**. Brasil: STJ, 2021. Disponível em: <https://agenda2030.stj.jus.br/sobre-a-agenda-2030/>. Acesso em: 07 abr. 2023.

UNIFESP. **Brasil é destaque em ranking internacional das universidades mais sustentáveis do mundo**. 2022. On line. Disponível em: <https://souciencia.unifesp.br/destaques/universidade-em-pauta/brasil-e-destaque-em-ranking-internacional-das-universidades-mais-sustentaveis-do-mundo>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VIEIRA, Maria Eduarda Martins *et al.* Espectroscopia dispersiva de energia de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. **Research, Society and Development**, v.10, n.10, 2021. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Espectroscopia-de-energia-dispersiva-de-raios-X-ao-Vieira-Silva/e3be4b201c478362d12841076ceccbfc481405ea>. Acesso em: 20 out. 2022.

WANG, Jizhe *et al.* Thermoelectric and mechanical properties of PLA/Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> composite wires used for 3D printing. **Composites Science and Technology**, v. 157, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353817327823>. Acesso em: 28 ago. 2022.

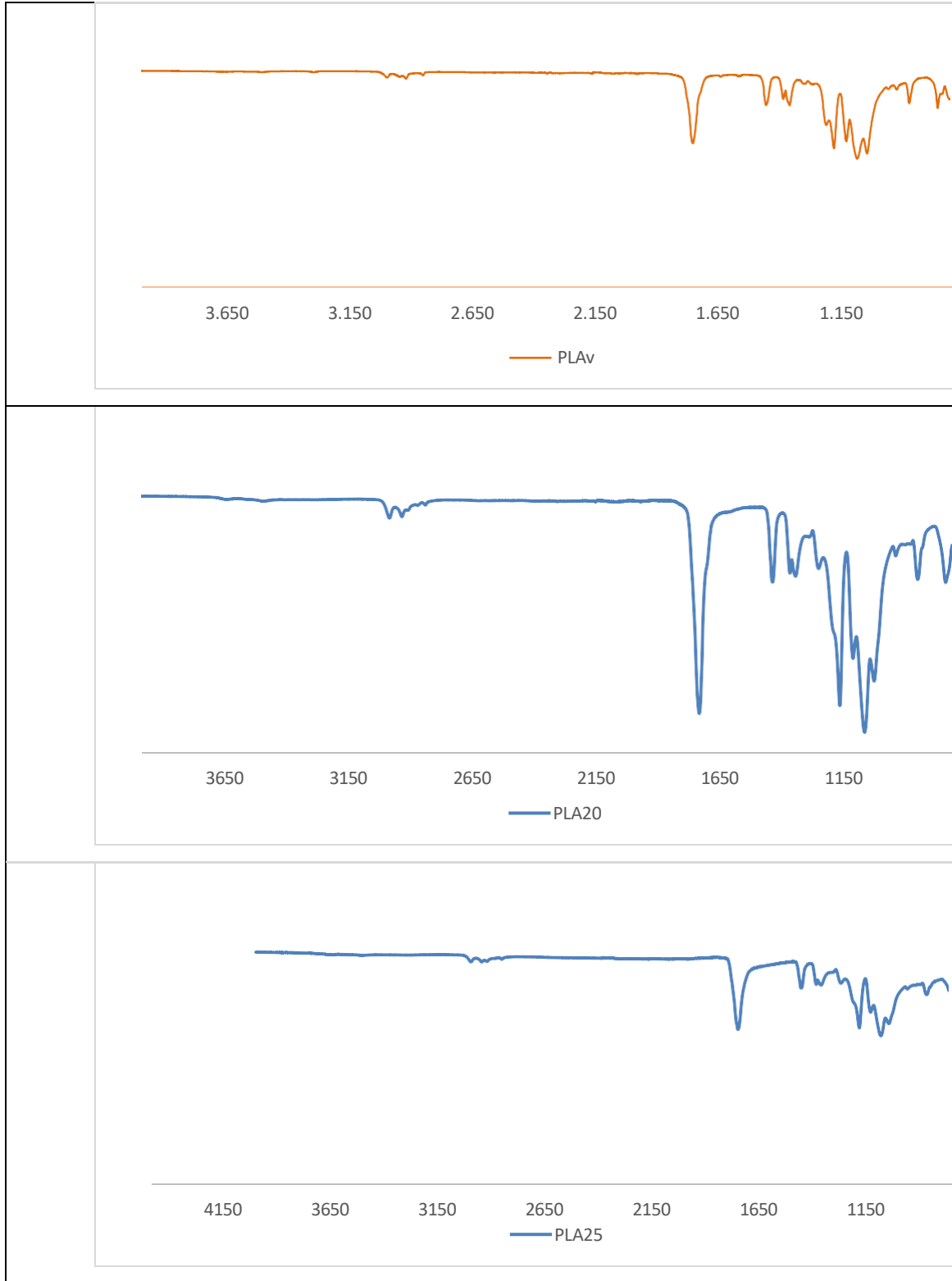
WILEY SCIENCE SOLUTIONS. **Sciencesolutions.wiley**. IR Spectral Databases. EUA: John Wiley & Son, 2022. Disponível em: <https://sciencesolutions.wiley.com/solutions/technique/ir/>. Acesso em: 05 ago. 2022.

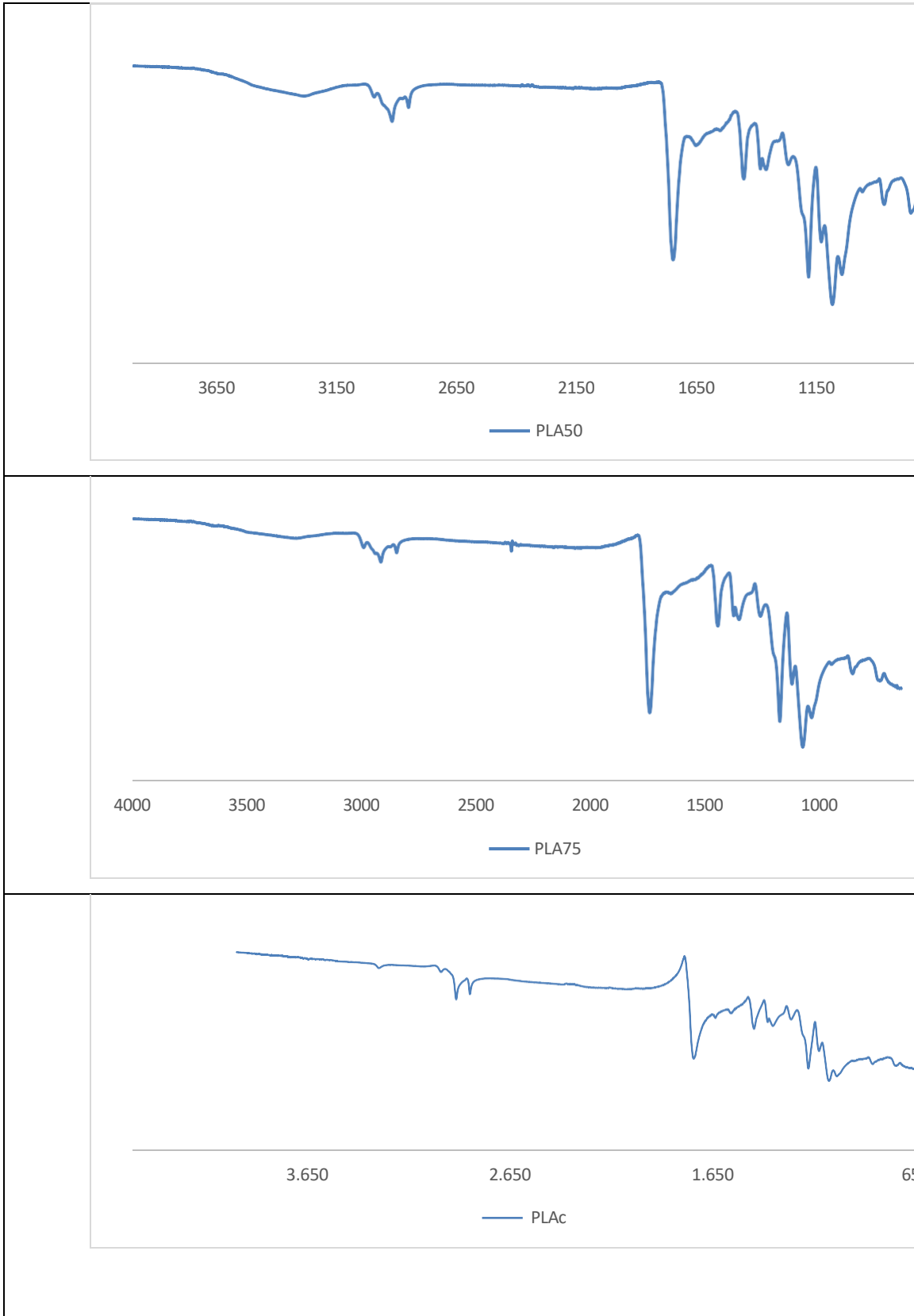
XIE, Lan; ZHU, Yutian. Tune the phase morphology to design conductive polymer composites: A review. **Polymer Composites**, v. 39, n. 9, p. 2985-2996, 2018. Disponível em: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.24345>. Acesso em: 25 ago. 2022.

XU, R.; XIE, J.; LEI, C., Influence of melt-draw ratio on the crystalline behavior of a polylactic acid cast film with a chi structure. **RSC Advances**, v. 7, n. 3, p.39914-39921, Aug. 2017.

## APÊNDICE A – ANÁLISES DE FTIR

Gráficos FTIR individualizados

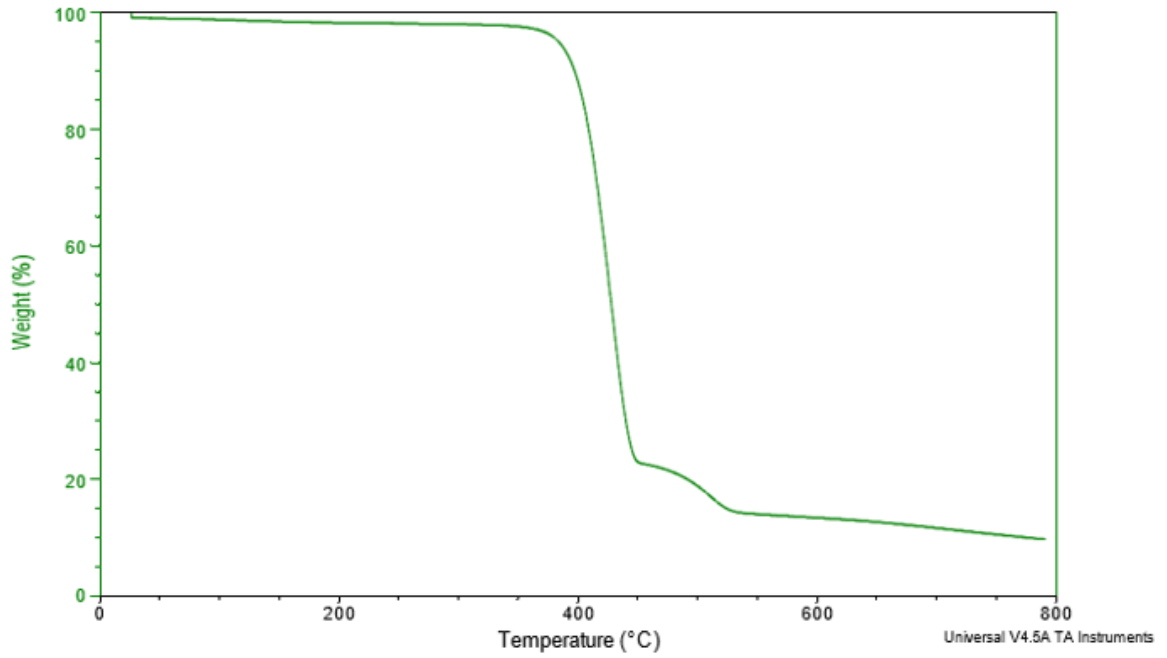




### APÊNDICE B – ANÁLISES DE TGA

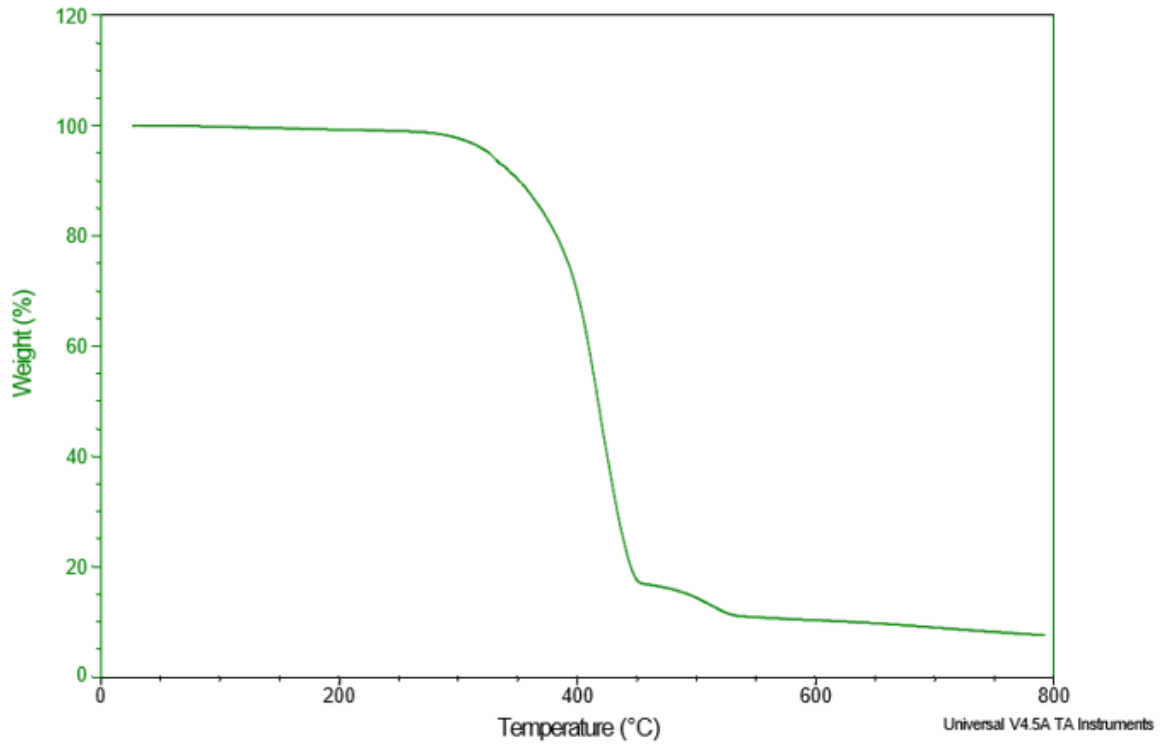
Sample: PLA75

TGA



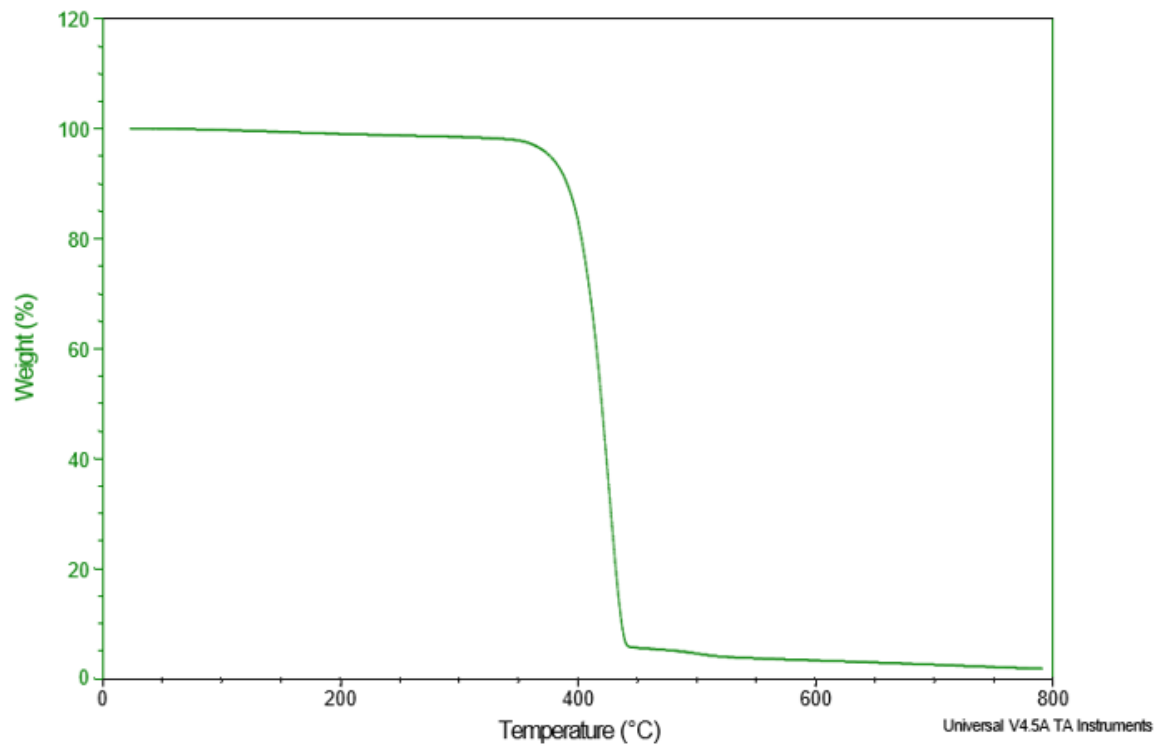
Sample: PLA50

TGA



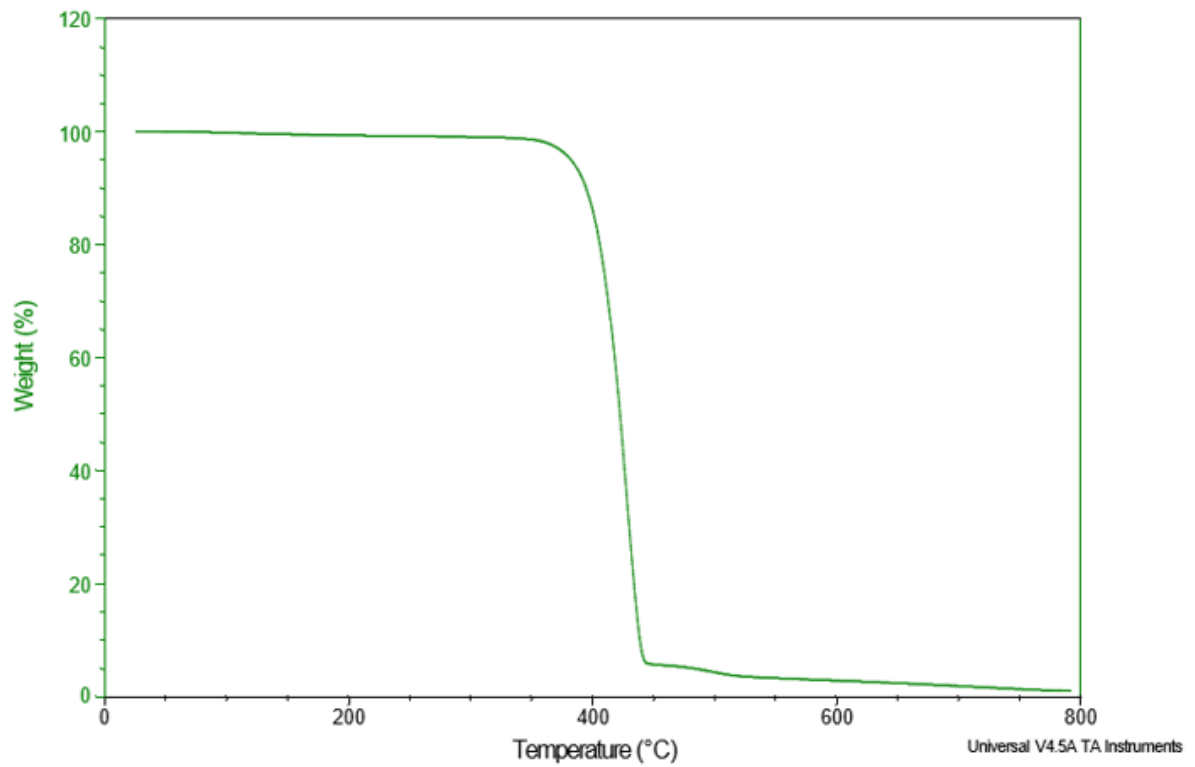
Sample: PLA20

TGA



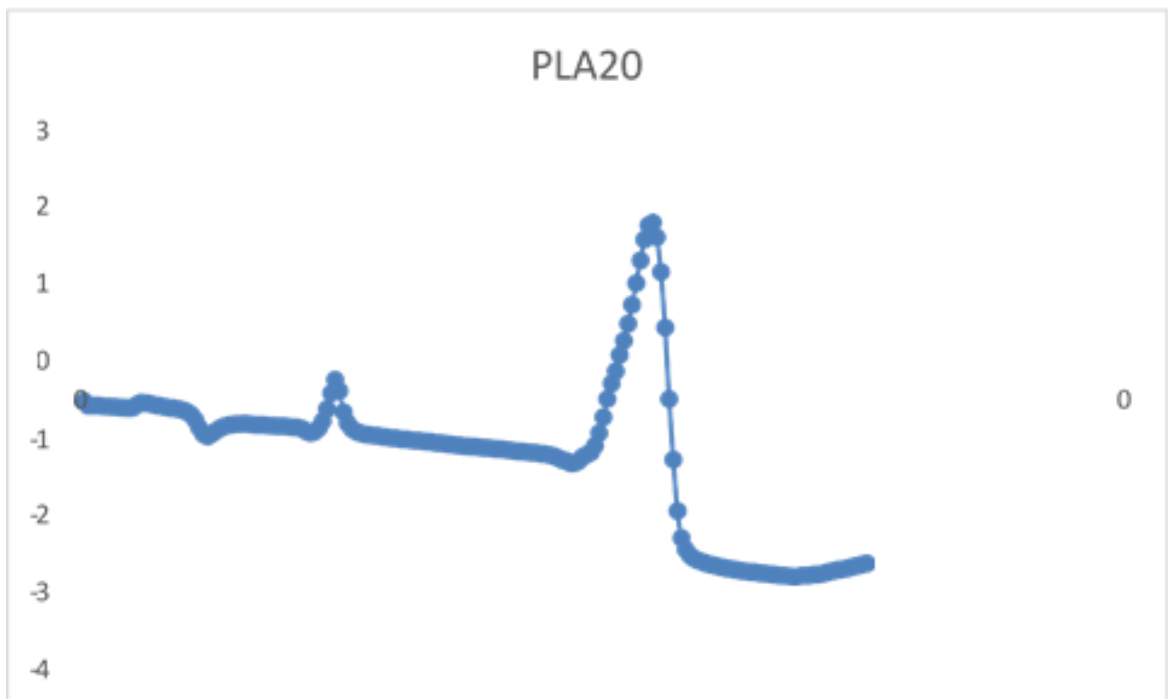
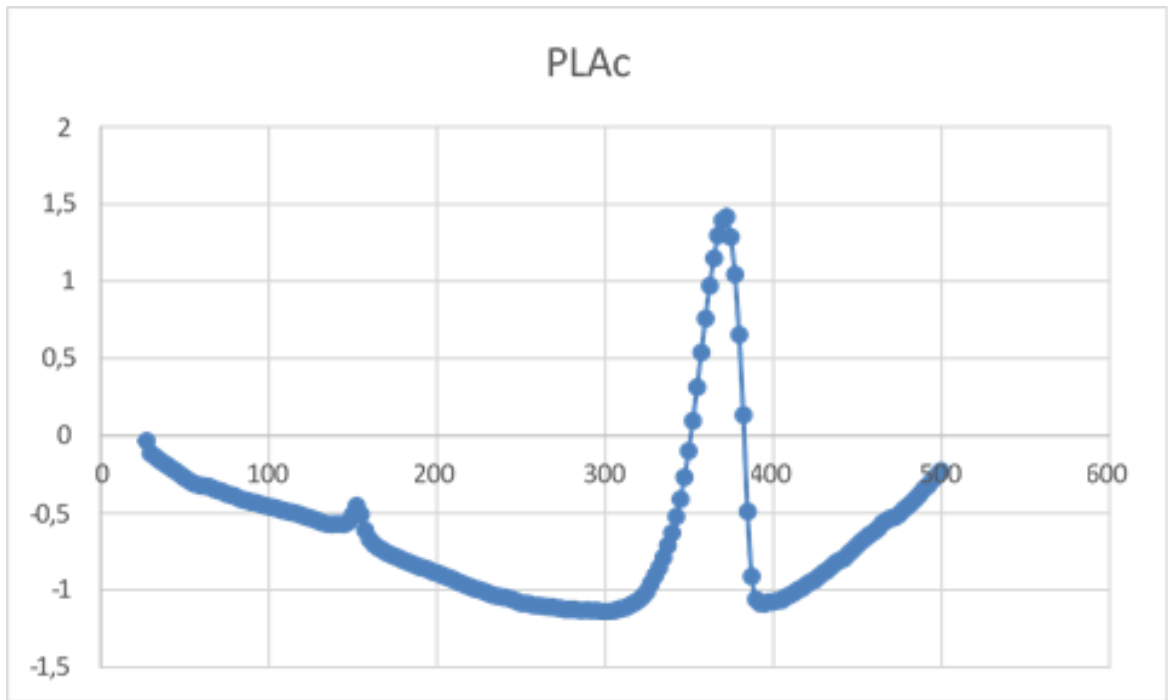
Sample: PLA25

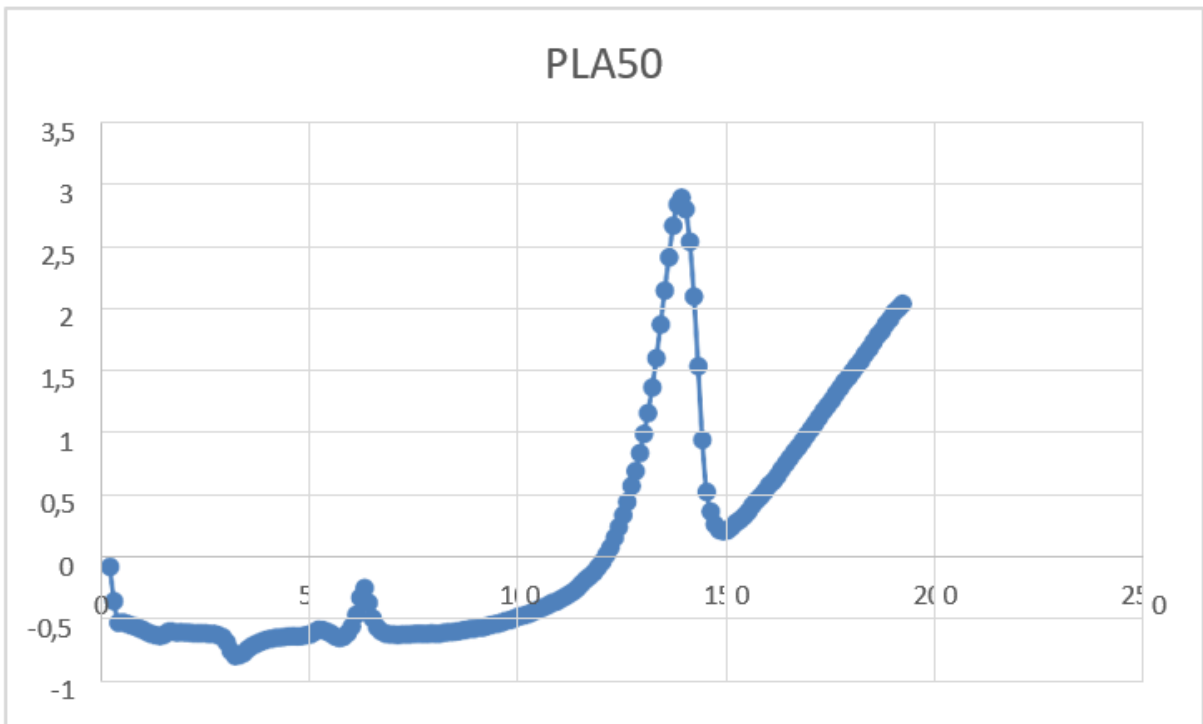
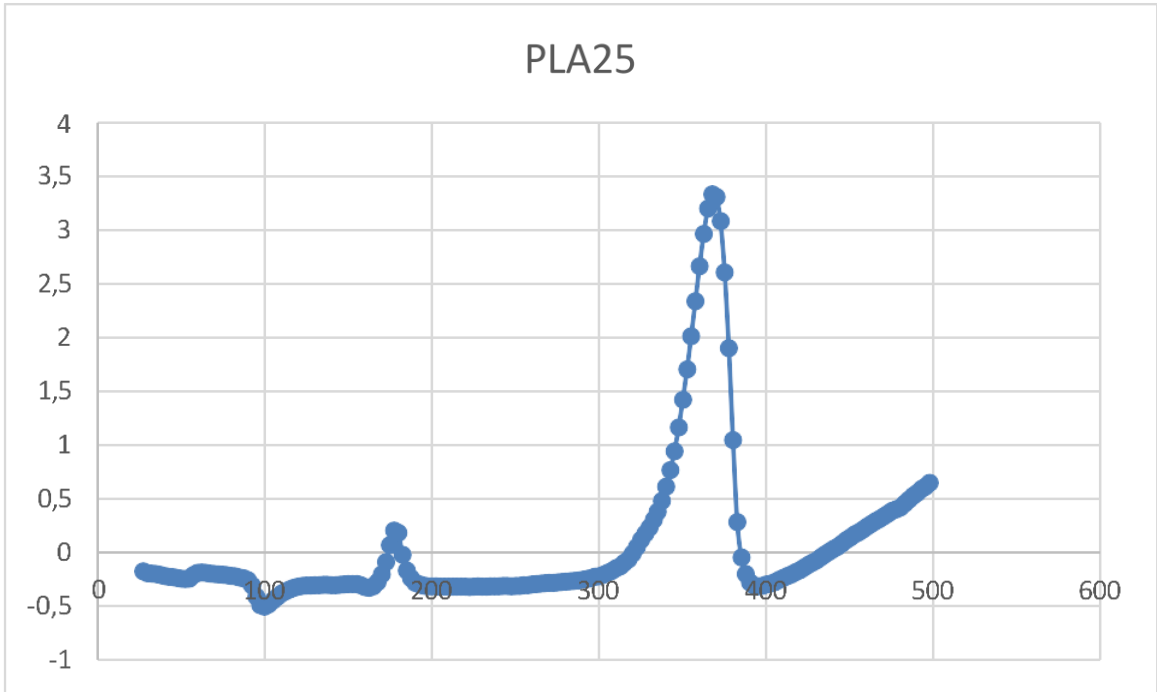
TGA

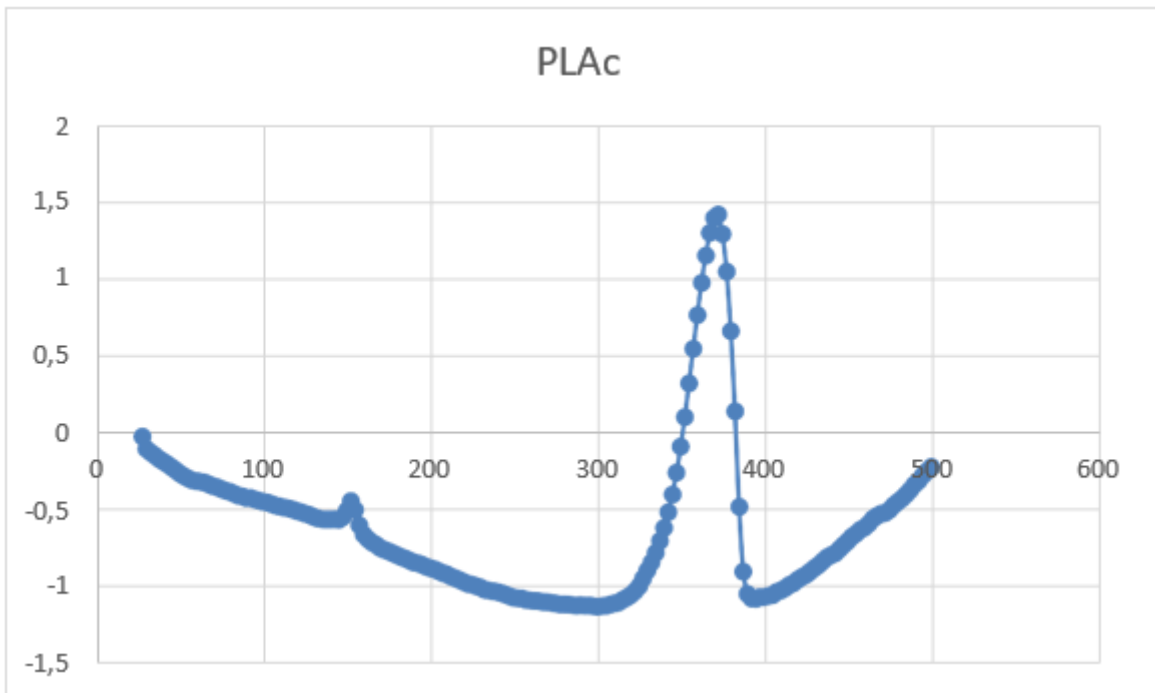
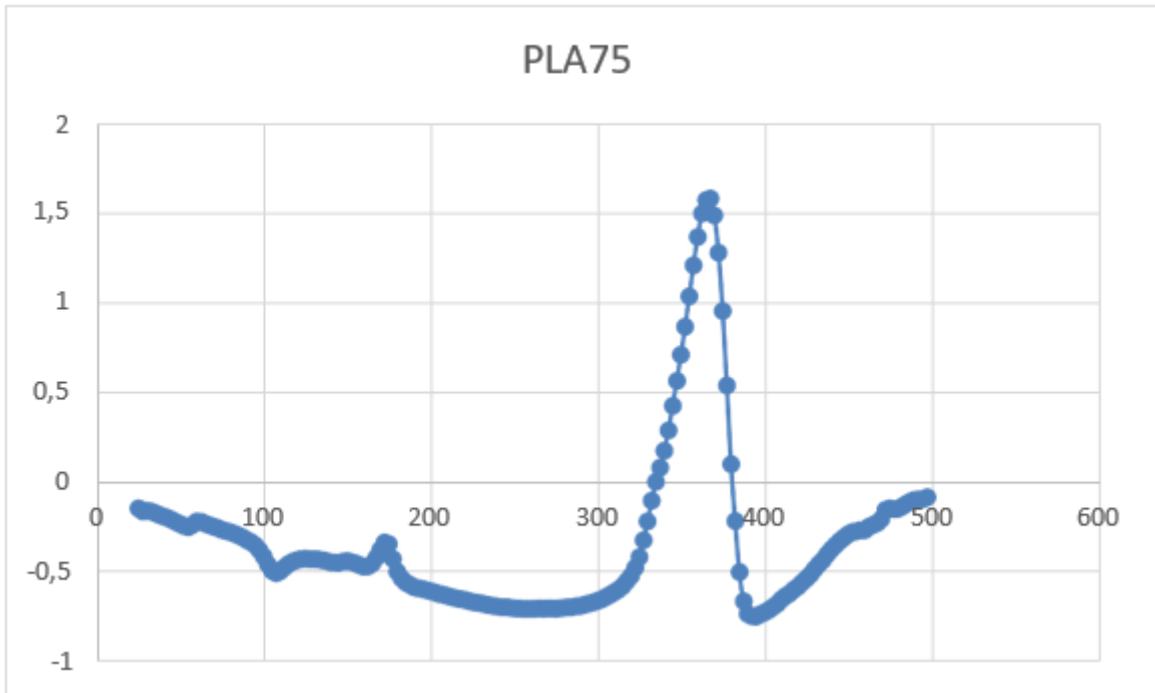




### APÊNDICE C – ANÁLISES DE DSC



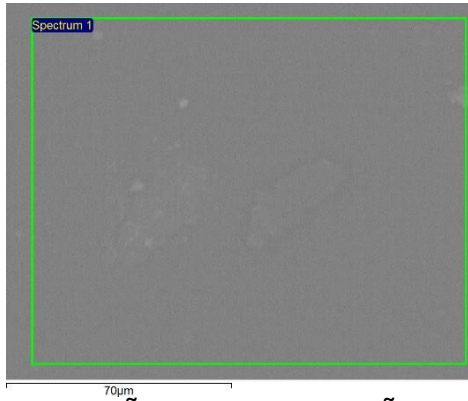




## APÊNDICE D – EDS PLAC

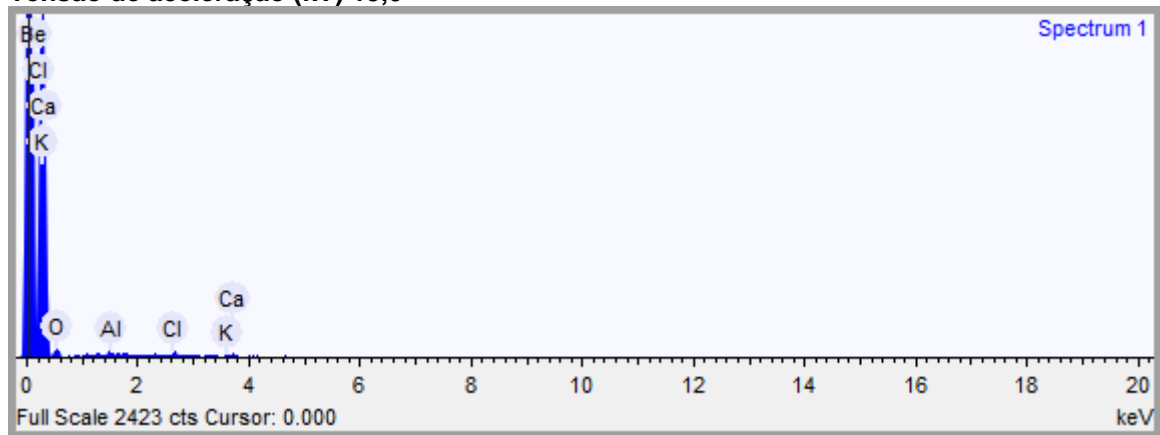
### IMAGEM 1

Largura da imagem: 317.6  $\mu\text{m}$



### CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO

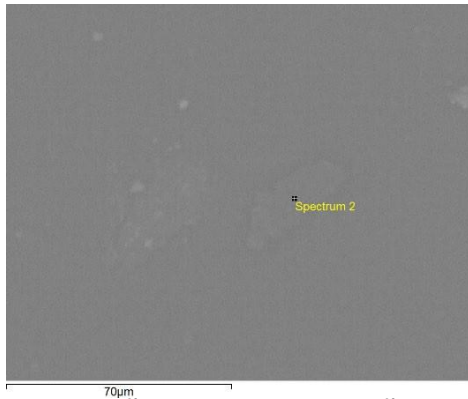
Tempo(s) de aquisição 119,9 Tempo de processo 5  
Tensão de aceleração (kV) 15,0



### Resumo dos Resultados

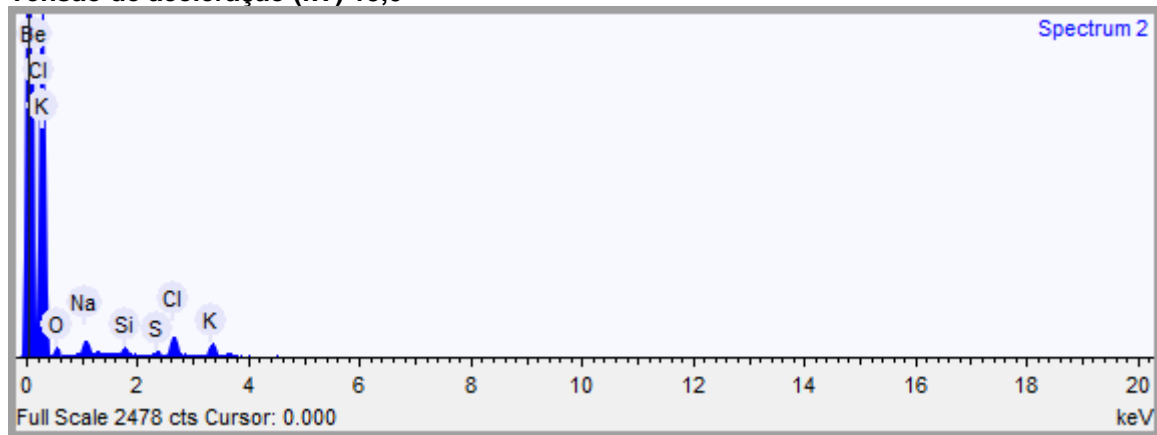
Elementos	Peso %	Atômico %
Oxigênio	68.111	82.451
Alumínio	6.362	4.567
Cloro	9.140	4.993
Potássio	5.834	2.889
Cálcio	10.553	5.100

## IMAGEM 2

Largura da Imagem: 317.6  $\mu\text{m}$ 

## CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO

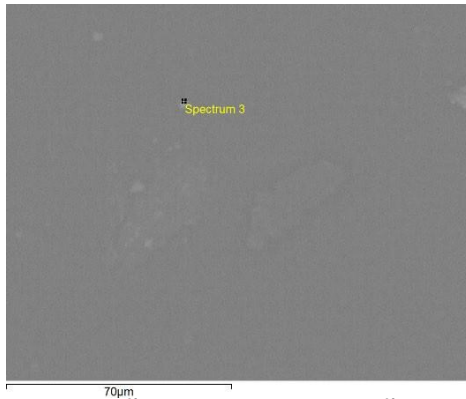
Tempo(s) de aquisição 119,9 Tempo de processo 5  
 Tensão de aceleração (kV) 15,0



## Resumo dos Resultados

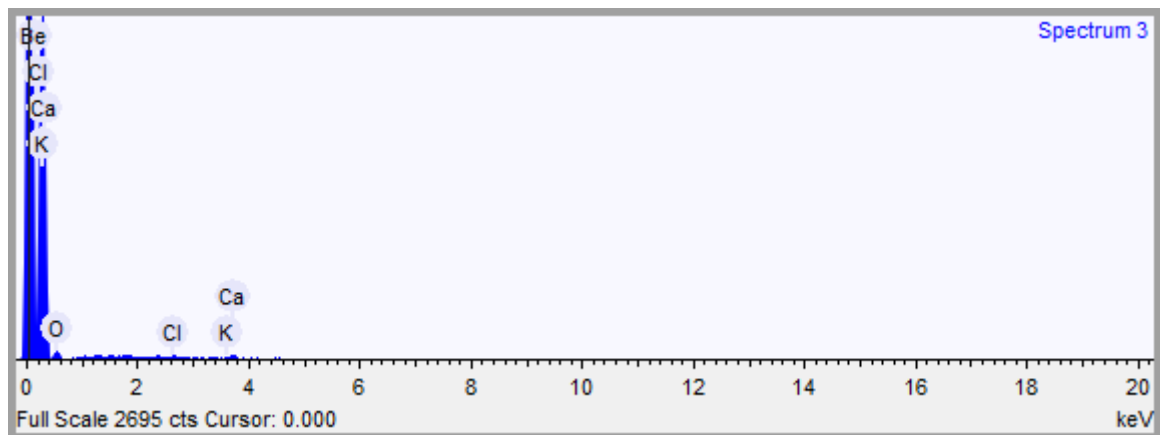
Elementos	Peso %	Atômico %
Oxigênio	41.827	58.417
Sódio	14.504	14.097
Silício	4.834	3.846
Enxofre	2.159	1.504
Cloro	20.017	12.616
Potássio	16.659	9.520

## IMAGEM 3

Largura da Imagem: 317.6  $\mu\text{m}$ 

## CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO

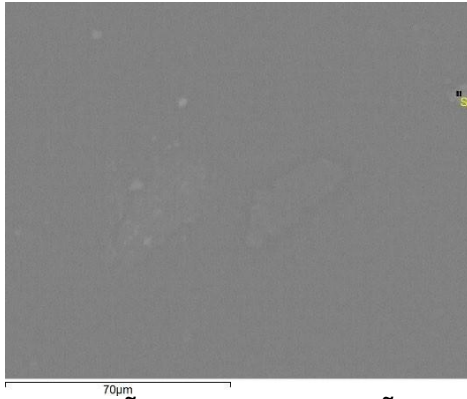
Acquisition time (s) 120.0 Process  
time 5 Accelerating voltage (kV)  
15.0



## Resumo dos Resultados

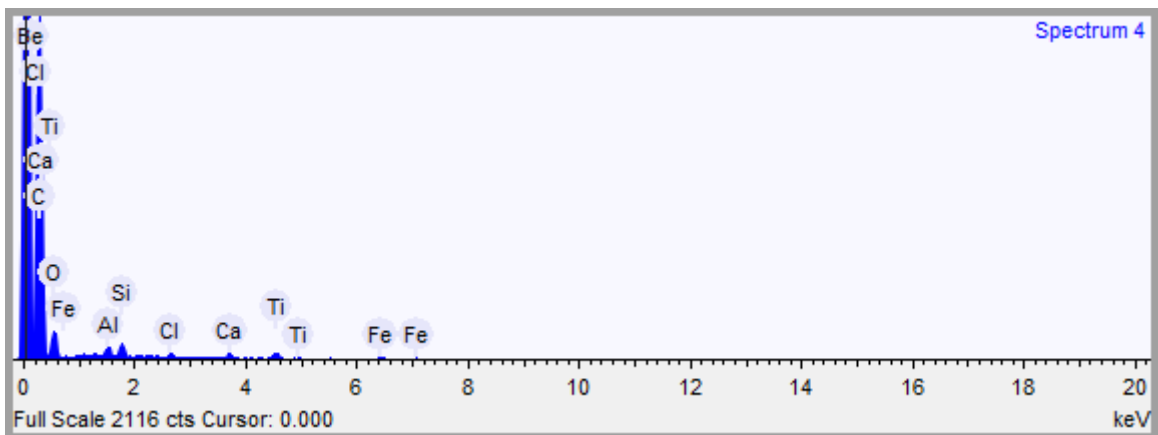
Elemento	Peso %	Atômico %
Oxigênio	70.515	85.227
Cloro	7.548	4.117
Potássio	5.967	2.951
Cálcio	15.970	7.705

## IMAGEM 4

Largura da Imagem: 317.6  $\mu\text{m}$ 

## CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO

Acquisition time (s) 120.0 Process  
 time 5 Accelerating voltage (kV)  
 15.00

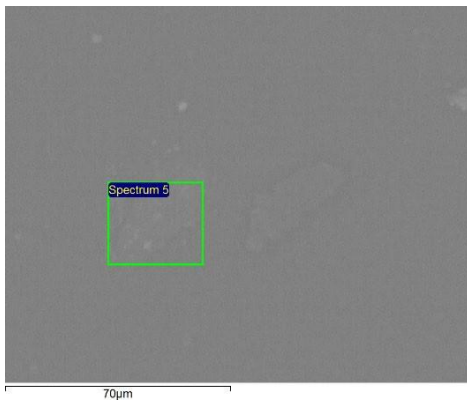


## Resumo dos Resultados

Elemento	Peso %	Atômico %
Carbono	78.431	85.287
Oxigênio	15.505	12.658
Aluminio	0.687	0.333
Silício	1.055	0.490
Cloro	0.605	0.223
Cálcio	0.801	0.261
Titânio	1.708	0.466
Ferro	1.208	0.283

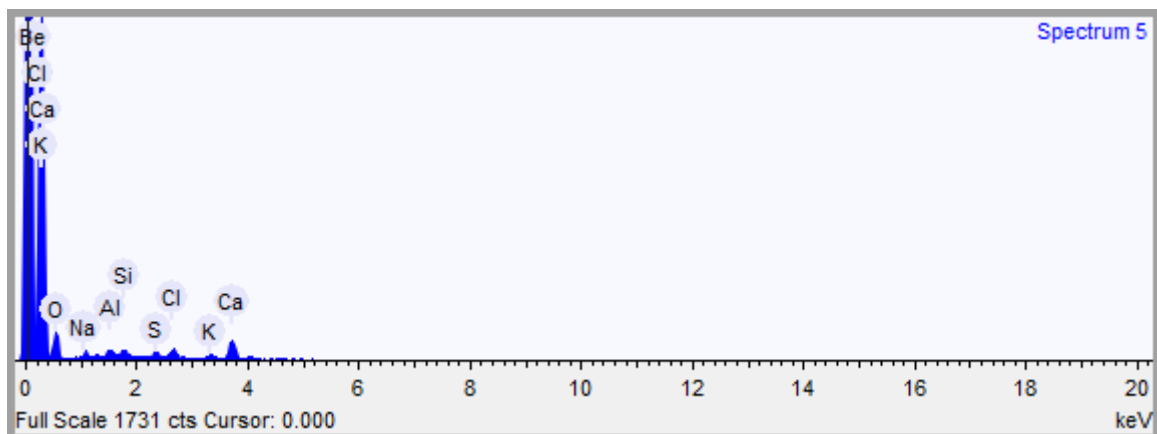
## IMAGEM 5

Largura da Imagem: 317.6  $\mu\text{m}$



## CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO

Acquisition time (s) 120.0 Process  
time 5 Accelerating voltage (kV)  
15.0



## Resumo dos Resultados

Elementos	Peso %	Atômico %
Oxigênio	60.052	76.211
Sódio	3.348	2.957
Aluminio	2.523	1.899
Sílica	3.551	2.567
Enxofre	3.276	2.074
Cloro	6.725	3.852
Potássio	3.391	1.761
Cálcio	17.133	8.679



### ANEXO A - FICHA TÉCNICA PLA CONDUTOR

Propriedades	Valores
Matriz	PLA
Características	baixo odor, não tóxico, de origem renovável
Estrutura Molecular	Amorfo
Aditivos	Negro de Fumo e Polímeros
Ponto de Fusão	aprox. 155 ° C
Resistência de 100 x 1,75mm	2-3 k ohm

*O limite de uso depende da geometria, carga e condição de uso.*