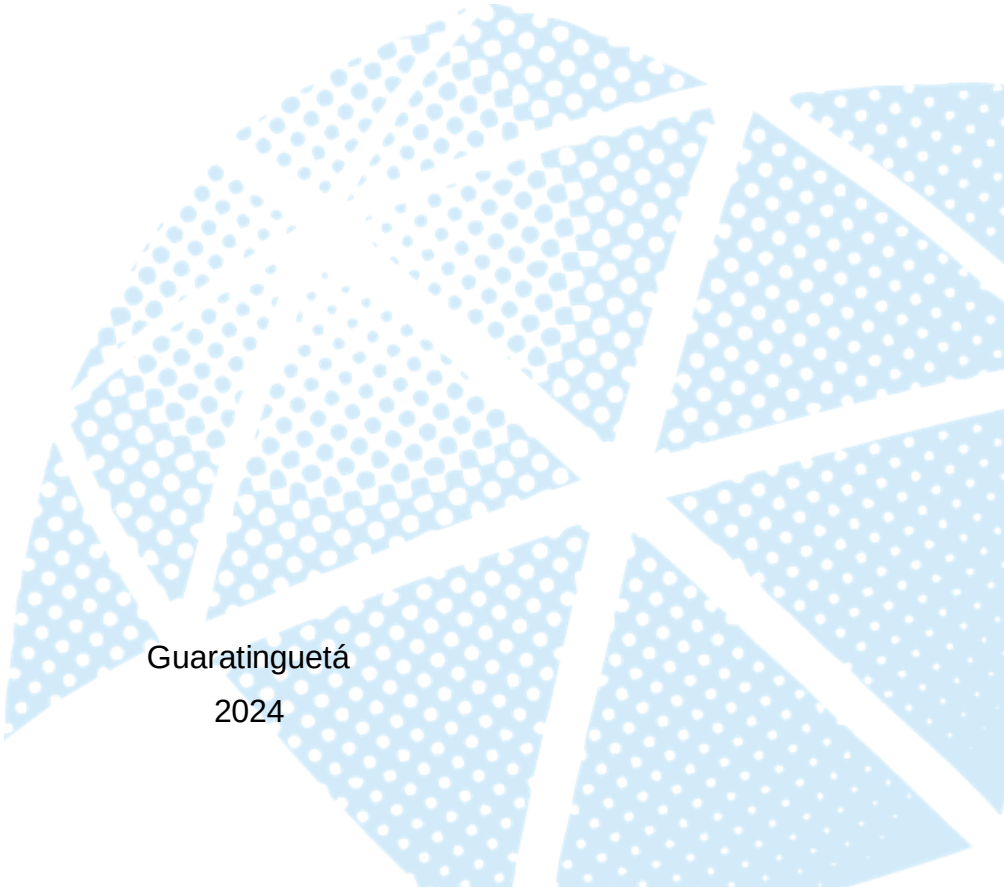


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá**

**VITOR QUEIROZ DE ABREU**

**IMPRESSÃO 3-D E O USO DE PLA E PETG COMO MATERIAIS DIELÉTRICOS  
DE ALTO DESEMPENHO PARA APLICAÇÕES ELETRÔNICAS DE PRECISÃO**

Guaratinguetá  
2024



**VITOR QUEIROZ DE ABREU**

**IMPRESSÃO 3-D E O USO DE PLA E PETG COMO MATERIAIS DIELÉTRICOS  
DE ALTO DESEMPENHO PARA APLICAÇÕES ELETRÔNICAS DE PRECISÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentada à Universidade Estadual  
Paulista (UNESP), Faculdade de  
Engenharia e Ciências, Guaratinguetá,  
para obtenção do título de Grau acadêmico  
Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador(a): Prof. Dr. Luis Rogerio de  
Oliveira Hein

Coorientador(a): Prof. Dr. Marcel Yuzo  
Kondo

Guaratinguetá

2024

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A162i | <p>Abreu, Vitor Queiroz de</p> <p>Impressão 3-D e o uso de PLA e PETG como materiais dielétricos de alto desempenho para aplicações eletrônicas de precisão / Vitor Queiroz de Abreu - Guaratinguetá, 2024.<br/>64 f : il.<br/>Bibliografia: f. 54-58</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.<br/>Orientador: Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein<br/>Coorientador: Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo</p> <p>1. Polímeros. 2. Impressão tridimensional. 3. Planejamento experimental. I. Título.</p> <p>CDU 541.6</p> |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**VITOR QUEIROZ DE ABREU**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“**GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente  
 **LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN**  
Data: 05/12/2024 22:33:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN  
Orientador/UNESP-FEG

Documento assinado digitalmente  
 **SERGIO FRANCISCO DOS SANTOS**  
Data: 06/12/2024 10:29:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. SERGIO FRANCISCO DOS SANTOS  
UNESP-FEG

Documento assinado digitalmente  
 **MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DI**  
Data: 09/12/2024 10:15:51-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARCELA APARECIDA GUERREIRO  
MACHADO DE FREITAS  
UNESP-FEG

Novembro  
2024

Dedico este trabalho à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família, especialmente aos meus pais, Luiz Fernando de Abreu e Rosália Queiroz de Abreu, que, apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein, que nunca deixou de me incentivar e, com sua orientação, dedicação e auxílio, tornou este estudo possível.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia e Ciência de Guaratinguetá, por seu compromisso e conhecimento compartilhado ao longo da minha formação.

À FAPESP pelo apoio financeiro, concedido por meio do Processo nº 2022/15565-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Aos funcionários da faculdade, pela dedicação e cordialidade no atendimento.

“Você não pode conectar os pontos olhando para frente; você só pode conectá-los olhando para trás. Então você tem que confiar que os pontos se conectarão de alguma forma no futuro. Você tem que confiar em algo – seu instinto, destino, vida, karma, o que for.”

Steve Jobs.

## RESUMO

A manufatura aditiva consiste num conjunto de técnicas que visam fabricar objetos por meio da deposição de material em camada por camada de forma controlada. Dentre essas técnicas, a de modelagem por deposição de material fundido (FDM) é a mais popular. Sua utilização cresce a cada ano que passa e vem sendo amplamente utilizada não só no ramo industrial, mas também por hobistas e entusiastas na área que fomentam o crescimento da cultura do “faça você mesmo” por meio de criações de projetos *open-source*, tornando a prototipagem rápida como uma prática comum em nossa sociedade. A presente proposta visa, a partir de uma impressora 3D e outros equipamentos de medição e aquisição de dados, estudar a viabilidade do uso de poli(ácido láctico) (PLA) e polietileno tereftalato glicol (PETG) como materiais dielétricos de alto desempenho em peças impressas para aplicações eletrônicas de precisão quando comparado ao polietileno de alta densidade (PEAD). Além disso, estudar a influência das características dos materiais, como composição e pigmentos, e dos parâmetros de impressão, como densidade de preenchimento, sobre a resistividade elétrica de volume destes materiais. Para a execução deste projeto de pesquisa foi realizada a medição da resistividade elétrica de volume das amostras de PLA e PETG, além de técnicas como a difratometria de raios-x (DRX) para caracterização dos pigmentos usados na coloração dos filamentos, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS) combinadas para a análise da superfície do material. Observou-se que o PLA e o PETG apresentaram uma média de resistividade elétrica de volume superior a  $10^{16}$  ohms.cm, enquanto o PEAD apresentou uma média superior a  $10^{17}$  ohms.cm. Além disso, o ensaio estatístico indicou que a cor, a densidade de preenchimento e a interação entre esses fatores têm influência significativa sobre a resistividade elétrica de volume.

**Palavras-chave:** Resistividade elétrica; Impressão 3D; Planejamento Experimental; PLA; PETG.



## ABSTRACT

Additive manufacturing consists of a set of techniques aimed at fabricating objects through the controlled deposition of material layer by layer. Among these techniques, fused deposition modeling (FDM) is the most popular. Its use grows each year and has become widely utilized not only in the industrial sector but also by hobbyists and enthusiasts, who foster the growth of the “make yourself” culture through open-source project creations, making rapid prototyping a common practice in our society. This proposal aims to study the feasibility of using polylactic acid (PLA) and polyethylene terephthalate glycol (PETG) as high-performance dielectric materials in 3D-printed parts for precision electronic applications compared to high-density polyethylene (HDPE), using a 3D printer and other measurement and data acquisition equipment. Additionally, it seeks to study the influence of material characteristics, such as composition and pigments, and printing parameters, such as infill density, on the volume electrical resistivity of these materials. For the execution of this research project, the volume electrical resistivity of PLA and PETG samples was measured, in addition to techniques such as X-ray diffraction (XRD) for the characterization of pigments used in filament coloring, optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) combined for surface analysis of the material. It was observed that PLA and PETG exhibited an average volume electrical resistivity exceeding  $10^{16}$  ohms.cm, while HDPE showed an average exceeding  $10^{17}$  ohms.cm. Additionally, statistical testing indicated that color, infill density, and the interaction between these factors have a significant influence on volume electrical resistivity.

**Keywords:** Electrical resistivity; 3D printing; Experimental design; PLA. PETG.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| ASTM  | American Society for Testing and Materials      |
| EPO   | European Patent Office                          |
| PLA   | Poliácido láctico                               |
| PETG  | Polietileno Tereftalato Glicol                  |
| PEAD  | Polietileno de Alta Densidade                   |
| FDM   | Fused Deposition Modeling                       |
| MEV   | Microscopia Eletrônica de Varredura             |
| EDS   | Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X |
| DRX   | Difratometria de Raios-X                        |
| ANOVA | Análise de Variância                            |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                            | <b>11</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                                                                 | <b>15</b> |
| 2.1 Polímeros .....                                                                                                                 | 15        |
| 2.1.1 PLA (Poliácido lático) .....                                                                                                  | 16        |
| 2.1.2 PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) .....                                                                                   | 17        |
| 2.2 Resistividade Elétrica.....                                                                                                     | 18        |
| 2.3 Densidade de Preenchimento .....                                                                                                | 21        |
| 2.4 Estatística Experimental.....                                                                                                   | 22        |
| 2.4.1 Planejamento Experimental .....                                                                                               | 22        |
| 2.4.2 Análise de Variância.....                                                                                                     | 23        |
| <b>3 OBJETIVOS .....</b>                                                                                                            | <b>25</b> |
| 3.1 Objetivo Geral.....                                                                                                             | 25        |
| 3.2 Objetivos Específicos.....                                                                                                      | 25        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                                                  | <b>26</b> |
| 4.1 Materiais e Equipamentos .....                                                                                                  | 26        |
| 4.2 Métodos.....                                                                                                                    | 27        |
| 4.2.1 Método de Impressão 3-D.....                                                                                                  | 28        |
| 4.2.2 Preparação das Amostras .....                                                                                                 | 29        |
| 4.2.3 Método de Medição da Resistividade Elétrica de Volume .....                                                                   | 29        |
| 4.2.4 Método de Análise Estatística.....                                                                                            | 32        |
| 4.2.5 Método de Análise Microscópica .....                                                                                          | 32        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                                               | <b>34</b> |
| 5.1 Comparação da Resistividade Elétrica de Volume .....                                                                            | 34        |
| 5.2 Análise Estatística .....                                                                                                       | 36        |
| 5.2.1 Análise Estatística do PLA.....                                                                                               | 38        |
| 5.2.2 Análise Estatística do PETG .....                                                                                             | 40        |
| 5.3 Caracterização Estrutural.....                                                                                                  | 41        |
| 5.4 Análise Microscópica .....                                                                                                      | 45        |
| 5.4.1 Análise por Microscopia Óptica .....                                                                                          | 45        |
| 5.4.2 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por<br>Energia Dispersiva da Fluorescência de Raios-x..... | 47        |
| <b>6 CONCLUSÃO.....</b>                                                                                                             | <b>52</b> |

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                         | <b>54</b> |
| <b>BIBLIOGRÁFICA CONSULTADA .....</b>                                                                                            | <b>58</b> |
| <b>ANEXO A - Programa em Python de automatização do processo de aquisição e medição da resistividade elétrica de volume.....</b> | <b>59</b> |
| <b>ANEXO B - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 25%. ....</b>         | <b>61</b> |
| <b>ANEXO C - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 50%. ....</b>         | <b>61</b> |
| <b>ANEXO D - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 75%. ....</b>         | <b>61</b> |
| <b>ANEXO E - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 25%. ....</b>           | <b>62</b> |
| <b>ANEXO F - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 50%. ....</b>           | <b>62</b> |
| <b>ANEXO G - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 75%. ....</b>           | <b>62</b> |
| <b>ANEXO H - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 25%.....</b>        | <b>63</b> |
| <b>ANEXO I - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 50%.....</b>        | <b>63</b> |
| <b>ANEXO J - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 75%.....</b>        | <b>63</b> |
| <b>ANEXO K - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 25%. ....</b>          | <b>64</b> |
| <b>ANEXO L - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 50%. ....</b>          | <b>64</b> |
| <b>ANEXO M - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 75%. ....</b>          | <b>64</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso de diversas técnicas que englobam a manufatura aditiva cresceu drasticamente e, como exemplo disso, a Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Esta técnica baseia-se na extrusão de um filamento termoplástico mediante o uso de uma impressora 3D e de um software, os quais, de camada por camada, produzem as peças de material polimérico, assim, este processo caracteriza-se como sendo eficiente pois reduz a quantidade de material desperdiçado e permite a liberdade de personalização da geometria do objeto por parte do usuário (PRAVEENA et al., 2022; MORANDINI et al., 2020; SCHIRMEISTER et al., 2019)

Segundo o Instituto Europeu de Patentes, estima-se que o mercado da indústria de manufatura aditiva movimentou USD 18 bilhões no ano de 2022, além de um crescimento médio de 25,6% nas vendas de componentes fabricados por meio da impressão 3D (CAVALLO et al., 2023). Um dos fatores que justificam este crescimento é a queda do custo de aquisição das impressoras 3D desktop, utilizadas para prototipagem rápida, fazendo com que as impressoras 3D se tornassem um equipamento presente em muitas residências de classe média. Este acontecimento fomentou o crescimento da cultura denominada de “faça você mesmo”, gerando uma comunidade formada por hobistas e entusiastas na área que buscam produzir peças, desenvolver programas de código aberto, melhorar o hardware destes equipamentos, e, assim, tornando a tecnologia mais acessível para pessoas de diferentes lugares do mundo e interessadas no tema (KOSTAKIS et al., 2015).

Atualmente, existem diversos materiais que podem ser utilizados para fabricação de peças por meio da técnica FDM, sendo estes, o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), nylon (poliamida), poli(ácido láctico) ou (Ácido Polilático) (PLA) e poli(tereftalato de etileno-co-tereftalato de 1,4-ciclohexadimetil-ciclohexileno) (PETG) (HANON et al.,

2021; WITTBRODT, PEARCE, 2015). Entre estes materiais, destacam-se especialmente o PLA e o PETG, os quais estão se tornando amplamente utilizados na técnica FDM (TAO et al., 2023). Este fato acontece, pois, o PLA possui alta resistência à tração e rigidez quando comparado com outros termoplásticos, além de possuir um baixo ponto de fusão (180 – 230°C), que reduz a quantidade de energia utilizada para a impressão de uma peça. Entretanto, este material apresenta elevada sensibilidade à água e baixa tenacidade quando comparado a outros polímeros (HANON et al., 2021; WITTBRODT, PEARCE, 2015). Ainda sobre o PLA, este é formado a partir do poliéster alifático linear, que é um termoplástico, semicristalino ou amorfo, sintetizado a partir de fontes renováveis como o açúcar do milho, cana de açúcar e até mesmo batata (SANTANA et al., 2018).

No que concerne ao PETG, um polímero amorfo, é que este é uma versão modificada do polietileno tereftalato (PET), sendo acrescentado o glicol modificado em sua composição durante o processo de polimerização e por consequência, este é mais transparente e menos rígido quando comparado ao PET (SANTANA et al., 2018). O PETG, entre os polímeros, é conhecido pela sua alta resistência química, tenacidade, flexibilidade, biocompatibilidade e resistência mecânica.

Além disso, assim como o PLA, o PETG também é um material dielétrico e com alto potencial de reciclagem. Além de tudo, o PLA e o PETG são polímeros que apresentam maior grau de segurança de trabalho quando comparados ao polímero ABS, dado que este polímero aparentemente apresenta maior toxicidade quando utilizado na técnica FDM (WITTBRODT, PEARCE, 2015; TAO et al., 2023)

Algumas pesquisas também afirmam a possibilidade da utilização do polietileno de alta densidade (PEAD) como matéria prima para a impressão 3D por meio da FDM. Isto ocorre pois o PEAD apresenta boas propriedades mecânicas, além de ser um dos

polímeros que apresenta maior resistividade elétrica, dessa forma, é adequado em contextos em que são necessários materiais dielétricos de alta desempenho, como por exemplo na fabricação de equipamentos eletrônicos de precisão (KEITHLEY INSTRUMENTS, 2004; SANTOS et al., 2018; HAQUE et al., 2023). Porém, o PEAD não é um material tradicionalmente utilizado como matéria-prima para impressão 3D, dado que ainda há falta de estudos referente à sua aplicabilidade neste tipo de produção, além de exigir maiores recursos das impressoras, como temperatura elevada de extrusão (entre 230 e 260°C), mesa aquecida por sua baixa adesão e a necessidade de um gabinete fechado, por conta dos altos níveis de contração e empenamento (HAQUE et al., 2023).

Estes materiais podem ser utilizados como isolantes em sistemas elétricos pois, não permitem a movimentação de elétrons pelo seu corpo e superfície (LISOWSKI et al., 2023). Dentre as propriedades elétricas, a resistividade elétrica é uma das principais propriedades utilizadas para mensurar, indiretamente, esta movimentação (LEE et al., 2020). Na Tabela 1, podem ser observados os materiais dielétricos com maior resistividade elétrica de volume.

**Tabela 1** - Resistividade elétrica de volume de vários materiais dielétricos.

| Material                    | Resistividade de Volume [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] |
|-----------------------------|------------------------------------------------------|
| Teflon (PTFE)               | $> 10^{18}$                                          |
| Safira                      | $> 10^{18}$                                          |
| Polietileno                 | $10^{16}$                                            |
| Poliestireno                | $> 10^{16}$                                          |
| Kel-F                       | $> 10^{18}$                                          |
| Cerâmica                    | $10^{14} - 10^{15}$                                  |
| Nylon                       | $10^{13} - 10^{14}$                                  |
| Époxi de Vidro              | $10^{13}$                                            |
| Policloreto de Vinila (PVC) | $5,0 \cdot 10^{13}$                                  |

Fonte: Adaptado de *Low Level Measurements Handbook: Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements*.

O estudo das propriedades elétricas é de suma importância do ponto de vista acadêmico e tecnológico, pois proporciona um melhor entendimento do comportamento dielétrico de um material, possibilitando o desenvolvimento de novos materiais, ou novas aplicações para materiais já existentes (ASTM, 2007). Na literatura, existe uma ampla variedade de estudos voltados para a análise das propriedades mecânicas de polímeros processados pela técnica FDM. Contudo, existem poucos trabalhos relacionados à análise de propriedades elétricas destes materiais processados por esta técnica (GIROTTI, SANTOS, 2023; POPESCU et al., 2023)

Portanto, este estudo visa contribuir para a área de blindagens elétricas de circuitos eletrônicos, a partir da investigação da viabilidade do uso de PLA e PETG como materiais dielétricos de alto desempenho para aplicações eletrônicas de precisão quando comparados ao PEAD.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Polímeros

Os polímeros são materiais constituídos por longas cadeias de unidades repetidas, chamadas monômeros, que estão conectadas entre si por meio de ligações covalentes. À medida que os monômeros se combinam, eles formam estruturas intermediárias conhecidas como oligômeros, e a repetição contínua dessa união resulta na formação dos polímeros (NEWELL, 2009).

Existem várias formas de classificar materiais poliméricos, como por sua origem (natural orgânico, artificial, sintético, natural inorgânico ou biopolímero), estrutura molecular (linear, ramificada, reticulada ou em bloco), método de preparação (adição ou condensação), comportamento mecânico (plásticos, elastômeros ou fibras), comportamento térmico (termoplástico, termofixo ou elastômero), biodegradabilidade (biodegradáveis ou não biodegradáveis) e também com base em suas propriedades elétricas. Para o propósito deste trabalho, é necessário um entendimento profundo das propriedades elétricas desses materiais. Com base em suas propriedades elétricas, os polímeros podem ser classificados em dois grupos principais, sendo eles (NEWELL, 2009; HAQUE et al., 2022):

- Polímeros de Alta Constante Dielétrica: polímeros com alta constante dielétrica têm uma grande capacidade de polarização em resposta a um campo elétrico, logo, estes podem armazenar mais carga elétrica. Estes materiais podem ser utilizados como capacitores, que são dispositivos que armazenam energia (HAQUE et al., 2022).
- Polímeros de Baixa Constante Dielétrica: polímeros com baixa constante dielétrica possuem a capacidade limitada de polarização, logo, estes são melhores para impedir a movimentação de cargas elétricas, tornando-os mais

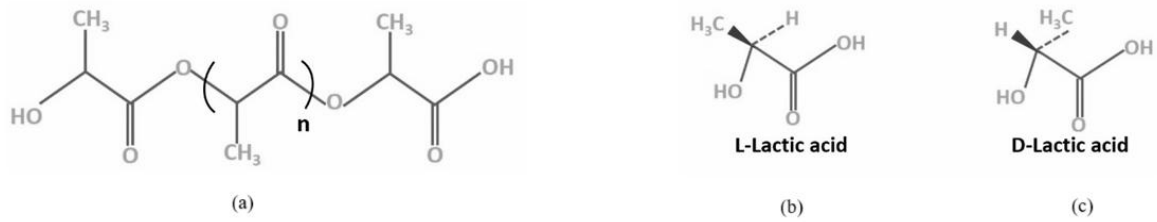
adequados para atuar como isolantes em sistemas onde o isolamento elétrico é necessário (HAQUE et al., 2022).

Dentre os principais fatores que influenciam as propriedades dielétricas dos polímeros, destacam-se a polaridade das cadeias poliméricas. Polímeros com grupos funcionais polares, como o polivinilideno fluorado (PVDF), tendem a apresentar uma constante dielétrica mais alta, devido à sua maior capacidade de polarização quando submetidos a um campo elétrico. Além disso, a estrutura molecular também desempenha um papel importante nas propriedades elétricas. Polímeros com estruturas mais ordenadas ou semicristalinas possuem maior rigidez dielétrica (capacidade do material de resistir à ruptura elétrica quando exposto a um campo elétrico), tornando-os ideais para aplicações de alta tensão. Por outro lado, polímeros amorfos apresentam menor rigidez dielétrica. Finalmente, a temperatura e a umidade são fatores significativos, pois a constante dielétrica e a resistividade elétrica variam em função desses parâmetros. Polímeros com boa estabilidade térmica mantêm suas propriedades dielétricas em uma ampla faixa de temperaturas (HAQUE et al., 2022).

### **2.1.1 PLA (Poliácido láctico)**

O PLA pertence à família dos poliésteres alifáticos, caracterizado por ligações éster formadas entre os grupos carboxila e hidroxila do ácido láctico, sendo composto por unidades repetidas desse ácido. Dependendo da estereoquímica, ou seja, da forma como os átomos e grupos funcionais estão organizados no espaço das unidades repetidas (D- e L-ácido láctico), o PLA pode apresentar uma estrutura semicristalina ou amorfa. Por exemplo, o PLA com maior quantidade de L-ácido láctico tende a formar uma estrutura cristalina, enquanto uma maior proporção de D-ácido láctico resulta em um PLA mais amorfo (RANAKOTI et al., 2022).

**Figura 1 - (a)** Estrutura química do PLA; **(b)** Isômero L-ácido láctico; **(c)** Isômero D-ácido láctico.

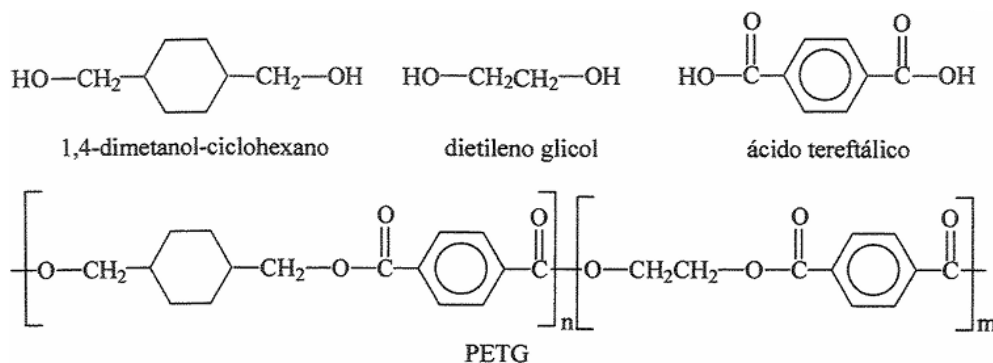


Fonte: RANAKOTI et al. (2022).

### 2.1.2 PETG (Polietileno Tereftalato Modificado Glicol)

O PETG é um poliéster aromático semelhante ao poli(tereftalato de etileno) (PET), sendo obtido através de um processo de policondensação entre ciclo-hexano dimetanol, ácido tereftálico e etileno glicol. O PETG se distingue de outros poliésteres aromáticos por sua estrutura totalmente amorfa. A inclusão dos monômeros 1,4-ciclo-hexano dimetanol e dietileno glicol impede o processo de cristalização, resultando em uma estrutura não cristalina. Em consequência, o material apresenta características amorfas, em contraste com a maior cristalinidade observada em outros poliésteres. A Figura 2 representa a estrutura química dos monômeros utilizados na produção do PETG (QUENTAL et al., 2010)

**Figura 2 -** Estrutura química dos monômeros utilizados na produção do PETG.



Fonte: QUENTAL et al. (2018).

## 2.2 Resistividade Elétrica

Os materiais poliméricos podem ser utilizados como isolantes em sistemas elétricos pois não permitem a movimentação de elétrons pelo seu corpo e superfície (LISOWSKI et al., 2003). Dentre as propriedades elétricas, a resistividade elétrica é uma das principais propriedades utilizadas para mensurar, indiretamente, esta movimentação (LEE et al., 2020). Portanto, por meio desta propriedade, é possível determinar a eficiência do material como dielétrico de alto desempenho. A resistividade elétrica varia dependendo de alguns fatores, como por exemplo, a tensão aplicada sobre o material, o tempo de eletrificação, a umidade e temperatura ambiente, dentre outros (ASTM, 2007). As equações empregadas para o cálculo da resistividade elétrica de volume e superfície são, respectivamente:

$$\rho_v = \frac{A}{t_c} \cdot \frac{V}{i} \quad (1)$$

$$p_s = \frac{P}{g} \cdot \frac{V}{i} \quad (2)$$

Onde:

$\rho_v$  = Resistividade de superfície [ $\Omega$ ]

$p_s$  = Resistividade de volume [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]

$A$  = Área efetiva do eletrodo de medição [ $\text{cm}^2$ ]

$t_c$  = Espessura média [ $\text{cm}$ ]

$P$  = Perímetro efetivo do eletrodo aterrado [ $\text{cm}$ ]

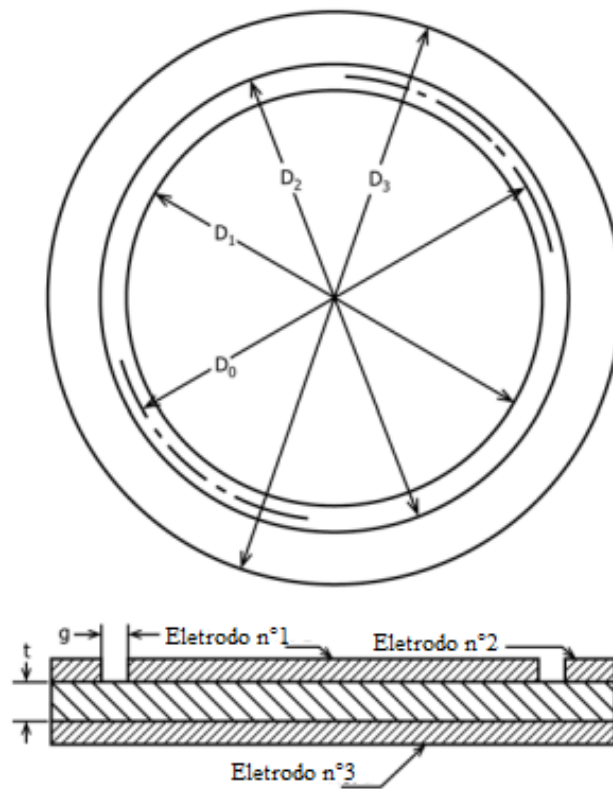
$g$  = Distância entre os eletrodos não aterrados [ $\text{cm}$ ]

$V$  = Tensão aplicada [ $\text{V}$ ]

$i$  = corrente medida [ $\text{A}$ ]

A Figura 3 apresenta um exemplo de uma amostra plana sendo utilizada para a medição da resistividade elétrica de volume, nela é possível ver a espessura da amostra, a distância entre os eletrodos não aterrados e os diâmetros do eletrodo.

**Figura 3** - Amostra plana para medição de volume e resistências ou condutâncias de superfície.

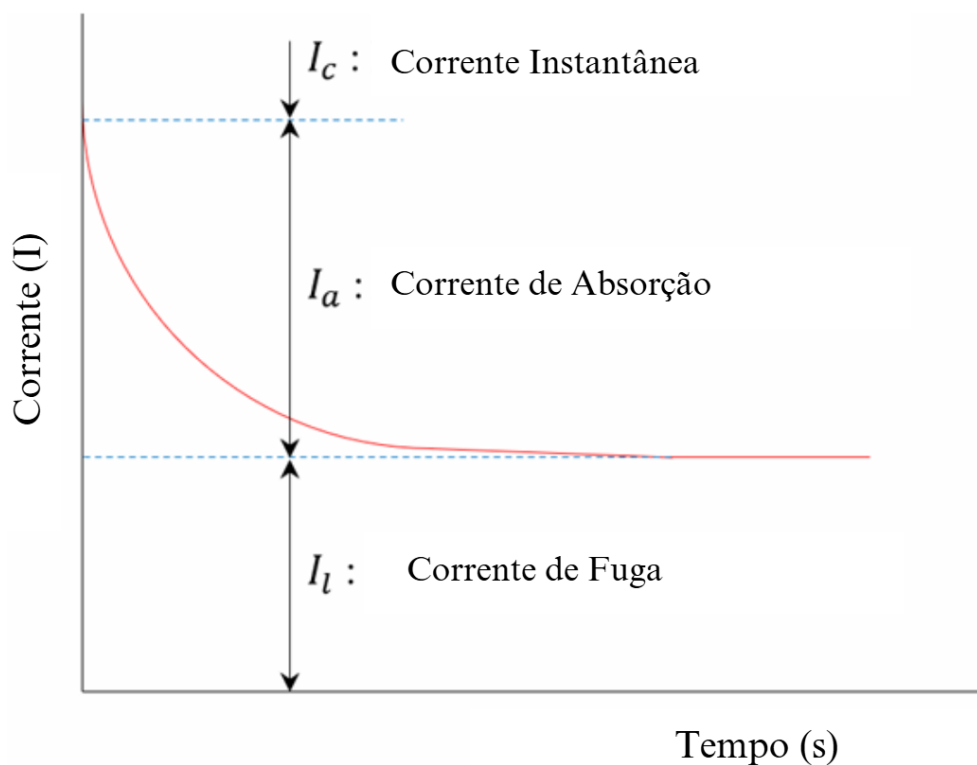


Fonte: ASTM (2007).

Outro fator utilizado para aumentar ou diminuir a resistividade elétrica dos materiais são os pigmentos; estes não são apenas estéticos, uma vez que tanto os polímeros como os pigmentos possuem grupos funcionais polares, que podem aumentar ou diminuir a resistividade elétrica do material, dependendo da composição do pigmento (BALAKRISHNAN et al., 2023).

Segundo a norma ASTM D257 (2007), utilizada para padronização de medições de resistividade elétrica em materiais isolantes, a amostra deve ser colocada entre dois eletrodos condutores, e esta deve ser submetida a uma tensão contínua conhecida que faz com que a corrente de absorção flua por meio da amostra, diminuindo de forma assintótica com o tempo, até alcançar a estabilidade. Em materiais condutores, a corrente alcança o comportamento assintótico em menos de 60 s a partir do início da polarização, contudo, em materiais isolantes, o comportamento assintótico da corrente pode ser alcançado em minutos, horas, meses ou até mesmo anos (LEE et al., 2020). A Figura 4 mostra o comportamento da corrente em função do tempo.

**Figura 4** - Comportamento da corrente em um material dielétrico sob ação de uma diferença de potencial elétrico ao longo do tempo.

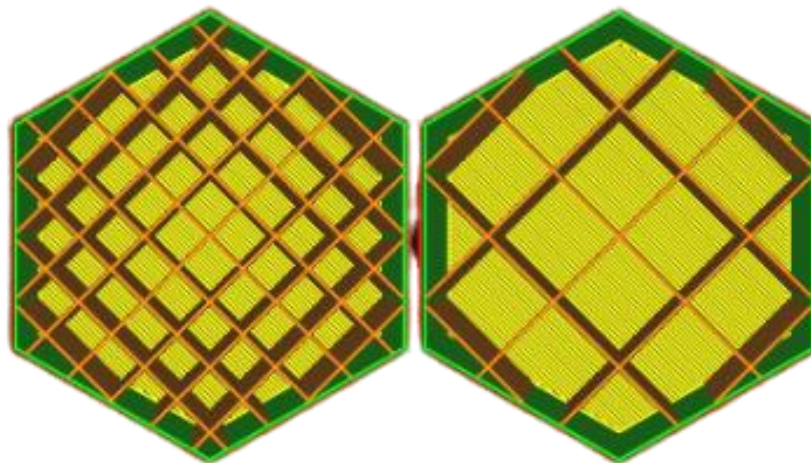


Fonte: Adaptado de LEE et al. (2020).

### 2.3 Densidade de Preenchimento

A densidade de preenchimento de um objeto fabricado por impressão 3D é a quantidade de material utilizada para preencher a área interna de uma camada. Desta forma, é possível definir o preenchimento de um material dentro de uma faixa que vai de 0%, representando um objeto oco, até 100%, representando um objeto sólido. Objetos com densidade de preenchimento inferior a 100% possuem espaços internos preenchidos por ar, em maior quantidade do que aqueles com densidade total. Este parâmetro afeta o tempo de fabricação da peça, a quantidade de material utilizado e a resistência mecânica da peça fabricada por FDM. A densidade de preenchimento em um objeto pode ser vista na Figura 5 (AMBATI et al., 2022).

**Figura 5** - Densidade de preenchimento de objeto com formato hexagonal.



Fonte: Adaptado do software Ultimaker Cura 5.1.0.

## **2.4 Estatística Experimental**

### **2.4.1 Planejamento Experimental**

O planejamento de experimento é um método aplicado para analisar a significância de uma ou mais variáveis de entrada sobre uma determinada variável de saída presente em um processo ou sistema de produção. As variáveis de entrada, também chamadas de fatores, podem ser controladas dentro de um determinado processo ou experimento. Dessa maneira, o planejamento e análise de experimentos é a metodologia mais eficiente para a resolução de problemas de processos industriais, pois esta abrange o estudo da significância dos fatores selecionados sobre uma variável resposta de forma estatística. Além disso, é uma metodologia enxuta que apresenta maior robustez e qualidade quando comparada a metodologia tradicional de análise de fatores sobre uma variável resposta (LIMA et al., 2006; NETO et al., 2002).

Antes da realização de qualquer tipo de ensaio, é necessário definir o escopo do experimento. Para isso, se faz necessário determinar:

- Tipo de planejamento de experimento: existem diferentes tipos de planejamento de experimento que podem ser utilizados dependendo da finalidade do experimentador, por exemplo, caso o objetivo seja a triagem de fatores, recomenda-se a utilização de planejamento por fatoriais fracionado. Contudo, caso o propósito seja a avaliação da influência dos fatores em um processo, recomenda-se o uso de planejamento por fatorial completo. Por fim, se o intuito do experimento for a otimização de um determinado sistema visando maximizar ou minimizar uma variável resposta indica-se o uso do planejamento por método de superfície de resposta. Existem outros tipos de planejamento de experimentos, porém, é importante que o objetivo do



experimento seja determinado previamente para que o melhor tipo de planejamento possa ser utilizado (NETO et al., 2002; GODOY, 2014);

- Fatores: são as variáveis de controle do experimento, ou seja, aquelas que o experimentador tem condições de controlar. Estas variáveis podem ser qualitativas ou quantitativas (NETO et al., 2002; GODOY, 2014);
- Níveis: são as classes dentro dos fatores que serão utilizadas no experimento para averiguar a significância daquele e fator em específico (NETO et al., 2002; GODOY, 2014);
- Variáveis não controladas: são as variáveis cujo controle não é possível, contudo, algumas destas podem ser medidas (NETO et al., 2002; GODOY, 2014);
- Variáveis de Resposta: são as variáveis de interesse do experimento, ou seja, estuda-se a influência dos fatores sobre estas (NETO et al., 2002; GODOY, 2014).

#### **2.4.2 Análise de Variância**

A análise de variância (ANOVA - Analysis of Variance) é uma ferramenta estatística utilizada para analisar se as médias de três ou mais fatores são diferentes. Desta forma, esta ferramenta permite determinar se há diferença significativa entre as variáveis de interesse sobre uma variável resposta (GODOY, 2014). Para a utilização desta ferramenta, é necessário, primeiramente, determinar as hipóteses relacionadas ao problema que o estudo se propõe a resolver (PAES, 1998). Desta forma, em um ensaio estatístico, existem duas hipóteses, sendo estas:

- Hipótese Nula ( $H_0$ ): é a hipótese submetida a teste.
- Hipótese Alternativa ( $H_1$ ): é a hipótese considerada como válida se a hipótese

nula for descartada.

Existem erros associados a todo teste de hipótese, por exemplo, o “erro do Tipo I” está relacionado ao descarte da hipótese nula quando esta for verdadeira. A probabilidade da ocorrência do “erro do Tipo I” é denominada como nível de significância ( $\alpha$ ). No geral, utiliza-se níveis de significância de: 5%, 1% e 0,1% (PAES, 1998). Outro parâmetro relevante para a utilização desta técnica é o nível descritivo ( $p - valor$ ), que é o nível de significância mínimo requerido para rejeitar  $H_0$ , este é calculado de acordo com os dados obtidos. Com estes dois parâmetros definidos, é possível determinar se a probabilidade do erro é aceitável ou não, de acordo com a relação abaixo:

- $p\text{-valor} > \alpha$ :  $H_0$  não é rejeitado
- $p\text{-valor} < \alpha$ :  $H_0$  é rejeitado

Portanto, as conclusões derivadas da ANOVA indicam se existe ou não significância estatística do fator em relação à variável resposta (PAESE, 2001; GODOY, 2014).

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

O presente projeto de pesquisa tem como objetivo contribuir para a área de blindagens elétricas de circuitos eletrônicos, investigando a viabilidade do uso de PLA e PETG, na forma de peças impressas pela técnica FDM, como materiais dielétricos de alto desempenho para aplicações eletrônicas de precisão. A pesquisa avaliará esses materiais em comparação ao PEAD, visando determinar sua eficácia como sistemas isolantes em circuitos eletrônicos de precisão.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

Este estudo tem como objetivos específicos avaliar o efeito da densidade de preenchimento na resistividade elétrica de volume do PLA e PETG, bem como investigar o impacto da composição dos polímeros, incluindo aditivos e pigmentos, sobre a resistividade elétrica de volume desses materiais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

- Filamentos de PLA e PETG de cores sólidas ou metálicas diversas, da marca Voolt3D, para impressão de corpos de prova com diâmetro de 80 mm e 5 mm de espessura nominal.
- PEAD, na forma de uma placa densa e lisa com 5 mm de espessura nominal e cor branca, cortada no diâmetro de 80 mm.

Para a impressão e avaliação da microestrutura dos corpos de prova impressos de PLA e PETG foram utilizados alguns instrumentos presentes no Laboratório de Imagens de Materiais (LAIMat) e do Laboratório de Difractometria e Fluorescência de Raios X presentes no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia e Ciências, campus de Guaratinguetá:

- Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15 com detector EDS Oxford Xplore 30.
- Microscópio óptico motorizado Zeiss AxioImager Z2m com sistema de microscopia correlativa Zeiss Shuttle & Find.
- Difratometro de Raios-X Bruker D8 Advance ECO.
- Impressoras 3-D Kingroon KP3S.

Já para a medição da resistividade elétrica, os instrumentos disponibilizados para este projeto são de propriedade do orientador deste trabalho e se encontram em ambiente climatizado, com aterramento próprio e dupla isolamento da rede elétrica, além de uma sequência de filtros de harmônicas, em sua residência:

- Calibrador de tensão DC Fluke 5440B, usado como fonte estável de tensão

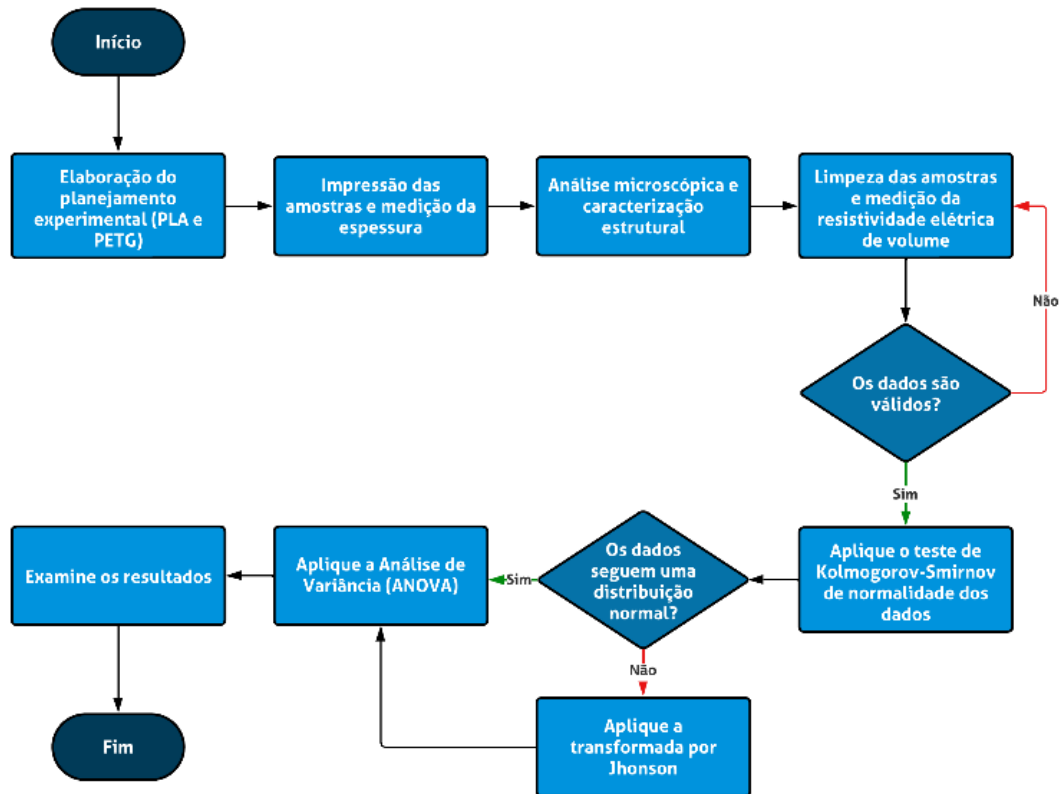
para este trabalho, com oscilação menor que 2 ppm para a tensão de 500V empregada nos testes.

- Adaptador de Resistividade Keithley 6105, para medidas de resistividade conforme ASTM D257-14.
- Picoamperímetro Keithley 6485, para as medidas de corrente DC, com resolução de 1 fA.
- Fontes de medição dinâmica (SMU) Keithley 2400 e calibrador de corrente Valhalla Scientific 2500, para aferição do picoamperímetro.
- Multímetros de bancada Keithley 2001 e Keysight 34460A, para aferição do calibrador de tensão DC.
- Cabos GPIB e gateway LAN/GPIB Agilent E5810A.
- Cabos coaxiais com blindagem, padrão RG316 e conectores BNC e UHF.

## **4.2 Métodos**

A Figura 6 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada, abrangendo o planejamento experimental, impressão, preparação das amostras, medição da resistividade elétrica de volume, análise estatística dos dados e caracterização estrutural e microscópica. Todas as etapas do fluxograma são detalhadas nos subtópicos deste item.

**Figura 6** - Fluxograma da metodologia empregada no projeto de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### 4.2.1 Método de Impressão 3-D

Neste estudo, as amostras possuem formato circular com diâmetro de 80 mm e espessura de 5 mm. O modelo 3D da amostra foi projetado por meio do software OpenSCAD, e posteriormente foi exportado em formato STL para o software Ultimaker Cura 5.1.0. A maioria dos parâmetros de impressão foram configurados para os mesmos valores, com exceção da densidade de preenchimento, que variou conforme os níveis adotados para o fator preenchimento, em concordância com a Tabela 2. Outrossim, estabeleceu-se como aceitável uma variação de umidade ambiente entre 45 e 55% para impressão das amostras.

**Tabela 2** - Parâmetros de Impressão 3-D para Impressora Kingroon KP3S.

| Parâmetro                     | Kingroon K3PS | Unidade |
|-------------------------------|---------------|---------|
| Altura da Camada              | 0,16          | mm      |
| Diâmetro do Bico              | 0,4           | mm      |
| Densidade de Preenchimento    | 100           | %       |
| Padrão de Preenchimento       | Cúbico        |         |
| Espessura de Camada da Parede | 1,44          | mm      |
| Espessura de Camada Superior  | 0,8           | mm      |
| Espessura de Camada Inferior  | 0,8           | mm      |
| Temperatura de Impressão      | 200 - 220     | °C      |
| Temperatura da Mesa           | 70            | °C      |
| Velocidade de Impressão       | 50            | mm/s    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### 4.2.2 Preparação das Amostras

A medição da espessura das amostras foi realizada de acordo com a norma ASTM D374. Outrossim, todas as amostras foram higienizadas com álcool isopropílico e manuseadas com luvas de policloreto de vinila, em concordância com a norma ASTM D257.

#### 4.2.3 Método de Medição da Resistividade Elétrica de Volume

Para determinar a resistividade elétrica de volume das amostras de PLA utilizou-se um sistema de medição composto por três equipamentos principais, sendo o primeiro, o Calibrador de tensão DC Fluke 5440B, que tem como função fornecer uma tensão de 500V ao sistema. O segundo equipamento é o Adaptador de Resistividade Keithley 6105, utilizado para medir a resistividade volumétrica das amostras quando

conectado a uma fonte de alimentação e um eletrômetro ou picoamperímetro, este possui um eletrodo recoberto com espuma condutora que comporta amostras com diâmetro entre 63,00 e 102,00 mm e espessura entre 1,50 e 6,30 mm. O terceiro equipamento é o Picoamperímetro Keithley 6485, que mede a corrente gerada pela diferença de potencial elétrico das amostras durante o período de eletrificação. Todos estes equipamentos (Figura 7) estão interconectados por cabos coaxiais com blindagens no padrão RG316, com isolamento em PTFE (politetrafluoretileno), utilizando conectores dos padrões BNC e UHF, também com isolamento em PTFE e conectores banhados a ouro. Para todos os ensaios foram registrados: o material, cor, preenchimento (%), tensão aplicada (V), umidade relativa do ar (%), temperatura ambiente (°C), espessura do material (cm). A resistividade elétrica de volume foi calculada usando a Equação 3 (ASTM, 2007):

$$\rho_v = \frac{22,9}{t_c} \cdot \frac{500}{i} \quad (3)$$



**Figura 7** - Visão geral dos equipamentos que compõem o sistema de medição: (a) Calibrador de tensão DC Fluke 5440B, (b) Adaptador de Resistividade Modelo 6105, (c) Picoamperímetro Modelo 6485, (d) Circuito de proteção para sobrecarga elétrica entre Adaptador de Resistividade Modelo 6105 e Picoamperímetro Modelo 6485.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a automatização do sistema de medição, elaborou-se uma programação em linguagem Python com intuito de salvar os valores de corrente e tempo para calcular a resistividade volumétrica de cada amostra, conforme Anexo A. Considerou-se, para fins de cálculo da resistividade elétrica de volume, a zona onde a corrente apresenta um comportamento assintótico com um coeficiente de variação igual ou menor a 1%. Adotou-se como condições primárias para a execução da medição de resistividade de volume, uma umidade relativa do ar entre 40 e 60% (TSUTSUMI, 2007).

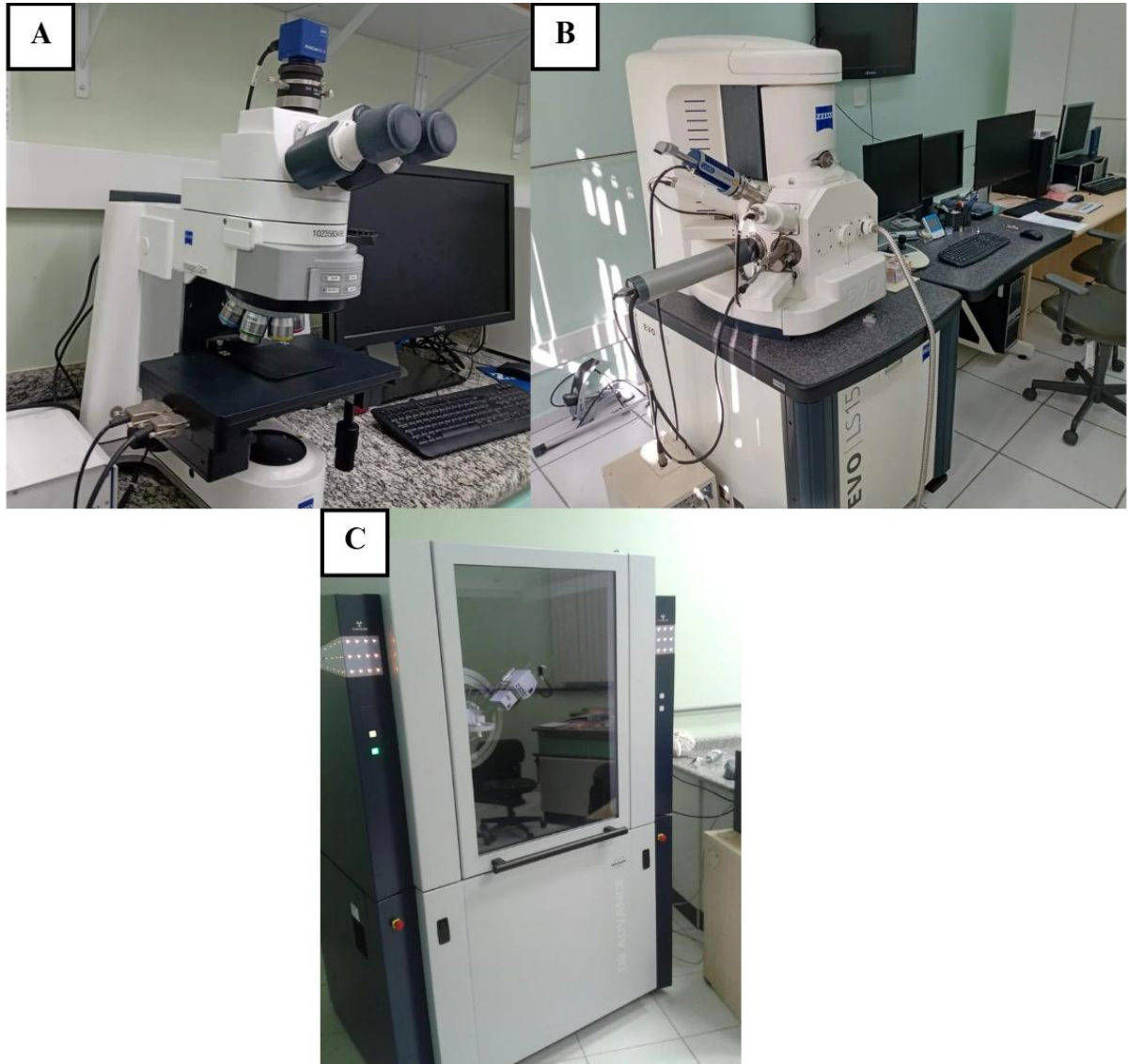
#### **4.2.4 Método de Análise Estatística**

Para este estudo, foi elaborado um planejamento experimental com dois fatores: cor e densidade de preenchimento, a cor com dois níveis (preto sólido e cobre metálico, no caso do PLA, e preto sólido e vermelho sólido, para o PETG) e a densidade de preenchimento com quatro níveis (25%, 50%, 75%, 100%). O número mínimo de ensaios necessários são oito devido à multiplicação entre o número de níveis dos fatores e, considerando uma tréplica, foram realizados vinte e quatro ensaios por material (NETO et al., 2002). Logo, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov de normalidade dos dados e, posteriormente, utilizou-se a transformação de Johnson para normalizar os dados. Com os dados normais, utilizou-se a análise de variância, com nível de significância de 5% ( $\alpha=0,050$ ) para avaliar a influência das variáveis de entrada sobre a média da resistividade elétrica de volume. O software Minitab para Windows na versão 17.1.0 foi utilizado para realizar a análise estatística.

#### **4.2.5 Análise Microscópica e Caracterização Estrutural**

Para avaliar a qualidade da superfície das amostras, foi utilizado o microscópio óptico motorizado Zeiss AxioImager Z2m, em campo claro, com ampliação de cinco vezes e dez vezes. A análise da composição das amostras em relação aos seus aditivos e pigmentos foi realizada utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) ambiental Zeiss EVO LS-15 com espectroscopia da fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDS). Além disso, para a caracterização estrutural das amostras, foi utilizado o Difratorômetro de Raios X Bruker D8 Advance ECO para a obtenção dos difratogramas.

**Figura 8** - Visão geral dos equipamentos utilizados para a análise microscópica e caracterização estrutural: (a) Microscópio óptico motorizado Zeiss Axiolmager Z2m com sistema de microscopia correlativa Zeiss Shuttle & Find, (b) Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15 com detector EDS Oxford Xplore 30, (c) Difratômetro de Raios X Bruker D8 Advance ECO.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Comparação da Resistividade Elétrica de Volume

A resistividade elétrica de volume das amostras de PLA e PETG em função da cor e preenchimento foram resumidas na Tabela 3 e 4. A resistividade elétrica de volume das amostras de PLA e PETG é maior do que  $10^{16} \Omega.cm$ . Entretanto, a resistividade elétrica de volume do PEAD é maior do que  $10^{17} \Omega.cm$ .

**Tabela 3** - Resistividade elétrica de volume do PLA em função da cor e densidade de preenchimento.

| Experimento | Cor      | Densidade de Preenchimento [%] | Resistividade de Volume [ $\Omega.cm$ ] | Desvio-Padrão [ $\Omega.cm$ ] | Espessura Média [mm] |
|-------------|----------|--------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1           | Sólida   | 25                             | 5,86E+16                                | 6,45E+14                      | 4,9268               |
| 2           | Sólida   | 50                             | 4,20E+16                                | 5,41E+14                      | 4,9058               |
| 3           | Sólida   | 75                             | 3,48E+16                                | 3,62E+14                      | 4,9320               |
| 4           | Sólida   | 100                            | 7,80E+16                                | 8,79E+14                      | 4,9302               |
| 5           | Metálico | 25                             | 7,25E+16                                | 9,17E+14                      | 4,8938               |
| 6           | Metálico | 50                             | 4,37E+16                                | 6,25E+14                      | 4,9034               |
| 7           | Metálico | 75                             | 1,24E+17                                | 2,67E+15                      | 4,9016               |
| 8           | Metálico | 100                            | 7,17E+16                                | 6,80E+14                      | 4,8976               |
| 9           | Sólida   | 25                             | 7,25E+16                                | 1,89E+15                      | 4,9268               |
| 10          | Sólida   | 50                             | 5,35E+16                                | 2,05E+14                      | 4,9058               |
| 11          | Sólida   | 75                             | 3,48E+16                                | 4,76E+14                      | 4,9320               |
| 12          | Sólida   | 100                            | 5,51E+16                                | 1,03E+15                      | 4,9302               |
| 13          | Metálico | 25                             | 1,22E+17                                | 1,71E+15                      | 4,8938               |
| 14          | Metálico | 50                             | 5,77E+16                                | 8,74E+14                      | 4,9034               |
| 15          | Metálico | 75                             | 1,01E+17                                | 6,56E+14                      | 4,9016               |
| 16          | Metálico | 100                            | 4,56E+16                                | 5,10E+14                      | 4,8976               |
| 17          | Sólida   | 25                             | 6,84E+16                                | 1,44E+15                      | 4,9268               |
| 18          | Sólida   | 50                             | 5,44E+16                                | 1,47E+15                      | 4,9058               |
| 19          | Sólida   | 75                             | 5,37E+16                                | 1,65E+15                      | 4,9320               |
| 20          | Sólida   | 100                            | 9,03E+16                                | 1,27E+15                      | 4,9302               |
| 21          | Metálico | 25                             | 1,67E+17                                | 1,31E+15                      | 4,8938               |
| 22          | Metálico | 50                             | 6,92E+16                                | 1,53E+15                      | 4,9034               |
| 23          | Metálico | 75                             | 1,17E+17                                | 7,55E+14                      | 4,9016               |
| 24          | Metálico | 100                            | 7,07E+16                                | 5,94E+14                      | 4,8976               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

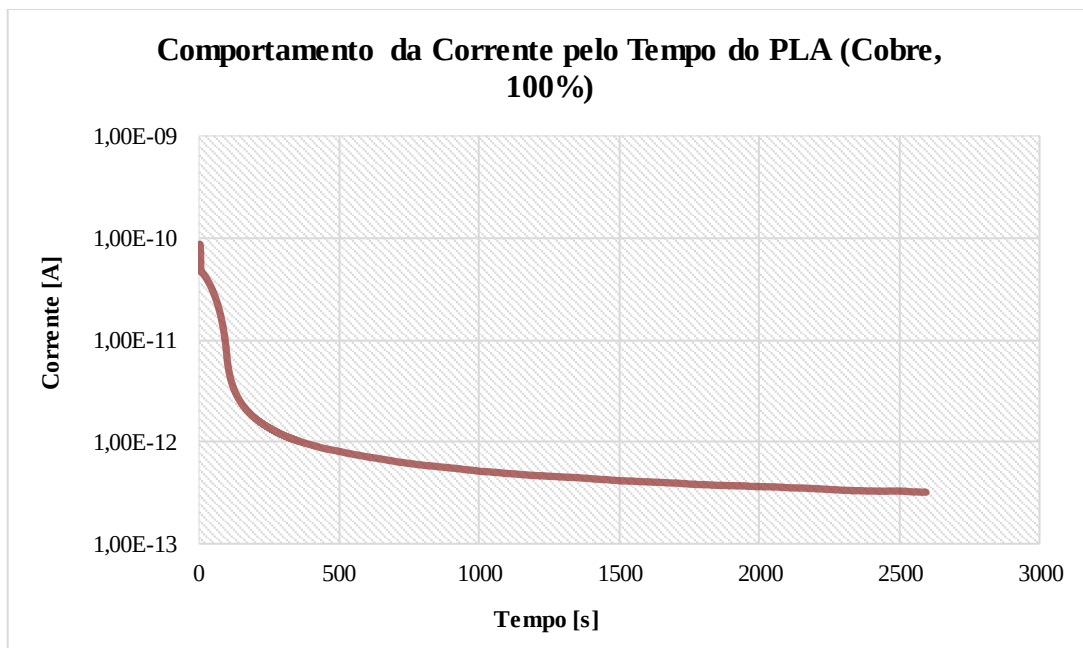
**Tabela 4** - Resistividade elétrica de volume do PETG em função da cor e densidade de preenchimento.

| Experimento | Cor      | Densidade de Preenchimento [%] | Resistividade de Volume [ohm.cm] | Desvio-Padrão [ohm.cm] | Espessura Média [mm] |
|-------------|----------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------|
| 1           | Vermelho | 25                             | 7,64E+15                         | 2,96E+13               | 5,0210               |
| 2           | Vermelho | 50                             | 2,27E+16                         | 5,23E+13               | 5,0140               |
| 3           | Vermelho | 75                             | 2,87E+16                         | 2,15E+14               | 5,0078               |
| 4           | Vermelho | 100                            | 5,20E+16                         | 6,25E+14               | 4,9974               |
| 5           | Preto    | 25                             | 3,60E+16                         | 2,88E+14               | 4,9824               |
| 6           | Preto    | 50                             | 4,39E+16                         | 3,27E+14               | 5,0138               |
| 7           | Preto    | 75                             | 1,01E+17                         | 1,18E+15               | 5,0094               |
| 8           | Preto    | 100                            | 4,16E+16                         | 7,82E+14               | 4,9956               |
| 9           | Vermelho | 25                             | 8,00E+15                         | 2,63E+13               | 5,0210               |
| 10          | Vermelho | 50                             | 1,43E+16                         | 1,19E+13               | 5,0140               |
| 11          | Vermelho | 75                             | 2,15E+16                         | 1,59E+14               | 5,0078               |
| 12          | Vermelho | 100                            | 4,68E+16                         | 5,26E+14               | 4,9974               |
| 13          | Preto    | 25                             | 2,11E+16                         | 5,97E+13               | 4,9824               |
| 14          | Preto    | 50                             | 3,70E+16                         | 3,07E+14               | 5,0138               |
| 15          | Preto    | 75                             | 9,39E+16                         | 2,66E+15               | 5,0094               |
| 16          | Vermelho | 100                            | 5,65E+16                         | 8,64E+14               | 4,9956               |
| 17          | Vermelho | 25                             | 7,78E+15                         | 2,77E+13               | 5,0210               |
| 18          | Vermelho | 50                             | 1,79E+16                         | 2,89E+13               | 5,0140               |
| 19          | Vermelho | 75                             | 3,14E+16                         | 6,11E+13               | 5,0078               |
| 20          | Preto    | 100                            | 4,02E+16                         | 4,38E+14               | 4,9974               |
| 21          | Preto    | 25                             | 2,13E+16                         | 9,88E+13               | 4,9824               |
| 22          | Preto    | 50                             | 2,82E+16                         | 1,73E+14               | 5,0138               |
| 23          | Preto    | 75                             | 4,92E+16                         | 6,48E+14               | 5,0094               |
| 24          | Vermelho | 100                            | 4,70E+16                         | 3,67E+14               | 4,9956               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

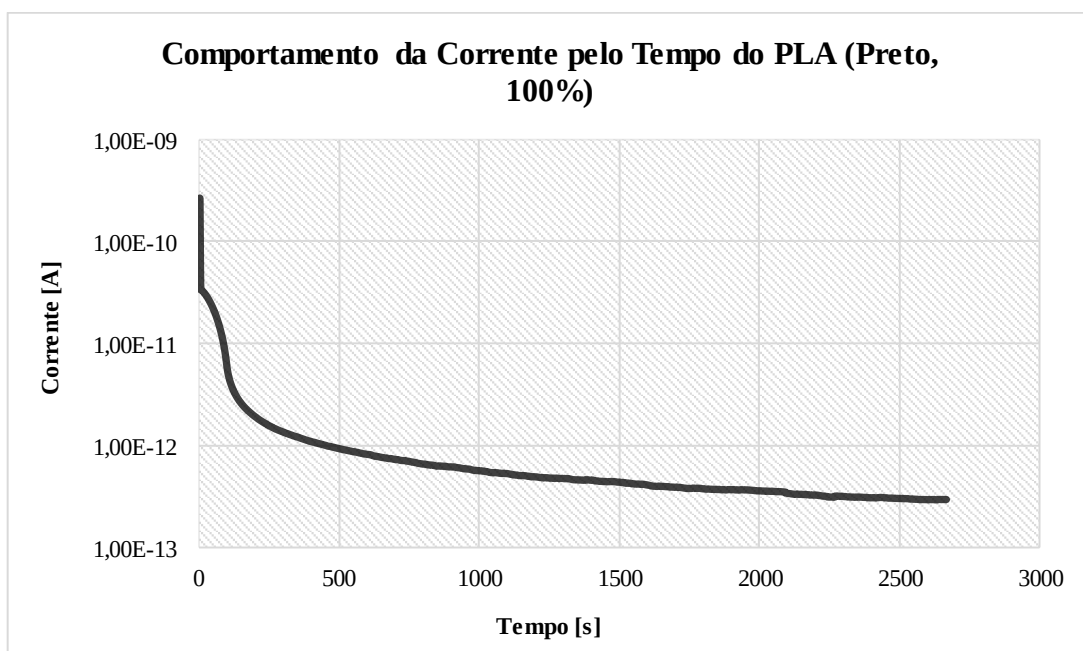
O gráfico da corrente em função do tempo durante o experimento para medição da resistividade elétrica de volume das amostras de PLA e PETG é apresentado nas Figuras 9, 10, 11 e 12. A queda da corrente ao longo do tempo é claramente observada em todos os ensaios, identificando esse padrão como o comportamento da corrente de absorção, posteriormente a corrente adquire um comportamento assintótico. Os anexos de B até M apresentam o gráfico de corrente pelo tempo das amostras restantes.

**Figura 9** - Gráfico de corrente-tempo de PLA da cor metálica com 100% de densidade de preenchimento.



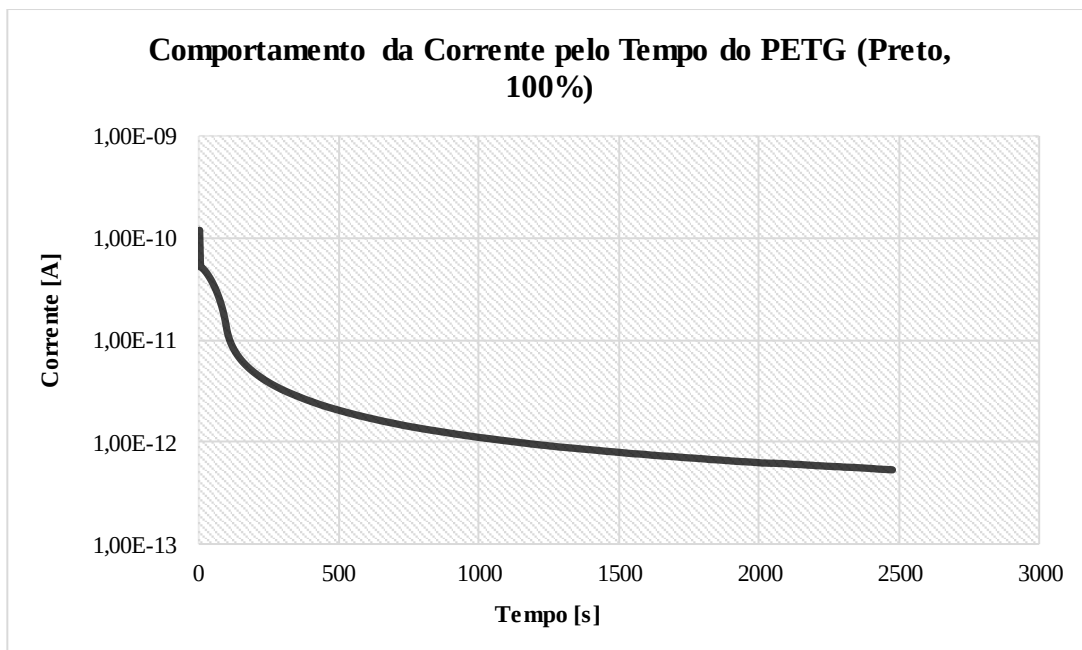
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 10** - Gráfico de corrente-tempo de PLA da cor preto sólido com 100% de densidade de preenchimento.



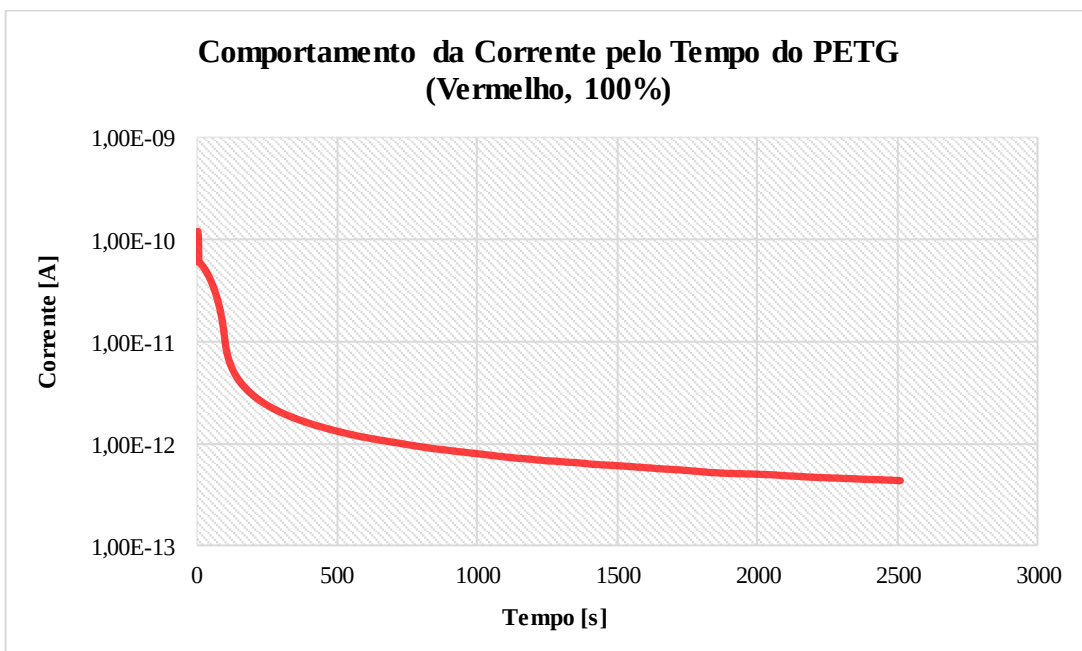
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 11** - Gráfico de corrente-tempo de PETG da cor preto sólido com 100% de densidade de preenchimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

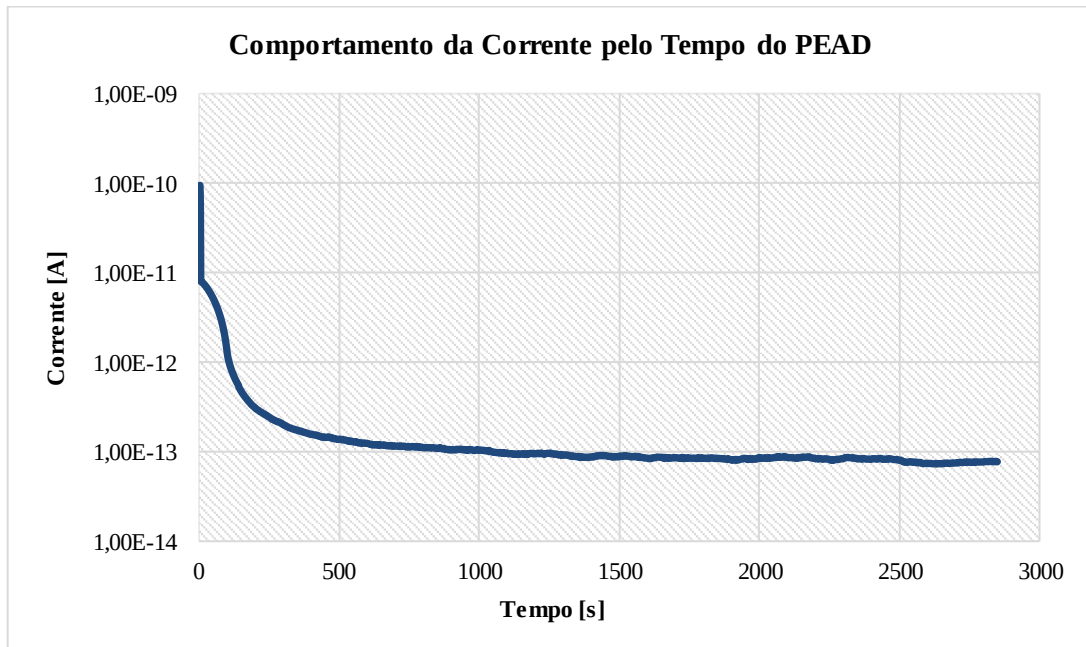
**Figura 12** - Gráfico de corrente-tempo de PETG da cor vermelho sólido com 100% de densidade de preenchimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 13, observa-se a corrente em função do tempo durante o experimento para medição da resistividade elétrica de volume da amostra de PEAD. A média da resistividade elétrica de volume do PEAD foi maior que  $10^{17} \Omega \cdot cm$ .

**Figura 13** - Gráfico de corrente-tempo do PEAD.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 5.2 Comparação da Análise Estatística

### 5.2.1 Análise Estatística do PLA

Pela Tabela 5, que apresenta o resultado da análise de variância, percebe-se que existe a influência da cor, densidade de preenchimento e interação entre cor e densidade de preenchimento sobre a média da resistividade elétrica de volume, dado que o P-Valor é menor do que o alfa (0,05) adotado, ou seja, a mudança de nível do fator resultou em valores da variável resposta estatisticamente diferentes, logo, existe efeito significativo. Uma interpretação da análise de variância foi realizada através do



Valor-F, onde valores maiores que 2 podem indicar que fator é relevante em relação à variável resposta.

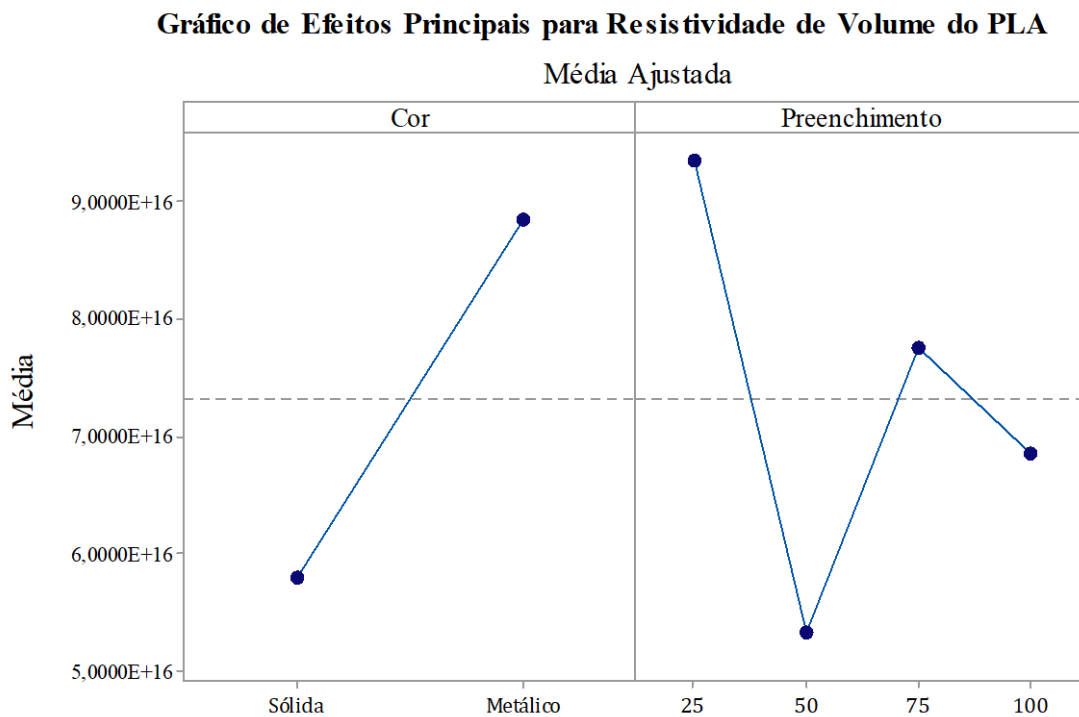
**Tabela 5 - Resultado da ANOVA para PLA.**

| Fator                          | SQ       | GL | SMQ      | F-Valor | P-Valor | Contribuição |
|--------------------------------|----------|----|----------|---------|---------|--------------|
| A (Cor)                        | 5,60E+33 | 1  | 5,60E+33 | 13,60   | 0,002   | 23,01%       |
| B (Densidade de Preenchimento) | 5,06E+33 | 3  | 1,69E+33 | 4,10    | 0,025   | 20,81%       |
| Interação entre A e B          | 7,08E+33 | 3  | 2,36E+33 | 5,73    | 0,007   | 29,10%       |
| Erro                           | 6,58E+33 | 16 | 4,12E+32 |         |         | 27,08%       |
| Total                          | 2,43E+34 | 23 |          |         |         | 100%         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O gráfico de efeito da resistividade de volume em função da cor e densidade de preenchimento é apresentado na Figura 14. Por meio deste, vê-se que a média da resistividade elétrica de volume das amostras de PLA da cor cobre metálico é  $8,85.10^{16} \Omega.cm$ , enquanto para as amostras da cor preto sólido é  $5,80.10^{16} \Omega.cm$ , visto que a cor é influente sobre a variável resposta. Em relação à densidade de preenchimento, observa-se que a maior resistividade elétrica de volume foi observada quando o preenchimento foi de 25%.

**Figura 14** - Gráfico de efeitos da resistividade de volume para amostras de PLA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 5.2.2 Análise Estatística do PETG

A Tabela 7, que apresenta a análise de variância, mostra que existe a influência da cor, densidade de preenchimento e interação entre cor e densidade de preenchimento sobre a média da resistividade elétrica de volume, dado que o P-Valor é menor do que o alfa adotado, logo, a mudança de nível resultou em valores da média da resistividade elétrica de volume diferentes. Além disso, a contribuição do erro no experimento do PETG foi 16,48%, enquanto para o PLA foi de 27,08%.

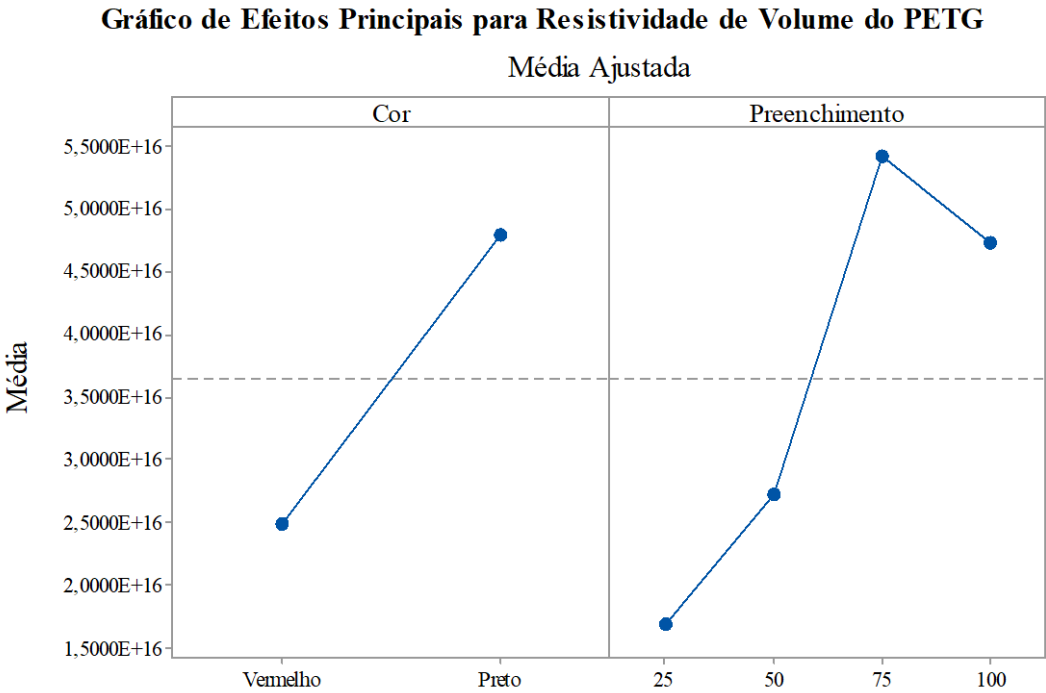
**Tabela 7 - Resultado da ANOVA para PETG.**

| Fator                          | SQ       | GL | SMQ      | F-Valor | P-Valor | Contribuição |
|--------------------------------|----------|----|----------|---------|---------|--------------|
| A (Cor)                        | 3,22E+33 | 1  | 3,22E+33 | 24,15   | 0,000   | 24,89%       |
| B (Densidade de Preenchimento) | 5,40E+33 | 3  | 1,80E+33 | 13,49   | 0,000   | 41,70%       |
| Interação entre A e B          | 2,19E+33 | 3  | 7,31E+32 | 5,48    | 0,009   | 16,93%       |
| Erro                           | 2,14E+33 | 16 | 1,34E+32 |         |         | 16,49%       |
| Total                          | 1,30E+34 | 23 |          |         |         | 100%         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O gráfico de efeito da resistividade de volume em função da cor e densidade de preenchimento é apresentado na Figura 15. Por meio deste, vê-se que a média da resistividade elétrica de volume das amostras de PETG da cor preto sólido é  $4,81 \cdot 10^{16} \Omega \cdot cm$ , enquanto para as amostras da cor vermelho sólido é  $2,49 \cdot 10^{16} \Omega \cdot cm$ , dado que a cor é influente sobre a variável resposta. Além disso, a densidade de preenchimento de 75% apresentou a maior resistividade elétrica de volume quando comparado com os outros níveis de preenchimento.

**Figura 15** - Gráfico de efeitos da resistividade de volume para amostras de PETG.

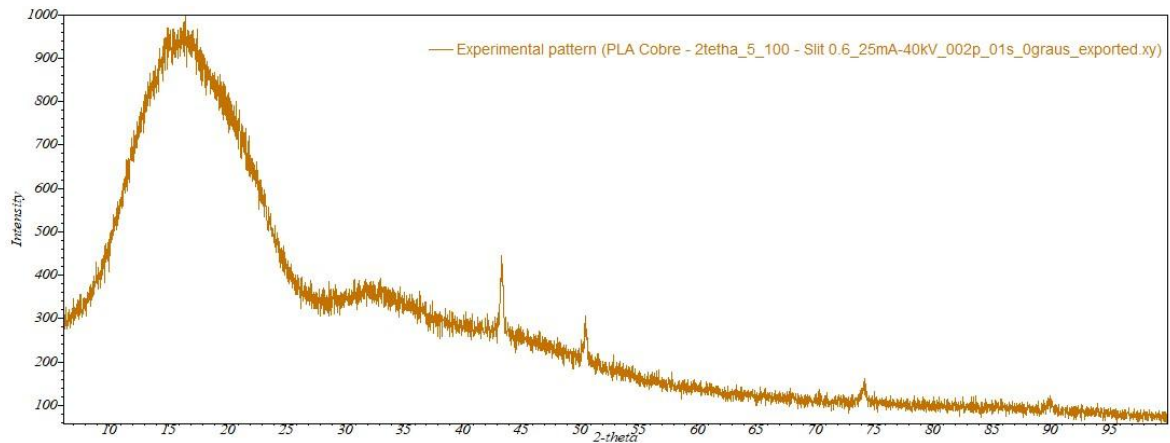


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**5.3 Caracterização Estrutural**

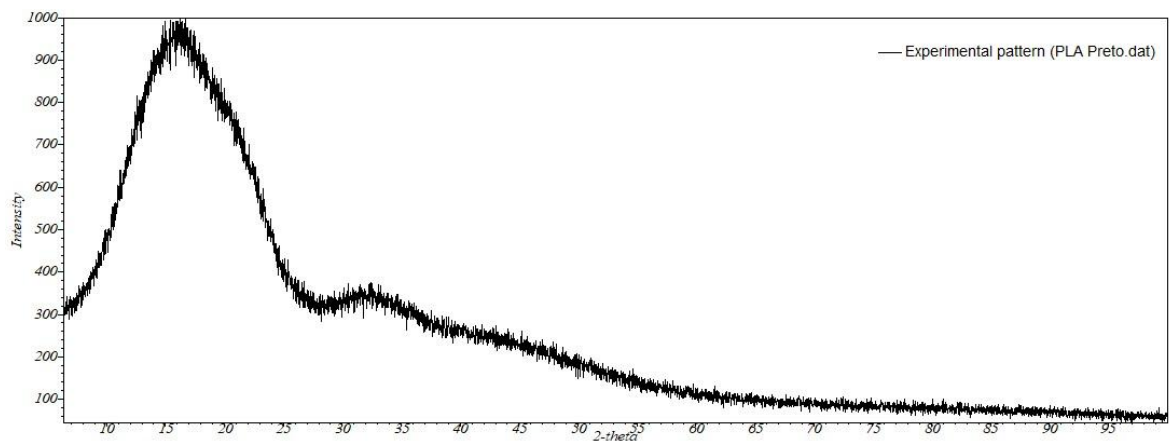
As Figuras 16 e 17 exibem os difratogramas do PLA nas cores cobre metálico e preto sólido, respectivamente. Em ambos os casos, o difratograma mostra que o PLA é um material amorfo, uma vez que não apresenta um arranjo ordenado de átomos em sua microestrutura, caracterizando-o como amorfo. No entanto, observam-se picos específicos no difratograma do PLA de cor cobre metálico que não estão presentes no difratograma do PLA preto sólido. Esse aspecto aponta para uma possível diferença na composição entre as amostras.

**Figura 16** - Resultado da difratometria para o PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 17** - Resultado da difratometria para o PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 100%.

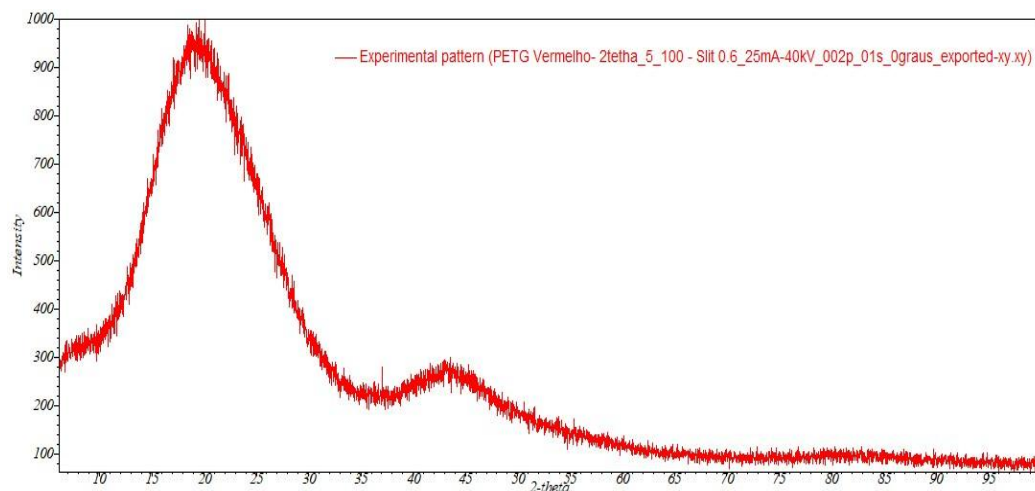


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O difratograma do PETG da cor vermelho e preto, apresentado nas Figuras 18 e 19, respectivamente, mostra que este é um material amorfo, que já era um resultado esperado segundo a literatura. Entretanto, diferentemente do PLA, não há a presença

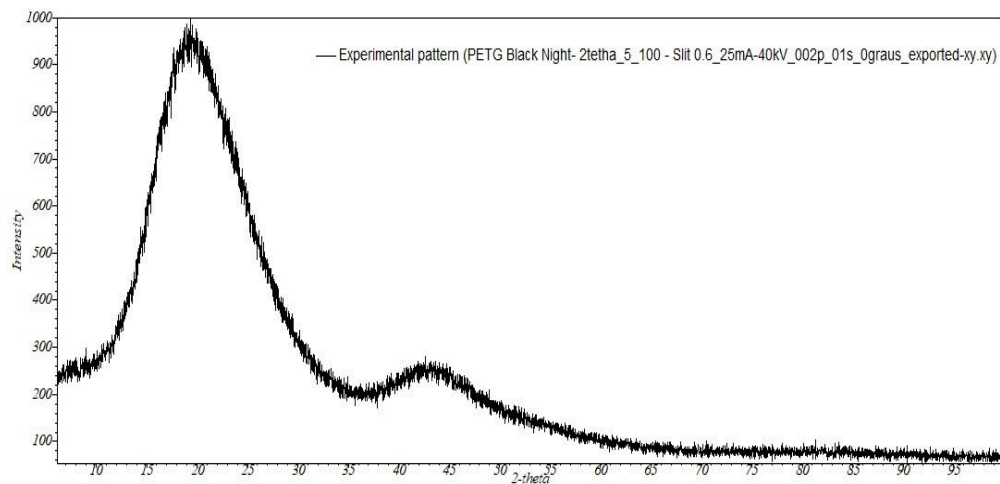
de picos distintos entre os dois difratogramas, indicando uma composição similar entre ambas as cores.

**Figura 18** - Resultado da difratometria para o PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 19** - Resultado da difratometria para o PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 100%.



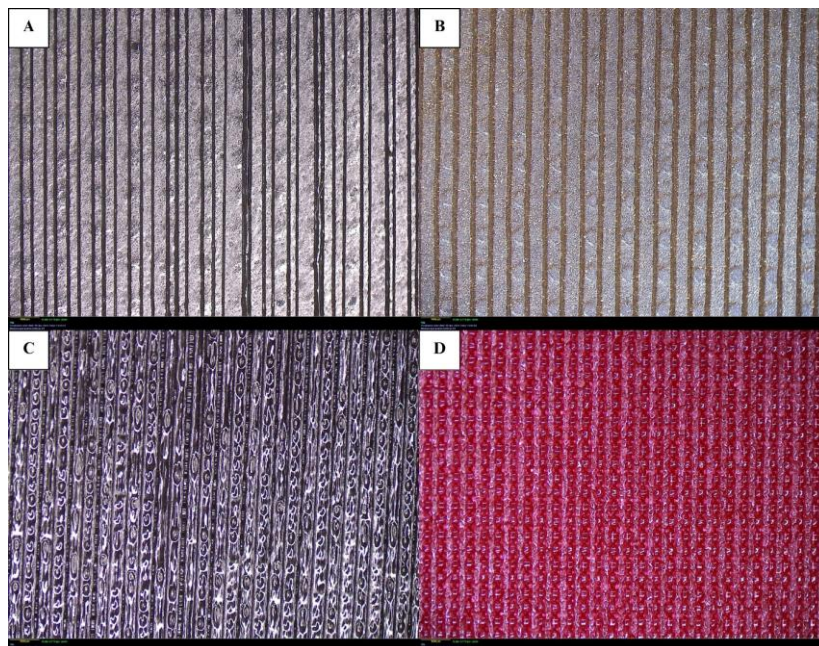
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 5.4 Análise Microscópica

### 5.4.1 Análise por microscopia óptica

A análise microscópica, conforme demonstrado nas Figuras 20 e 21, indica uma diferença significativa na microestrutura entre o PLA e o PETG. Isso se deve à presença do "glicol modificado" na composição do PETG, tornando seu filamento mais transparente em comparação ao PLA. O glicol impede a formação de uma estrutura semicristalina, resultando em uma estrutura amorfa. A redução da cristalinidade é o que confere a transparência ao material.

**Figura 20** - Microestrutura das amostras de PLA-HT e PETG, aquisição feita em campo claro com ampliação de 10x no estereomicroscópio Aida STL2 Plus: (a) PLA-HT cor preto sólido com preenchimento de 100%, (b) PLA-HT cor cobre metálico com preenchimento de 100%, (c) PETG cor preto com preenchimento de 100%, (d) PETG cor vermelho com preenchimento de 100%.

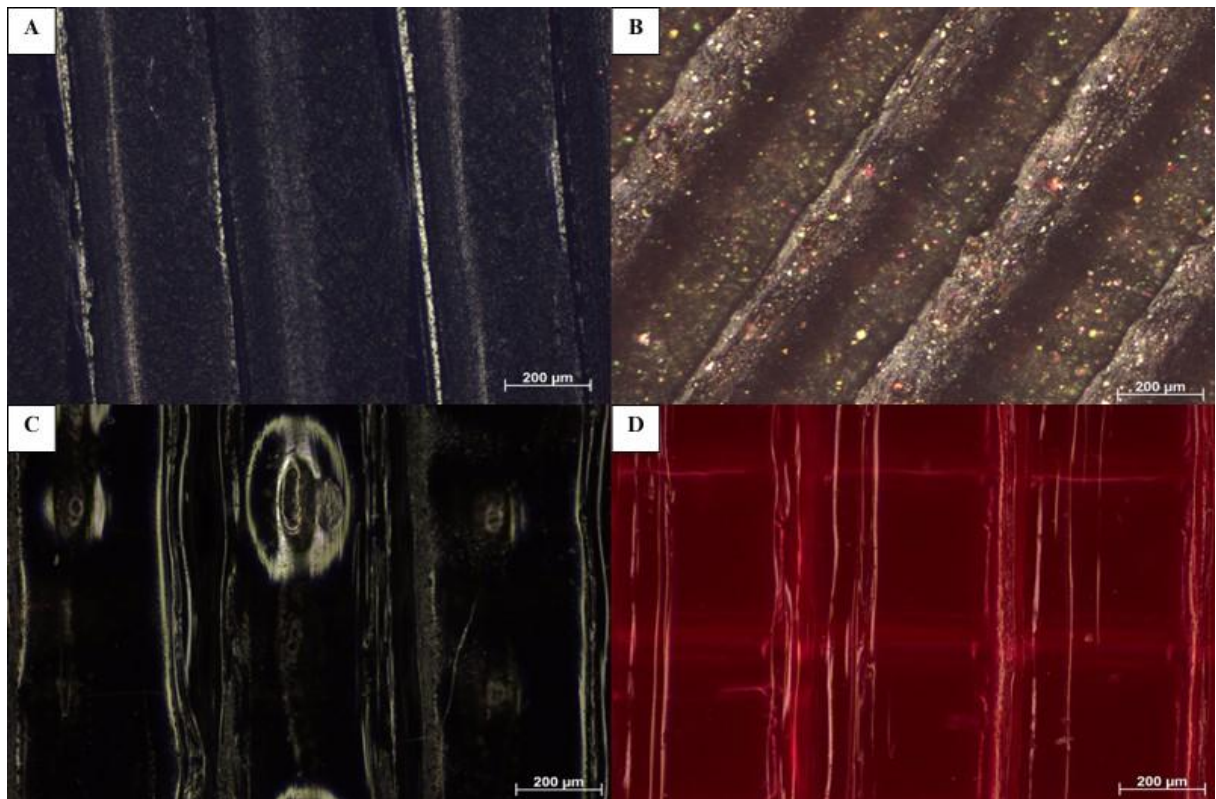


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).



**Figura 21** - Microestrutura das amostras de PLA e PETG, aquisição feita em campo claro com ampliação de 5x no Microscópio óptico motorizado Zeiss AxioImager Z2m:

(a) PLA cor preto sólido com densidade de preenchimento de 100%, (b) PLA cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 100%, (c) PETG cor preto com densidade de preenchimento de 100%, (d) PETG cor vermelho com densidade de preenchimento de 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

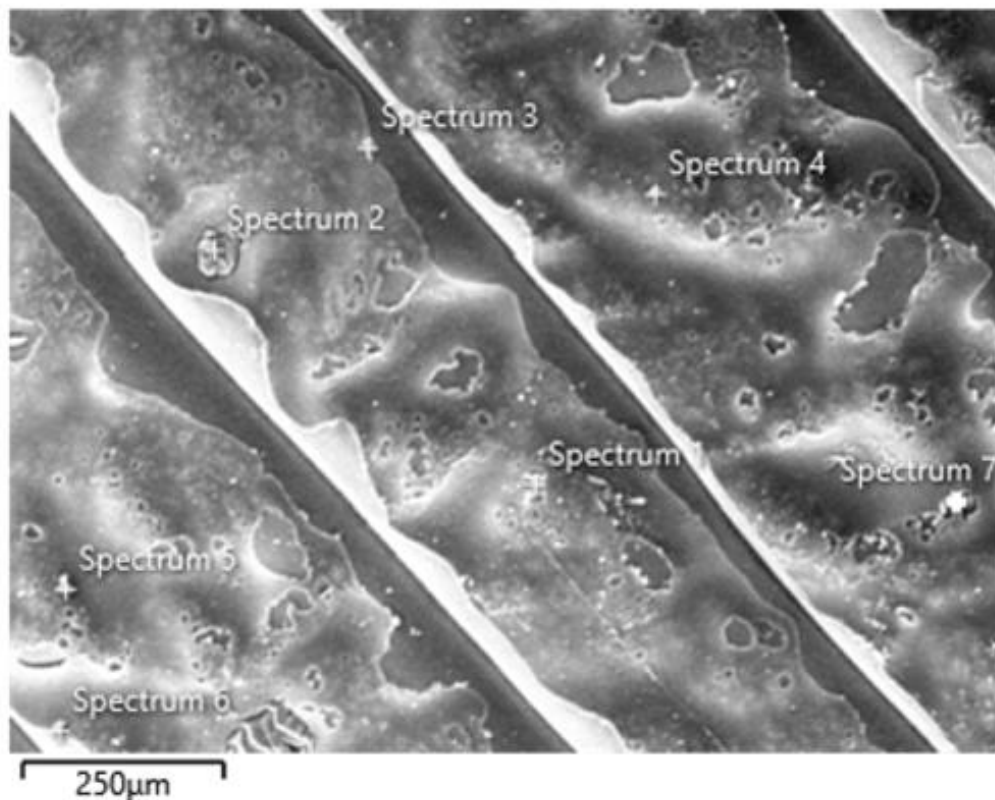
Ainda na Figura 21, em relação à análise microscópica do PLA, observa-se uma diferença significativa na presença de pigmentos entre as amostras de cores sólidas e metálicas. Foi notado que as amostras de cor metálica exibem a presença de pigmentos em sua microestrutura, enquanto as amostras de cor sólida não apresentam essa característica.



#### 5.4.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva da fluorescência de raios-x

A análise microscópica realizada por meio de MEV, combinada com EDS, conforme ilustrado nas Figuras 22, 23, 24 e 25, e nas Tabelas 8, 9, 10 e 11, revela a presença de diferentes elementos na estrutura molecular tanto do PLA quanto do PETG. A presença de elementos com teor inferior a 5% do total variou de acordo com a mudança de cor.

**Figura 22** - Microestrutura da amostra de PETG vermelho, aquisição feita com o detector VPSE-G3 (elétrons secundários sob pressão variável), em modo de baixo vácuo, a 20 kV e sob pressões entre 50 e 60 Pa, com gás N2 5.0 na câmara no Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15.



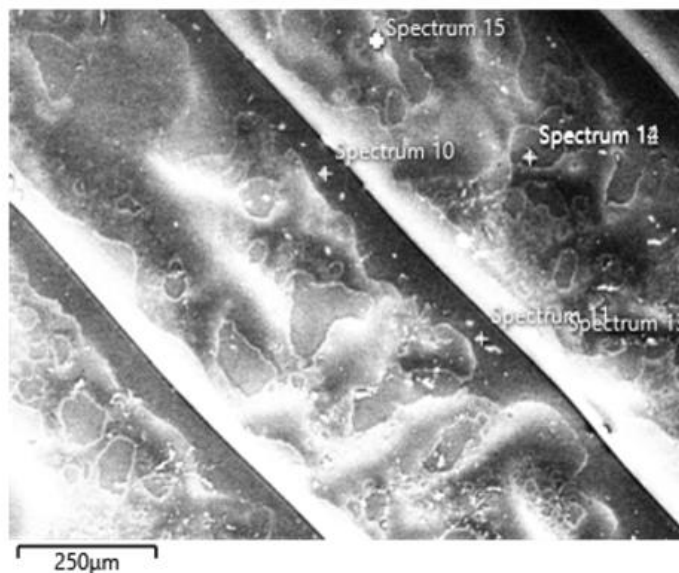
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 8** - Análise de elementos por espectroscopia EDS em MEV do PETG vermelho.

| Espectro Químico | Espectro 1 | Espectro 3 | Espectro 4 | Espectro 5 | Espectro 7 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| C                | 60,91%     | -          | 50,53%     | 62,65%     | 72,05%     |
| O                | 27,08%     | -          | 35,32%     | 27,94%     | 27,50%     |
| Na               | -          | 34,79%     | -          | 0,21%      | -          |
| Mg               | 1,54%      | 1,90%      | 0,65%      | 1,13%      | -          |
| Al               | 0,30%      | 3,22%      | -          | 0,39%      | -          |
| Si               | 2,19%      | 2,55%      | -          | 0,37%      | -          |
| S                | 0,05%      | 5,56%      | -          | 1,00%      | -          |
| Cl               | 2,10%      | 30,20%     | -          | 0,07%      | -          |
| K                | 0,06%      | 15,76%     | -          | -          | -          |
| Ca               | 5,02%      | 6,02%      | 13,50%     | 6,23%      | 0,44%      |
| Ti               | 0,50%      | -          | -          | -          | -          |
| Fe               | 0,24%      | -          | -          | -          | -          |
| Total            | 100%       | 100%       | 100%       | 100%       | 100%       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)..

**Figura 23** - Microestrutura da amostra de PETG preto, aquisição feita com o detector VPSE-G3 (elétrons secundários sob pressão variável), em modo de baixo vácuo, a 20 kV e sob pressões entre 50 e 60 Pa, com gás N2 5.0 na câmara no Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15.



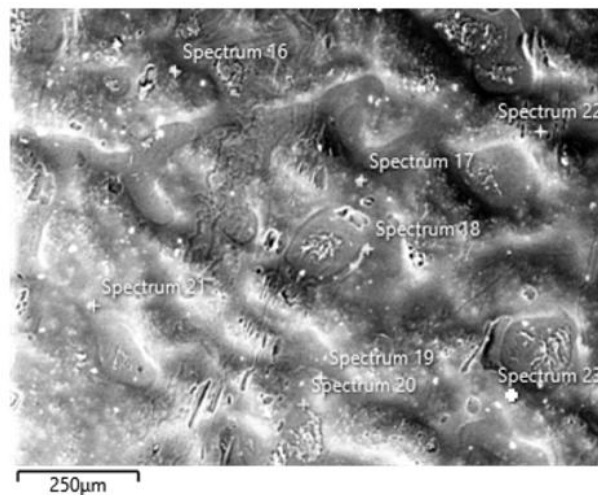
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 9** - Análise de elementos por espectroscopia EDS em MEV do PETG preto.

| Espectro Químico | Espectro 10 | Espectro 11 | Espectro 12 | Espectro 13 | Espectro 14 | Espectro 15 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| C                | 71,86%      | 71,72%      | 67,74%      | 66,32%      | 71,68%      | 58,65%      |
| N                | -           | -           | -           | -           | -           | 11,42%      |
| O                | 20,84%      | 21,75%      | 29,86%      | 27,54%      | 24,87%      | 23,95%      |
| Na               | 0,12%       | -           | 1,05%       | -           | 1,53%       | 2,47%       |
| Mg               | -           | -           | -           | 0,62%       | 0,06%       | -           |
| Si               | -           | -           | -           | 0,1%        | -           | -           |
| P                | 0,23%       | 0,18%       | -           | -           | -           | -           |
| S                | -           | -           | 0,04%       | -           | 0,03%       | 0,31%       |
| Cl               | -           | 0,06%       | 0,84%       | -           | 1,15%       | 1,97%       |
| K                | -           | -           | 0,37%       | -           | 0,53%       | 0,91%       |
| Ca               | 0,18%       | 0,17%       | 0,11%       | 5,42%       | 0,14%       | 0,14%       |
| Cu               | 1,3%        | 0,16%       | -           | -           | -           | -           |
| Zn               | 5,47%       | 5,95%       | -           | -           | -           | -           |
| Rh               | -           | -           | -           | -           | -           | 0,19%       |
| Total            | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 24** - Microestrutura da amostra de PLA metálico (cobre), aquisição feita com o detector VPSE-G3 (elétrons secundários sob pressão variável), em modo de baixo vácuo, a 20 kV e sob pressões entre 50 e 60 Pa, com gás N2 5.0 na câmara no Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 10** - Análise de elementos por espectroscopia EDS em MEV do PLA cobre metálico.

| Espectro Químico | Espectro 16 | Espectro 17 | Espectro 18 | Espectro 19 | Espectro 20 | Espectro 21 | Espectro 22 | Espectro 23 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| C                | 55,20%      | 57,70%      | 56,80%      | 59,20%      | 71,80%      | 63,60%      | 63,70%      | 59,62%      |
| O                | 31,76%      | 34,40%      | 34,20%      | 29,70%      | 27,20%      | 30,00%      | 28,60%      | 33,16%      |
| F                | 1,43%       | -           | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Mg               | 2,93%       | -           | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Al               | 1,06%       | 2,60%       | 2,20%       | 3,00%       | 0,30%       | 2,20%       | 1,30%       | 1,68%       |
| Si               | 2,76%       | 2,80%       | 2,20%       | 3,20%       | 0,30%       | 2,20%       | 1,30%       | 1,73%       |
| K                | 1,24%       | 1,00%       | 0,80%       | 1,30%       | 0,10%       | 0,80%       | 0,60%       | 0,60%       |
| Ti               | 0,06%       | -           | -           | -           | -           | -           | 0,10%       | -           |
| Fe               | 3,56%       | 1,40%       | 3,80%       | 3,60%       | 0,30%       | 1,20%       | 4,50%       | 3,21%       |
| Na               | -           | 0,10%       | -           | -           | -           | 0,10%       | -           | -           |
| Total            | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Figura 25** - Microestrutura da amostra de PLA preto, aquisição feita com o detector VPSE-G3 (elétrons secundários sob pressão variável), em modo de baixo vácuo, a 20 kV e sob pressões entre 50 e 60 Pa, com gás N2 5.0 na câmara no Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 11** - Análise de elementos por espectroscopia EDS em MEV do PLA preto sólido.

| Espectro Químico | Espectro 24 | Espectro 25 | Espectro 26 | Espectro 27 | Espectro 28 | Espectro 29 | Espectro 30 | Espectro 31 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| C                | 64,50%      | 76,00%      | 69,70%      | 62,00%      | 75,30%      | 75,40%      | 70,80%      | 67,60%      |
| O                | 30,70%      | 24,00%      | 30,30%      | 29,30%      | 24,70%      | 24,20%      | 29,20%      | 32,40%      |
| Fe               | 2,50%       | -           | -           | -           | -           | -           | -           | -           |
| Al               | 0,90%       | -           | -           | -           | -           | 0,10%       | -           | -           |
| Si               | 0,90%       | -           | -           | -           | -           | 0,10%       | -           | -           |
| K                | 0,40%       | -           | -           | 0,70%       | -           | 0,10%       | -           | -           |
| N                | -           | -           | -           | 6,10%       | -           | -           | -           | -           |
| Na               | -           | -           | -           | 0,90%       | -           | 0,10%       | -           | -           |
| Cl               | -           | -           | -           | 0,50%       | -           | 0,10%       | -           | -           |
| S                | -           | -           | -           | 0,20%       | -           | -           | -           | -           |
| Ca               | -           | -           | -           | 0,10%       | -           | -           | -           | -           |
| Total            | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        | 100%        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 6 CONCLUSÃO

O PLA e PETG são materiais que podem ser utilizados como dielétricos de alto desempenho em aplicações eletrônicas de alta precisão, devido à sua resistividade elétrica de volume média ser superior a  $10^{16} \Omega.cm$ . Especificamente, o PLA na cor cobre metálico, que apresentou uma resistividade de volume próxima a  $10^{17} \Omega.cm$ . No entanto, o PEAD continua sendo um material com uma resistividade de volume média superior a  $10^{17} \Omega.cm$ .

Os equipamentos eletrônicos empregados para medição da resistividade elétrica de volume das amostras de PLA e PETG possuem robustez para realizar medições de com resolução na faixa de 100 attoampère. Isso se deve à boa estabilidade encontrada nos ensaios, constatadas por meio dos valores médios de resistividade elétrica de volume e desvio padrão, graças à configuração do filtro móvel de 100 medições na programação do picoamperímetro e ao uso de cabos curtos e conectores com blindagem em PTFE.

Os resultados da análise estatística empregada para analisar a influência do fator cor e densidade de preenchimento sobre a resistividade elétrica de volume de amostras do PLA e PETG indicam que, com 95% de confiança, que a cor, a densidade de preenchimento e a interação entre essas duas variáveis de controle são fatores significativos sobre os valores da resistividade elétrica de volume para ambos os materiais, de acordo com a ANOVA.

A análise por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva da fluorescência de raios-X, somada aos resultados de difratometria por raios-X, indica a presença, em menor quantidade, de diferentes elementos na composição das amostras de PLA e PETG. Desta forma, a presença destes

pigmentos possivelmente é a causa de o fator cor ser significativo em relação à média da resistividade elétrica de volume para o PLA e PETG.

## REFERÊNCIAS

- ALTOMARE, A. *et al.* QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW\_COD. **Journal of Applied Crystallography**, Oxford, v. 48, p. 598-603, 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1107/S1600576715002319>. Acesso em: 02 set. 2022.
- AMBATI, S.; AMBATIPUDI, R. Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdã, v. 64, p. 804–807, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322035994>. Acesso em: 07 dez. 2024.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D257-14**: standard test methods for DC resistance or conductance of insulating materials. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- CAVALLO, F. *et al.* **Innovation trends in additive manufacturing**: Patents in 3D printing technologies. Munich: European Patent Office, 2023. Disponível em: [epo.org/trends-3dp](https://epo.org/trends-3dp). Acesso em: 22 nov. 2023.
- BALAKRISHNAN, N. K.; KOENIG, K.; SEIDE, G. The effect of dye and pigment concentrations on the diameter of melt-electrospun polylactic acid fibers. **Polymers**, Basel, v. 12, n. 10, p. 2321, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/10/2321>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- GIROTTTO, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 639–647, 2002. DOI: 10.1590/S0100-40422002000400019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/PxrHmw3ywzdDRJpymSZ55Pr/?lang=pt>. Acesso em: 21 out. 2023.
- GODOY, C. **Uma aplicação do planejamento de experimentos e carta de controle em uma indústria de cosméticos**: ciclo DMAIC. Orientador: Gladys Dorotea Cacsire Barriga. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2014.
- HANON, M. M.; DOBOS, J.; ZSIDAI, L. The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness. **Procedia Manufacturing**, Amsterdã, v. 54, p. 244–249, 2021. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.07.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978921001748>. Acesso em: 15 set. 2022.
- HAQUE, SK. M. *et al.* Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. **Energies**, Basel, v. 14, n. 10, p. 2758, 2021. DOI: 10.3390/en14102758. Disponível em: <https://www.mdpi.com/19961073/14/10/2758>. Acesso em: 21 out. 2023.



HAQUE, S. K. M. *et al.* Electrical properties of different polymeric materials and their applications: the influence of electric field. **IntechOpen**, Rijeka, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/67091>. Acesso em: 17 out. 2024.

KALAŠ, D. *et al.* FFF 3D printing in electronic applications: dielectric and thermal properties of selected polymers. **Polymers**, Basel, v. 13, n. 21, p. 3702, 2021. DOI: 10.3390/polym13213702. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/21/3702>. Acesso em: 02 dez. 2023.

KEITHLEY INSTRUMENTS. **Low level measurements handbook**: precision DC current, voltage, and resistance measurements. 6. ed. Cleveland: Keithley Instruments, 2004. 239p.

KOSTAKIS, V.; NIAROS, V.; GIOTITSAS, C. Open source 3D printing as a means of learning: an educational experiment in two high schools in Greece. **Telematics and Informatics**, Londres, v. 32, n. 1, p. 118–128, 2015. DOI: 10.1016/j.tele.2014.05.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736585314000343>. Acesso em: 09 dez. 2023.

LIMA, A. A. N. *et al.* Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, Araraquara, v. 27, n. 3, p. 177–187, 2006. Disponível em: <https://rcfba.fcfar.unesp.br/index.php/ojs/article/view/545>. Acesso em: 04 jan. 2024.

LEE, H. G.; KIM, J. G. Volume and surface resistivity measurement of insulating materials using guard-ring terminal electrodes. **Energies**, Basel, v. 13, n. 11, p. 2811, 2020. DOI: 10.3390/en13112811. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2811>. Acesso em: 10 out. 2023.

LISOWSKI, M. *et al.* Space charge influence on the results of volume resistivity measurements in solid dielectrics. *In*: IMEKO WORLD CONGRESSES, 17., p. 837–840, 2003, Dubrovnik. **Proceedings** [ ....]. 2003, Dubrovnik: IMEKO, 2003. Disponível em: <https://www.imeko.org/publications/wc-2003/PWC-2003-TC4-089.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2023.

MORANDINI, M. M.; DEL VECHIO, G. H. Impressão 3D, tipos e possibilidades: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. **Revista Interface Tecnológica**, Taquaritinga, v. 17, n. 2, p. 67–77, 2020. DOI: 10.31510/infa.v17i2.866. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/866>. Acesso em: 04 maio 2023.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 2. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2001. 412 p.

PAES, Â.T. Itens essenciais em bioestatística. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, São Paulo, v. 71, n. 4, p. 575–580, 1998. DOI: 10.1590/S0066782X1998001000003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abc/a/zfZ7mmc6pKwcwx9hV5Ggg8L/>. Acesso em: 09 jan. 2024.

PAESE, C; CATEN, C. T.; RIBEIRO, J. L. D. Aplicação da análise de variância na implantação do CEP. **Production**, São José dos Campos, v. 11, n. 1, p. 17-26, 2001. DOI: 10.1590/S0103-65132001000100002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/pGfcszPsMrGR8jWfDQQmBGp/>. Acesso em: 03 jan. 2024.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. New York: Prentice Hall, 1989. 333 p.

PIMENTA, C. D. *et al.* Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. **Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas (GEPROS)**, Bauru, n. 2, p. 97-108, 2012. DOI: 10.15675/gepros.v0i2.800. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/800>. Acesso em: 18 jul. 2023.

POPESCU, D. *et al.* FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: a review. **Polymer Testing**, Amsterdã, v. 69, p. 157-166, 2018. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941818306093>. Acesso em: 12 nov. 2023.

PRAVEENA, B. A. *et al.* A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdã, v. 52, p. 1309–1313, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.059. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321070632>. Acesso em: 07 jan. 2023.

QUENTAL, A. C. **Blendas de PHB e PETG**: formação de um copoliéster aromático/alifático via processamento reativo. Orientador: Maria Isabel Felisberti. 2004. Dissertação (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=506263>. Acesso em: 26 out. 2024.

SANTOS, L. *et al.* Tipos de polímeros utilizados como matéria prima no método de manufatura aditiva por FDM: uma abordagem conceitual. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 38., 2018, Maceio. **Anais eletrônicos** [...]. Rio de Janeiro: ABEPRO 2018. Disponível em: [https://abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STO\\_268\\_536\\_36043.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_268_536_36043.pdf). Acesso em: 20 fev. 2023

SANTANA, L. *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: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S151770762018000400457&lng=pt&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762018000400457&lng=pt&lng=pt). Acesso em: 15 jan. 2024.

SCHIRMEISTER, C. G. *et al.* 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. **Additive Manufacturing**, Amsterdã, v. 28, p. 152–159, 2019. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419301502>. Acesso em: 23 nov. 2023.

RANAKOTI, L. *et al.* Critical review on polylactic acid: properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. **Materials**, Basel, v. 15, n. 4312, p. 1-29, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15124312>. Acesso em: 17 out. 2024.

TAO, Y. *et al.* development and application of wood flour-filled polylactic acid composite filament for 3D printing. **Materials**, Basel, v. 10, n. 4, p. 339, 2017. DOI: 10.3390/ma10040339. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/4/339>. Acesso em: 12 nov. 2023.

TSUTSUMI, H. *et al.* Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment. **Building and environment**, Amsterdã, v. 42, n. 12, p. 4034–4042, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.037. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003751>. Acesso em: 16 dez. 2023.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. **Additive Manufacturing**, Amsterdã, v. 8, p. 110–116, 2015. DOI: 10.1016/j.addma.2015.09.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860415000494>. Acesso em: 09 fev. 2023.

### **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D374-99**: standard Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation. West Conshohocken: ASTM International, 1999.

## APÊNDICE A – Programa em Python de automatização do processo de aquisição e medição da resistividade elétrica de volume.

```

import vxi11
import pyvisa
import numpy as np
import time
import os
import matplotlib.pyplot as plt
num = 2000
Mat = input("Qual o material a ser ensaiado? ")
cor = input("Qual a cor do CDP? ")
preench = input("Qual o nível de preenchimento em %? ")
Volt = input("Qual a tensão para o ensaio? ")
Volts = float(Volt)
thickness = input("Entre com a espessura do CDP em mm: ")
RH = input("Entre com a umidade relativa do ar em %: ")
temp = input("Informe a temperatura ambiente em graus Celsius: ")
thick = float(thickness)
filepath = f'D:\\Ensaio resistividade 60\\Volume2\\{Mat}-{cor}-{preench}-UR{RH}-{Volt}V.csv'
fluke = vxi11.Instrument("169.254.58.10", "gpib0,14")
pico = vxi11.Instrument("169.254.58.10", "gpib0,22")
pico.write("*RST")
pico.write("DISP:DIG 7")
pico.write("SYST:ZCH ON")
pico.write("RANG 2e-9")
pico.write("INIT")
pico.write("SYST:ZCOR:ACQ")
pico.write("SYST:ZCOR ON")
pico.write("RANG:AUTO ON")
pico.write("SYST:ZCH OFF")
pico.write("AVER:COUN 100")
pico.write("AVER:TCON MOV")
pico.write("AVER ON")
pico.write("FORM:ELEM READ")
pico.write("DISP:ENAB OFF")
fluke.write(f"SOUT {Volts}")
fluke.write("OPER")
# Time
timeList = [] # Create an empty list to store time values in.
currentList = [] # Create an empty list to store current values in.
startTime = time.time() # Create a variable that holds the starting timestamp.
finalcurrentList = [] # Create a current list to compute the stationary current.
volresistList = [] # Create a list to compute mean volume resistivity.
# Setup the plot
plt.figure(figsize=(10, 10)) # Initialize a matplotlib figure
plt.xlabel('Elapsed Time (s)', fontsize=12) # Create a label for the x axis and set the font size to 12pt
plt.minorticks_on()
plt.tick_params(which='both', width=1)
plt.tick_params(which='major', length=6)
plt.tick_params(which='minor', length=3)
plt.xticks(fontsize=10) # Set the font size of the x tick numbers to 10pt
plt.ylabel('Current (A)', fontsize=12) # Create a label for the y axis and set the font size to 12pt
plt.yscale('log')
plt.yticks(fontsize=10) # Set the font size of the y tick numbers to 10pt

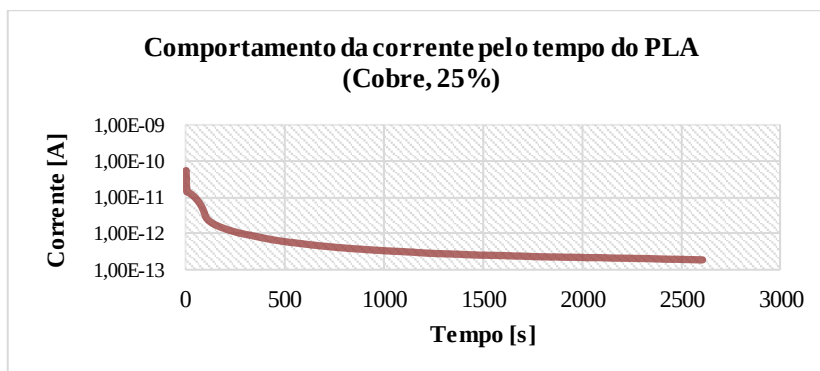
```

```

plt.grid(True)
plt.title(f'Current versus time at {Volt}V for volume resistivity measurement', fontsize=14)
with open(filepath, "w") as file:
    file.write("Time [s], Measured [A]\n")
    for x in range(num):
        pico.timeout = 1
        currentReading = float(pico.ask("READ?")) # Read and process data from the Keithley 6485.
        currentList.append(currentReading) # Append processed data to the current list
        timeList.append(float(time.time() - startTime)) # Append time values to the time list
        time.sleep(0.49) # Interval to wait between collecting data points.
        plt.plot(timeList, currentList, color='blue', linewidth=1) # Plot the collected data with time on the
x axis and temperature on the y axis.
        plt.pause(0.01) # This command is required for live plotting. This allows the code to keep
running while the plot is shown.
        print("{} {}".format(float(time.time() - startTime), currentReading ))
        file.write("{} {}\n".format(float(time.time() - startTime), currentReading ))
        if x > 1900:
            finalcurrentList.append(float(currentReading))
            volresistList.append(float((229/thick*((Volts/(currentReading)-49220000))))))
stationaryCurrent = np.mean(finalcurrentList)
stdstationaryCurrent = np.std(finalcurrentList)
statCurr = ("{:5e}".format(stationaryCurrent))
stdstatCurr = ("{:5e}".format(stdstationaryCurrent))
maxCurrent = np.max(currentList)
maxCurr = ("{:5e}".format(maxCurrent))
meanVolumeResistivity = np.mean(volresistList)
meanRV = ("{:5e}".format(meanVolumeResistivity))
stdVolumeResistivity = np.std(volresistList)
stdRV = ("{:5e}".format(stdVolumeResistivity))
plt.text(800,0.000000000001,f'Mean Volume Resistivity: {meanRV} ohm.cm \nStandard deviation of
Volume Resistivity: {stdRV} ohm.cm \nTest Voltage: {Volt} V \nMaterial: {Mat} \nColor: {cor}
\nInfill: {preench} % \nRelative Humidity: {RH} % \nAmbient Temperature: {temp}
°C',fontsize=12, bbox={
    'facecolor': 'white', 'alpha': 1.0, 'pad': 10})
print(f'Material: {Mat} {cor} com {preench} % de preenchimento \nResistividade de Volume média:
{meanRV} ohm.cm \nDesvio-Padrão da Resistividade de Volume: {stdRV} ohm.cm \nCorrente
estacionária: {statCurr} A \nDesvio-padrão da corrente estacionária: {stdstatCurr} A \nCorrente
máxima: {maxCurr} A")
resultpath = f'D:\Ensaio resistividade 60\Volume2\Resultados_{Mat}-{cor}-{preench}-UR{RH}-
{Volt}V.txt"
with open(resultpath, "w") as res:
    res.write(f'Material: {Mat} {cor} com {preench} % de preenchimento \nResistividade de Volume
média: {meanRV} ohm.cm \nDesvio-Padrão da Resistividade de Volume: {stdRV} ohm.cm
\nCorrente estacionária: {statCurr} A \nDesvio-padrão da corrente estacionária: {stdstatCurr} A
\nCorrente máxima: {maxCurr} A \nUmidade relativa: {RH}% \nTemperatura ambiente: {temp} °C")
pico.write("DISP:ENAB ON")
fluke.write("STBY")
plt.savefig(f'D:\Ensaio resistividade 60\Volume2\Figura{Mat}-{cor}-{preench}-UR{RH}-
{Volt}V.png")
plt.show()
file.close()
res.close()

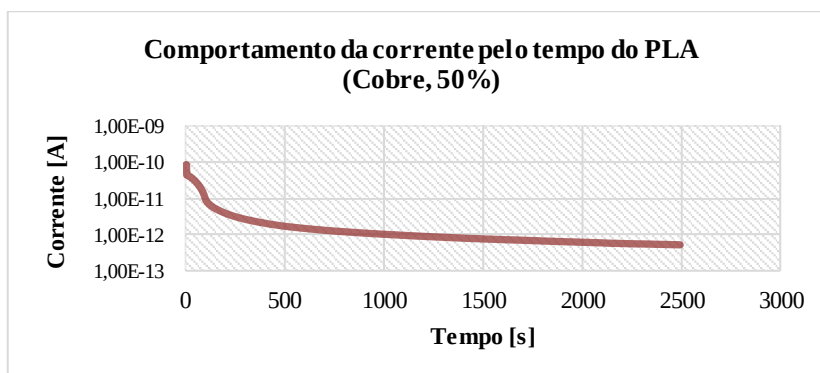
```

**ANEXO B** - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 25%.



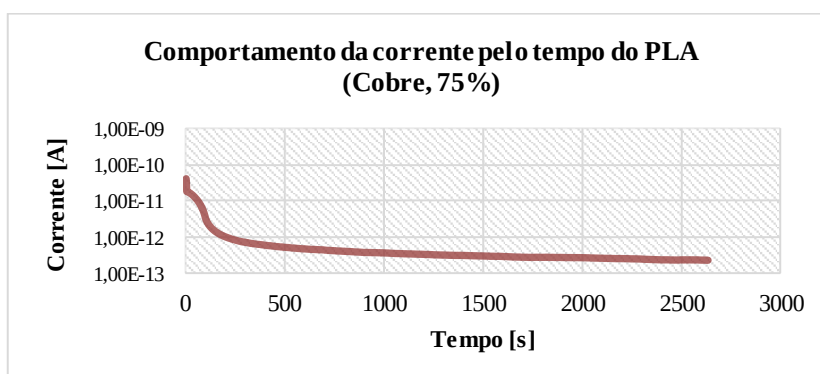
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**ANEXO C** - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 50%.



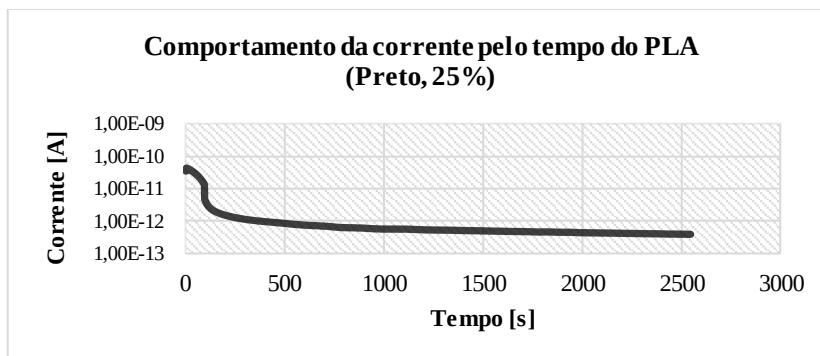
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)..

**ANEXO D** - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor cobre metálico com densidade de preenchimento de 75%.



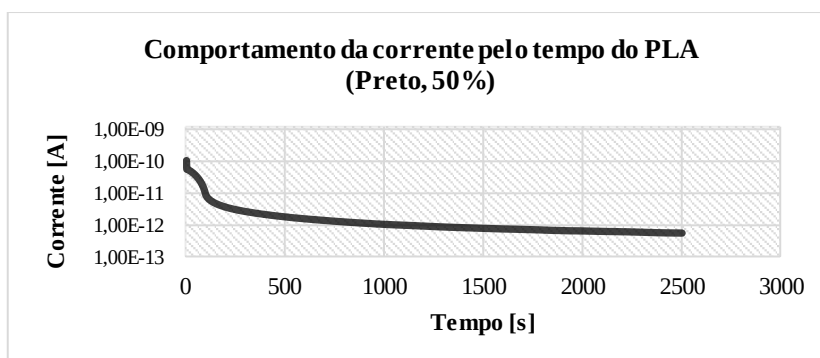
Fonte: Produção do próprio autor.

**ANEXO E** - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 25%.



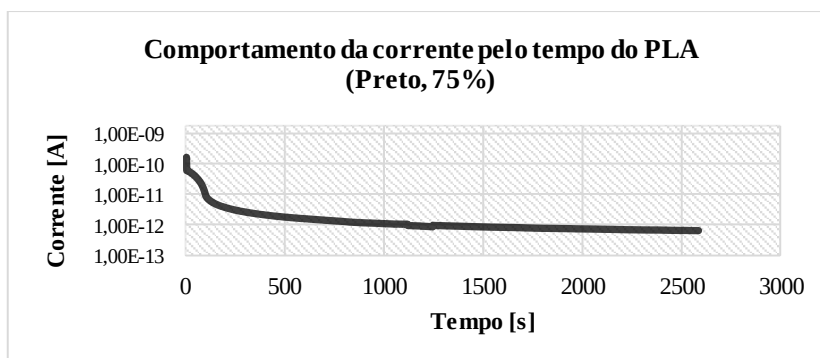
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**ANEXO F** - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 50%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

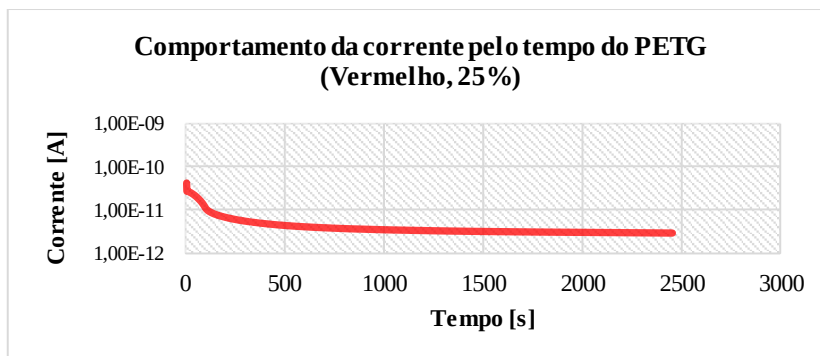
**ANEXO G** - Gráfico de corrente pelo tempo do PLA da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 75%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

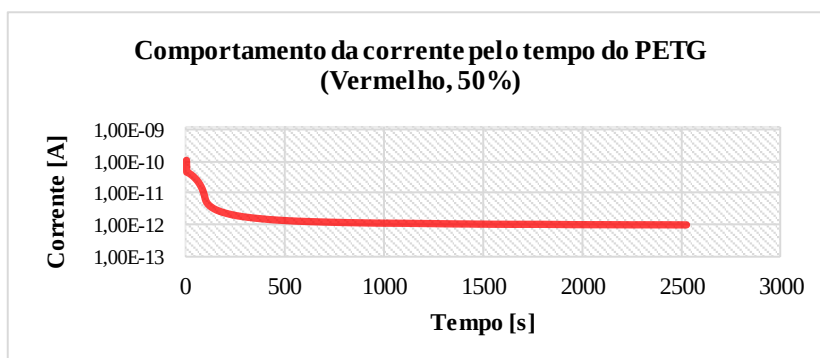


**ANEXO H** - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 25%.



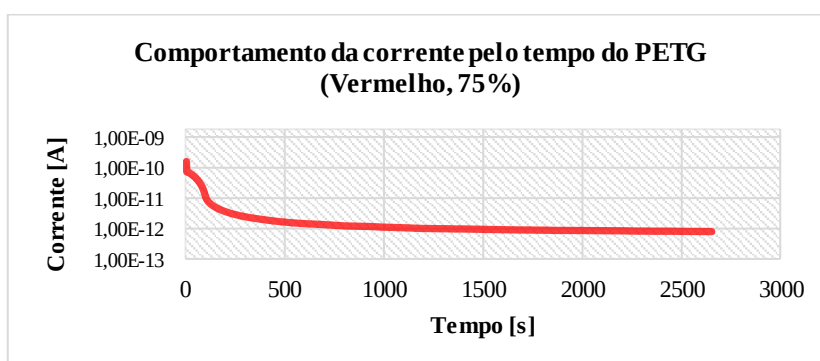
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**ANEXO I** - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 50%.



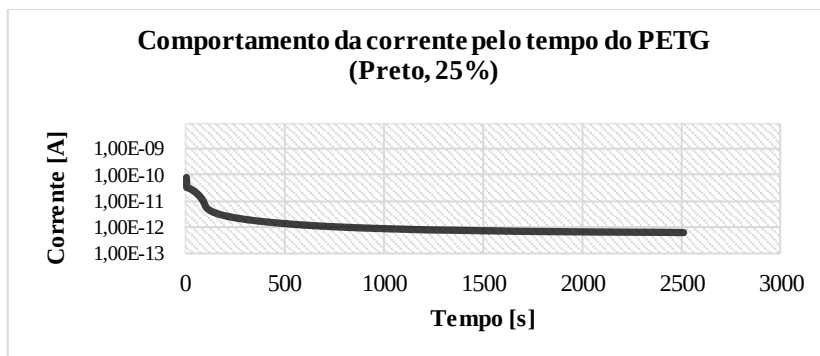
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**ANEXO J** - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor vermelho sólido com densidade de preenchimento de 75%.



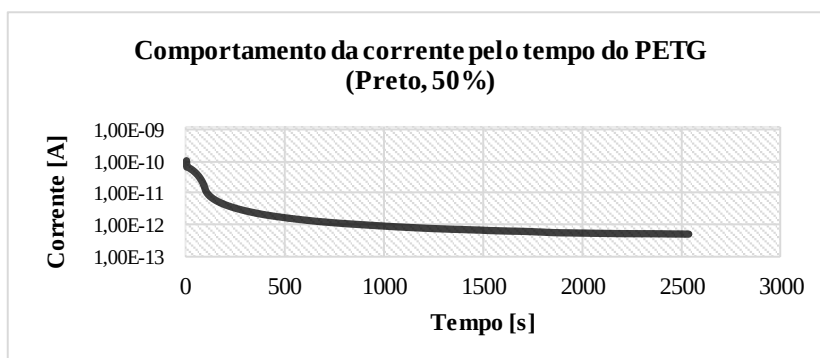
Fonte: Produção do próprio autor.

**ANEXO K** - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 25%.



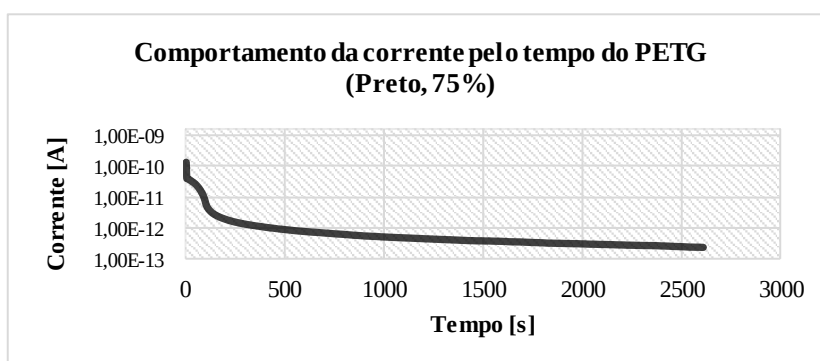
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**ANEXO L** - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 50%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

**ANEXO M** - Gráfico de corrente pelo tempo do PETG da cor preto sólido com densidade de preenchimento de 75%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).