



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM



DIOGO ABREU FURTADO

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE RESINA
FOTOSENSÍVEL PARA IMPRESSÃO 3D – DLP MODIFICADA COM GRAFITE**

MANAUS – AM

2025

DIOGO ABREU FURTADO

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE RESINA
FOTOSENSÍVEL PARA IMPRESSÃO 3D – DLP MODIFICADA COM GRAFITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Propriedades Físicas, Mecânicas E Modelagem De Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade

Coorientador: Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto

MANAUS – AM

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

F992i Furtado, Diogo Abreu
Investigação das propriedades elétricas e mecânicas de resina
fotossensível para impressão 3D – DLP modificada com grafite / Diogo
Abreu Furtado. - 2025.
98 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Jean Carlos Silva Andrade.
Coorientador(a): José Costa de Macêdo Neto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Manaus, 2025.

1. Impressão 3D DLP. 2. Grafite condutivo. 3. Manufatura aditiva. 4.
Propriedades elétricas. 5. Propriedades mecânicas. I. Andrade, Jean Carlos
Silva. II. de Macêdo, José Costa. III. Universidade Federal do Amazonas.
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV.
Título

DIOGO ABREU FURTADO

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE RESINA
FOTOSENSÍVEL PARA IMPRESSÃO 3D – DLP MODIFICADA COM GRAFITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Propriedades Físicas, Mecânicas E Modelagem De Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade

Presidente da Banca / Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Prof. Dr. Daniel Macedo de Araújo

Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Prof. Dr. Antônio Cláudio Kieling

Universidade do Estado do Amazonas – UEA

MANAUS – AM

2025

Dedico este trabalho à minha esposa, Sabrina Ketulen,
minha fiel companheira e principal incentivadora na vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida, pela saúde e por ter me dado força e coragem para conseguir entrar e concluir esse mestrado. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha esposa, Sabrina, meu amor e minha base, que esteve ao meu lado em cada etapa dessa jornada, me apoiando, incentivando e me empurrando nos momentos mais puxados. Aos meus pais, Luzete e Vanderlei, que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu duvidava. O apoio de vocês fez toda a diferença.

Ao meu orientador, Jean Andrade, meu sincero obrigado pela parceria e paciência. Você não só me orientou academicamente, mas também abriu portas, facilitou ensaios e fez o possível para que as coisas acontecessem. Sou muito grato por isso.

Ao meu coorientador, José Costa, agradeço pelas contribuições, sugestões e apoio ao longo da pesquisa. Sua orientação adicional foi essencial para o amadurecimento do trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

Aos professores que participaram da minha qualificação, Antônio Kieling e Daniel Macedo, obrigado pelas sugestões, críticas e pela forma como contribuíram para melhorar minha pesquisa. Também agradeço ao professor Marcos Marques, coordenador do curso, sempre disponível e prestativo quando precisei resolver qualquer questão ao longo desses anos.

Por fim, um obrigado a todos os professores que passaram pela minha vida, desde os primeiros anos de escola até os últimos anos desse mestrado. Cada um deixou sua marca e ajudou a construir o que sou hoje.

RESUMO

Este estudo investigou a modificação de uma resina fotocurável do tipo ABS-Like, utilizada em impressão 3D por tecnologia DLP, por meio da adição de grafite em diferentes concentrações, com o intuito de compreender a influência dessa carga condutiva sobre o comportamento elétrico, mecânico e a qualidade de impressão do material. Foram produzidos corpos de prova contendo até 10% em massa de grafite, avaliados por ensaios de tração, espectroscopia de impedância, microscopia óptica, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier e análise da imprimibilidade. Os resultados indicaram um aumento gradual da condutividade elétrica com a adição de grafite, especialmente a partir de 3%, enquanto a resistência mecânica apresentou queda linear com o aumento da concentração. A análise morfológica revelou que a presença do grafite interfere na formação das camadas durante a impressão, reduzindo a espessura das laminações e prejudicando sua adesão, efeito mais evidente nas formulações com maior teor de carga. A amostra com 10% de grafite, por exemplo, apresentou falhas estruturais que inviabilizaram o ensaio mecânico, embora tenha sido possível analisá-la visualmente, identificando delaminações possivelmente causadas pelo excesso de carga e pela diminuição da altura efetiva das camadas impressas. Ainda assim, as formulações com 5% mostraram-se viáveis, mantendo um bom equilíbrio entre condutividade elétrica, resistência mecânica e fidelidade de impressão, possibilitando a fabricação de peças com desempenho satisfatório. Os resultados indicam o potencial da incorporação de cargas condutivas em resinas fotocuráveis para ampliação de funcionalidades, sugerindo aplicações promissoras em sensores impressos, materiais dissipativos de carga eletrostática (ESD) e blindagens eletromagnéticas leves, ampliando as possibilidades de uso da manufatura aditiva funcional em dispositivos multifuncionais e proteção de circuitos sensíveis.

Palavras-chave: Impressão 3D DLP; Grafite condutivo; Manufatura aditiva; Materiais funcionais; Propriedades elétricas; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This work investigated the modification of a photopolymer resin of the ABS-Like type, used in 3D printing by DLP technology, through the addition of graphite in different concentrations, with the aim of understanding the influence of this conductive filler on the electrical, mechanical properties, and printing quality of the material. Test specimens containing up to 10% by mass of graphite were produced and evaluated through tensile testing, impedance spectroscopy, optical microscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy, and printability analysis. The results indicated a gradual increase in electrical conductivity with the addition of graphite, especially from 3%, while the mechanical strength showed a linear decrease with increasing concentration. The morphological analysis revealed that the presence of graphite interferes with the formation of layers during printing, reducing the thickness of the laminations and impairing their adhesion, an effect more evident in formulations with higher load content. The sample with 10% graphite, for example, showed structural failures that prevented mechanical testing, although it was possible to visually analyze it, identifying delaminations possibly caused by excessive loading and the reduced effective height of the printed layers. Nevertheless, the formulations with 5% graphite proved to be viable, maintaining a good balance between electrical conductivity, mechanical strength, and print fidelity, enabling the production of parts with satisfactory performance. The results indicate the potential of incorporating conductive fillers into photopolymer resins to enhance functionalities, suggesting promising applications in printed sensors, electrostatic discharge (ESD) materials, and lightweight electromagnetic shielding, thus expanding the possibilities of functional additive manufacturing in multifunctional devices and protection of sensitive circuits.

Keywords: DLP 3D printing; Conductive graphite; Additive manufacturing; Functional materials; Electrical properties; Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Para o polietileno - a) uma representação esquemática da unidade repetida e das estruturas da cadeia; b) uma perspectiva da molécula, indicando a estrutura em zigue-zague da cadeia. Fonte: WD CALLISTER, DG RETHWISCH – 2020	20
Figura 2 Rotas de síntese de PLA. Fonte: Horban, M. A., Silva, A. A., Maydl, M. P., Castella, R., & Lunelli, C. E. (2017)	22
Figura 3 Estrutura química do ABS. Fonte: Hosokawa, Meire & Prado, Karen & Coelho, Amanda & Barrios, Christian & Faulstich de Paiva, Jane. (2021)	23
Figura 4 MEV de G-ABS com 2,3%, 3,8% e 7,4% de grafeno, e esquema da dispersão. Fonte: Joshi et al. (2020).	27
Figura 5 Condutividade elétrica de compósitos com SWNTs em função da concentração. Fonte: Winey et al. (2007).	29
Figura 6 Esquema do processo de impressão DLP com formação de voxels via projeção digital. Fonte: Formlabs (2021).	32
Figura 7 Espectrofotômetro infravermelho IRAffinity-1S. Fonte: Autor (2025).....	35
Figura 8 Sistema de Teste de Materiais do Módulo Analítico da Ametek Solartron. Fonte: Autor (2024)	37
Figura 9 Máquina de ensaios mecânicos INSTRON, modelo 5582. Fonte: Autor (2024).....	38
Figura 10 Estereoscópio digital da INSIZE, modelo ISM-DL301. Fonte: Autor (2024).....	39
Figura 11 Fluxograma de trabalho. Fonte: Autor (2024)	40
Figura 12 Impressora 3D de resina Creality Halot One. Fonte: Creality (2021).....	45
Figura 13 Componentes da impressora de resina. Fonte: Creality (2021)	46
Figura 14 Sequência do processo de nivelamento da mesa de impressão. Fonte: Creality (2021)	47
Figura 15 Interface do software Halot Box. Fonte: Autor (2024)	48
Figura 16 Corpo de prova impresso. Fonte: Autor (2024)	49
Figura 17 Peças de calibração com diferentes tempos de exposição de camadas, da esquerda para a direita: 2,8s; 3,2s; 3,6; e 4,0. Fonte: Autor (2024)	50
Figura 18 DRX da amostra de grafite representada no Xpert Highscore. Fonte: Autor (2025).....	52
Figura 19 Espectro FTIR da resina ABS-Like pura. Fonte: Autor (2025).....	55
Figura 20 Espectros FTIR da resina ABS-Like com diferentes porcentagens de grafite. Fonte: Autor (2025)	56
Figura 21 Microscopia eletrônica de varredura da resina ABS-Like com escala de 10 microns. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	57
Figura 22 Microscopia eletrônica de varredura da resina ABS-Like com escala de 1 micron. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	58

Figura 23 Microscopia eletrônica de varredura do Grafite com escala de 2 microns. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	59
Figura 24 Microscopia eletrônica de varredura do Grafite com escala de 1 micron. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	59
Figura 25 Microscopia eletrônica de varredura do Grafite com aproximação escala de 200 nanômetros. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	60
Figura 26 Espectro EDS da resina ABS-Like. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025).....	61
Figura 27 Mapeamento EDS de C e O na resina ABS-Like. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025).....	62
Figura 28 Espectro EDS do grafite. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025).....	63
Figura 29 Mapeamento EDS de C do grafite. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025).....	63
Figura 30 Diagramas de Nyquist das amostras. Fonte: Autor (2025)	64
Figura 31 Circuito equivalente utilizado nas amostras. Fonte: Autor (2025)	65
Figura 32 Curva equivalente para a resina base. Fonte: Autor (2025)	65
Figura 33 Curva equivalente para a adição de 0,5%. Fonte: Autor (2025)	65
Figura 34 Curva equivalente para a adição de 1%. Fonte: Autor (2025)	66
Figura 35 Curva equivalente para a adição de 3%. Fonte: Autor (2025)	66
Figura 36 Curva equivalente para a adição de 5%. Fonte: Autor (2025)	66
Figura 37 Curva equivalente para a adição de 10%. Fonte: Autor (2025)	66
Figura 38 Ajuste exponencial entre a concentração de grafite e a condutividade elétrica	69
Figura 39 Corpo de prova de resina ABS-Like com adição de 10% de Grafite com falha de impressão. Autor (2025).....	72
Figura 40 Gráfico de Engenharia do ensaio de tração das amostras.	73
Figura 41 Microscopia óptica da amostra base. Fonte: Autor (2025)	74
Figura 42 Microscopia óptica da amostra com 0,5% de grafite. Fonte: Autor (2025)	75
Figura 43 Microscopia óptica da amostra com 1% de grafite. Fonte: Autor (2025).....	75
Figura 44 Microscopia óptica da amostra com 3% de grafite. Fonte: Autor (2025).....	76
Figura 45 Microscopia óptica da amostra com 5% de grafite. Fonte: Autor (2025).....	76
Figura 46 Microscopia óptica da amostra com 10% de grafite Fonte: Autor (2025).....	77
Figura 47 Avaliação da fratura da amostra base. Fonte: Autor (2025)	78
Figura 48 Avaliação da fratura da amostra com 0,5% de grafite. Fonte: Autor (2025)	79
Figura 49 Avaliação da fratura da amostra com 1% de grafite. Fonte: Autor (2025)	79
Figura 50 Avaliação da fratura da amostra com 3% de grafite. Fonte: Autor (2025)	80
Figura 51 Avaliação da fratura da amostra com 5% de grafite. Fonte: Autor (2025)	80
Figura 52 Avaliação da adesão entre camadas da amostra com adição de 10% de grafite. Fonte: Autor (2025)	81
Figura 53 Planejamento de atividades. Fonte: Autor (2025).....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Comparação de propriedades mecânicas dos principais polímeros de engenharia. Fonte: Harper (1999)	24
Tabela 2 Estado da técnica de compósitos condutivos impressos em resina. Fonte: Autor (2024)	32
Tabela 3 Propriedades da resina ABS-Like. Fonte: Elegoo (2024)	43
Tabela 4 Composição da Resina. Fonte: Elegoo <i>MSDS Report</i> (2022)	44
Tabela 5 Resumo das Funções dos Componentes da resina ABS-Like. Fonte: Autor (2025)	44
Tabela 6 Definições de impressão ABS-Like. Fonte: Autor (2024)	51
Tabela 7 Composição elementar da resina ABS-Like obtida por MEV-EDS. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	61
Tabela 8 Composição elementar do grafite em pó obtida por MEV-EDS. Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)	62
Tabela 9 Valores de R_s , R_p e diâmetro do arco para diferentes concentrações de grafite Fonte: (Autor, 2025)	67
Tabela 10 Valores de resistência, resistividade e condutividade das amostras com diferentes concentrações de grafite. Fonte: Autor (2025)	67
Tabela 11 Dados coletados das amostras. Fonte: Autor (2025)	71

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

3D – *Three-Dimensional* (Tridimensional). Representa objetos com três dimensões, como nos modelos criados por impressão 3D.

ABS-Like – *Acrylonitrile Butadiene Styrene-like Resin* (Resina similar ao ABS). Tipo de resina fotopolimerizável com propriedades mecânicas comparáveis ao termoplástico ABS.

AMF – *Additive Manufacturing File*. Formato de arquivo padrão utilizado para manufatura aditiva, como alternativa aos formatos STL e OBJ.

CAD – *Computer-Aided Design* (Projeto Assistido por Computador). Ferramenta de modelagem utilizada para projetar peças tridimensionais antes da impressão.

CPE – *Constant Phase Element* (Elemento de Fase Constante). Componente utilizado em circuitos equivalentes para representar comportamento capacitivo não ideal em espectroscopia de impedância.

CT - DEMAT – Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia de Materiais. Departamento acadêmico vinculado ao Centro de Tecnologia.

DLP – *Digital Light Processing* (Processamento Digital de Luz). Tecnologia de impressão 3D baseada na cura seletiva de resina por projeção de luz digital controlada.

DOE – *Design of Experiments* (Planejamento de Experimentos). Metodologia estatística para planejamento e análise de experimentos.

DRX – Difração de Raios X. Técnica utilizada para identificar fases cristalinas e analisar a estrutura cristalina dos materiais.

EDS – *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X). Método de análise química elementar acoplado ao MEV, utilizado para identificar a composição superficial da amostra.

EIS – *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (Espectroscopia de Impedância Eletroquímica). Técnica que avalia as propriedades elétricas de um material por meio da resposta à corrente alternada em diferentes frequências.

FWHM – *Full Width at Half Maximum* (Largura Total na Metade da Altura). Parâmetro utilizado em DRX para descrever a largura de um pico de difração.

LABPEMOL – Laboratório de Peneiras Moleculares da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

LCD – *Liquid Crystal Display* (Display de Cristal Líquido). Tecnologia de exibição utilizada em telas finas e sistemas de visualização.

LPMAT – Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais. Laboratório associado à UFRN, focado na análise e caracterização de materiais.

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura. Técnica de imagem de alta resolução para análise topográfica da superfície de materiais.

MO – Microscopia Óptica. Técnica de observação baseada em luz visível, utilizada para análise morfológica de camadas e defeitos em menor escala de ampliação.

MSDS – *Material Safety Data Sheet* (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos). Documento técnico com dados sobre segurança, manuseio e riscos de produtos químicos.

NTC – *Negative Temperature Coefficient* (Coeficiente de Temperatura Negativo). Tipo de material cuja resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura. Inicialmente previsto como aditivo condutivo no projeto.

OBJ – *Object File Format*. Formato de arquivo que descreve a geometria de objetos 3D, comum em impressão 3D.

Rp – *Polarization Resistance* (Resistência de Polarização). Componente do circuito equivalente em EIS que representa a resistência associada à interface dielétrica da amostra.

Rs – *Solution Resistance* (Resistência de Solução ou Resistência Ôhmica). Componente do circuito equivalente em EIS que representa a resistência intrínseca do material à passagem de corrente elétrica.

STL – *Stereolithography*. Formato de arquivo padrão utilizado em impressão 3D, representando superfícies trianguladas.

UEA – Universidade do Estado do Amazonas. Instituição pública de ensino superior do estado do Amazonas.

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Instituição pública de ensino superior localizada no Rio Grande do Norte.

UV – *Ultraviolet* (Ultravioleta). Radiação utilizada para promover a fotopolimerização das resinas durante a impressão 3D.

VAT – *Vat Photopolymerization* (Fotopolimerização em Cuba). Tecnologia de impressão 3D baseada na cura de resina líquida em um reservatório exposto à luz UV.

ZView – ZView Software. Software especializado na análise de espectroscopia de impedância, permitindo o ajuste automático de circuitos equivalentes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
1.3.1 POLÍMEROS	19
1.3.1.1 ÁCIDO POLILÁTICO (PLA).....	21
1.3.1.2 ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	23
1.3.2 COMPÓSITO POLIMÉRICO.....	25
1.3.3 NANOTUBO DE CARBONO (NTC)	27
1.3.4 PARTÍCULAS DE GRAFITE	30
1.3.5 MANUFATURA ADITIVA	31
1.3.5.1 PROCESSO DLP	32
2. CARACTERIZAÇÕES E ENSAIOS	34
2.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	34
2.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR).....	34
2.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV-EDS).....	35
2.4 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	36
2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO	37
2.6 MICROSCÓPIO ÓPTICO (MO).....	38
3. METODOLOGIA	40
3.1 PROCESSOS EXPERIMENTAIS PARA MODIFICAÇÃO DA RESINA.....	41
3.1.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	41
3.1.2 ROTEIRO DE EXPERIMENTAÇÃO.....	41
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.2.1 PARTÍCULA DE GRAFITE	42
3.2.2 RESINA ABS-LIKE	42
3.2.3 IMPRESSORA 3D DE RESINA CREALITY HALOT ONE.....	45
3.2.4 USO E APRENDIZADO DA IMPRESSORA DE RESINA.....	46
3.2.5 DEFINIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO SLICER.....	47

3.2.6	CALIBRAÇÃO DA RESINA ABS-LIKE.....	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	52
4.2	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR).....	54
4.3	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV-EDS).....	56
4.2.1	ANÁLISE EDS DA RESINA ABS-LIKE.....	60
4.2.2	ANÁLISE EDS DA AMOSTRA DE GRAFITE.....	62
4.3	ENSAIO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	64
4.3.1	CÁLCULO DA RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE.....	67
4.3.2	ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE GRAFITE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	68
4.3.3	VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR ANOVA.....	70
4.4	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	71
4.5	MICROSCÓPIO ÓPTICO (MO).....	73
4.5.1	ANÁLISE DA FRATURA DAS AMOSTRAS.....	77
4.6	APLICAÇÕES POTENCIAIS.....	81
4.6.1	SENSORES IMPRESSOS.....	82
4.6.2	MATERIAIS DISSIPATIVOS DE CARGA ELETROSTÁTICA (ESD).....	82
4.6.3	BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA LEVE.....	83
5.	CONCLUSÃO.....	84
6.	PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES.....	85
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
8.	APÊNDICE A.....	92

1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D, também conhecida como prototipagem rápida, tem transformado a forma como peças complexas são fabricadas. Ela possibilita a produção direta a partir de projetos assistidos por computador (CAD) e vem sendo continuamente aperfeiçoada para atender às exigências de diferentes áreas da engenharia (Wang, 2013). Um método bastante utilizado envolve o uso de resinas fotocuráveis, que permitem a criação de objetos tridimensionais por meio da cura de resinas líquidas através da fotopolimerização (Paiva; Nogueira, 2021). O resultado são peças com rico nível de detalhamento e excelente resolução, favorecendo aplicações em engenharia, medicina e design de produtos (Ahang et al., 2021).

O desenvolvimento de materiais com propriedades aprimoradas para impressão 3D tem ganhado destaque em diversos estudos, especialmente na busca por compósitos funcionais. Um dos desafios é produzir resinas que apresentem além de bom desempenho mecânico, mas também condutividade elétrica, ampliando o leque de aplicações dos componentes impressos. Neste cenário, a adição de cargas condutivas como o grafite tem mostrado uma alternativa viável para modificar as propriedades da matriz polimérica (Kwok et al., 2017).

O uso de resinas fotocuráveis na impressão 3D tem se consolidado como um recurso importante na manufatura aditiva, onde permite a criação de peças com geometrias complexas e personalizáveis. No entanto, essas resinas costumam ser eletricamente isolantes, o que limita sua utilização em situações que exigem condução ou dissipação de carga. A incorporação de grafite, além de viável economicamente, ainda é pouco explorada e pode proporcionar alterações significativas nas propriedades físicas do material, abrindo novas possibilidades para aplicações elétricas associadas à liberdade geométrica característica da manufatura aditiva.

Apesar das vantagens geométricas oferecidas pela impressão 3D, especialmente com resinas DLP, a ausência de condutividade elétrica nas formulações padrão ainda representa um obstáculo para aplicações mais amplas, como em sensores, materiais dissipativos de carga eletrostática (ESD) e blindagens eletromagnéticas. Tais limitações físicas restringem o uso dos polímeros fotocuráveis a funções puramente estruturais, sem a possibilidade de agregar funcionalidades elétricas. Incorporar cargas condutivas, como o grafite, à matriz polimérica surge como uma estratégia prática e acessível para superar essa limitação. Ao adicionar grafite à resina fotossensível, é possível ajustar as propriedades elétricas e mecânicas do material de forma simples, sem a necessidade de tratamentos adicionais. Esse tipo de modificação permite, por exemplo, a criação de sensores impressos para monitoramento de condições ambientais, ou componentes ESD que protejam circuitos sensíveis em ambientes industriais. Com isso, abrem-

se novas possibilidades para obter peças com características elétricas e mecânicas equilibradas, aliando desempenho funcional às liberdades geométricas proporcionadas pela impressão 3D, e ampliando as aplicações de materiais na manufatura aditiva.

O grafite é um material condutivo amplamente acessível, de baixo custo e com boa estabilidade térmica e química, sendo aplicado em diversas formulações de compósitos poliméricos. Quando adicionado a resinas fotocuráveis, mesmo em pequenas quantidades, pode conferir certo nível de condutividade elétrica, sem a necessidade de tratamentos adicionais. Por outro lado, sua dispersão na matriz também pode influenciar o comportamento mecânico do compósito, afetando, por exemplo, a resistência à tração e à fratura (Jo et al., 2017). Estudar essas formulações é necessário para compreender o desempenho do material em uso e propor melhorias físicas.

Com base nesse contexto, parte-se da hipótese de que a presença de grafite na resina modificará sua condutividade elétrica em função da concentração utilizada. Ao mesmo tempo, espera-se que esse ganho venha acompanhado por perda de desempenho mecânico, exigindo um estudo para identificar uma formulação que concilie ambos os aspectos de forma equilibrada. A investigação também considera que esse tipo de modificação pode servir como base teórica para novas formulações com diferentes materiais funcionais, contribuindo para o avanço da área.

A relação entre a estrutura interna das amostras e suas propriedades físicas é um fator base para a qualidade dos compósitos obtidos. Aspectos como aglomeração de partículas, adesão à matriz e uniformidade na distribuição são modificadores do desempenho do material final e precisam ser compreendidos para que se possa otimizar tanto a formulação quanto o processo de fabricação.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar compósitos formados pela resina fotossensível ABS-Like, fornecida pela Elegoo, e diferentes concentrações de grafite, avaliando suas propriedades elétricas, mecânicas e a viabilidade de fabricação por impressão 3D. A resina ABS-Like foi escolhida devido à sua alta compatibilidade com a tecnologia DLP (Digital Light Processing), que permite a impressão de peças com alta precisão e boa qualidade superficial. Além disso, a escolha dessa resina está alinhada à sua capacidade de replicar as propriedades do ABS convencional, o que a torna uma excelente base para modificações que requerem tanto desempenho mecânico quanto condutividade elétrica. Este trabalho também busca reunir e sistematizar conhecimentos que possam contribuir para a formulação de novos materiais funcionais voltados à manufatura aditiva, colaborando com o avanço tecnológico e científico na área de materiais poliméricos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a influência da adição de grafite em diferentes concentrações sobre as propriedades elétricas e mecânicas de uma resina fotocurável utilizada em impressão 3D pela tecnologia DLP. Busca-se compreender como a presença dessa carga condutiva impacta o desempenho físico do material, sua processabilidade e seu potencial de aplicação em contextos funcionais dentro da manufatura aditiva, como sensores, materiais dissipativos de carga eletrostática (ESD) e blindagens eletromagnéticas leves, com vistas à ampliação das funcionalidades das peças impressas e à proposição de novos caminhos para formulações de compósitos poliméricos avançados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Obter compósitos à base de resina fotocurável com diferentes concentrações de grafite, produzindo corpos de prova por impressão 3D via tecnologia DLP para avaliação experimental.
- II. Caracterizar as propriedades físicas mecânicas e elétricas do material compósito obtido, com ênfase na análise da condutividade elétrica por espectroscopia de impedância e, em seguida, na avaliação do comportamento mecânico por meio de ensaios de tração, considerando os efeitos da adição de grafite sobre a matriz polimérica.
- III. Analisar a imprimibilidade das formulações no processo DLP, avaliando definição geométrica, estabilidade de impressão e formação das camadas. Será utilizada microscopia óptica para avaliar a qualidade das camadas e MEV para verificar a distribuição do grafite e possíveis defeitos.
- IV. Investigar o uso de cargas condutivas de grafite em matrizes poliméricas fotocuráveis, gerando novos dados experimentais que contribuirão para fortalecer a base científica e impulsionar o desenvolvimento de novos compósitos funcionais aplicáveis à manufatura aditiva.

1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No contexto dos materiais poliméricos, observa-se uma tendência crescente em direção ao constante desenvolvimento e aperfeiçoamento tecnológico de novos polímeros e compostos poliméricos, juntamente com métodos de fabricação inovadores (Amancio-Filho; Santos, 2009). Os polímeros, devido à sua versatilidade e propriedades ajustáveis, desempenham um papel crucial em uma ampla gama de aplicações industriais e de consumo. Com o avanço da pesquisa e da tecnologia, novos polímeros são projetados para atender a requisitos específicos, como resistência mecânica aprimorada, resistência a solventes, condutividade elétrica e térmica, entre outros atributos desejáveis. Além disso, o desenvolvimento de compósitos poliméricos, que combinam polímeros com materiais de reforço como fibras ou nanopartículas, abre novas possibilidades em termos de resistência e desempenho dos materiais (Bader, 2001). Os métodos de fabricação também evoluíram consideravelmente, com o advento da impressão 3D, técnicas de moldagem avançadas e processos de revestimento inovadores, todos contribuindo para a diversificação e aprimoramento contínuo dos materiais poliméricos disponíveis.

1.3.1 POLÍMEROS

Os polímeros representam uma classe importante de materiais que encontramos em diversas aplicações, tanto naturais quanto sintéticas. Os polímeros naturais, derivados de plantas e animais, têm sido utilizados ao longo de séculos, incluindo materiais como madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda. Além disso, proteínas, enzimas, amidos e celulose são exemplos de polímeros que desempenham funções cruciais em processos biológicos e fisiológicos. Com avanços nas técnicas de pesquisa científica, hoje entendemos melhor as estruturas moleculares desses polímeros naturais (Callister; Rethwisch, 2016).

Por outro lado, os polímeros sintéticos são sintetizados a partir de pequenas moléculas orgânicas e têm tido um aumento de uso significativo desde o fim da Segunda Guerra Mundial. Plásticos, borrachas e materiais fibrosos sintéticos oferecem vantagens importantes, como custos mais baixos de produção e propriedades mecânicas que podem ser ajustadas para atender a requisitos específicos. Muitas aplicações anteriormente dominadas por metais e materiais naturais foram substituídas por polímeros sintéticos devido às suas propriedades superiores e custo competitivo (Wei, Z. *et al.*, 2020).

Os polímeros são caracterizados por ligações covalentes entre seus monômeros, formando cadeias longas ou redes tridimensionais. A principal ligação envolvida é a ligação

carbono-carbono, que proporciona estabilidade estrutural às macromoléculas. Essa estrutura molecular influencia diretamente as propriedades físicas e químicas dos polímeros, como resistência, ductilidade, ponto de fusão e solubilidade (Huang, S. *et al.*, 2020).

As moléculas poliméricas são significativamente maiores em comparação com as moléculas de hidrocarbonetos, sendo frequentemente chamadas de macromoléculas devido ao seu tamanho. Nas moléculas poliméricas, os átomos estão ligados covalentemente uns aos outros por meio de ligações primárias e secundárias. Para os polímeros com cadeias de carbono, a estrutura de cada cadeia consiste em uma série de átomos de carbono. Frequentemente, cada átomo de carbono forma ligações simples com dois átomos de carbono adjacentes, um de cada lado, o que pode ser representado esquematicamente em duas dimensões.

Essas moléculas alongadas são compostas por unidades estruturais chamadas unidades repetidas, que se repetem ao longo da cadeia. O termo "monômero" refere-se à pequena molécula a partir da qual um polímero é sintetizado. Portanto, embora "monômero" e "unidade repetida" tenham significados distintos, às vezes o termo "monômero" ou "unidade monomérica" é usado no lugar do termo mais apropriado "unidade repetida". O tamanho e a complexidade dessas macromoléculas contribuem significativamente para as diversas propriedades apresentadas pelos polímeros, incluindo sua resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência química (Callister; Rethwisch, 2016).

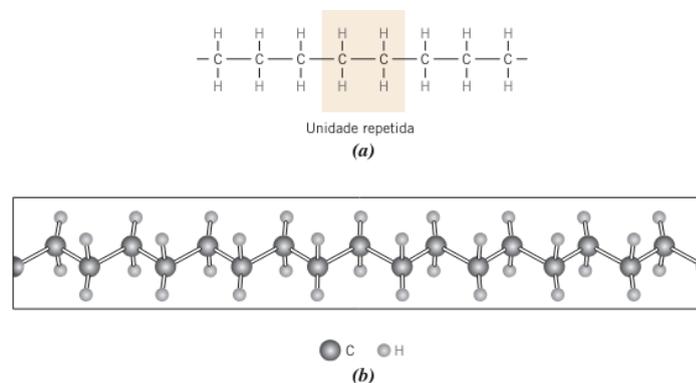


Figura 1 Para o polietileno - a) uma representação esquemática da unidade repetida e das estruturas da cadeia; b) uma perspectiva da molécula, indicando a estrutura em zig-zague da cadeia.

Fonte: WD CALLISTER, DG RETHWISCH – 2020

Os polímeros podem ser amplamente classificados em duas categorias principais: sintéticos e naturais. Os polímeros sintéticos são produzidos artificialmente por meio de reações químicas, permitindo o controle preciso de sua estrutura molecular e propriedades. Exemplos

de polímeros sintéticos incluem polietileno, polipropileno, poliácido láctico (PLA) e cloreto de polivinila (PVC). Por outro lado, os polímeros naturais são derivados de fontes biológicas e frequentemente compostos por unidades repetidas encontradas na natureza. Polímeros naturais comuns incluem celulose, proteínas, amidos e borracha natural (Ravve, 2012).

A espinha dorsal dos polímeros consiste principalmente em átomos de carbono ligados por ligações covalentes, formando cadeias longas ou redes. Além do carbono, outros elementos como hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre podem estar presentes na estrutura do polímero, contribuindo para suas propriedades globais. A disposição dos átomos e a natureza das ligações entre eles determinam as características únicas de cada polímero, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações.

Considerando a diversidade e as características únicas dos polímeros, a seleção do material desempenha um papel crucial no processo de fabricação, especialmente na impressão 3D. Atualmente, há uma crescente demanda por polímeros de fácil fabricação e elevada resistência mecânica, bem como por polímeros biodegradáveis (Callister; Rethwisch, 2016). Polímeros como o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) destacam-se pela elevada resistência mecânica (Lamarti *et al.*, 2017), enquanto os polímeros biodegradáveis, como o PLA, têm ganhado relevância na sociedade contemporânea (RAJ *et al.*, 2018). No contexto da impressão 3D, essas características são altamente requisitadas, refletindo a diversidade de aplicações e demandas do mercado atual.

1.3.1.1 ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

O ácido polilático (PLA) é um polímero biodegradável e biocompatível que tem despertado crescente interesse devido às suas propriedades e aplicações diversificadas. A estrutura química do PLA é fundamental para suas propriedades únicas e funcionalidades. O PLA é um poliéster termoplástico que consiste em unidades repetidas de ácido láctico. O ácido láctico é um composto natural que pode ser obtido a partir de fontes renováveis, como milho, cana-de-açúcar ou outras fontes vegetais.

A polimerização do PLA pode ocorrer por diferentes rotas, sendo a mais comum a polimerização por condensação do ácido láctico. Nesse processo, o ácido láctico é aquecido e submetido a pressão para remover a água, resultando na formação de ligações covalentes entre as moléculas de ácido láctico e na produção de cadeias longas de polímero (Horban *et al.*, 2017). Outra rota de polimerização do PLA envolve a polimerização por ring-opening de lactida, um composto cíclico derivado do ácido láctico.

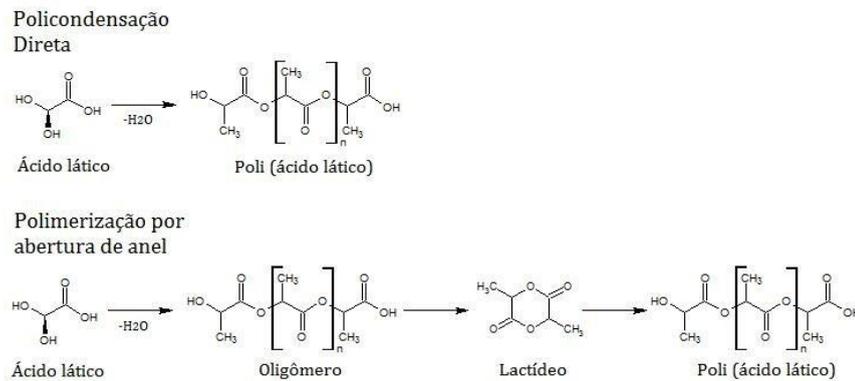


Figura 2 Rotas de síntese de PLA.

Fonte: Horban, M. A., Silva, A. A., Maydl, M. P., Castella, R., & Lunelli, C. E. (2017)

O PLA possui várias aplicações importantes, especialmente devido à sua natureza biodegradável e compostável. É usado na fabricação de embalagens biodegradáveis, filmes plásticos, tecidos não tecidos, dispositivos médicos absorvíveis e até mesmo em suturas cirúrgicas. A importância ambiental do PLA reside na sua capacidade de se degradar em condições compostáveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado aos resíduos plásticos convencionais.

Além de suas aplicações convencionais, o PLA ganhou destaque na indústria de manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D. O PLA é um material popular para impressão 3D devido à sua biocompatibilidade, facilidade de processamento e capacidade de degradação. Os filamentos de PLA são amplamente utilizados em impressoras 3D FDM (Modelagem por Deposição Fundida), onde são derretidos e extrudados em camadas sucessivas para criar objetos tridimensionais (RAJ *et al.*, 2018).

A utilização do PLA na manufatura aditiva está alinhada com os esforços para promover práticas sustentáveis na indústria de fabricação. A capacidade de produzir peças personalizadas e complexas com PLA oferece uma alternativa ecologicamente correta às resinas plásticas convencionais. A impressão 3D com PLA também está sendo explorada em diversas áreas, como prototipagem rápida, design de produtos, fabricação de dispositivos médicos e até mesmo na indústria alimentícia (Bodani *et al.*, 2022).

Além de sua aplicação na impressão 3D FDM, o PLA também encontra uso na tecnologia de impressão 3D por processamento de luz digital (DLP). Nos sistemas DLP, o PLA é utilizado como resina fotocurável que polimeriza quando exposta à luz UV controlada por um laser, permitindo a criação de modelos 3D com alta precisão e detalhamento. A capacidade de produzir peças com detalhes intrincados e superfícies suaves faz do PLA uma escolha popular

para aplicações que exigem alta qualidade estética e dimensional. A utilização do PLA nessas tecnologias de impressão 3D destaca sua versatilidade e adaptabilidade como material de escolha para uma ampla gama de aplicações de fabricação aditiva (Bagheri Saed *et al.*, 2020).

Portanto, a utilização do PLA (ácido polilático) nas tecnologias de impressão 3D destaca sua versatilidade e adaptabilidade como material de escolha para uma ampla gama de aplicações de fabricação aditiva. Este polímero biodegradável, derivado de fontes renováveis como o amido de milho, oferece uma combinação única de propriedades mecânicas adequadas e sustentabilidade ambiental. Sua capacidade de ser facilmente processado em impressoras 3D torna-o ideal para prototipagem rápida, bem como para a produção de peças funcionais e decorativas. Além disso, o PLA se diferencia por sua baixa emissão de odores e menores requisitos de temperatura de extrusão em comparação com outros polímeros, como o ABS. Essas características, aliadas à sua biodegradabilidade, tornam o PLA uma escolha preferencial em setores que valorizam tanto o desempenho técnico quanto a responsabilidade ambiental.

1.3.1.2 ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)

O ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) é um copolímero amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades mecânicas e versatilidade de aplicação. Sua estrutura química consiste em unidades de acrilonitrila (AN), butadieno (BD) e estireno (S) que são polimerizadas em conjunto para formar uma resina termoplástica (Hosokawa *et al.*, 2021). A polimerização do ABS pode ocorrer por meio de diferentes métodos, sendo o mais comum o processo de polimerização em emulsão ou suspensão.

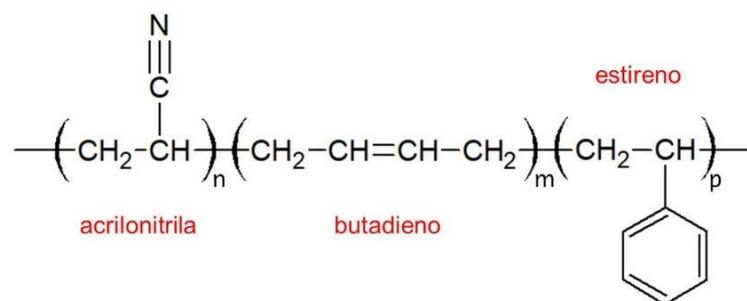


Figura 3 Estrutura química do ABS.

Fonte: Hosokawa, Meire & Prado, Karen & Coelho, Amanda & Barrios, Christian & Faulstich de Paiva, Jane. (2021)

Na estrutura química do ABS, a presença da acrilonitrila confere resistência térmica e resistência química ao polímero, tornando-o adequado para aplicações que requerem estabilidade dimensional e durabilidade em ambientes adversos (Oliveira, *et al.* 2016). O butadieno contribui com a resistência ao impacto do ABS, conferindo-lhe tenacidade e capacidade de absorção de energia. O estireno, por sua vez, proporciona rigidez e facilidade de processamento ao copolímero.

A polimerização do ABS pode ser realizada por diferentes rotas (Hanon; Kovács; László, 2022), como a polimerização em emulsão, na qual os monômeros são dispersos em água com um agente emulsionante para formar uma emulsão estável. Nesse processo, os monômeros são emulsificados em partículas finas e submetidos à polimerização sob condições controladas de temperatura e pH. Outra rota comum é a polimerização em suspensão, na qual os monômeros são dispersos em uma fase aquosa com um agente suspensor para formar partículas de polímero suspensas. A polimerização é então iniciada e controlada para obter o copolímero desejado.

O ABS é amplamente utilizado na indústria devido à sua resistência, tenacidade e facilidade de processamento. Ele é empregado em uma variedade de aplicações, incluindo a fabricação de peças automotivas, eletrodomésticos, brinquedos, equipamentos eletrônicos e embalagens. Sua resistência ao impacto e rigidez tornam-no um material ideal para componentes que exigem durabilidade e estabilidade dimensional (Lamarti *et al.*, 2017). A comparação entre as principais propriedades do ABS e outros polímeros de engenharia pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1 Comparação de propriedades mecânicas dos principais polímeros de engenharia.

Fonte: Harper (1999)

Material	Temperatura de deformação térmica a 1.82 MPa, °C	Resistência à tração, MPa	Módulo de tração, GPa	Resistência ao impacto, J/m	Densidade, g/cm ³	Resistência dielétrica, MV/m
ABS	99	41.0	2.30	347.0	1.18	15.7
PTFE	127	17.1	0.36	173.0	2.20	17.7
PP	102	35.8	1.60	43.0	0.90	25.6
PVC-rígido	82	44.4	2.75	17.4	1.44	34.0
POM	136	69.0	3.20	32.0	1.42	19.7
Nylon 6	65	65.0	2.76	101.0	1.14	16.5
Nylon 6/6	90	82.7	2.10	109.0	1.14	23.6
PET	224	159.0	8.96	96.0	1.38	21.3

Além das aplicações industriais, o ABS também desempenha um papel significativo na impressão 3D, incluindo tecnologias como a impressão 3D por FDM (deposição de filamento fundido) e DLP (*digital light processing*). Nesses processos, o ABS é utilizado como filamento em uma impressora 3D ou uma resina foto curável, respectivamente. A capacidade do ABS de proporcionar elevada resistência mecânica e estabilidade dimensional torna-o um material popular para prototipagem rápida e produção de peças funcionais. Essas características fazem do ABS uma escolha versátil e confiável, destacando sua importância na evolução das tecnologias de impressão 3D e na criação de soluções inovadoras para diversos setores industriais.

1.3.2 COMPÓSITO POLIMÉRICO

Nos últimos anos, tem havido um desenvolvimento significativo na síntese e caracterização de materiais, especialmente para aprimorar as propriedades dos materiais por meio do uso de nanopartículas como cargas. Os materiais em escala nanométrica desempenham um papel vital em diversos campos, incluindo engenharia ambiental, medicina, indústrias e eletrônica. Tipicamente, os nanomateriais têm um tamanho entre 1 e 100 nm, com diferenças mínimas entre as dimensões mais longas e mais curtas nos eixos x e y. As nanopartículas, também chamadas de "partículas ultrafinas", apresentam propriedades únicas em comparação com partículas finas (com tamanho entre 100 e 2.500 nm) e partículas grossas (entre 2.500 e 10.000 nm). Por exemplo, a temperatura de transição de partículas ferromagnéticas como $MgFe_2O_4$ ou $MnFe_2O_4$ pode ser manipulada alterando o tamanho das partículas. Da mesma forma, partículas nanoestruturadas de ZnO apresentam capacidades de adsorção, taxas de reação e propriedades redox distintas em comparação com suas contrapartes em massa (Muthukumar *et al.*, 2020).

A incorporação de nanopartículas em polímeros tem demonstrado melhorias significativas em diversas propriedades. A eficácia desses nanocompósitos depende de vários fatores, incluindo o tipo de matriz polimérica, o tipo de nanocarga utilizada, a orientação das partículas, a razão de aspecto das partículas e a concentração das nanopartículas. Algumas nanopartículas comumente utilizadas para formar nanocompósitos incluem nanotubos de carbono (CNTs), argila, haloisita (HNT), nanocelulose, carbonato de cálcio, nanopartículas metálicas, grafeno e zeólitas. Obter uma dispersão uniforme das nanopartículas na matriz polimérica é fundamental para melhorar as propriedades. Uma dispersão inadequada pode resultar em reforço menos eficaz e pode se assemelhar a compósitos convencionais. Em

contraste, nanopartículas bem dispersas podem criar uma estrutura esfoliada, oferecendo uma grande área de superfície para interação entre a matriz e a nanocarga, proporcionando um reforço eficaz (Muthukumar *et al.*, 2020).

Um dos principais desafios ao imprimir nanocompósitos poliméricos está relacionado às considerações de processamento para garantir a confiabilidade dos materiais finais. A dispersão uniforme das nanopartículas na matriz polimérica é fundamental para obter propriedades aprimoradas. A escolha adequada dos parâmetros de impressão, como temperatura, velocidade de deposição e tipo de filamento, influencia diretamente na qualidade e nas propriedades finais dos nanocompósitos impressos em 3D. Além disso, a orientação das nanopartículas durante o processo de impressão pode afetar significativamente as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais.

A impressão 3D de nanomateriais oferece vantagens significativas, incluindo a capacidade de produzir estruturas complexas com precisão micrométrica e a capacidade de integrar múltiplos materiais em um único componente. No caso dos nanocompósitos poliméricos, a adição de nanopartículas pode melhorar propriedades como resistência mecânica, condutividade elétrica, resistência térmica e resistência química. Esses materiais são altamente versáteis e podem ser utilizados em uma ampla gama de aplicações, desde peças de engenharia até dispositivos biomédicos e eletrônicos (Falahati *et al.*, 2020).

Quando se trata da aplicação de nanocompósitos poliméricos na impressão 3D de resinas, como SLA (estereolitografia) e DLP (processo de polimerização digital), surgem considerações adicionais. Nestes métodos de impressão, a resina líquida é exposta a luz ultravioleta ou laser para solidificação camada por camada, formando objetos tridimensionais. A adição de nanopartículas ao polímero da resina pode melhorar a resolução, a precisão e as propriedades finais dos objetos impressos. As nanopartículas também podem permitir a criação de estruturas mais complexas e duráveis, ampliando as capacidades desses processos de impressão avançados (Falahati *et al.*, 2020), como demonstrado na figura 4, onde a adição de nanopartículas de grafeno sobre uma matriz polimérica a fim, de melhorar a condutividade (Joshi *et al.*, 2020).

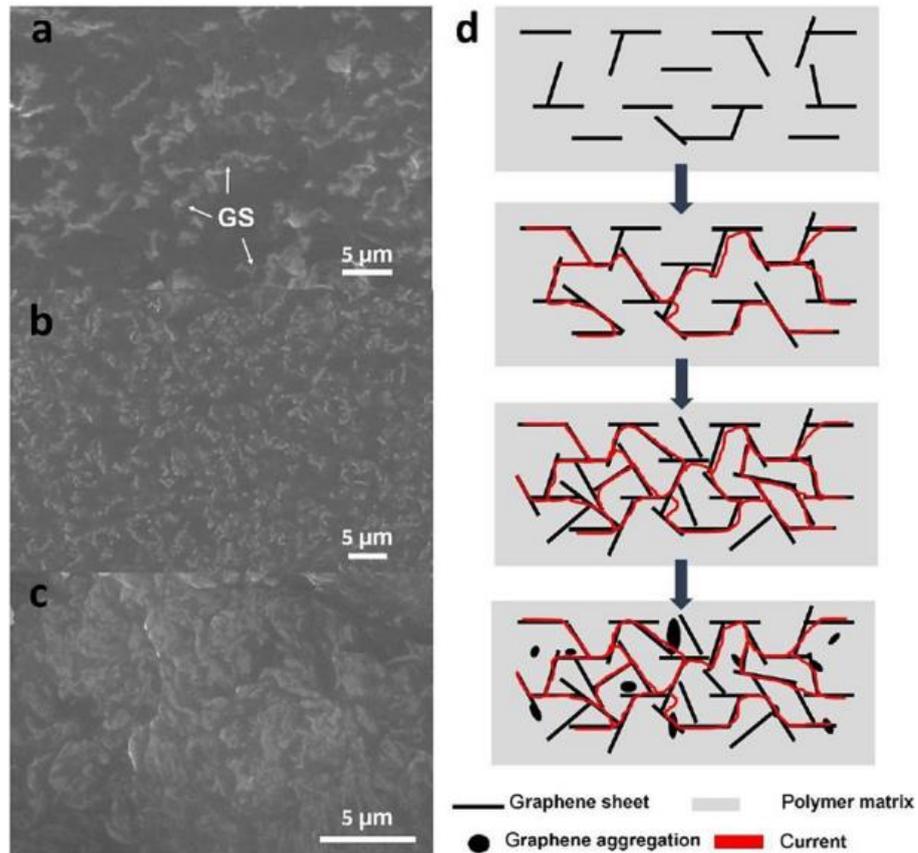


Figura 4 MEV de G-ABS com 2,3%, 3,8% e 7,4% de grafeno, e esquema da dispersão.

Fonte: Joshi et al. (2020).

1.3.3 NANOTUBO DE CARBONO (NTC)

Os nanotubos de carbono (NTC) são estruturas tubulares compostas por carbono, apresentando dois principais tipos com alta perfeição estrutural. Os nanotubos de parede única (SWNTs) consistem em uma única folha de grafite enrolada de forma cilíndrica, enquanto os nanotubos de parede múltipla (MWNTs) compreendem uma matriz desses nanotubos, dispostos de maneira concêntrica como anéis no tronco de uma árvore. Os SWNTs podem ser metálicos ou semicondutores, dependendo da direção da folha de grafite ao ser enrolada para formar o cilindro do nanotubo. A direção na folha de grafite e o diâmetro do nanotubo são determinados por um par de números inteiros (n , m) que definem o tipo de nanotubo. Dependendo da aparência de uma faixa de ligações de carbono ao redor do diâmetro do nanotubo, ele pode ser do tipo cadeira ($n = m$), zigue-zague ($n = 0$ ou $m = 0$) ou quiral (qualquer outro n e m). Todos os SWNTs do tipo cadeira são metais; aqueles com $n - m = 3k$, onde k é um inteiro diferente de zero, são semicondutores com uma pequena lacuna de banda; e todos os outros são semicondutores com uma lacuna de banda que depende inversamente do diâmetro do nanotubo.

As propriedades eletrônicas dos MWNTs são bastante semelhantes às dos SWNTs perfeitos, pois o acoplamento entre os cilindros é fraco nos MWNTs. Devido à estrutura eletrônica quase unidimensional, o transporte eletrônico nos SWNTs e MWNTs metálicos ocorre de maneira balística (ou seja, sem espalhamento) ao longo de longos comprimentos de nanotubo, permitindo que transportem correntes elevadas com essencialmente nenhum aquecimento. Além disso, os fônons se propagam facilmente ao longo do nanotubo, e a condutividade térmica medida a temperatura ambiente para um MWNT individual é maior do que a do diamante natural e do plano basal do grafite. Observa-se também supercondutividade, mas apenas em baixas temperaturas, com temperaturas de transição de aproximadamente 0,55 K para SWNTs com diâmetro de 1,4 nm e cerca de 5 K para SWNTs com diâmetro de 0,5 nm (Baughman, 2002).

Os SWNTs de diâmetro pequeno são bastante rígidos e excepcionalmente fortes, com um alto módulo de Young e alta resistência à tração. A síntese dos nanotubos de carbono geralmente envolve métodos como descarga de arco de carbono, ablação a laser de carbono ou deposição química de vapor (tipicamente em partículas catalisadoras). Os diâmetros dos nanotubos variam de aproximadamente 0,4 a mais de 3 nm para SWNTs e de aproximadamente 1,4 a pelo menos 100 nm para MWNTs. No entanto, os SWNTs são atualmente produzidos em pequena escala e são extremamente caros. Muitos pesquisadores dependem de instalações de produção para obter SWNTs purificados. Além disso, os métodos sintéticos atuais resultam em misturas de vários SWNTs semicondutores e metálicos, o que pode ser problemático para dispositivos eletrônicos que requerem SWNTs semicondutores específicos (Baughman, 2002).

A aplicabilidade dos nanotubos de carbono na impressão 3D oferece oportunidades significativas devido às propriedades únicas desses materiais. Os nanotubos de carbono, especialmente os SWNTs e MWNTs, podem ser incorporados em filamentos plásticos utilizados em tecnologias de impressão 3D para criar materiais com propriedades mecânicas e elétricas aprimoradas. A adição de nanotubos de carbono a polímeros, como o PLA (ácido polilático) ou o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), pode melhorar a resistência e a condutividade elétrica dos produtos impressos em 3D. Conforme figura 5, é possível verificar a melhora na condutividade de uma matriz polimérica com a adição de nanotubos de carbono.

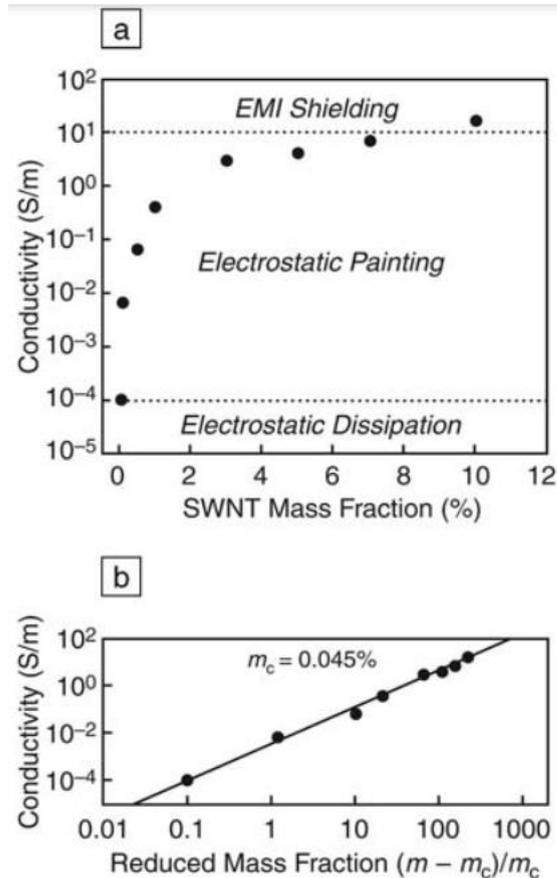


Figura 5 Condutividade elétrica de compósitos com SWNTs em função da concentração.

Fonte: Winey et al. (2007).

No contexto da impressão 3D, os nanotubos de carbono podem ser usados para fabricar componentes eletrônicos condutores, sensores e dispositivos biomédicos avançados. A alta condutividade elétrica e térmica dos nanotubos de carbono torna-os adequados para aplicações que exigem propriedades elétricas específicas, como a fabricação de eletrodos flexíveis, componentes de circuitos impressos e dispositivos de armazenamento de energia (Shi *et al.*, 2019) (Winey *et al.*, 2007).

Além disso, os nanotubos de carbono podem ser empregados na impressão 3D de materiais compósitos avançados, onde sua alta resistência e rigidez contribuem para melhorar as propriedades mecânicas dos produtos finais. Por exemplo, ao incorporar nanotubos de carbono em polímeros como o ABS, é possível criar filamentos para impressão 3D que resultam em peças mais duráveis e resistentes ao impacto.

1.3.4 PARTÍCULAS DE GRAFITE

O grafite é uma forma alotrópica do carbono composta por camadas de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal. Cada camada é fortemente ligada por ligações covalentes, enquanto as interações entre as camadas adjacentes são fracas, permitindo que elas deslizem facilmente umas sobre as outras. Esta estrutura confere ao grafite suas propriedades características, como alta condutividade elétrica, flexibilidade e boa resistência térmica e química. Quando o grafite é reduzido a partículas em escala nanométrica, ele se torna uma nanopartícula condutora, devido à espessura extremamente fina das camadas, permitindo a condução de corrente elétrica através das partículas individuais.

As partículas de grafite apresentam condutividade elétrica superior a muitos outros materiais não metálicos, o que as torna interessantes para diversas aplicações, especialmente quando incorporadas em matrizes poliméricas (Bilisik, K., & Akter, M, 2022). A estrutura em camadas do grafite permite que, quando disperso na matriz, ele facilite o transporte de elétrons, mesmo em concentrações relativamente baixas. Além disso, o grafite é amplamente disponível, de baixo custo e pode ser facilmente produzido em larga escala, o que o torna uma alternativa acessível para a fabricação de materiais com propriedades condutivas.

Comparado aos nanotubos de carbono (NTC), o grafite apresenta várias vantagens, principalmente no que diz respeito ao custo e à disponibilidade. Os nanotubos de carbono, especialmente os de parede única (SWNTs), têm um custo de produção elevado devido à complexidade dos métodos de síntese e purificação. Em contrapartida, o grafite é facilmente extraído e processado, oferecendo uma solução muito mais acessível para aplicações em larga escala. Embora os NTCs ofereçam melhor desempenho em termos de condutividade e resistência mecânica, o grafite, devido ao seu custo reduzido, se torna uma opção viável em uma série de aplicações que não exigem as propriedades extremas oferecidas pelos nanotubos.

Além disso, a facilidade de integração do grafite com diferentes tipos de resinas e polímeros em processos como impressão 3D amplia ainda mais suas possibilidades de uso, tornando-o uma opção interessante para compósitos condutores. A adição de grafite a materiais poliméricos pode resultar em produtos com boas propriedades elétricas e, dependendo da concentração utilizada, com características mecânicas satisfatórias para aplicações diversas. No entanto, a eficiência dessas adições depende de uma dispersão homogênea do grafite na matriz, pois aglomerações podem comprometer a condutividade e outras propriedades do material.

1.3.5 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia inovadora que permite a criação de objetos tridimensionais camada por camada a partir de dados digitais. Nesse processo, materiais como plásticos, metais, cerâmicas e compostos são depositados de forma controlada para formar peças complexas e personalizadas. A manufatura aditiva oferece vantagens significativas, como redução de desperdício de material, flexibilidade de design e produção sob demanda, sendo amplamente aplicada em setores como engenharia, medicina, arquitetura, automotivo e aeroespacial.

Além disso, a impressão 3D representa o futuro promissor para o desenvolvimento de novos materiais e compósitos. A capacidade de imprimir materiais complexos e personalizados abre portas para inovações em design de produtos e na criação de estruturas otimizadas em diversas indústrias (Kalsoom; Nesterenko; Paull, 2016). No campo dos compósitos, a impressão 3D permite a fabricação de peças com propriedades mecânicas e funcionais específicas, combinando diferentes materiais de forma eficiente.

Existem diferentes tipos de tecnologias de impressão 3D, cada uma adequada para diferentes materiais e aplicações. O FDM (*Fused Deposition Modeling*), por exemplo, é amplamente utilizado para imprimir objetos em plásticos termoplásticos. Essa técnica envolve a extrusão de filamentos de material derretido, que são depositados camada por camada para formar o objeto desejado. Já o SLA (*Stereolithography*) e o DLP (*Digital Light Processing*) são métodos baseados em resina líquida fotocurável. No SLA, um feixe de laser é usado para solidificar a resina em camadas sucessivas, enquanto no DLP, um projetor de luz é empregado para curar a resina de forma semelhante. Ambas as técnicas oferecem alta resolução e são ideais para aplicações que requerem detalhes precisos e superfícies suaves, como na produção de protótipos e peças para odontologia e joalheria.

Muitos trabalhos buscam trazer novos compósitos na impressão 3D, principalmente com a integração entre matriz polimérica em resina e nanotubos de carbono ou nanopartículas de cobre, visando adicionar uma nova característica de condutividade elétrica às peças impressas. A combinação de polímeros com esses nanomateriais permite criar componentes com capacidades elétricas, mantendo a flexibilidade e a resistência mecânica do material base. Conforme a tabela 2, que resume os principais avanços do estado da técnica de compósitos condutivos impressos em resina, essas inovações têm permitido a fabricação de peças eletrônicas funcionais, sensores e outras aplicações tecnológicas diretamente pela impressão 3D.

Tabela 2 Estado da técnica de compósitos condutivos impressos em resina.

Fonte: Autor (2024)

Referência	Partícula	Carga (wt%)	Viscosidade (Pa-s)	Condutividade (S/cm)
Gonzalez <i>et al.</i> , 2017	MWCNT	0.3	10.0	2.7×10^{-4}
Mu <i>et al.</i> , 2017	MWCNT	0.3	11.5	8.0×10^{-6}
Lee <i>et al.</i> , 2006	Pó de cobre	60	0.10	4.0×10^4
Tsai, <i>et al.</i> , 2022	Flocos de AgCu	70	6	1000

1.3.5.1 PROCESSO DLP

O processo DLP (*Digital Light Processing*) é uma tecnologia de impressão 3D que utiliza resinas líquidas fotocuráveis para criar objetos camada por camada, conforme pode ser observado na ilustração da Figura 6. Nesse método, uma fonte de luz projetora, como um projetor de vídeo, é utilizada para solidificar a resina em pontos específicos, formando a estrutura desejada (Zhao *et al.*, 2020).

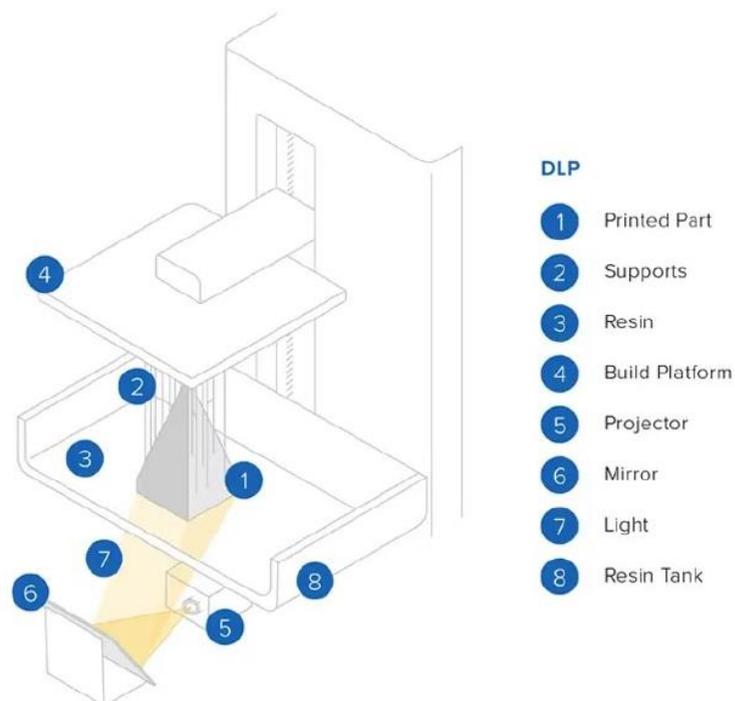


Figura 6 Esquema do processo de impressão DLP com formação de voxels via projeção digital.

Fonte: Formlabs (2021).

O funcionamento do processo DLP começa com a preparação de um modelo digital 3D do objeto a ser impresso. Esse modelo é então fatiado em camadas ultrafinas com a espessura

desejada. Durante a impressão, a resina líquida é distribuída em uma plataforma de construção. Uma luz intensa é projetada através de um chip DLP que contém milhões de *micromirrors* individuais. Cada *micromirror* é capaz de se mover para refletir a luz em diferentes direções.

À medida que a luz é projetada sobre a resina, ela solidifica a camada correspondente do objeto. A plataforma de construção então se move para baixo, permitindo que uma nova camada de resina seja distribuída e o processo seja repetido. Esse ciclo de solidificação por camadas continua até que o objeto tridimensional seja completamente construído.

Uma das principais vantagens do processo DLP é sua alta velocidade de impressão em comparação com outras tecnologias de impressão 3D, como o SLA (*Stereolithography*). Como a luz é projetada em uma área maior de uma vez só, o DLP pode produzir camadas mais rapidamente, resultando em tempos de impressão mais curtos para objetos complexos. Além disso, o DLP oferece excelente precisão e detalhes finos, sendo ideal para aplicações que requerem alta resolução, como prototipagem rápida, odontologia, joalheria e produção de peças intrincadas para diversas indústrias.

2. CARACTERIZAÇÕES E ENSAIOS

2.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Foi realizada uma análise de grafite em pó utilizando a técnica de difração de raios-X (DRX), com o objetivo de caracterizar a estrutura cristalina do grafite e determinar o tamanho médio de cristalito das partículas. A difração de raios-X é uma técnica utilizada para investigar a organização atômica e estrutural dos materiais. No caso do grafite, ela permite examinar a disposição das camadas de carbono e a intensidade das reflexões em diferentes ângulos, fornecendo informações valiosas sobre a morfologia e a qualidade do grafite.

O ensaio foi realizado utilizando o sistema de difração de raios-X, localizado no LABPEMOL - Laboratório de Peneiras Moleculares da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A análise teve como objetivo a caracterização do grafite, verificando a disposição das camadas e a presença de aglomerações, além do cálculo do tamanho médio de cristalito, que é uma medida importante para entender a qualidade e as propriedades elétricas do grafite. A varredura foi realizada com a posição inicial em $5,00^\circ 2\theta$ e a posição final em $69,98^\circ 2\theta$, utilizando um tamanho de passo de $0,02^\circ 2\theta$. O tempo de passo de escaneamento foi de 1 segundo para cada posição, e as medições ocorreram a uma temperatura de 25°C com material do ânodo de cobre (Cu).

A medição foi realizada ao longo de um intervalo de ângulos 2θ , com varredura em diferentes frequências de difração, e as reflexões foram registradas para gerar o perfil de difração. O software utilizado para análise e visualização dos dados foi o XPert-Highscore, que permitiu a interpretação dos dados de difração e o cálculo do tamanho médio de cristalito. Foi possível calcular o tamanho médio de cristalito do grafite, utilizando métodos baseados nas equações de Scherrer, que correlacionam a largura das reflexões com o tamanho das partículas cristalinas.

2.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR)

Foi realizada uma análise da resina ABS-Like com adição de grafite utilizando a técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com o objetivo de investigar as modificações estruturais e as interações entre a matriz polimérica e o aditivo. A FTIR é uma técnica de caracterização molecular que permite identificar grupos funcionais e examinar as ligações químicas presentes na amostra com alta resolução.

A análise foi conduzida utilizando o espectrômetro FTIR modelo IRAffinity-1S da Shimadzu Corporation, disponível no Laboratório Central de Análises Químicas da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). O equipamento foi calibrado com uma resolução máxima de $0,5\text{ cm}^{-1}$ e uma relação sinal-ruído de 30.000:1. O espectro foi coletado em uma faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com uma acumulação de 1 minuto por espectro. O software Origin 2025b foi utilizado para análise dos dados, facilitando a interpretação e a identificação dos picos característicos das ligações presentes.

A varredura foi realizada com o equipamento configurado para obter o espectro de absorção da radiação infravermelha, e os resultados foram utilizados para comparar as modificações nas amostras com diferentes porcentagens de grafite. O software de análise forneceu informações detalhadas sobre a intensidade e a posição dos picos, permitindo avaliar a integridade das ligações e as possíveis interações do grafite com a matriz polimérica.



Figura 7 Espectrofotômetro infravermelho IRAffinity-1S.

Fonte: Autor (2025)

2.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV-EDS)

Foi realizada uma análise utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para examinar a morfologia superficial e a distribuição das partículas de grafite em pó. O MEV é uma técnica utilizada para observar as superfícies das amostras com alta resolução. Utilizando um feixe de elétrons, o MEV permite a visualização da topografia e da estrutura do grafite,

revelando características como a forma e o tamanho das partículas, bem como sua homogeneidade ou aglomeração.

Além disso, a técnica foi combinada com a Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), que forneceu informações sobre a composição elementar do grafite. O EDS permite a identificação e a quantificação dos elementos presentes nas amostras, proporcionando uma visão da distribuição do carbono nas partículas de grafite e das possíveis impurezas presentes.

A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais CT - DEMAT da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), utilizando um difratômetro de raios X da Bruker.

Em uma etapa separada, a resina fotocurável também foi analisada utilizando a mesma técnica de MEV-EDS, permitindo a comparação das propriedades elementares entre a resina e o grafite. As imagens obtidas com o MEV e os dados espectroscópicos do EDS serão discutidos ao longo do trabalho, permitindo uma compreensão das características estruturais de ambos os materiais.

2.4 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Neste trabalho, a Espectroscopia de Impedância Complexa (EIS) foi utilizada para investigar os efeitos da adição de grafite nas resinas fotocuráveis utilizadas para impressão 3D. A EIS é uma técnica que permite analisar as propriedades elétricas de materiais em função da frequência de uma corrente alternada aplicada. Em vez de medir apenas a resistência elétrica, como no método tradicional de resistividade, a EIS fornece uma visão mais detalhada das interações elétricas dentro do material, permitindo a caracterização de comportamentos complexos, como a condutividade, capacitância e as propriedades dielétricas.

A técnica de EIS foi realizada utilizando o Sistema de Teste de Materiais do Módulo Analítico da Ametek Solartron, localizado no Laboratório de Processamento de Materiais Tecnológicos (LPMAT) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Nessa máquina, foi aplicado um sinal de corrente alternada (CA) de baixa amplitude nas amostras, e a resposta da tensão foi medida em frequências de 10^6 a 10 Hz. A impedância complexa (Z) das amostras foi registrada ao longo de um espectro de frequências. A partir dessas medições, é possível determinar as características resistivas e capacitivas do material, além de identificar fenômenos de relaxação e dispersão de carga que podem ocorrer devido à adição de grafite.

O processo de análise envolveu a obtenção das curvas de impedância real (Z') e impedância imaginária (Z'') das amostras, que são medidas em diferentes frequências. A impedância real (Z') está relacionada à resistência resistiva do material, que é a parte da impedância que se opõe ao fluxo de corrente contínua. Já a impedância imaginária (Z'') reflete a capacidade de armazenamento e dissipação de energia do material, associando-se à sua capacidade dielétrica e ao comportamento capacitivo.

Essas duas componentes da impedância foram registradas ao longo de um espectro de frequências, permitindo analisar como as propriedades do material variam dependendo da concentração de grafite. As curvas obtidas foram usadas para identificar a condutividade elétrica das amostras, com a impedância real fornecendo informações diretas sobre a resistência elétrica do material e a impedância imaginária ajudando a entender como a carga se distribui e como o material responde ao campo elétrico alternado.

A partir da análise dessas curvas, foi possível avaliar a influência da adição de grafite nas propriedades elétricas das resinas, observando a mudança no comportamento resistivo e capacitivo das amostras e, por consequência, determinar o impacto na condutividade elétrica total do material.

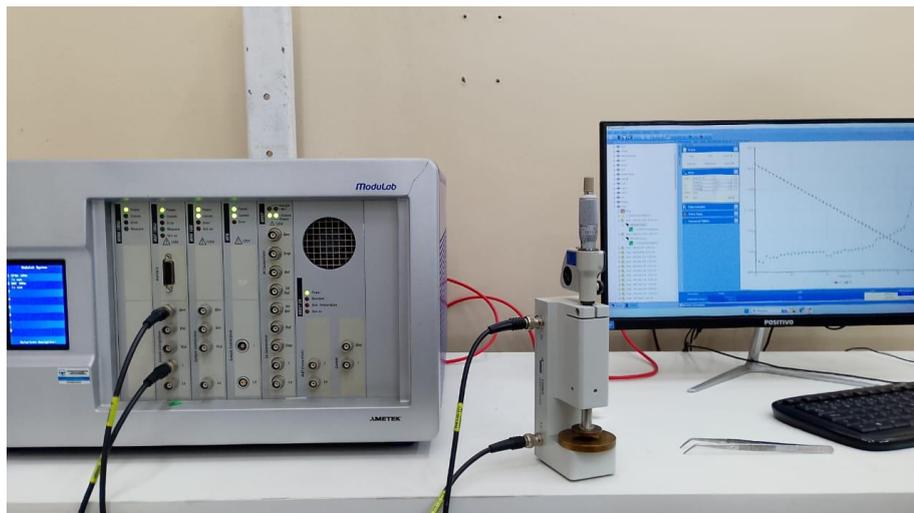


Figura 8 Sistema de Teste de Materiais do Módulo Analítico da Ametek Solartron.

Fonte: Autor (2024)

2.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados conforme o método ASTM D638, utilizando corpos de prova do tipo V, que foram selecionados de acordo com as limitações de fabricação

da impressão 3D. O objetivo principal é avaliar a resistência à tração das amostras e verificar o impacto da adição de grafite nas propriedades mecânicas da resina.

As amostras foram mantidas em uma sala com temperatura controlada, a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $50 \pm 5\%$, para garantir que as condições ambientais estejam adequadas e constantes durante o ensaio.

O ensaio foi conduzido utilizando a máquina de ensaios mecânicos INSTRON, modelo 5582, equipada com uma célula de carga de 1,0 kN e resolução de 0,01 kgf. A velocidade de ensaio foi ajustada para 1 mm/min, conforme recomendado pela norma ASTM D638, para garantir uma deformação controlada das amostras e evitar falhas abruptas.

Durante o teste, foram registradas a carga máxima suportada e o alongamento da amostra. A partir dessas medições, foi possível calcular a resistência à tração, o módulo de elasticidade e a resistência à fratura, oferecendo uma perspectiva sobre o comportamento mecânico da resina modificada com o grafite.



Figura 9 Máquina de ensaios mecânicos INSTRON, modelo 5582.

Fonte: Autor (2024)

2.6 MICROSCÓPIO ÓPTICO (MO)

Foi realizada uma análise microscópica óptica (MO) nos corpos de prova fabricados, com ênfase nas superfícies superiores e na região de fratura das amostras. O objetivo principal foi examinar a distribuição das partículas de grafite e as influências das adições nas

propriedades das composições, especialmente no que tange à impreabilidade e à integridade das camadas formadas. Além disso, foi investigada a variação geométrica das camadas depositadas para identificar possíveis vazios ou falhas de aderência entre as partículas de grafite e a matriz polimérica.

Para essa caracterização, foi utilizado o estereoscópio digital da INSIZE, modelo ISM-DL301, com aumentos de até 100x, localizado no Laboratório de Materiais e Processamento da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Essa análise permitiu observar a distribuição das partículas em diferentes concentrações de grafite, assim como os efeitos da adição sobre a qualidade da impressão 3D.

O estereoscópio digital da INSIZE, modelo ISM-DL301, é uma técnica de microscopia que utiliza iluminação e ampliação ótica para observar as superfícies das amostras em detalhes. A luz é refletida na amostra e direcionada para um conjunto de lentes que amplia a imagem. O estereoscópio tem a capacidade de proporcionar uma visão tridimensional da amostra, permitindo a avaliação das texturas, formas e distribuições das partículas de forma mais precisa. A imagem gerada é capturada por uma câmera integrada e projetada em um monitor, o que facilita a análise em tempo real. Esse equipamento é capaz de fornecer aumento de até 100x, permitindo observar a microestrutura das amostras em detalhes, sendo fundamental para a análise da qualidade da impressão 3D e da distribuição de partículas nas resinas.

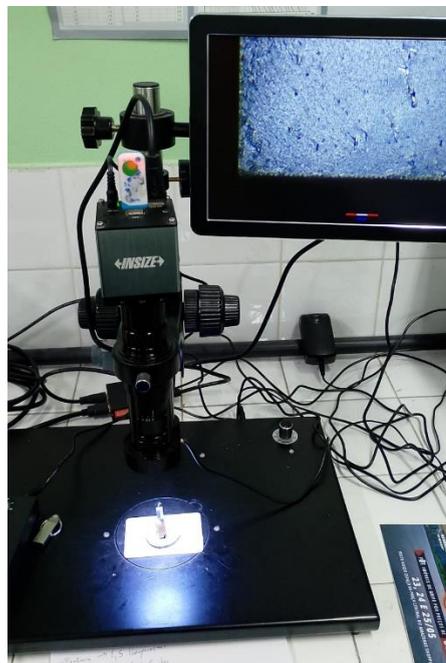


Figura 10 Estereoscópio digital da INSIZE, modelo ISM-DL301.

Fonte: Autor (2024)

3. METODOLOGIA

Este trabalho visa investigar os efeitos da adição de grafite em pó nas resinas fotocuráveis para impressão 3D, focando nas propriedades elétricas e mecânicas. O fluxo experimental, conforme o fluxograma da Figura 11, envolveu a preparação das resinas ABS-Like com grafite, seguidas pela impressão 3D dos corpos de prova.

As amostras foram caracterizadas inicialmente por Difração de Raios-X (DRX) para analisar a estrutura cristalina do grafite. Em seguida, as análises de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV-EDS) foram realizadas para estudar a morfologia e a composição elementar das amostras, seguidas por Microscopia Óptica (MO) para observar a distribuição das partículas de grafite. Adicionalmente, a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para investigar as interações químicas e estruturais entre a matriz polimérica ABS-Like e o grafite em diferentes concentrações.

Por fim, os ensaios elétricos foram feitos utilizando Espectroscopia de Impedância Complexa (EIS), enquanto os ensaios mecânicos seguiram a norma ASTM D638, avaliando a resistência à tração, elasticidade e comportamento das amostras.

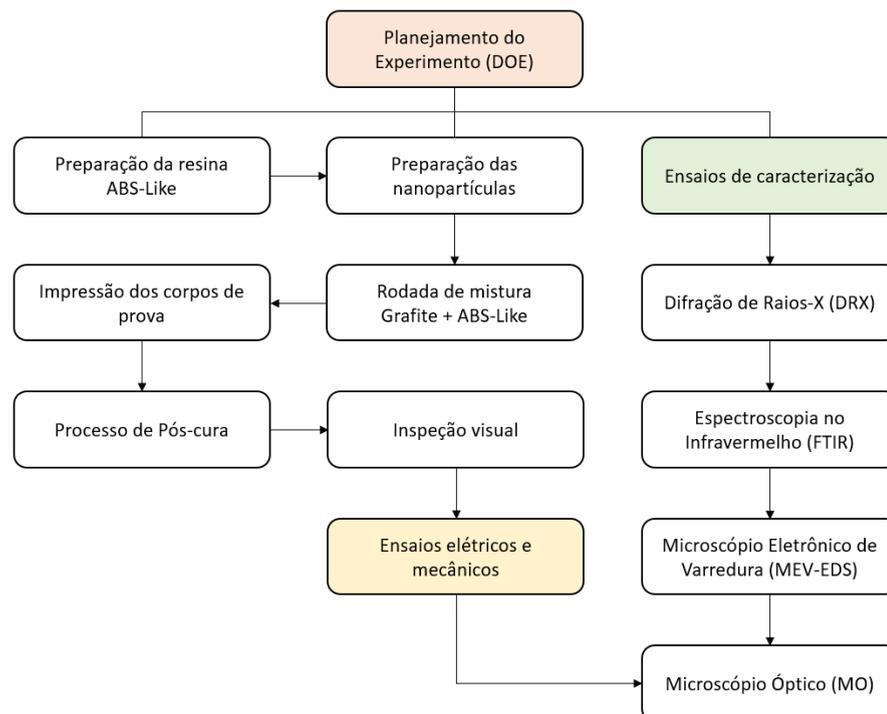


Figura 11 Fluxograma de trabalho.

Fonte: Autor (2024)

3.1 PROCESSOS EXPERIMENTAIS PARA MODIFICAÇÃO DA RESINA

3.1.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para investigar o impacto da adição de grafite nas propriedades das resinas fotocuráveis, foram preparadas amostras de resina ABS-Like com diferentes concentrações de grafite. As porcentagens de grafite escolhidas para o estudo foram 0%, 0,5%, 1%, 3%, 5% e 10%, visando avaliar como a adição desse aditivo condutivo afeta as propriedades elétricas e mecânicas da resina.

A resina pura (0%) foi utilizada como controle, permitindo a comparação com as formulações modificadas. As amostras com 0,5% a 10% de grafite foram preparadas em concentrações progressivas para investigar o efeito do grafite na condutividade elétrica e na resistência mecânica da resina. A escolha dessas concentrações teve como base o interesse em cobrir uma faixa ampla de concentrações, permitindo observar desde pequenas alterações nas propriedades até o limite de saturação do material.

Cada amostra foi preparada garantindo uma mistura homogênea entre o grafite e a resina fotocurável, e foi posteriormente impressa utilizando a tecnologia de impressão 3D DLP, que garante alta precisão na formação das camadas.

3.1.2 ROTEIRO DE EXPERIMENTAÇÃO

O roteiro experimental seguiu uma sequência sistemática para avaliar as propriedades das amostras preparadas com diferentes concentrações de grafite. Após a preparação das amostras, os ensaios mecânicos e elétricos foram realizados para caracterizar as alterações nas propriedades com o aumento do percentual de grafite.

As amostras de 0%, 0,5%, 1%, 3%, 5% e 10% de grafite foram submetidas aos seguintes testes:

- Ensaio de tração: Para medir a resistência mecânica das amostras e verificar o impacto do grafite na integridade estrutural da resina.
- Espectroscopia de Impedância (EIS): Para analisar a condutividade elétrica das amostras e determinar como o grafite influencia a resposta elétrica do material.
- Microscopia óptica e análise de morfologia: Para verificar a distribuição das partículas de grafite e identificar qualquer aglomeração ou falha na adesão das camadas durante o processo de impressão.

Cada uma dessas etapas foi realizada de forma sequencial, com as amostras sendo preparadas e analisadas de acordo com os percentuais de grafite estabelecidos. A impressão das amostras foi feita com o mesmo conjunto de parâmetros para garantir a consistência das características físicas, permitindo uma avaliação precisa dos efeitos da variação do grafite nas propriedades do material.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 PARTÍCULA DE GRAFITE

Para este estudo, foi definida a utilização de grafite em pó como partícula condutora para ser incorporada nas resinas fotocuráveis utilizadas na impressão 3D. A escolha do grafite teve como inspiração trabalhos anteriores que exploraram a adição de nanotubos de carbono (NTC) para a melhoria das propriedades elétricas de materiais (Gonzalez *et al.*, 2017) (Mu *et al.*, 2017). Embora os nanotubos de carbono sejam conhecidos por suas excelentes propriedades elétricas e mecânicas, o grafite foi selecionado devido à sua similaridade estrutural com os NTCs, e por apresentar valores de condutividade elétrica próximos aos dos nanotubos. Além disso, o grafite se destaca como uma alternativa mais barata e acessível, sendo uma opção menos explorada no campo da impressão 3D.

Foi escolhido o grafite em pó de alto grau de processamento e pureza superior a 90%, fornecido pela Aeromax, uma das empresas brasileiras emergentes na síntese de componentes para lubrificantes, que também utiliza o grafite em suas soluções. Este grafite foi selecionado devido à sua alta pureza, o que garante a consistência nas propriedades do material e desempenho confiável para a produção dos compósitos. A alta pureza do grafite é fundamental para assegurar que as propriedades elétricas e mecânicas desejadas sejam obtidas nas resinas modificadas, proporcionando a condutividade necessária para o estudo de novas aplicações.

Essa escolha de material visa otimizar o custo-benefício, ao mesmo tempo em que oferece uma alternativa viável ao uso de materiais mais caros como os nanotubos de carbono, mantendo propriedades compatíveis e de fácil processamento, o que é fundamental no desenvolvimento de materiais e técnicas para impressão 3D.

3.2.2 RESINA ABS-LIKE

A resina, modelo Resina ABS-Like Gray, fornecida pela empresa Elegoo, é uma escolha ideal para o projeto devido à sua alta resistência e durabilidade, replicando as propriedades do ABS convencional. Essa resina é conhecida por sua capacidade de produzir peças com características similares ao ABS, incluindo flexibilidade e resistência à tração, tornando-a altamente adequada para aplicações que exigem componentes mecânicos robustos e duráveis. A resina fotossensível utilizada nos experimentos possui especificações técnicas conforme a ficha de dados de segurança (MSDS) de 2022. A escolha da resina levou em consideração sua compatibilidade com o sistema DLP e suas propriedades mecânicas comparáveis ao ABS. A resina é amplamente aceita no mercado devido à sua capacidade de proporcionar peças com excelente desempenho mecânico e dimensional.

Além disso, a resina ABS-Like da Elegoo é uma escolha popular devido à sua versatilidade e compatibilidade com uma variedade de impressoras 3D. Isso permite uma ampla aplicação em diferentes setores, desde engenharia mecânica até prototipagem rápida e fabricação de peças funcionais. Sua resistência térmica, combinada com a durabilidade ao longo do tempo, faz dela uma opção confiável para a criação de peças que precisam suportar condições exigentes.

No contexto do projeto em questão, a escolha dessa resina se baseia em sua capacidade comprovada de produzir peças mecânicas duráveis e precisas, essenciais para o sucesso do experimento e para atender aos requisitos de resistência e desempenho das peças a serem fabricadas.

Tabela 3 Propriedades da resina ABS-Like.

Fonte: Elegoo (2024)

ABS-Like Elegoo	
Densidade	1,05~1,25 g/cm ³
Viscosidade	150-250 mPa·s
Dureza	75 Shore D
Tensão de ruptura	40-70 Mpa

A análise da composição da resina ABS-Like foi realizada para entender seus componentes principais e suas funções dentro da formulação. Como mostrado na Tabela 5, a resina contém vários componentes que contribuem para suas propriedades de desempenho. Dentre esses componentes, destacam-se os monômeros acrílicos, que são responsáveis pela polimerização da resina, e os fotoiniciadores, que são essenciais para a ativação da reação de cura quando expostos à luz UV. A Tabela 6 fornece detalhes adicionais sobre a composição da

resina, com a indicação dos percentuais de cada substância presente, bem como suas respectivas funções.

Tabela 4 Composição da Resina.

Fonte: Elegoo *MSDS Report* (2022)

Componente	CAS	EINECS	Descrição	Percentual
(5-ethyl-1,3-dioxan-5-yl)methyl acrylate	66492-51-1	266-380-7	Perigoso para o meio aquático (Crônico 2, H411); Irritação na pele (2, H315); Sensibilização da pele (1B, H317)	45%
3,3,5-trimethylcyclohexyl acrylate	86178-38-3	289-200-9	Perigoso para o meio aquático (Crônico 2, H411); Irritação na pele (2, H315); Irritação nos olhos (2, H319); Toxicidade específica para órgãos-alvo (SE 3, H335)	28%
2-Oxepanone, polímero com 2-ethyl-2-(hydroxymethyl)-1,3-propanediol e 5-isocyanato-1-(isocyanatomethyl)-1,3,3-trimethylcyclohexane, 2-hydroxyethyl acrylate-bloqueado	68987-79-1	-	-	20%
Ethyl phenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphinate	84434-11-7	282-810-6	Perigoso para o meio aquático (Crônico 2, H411); Sensibilização da pele (1B, H317)	5%
Dióxido de titânio	13463-67-7	236-675-5	Suspeito de causar câncer (Carc. 2, H351)	1,5%
Negro de fumo	1333-86-4	215-609-9	Substância com limite de exposição ocupacional na Comunidade	0,5%

Tabela 5 Resumo das Funções dos Componentes da resina ABS-Like.

Fonte: Autor (2025)

Componente	Função
(5-ethyl-1,3-dioxan-5-yl)methyl acrylate	Monômero, serve para formar a estrutura da resina e permitir a foto-polimerização.
3,3,5-trimethylcyclohexyl acrylate	Monômero, auxilia na foto-polimerização e modificação da rigidez da resina.
2-Oxepanone, polymer with 2-ethyl-2-(hydroxymethyl)-1,3-propanediol	Polímero bloqueado, controla a viscosidade e estabilidade térmica.
Ethyl phenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphinate	Fotoiniciador, inicia a foto-polimerização ao ser exposto à luz UV.
Titanium dioxide	Pigmento e estabilizador, ajuda na dispersão e pode melhorar a cura com luz UV.
Carbon black	Pigmento, absorve luz UV e altera as propriedades elétricas da resina.

3.2.3 IMPRESSORA 3D DE RESINA CREALITY HALOT ONE

A Creality Halote One é uma impressora 3D de resina que utiliza a técnica de processamento digital de luz (DLP). Esta técnica permite a criação de objetos tridimensionais de alta precisão e qualidade, solidificando resina fotocurável camada por camada usando uma fonte de luz projetada através de um LCD monocromático.



Figura 12 Impressora 3D de resina Creality Halot One.

Fonte: Creality (2021)

A Halote One opera com a técnica DLP, que é conhecida por sua capacidade de produzir detalhes finos e superfícies lisas. A precisão do eixo XY varia entre 0,01 e 0,05 mm, permitindo a fabricação de peças com alta resolução. A fonte de luz integral Creality, combinada com o LCD monocromático de 5,96 polegadas, garante uma cura uniforme das camadas de resina.

O volume útil de impressão da Halote One é de 127 x 80 x 160 mm. Este tamanho é adequado para uma ampla gama de projetos, desde pequenas peças detalhadas até modelos de médio porte. A velocidade de impressão varia entre 1 e 10 segundos por camada, o que possibilita a produção rápida de objetos complexos.

A Halote One utiliza resina fotocurável de 405 nm como material de impressão. Esta resina é curada pela luz projetada através do LCD, formando estruturas robustas e detalhadas. A impressora suporta formatos de arquivo STL, OBJ e AMF, proporcionando flexibilidade para os usuários que trabalham com diferentes tipos de software de modelagem 3D.

Para finalizar a impressora é equipada com o software Creality Halot-Box, que facilita a configuração dos arquivos de impressão. Este software é projetado para ser intuitivo, tornando o processo de impressão acessível para iniciantes e eficiente para usuários experientes.

3.2.4 USO E APRENDIZADO DA IMPRESSORA DE RESINA

A Creality Halote One é uma impressora 3D de resina que utiliza a técnica de processamento digital de luz (DLP), conhecida por sua capacidade de produzir objetos tridimensionais com alta precisão e qualidade. Esta impressora possui um volume útil de impressão de 127 x 80 x 160 mm, uma precisão do eixo XY que varia entre 0,01 e 0,05 mm, e uma velocidade de impressão que varia de 1 a 10 segundos por camada. Equipada com um LCD monocromático de 5,96 polegadas e uma fonte de luz integral Creality, a Halote One utiliza resina fotocurável de 405 nm como material de impressão. Além disso, suporta formatos de arquivo STL, OBJ e AMF, sendo controlada pelo software Creality Halot-Box, que facilita a configuração e o gerenciamento dos arquivos de impressão.

A tecnologia DLP funciona projetando uma imagem de cada camada do objeto a ser impresso através de um painel LCD. O LCD monocromático permite que a luz passe apenas nas áreas desejadas, solidificando a resina fotocurável nessas regiões específicas. Esse processo é repetido camada por camada até que o objeto tridimensional esteja completo. A precisão do eixo XY e a uniformidade da fonte de luz integral Creality garantem que cada camada seja curada com precisão, resultando em uma superfície lisa e detalhada no objeto final.

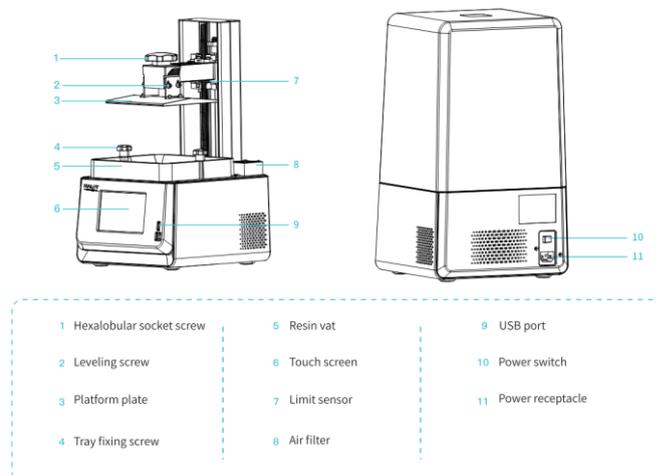


Figura 13 Componentes da impressora de resina.

Fonte: Creality (2021)

O início do processo envolveu o entendimento da impressora e seus componentes, começando pela análise do manual de uso, conforme mostrado na imagem 14. A partir dessa análise, iniciou-se o processo de nivelamento da mesa de impressão, seguindo o roteiro proposto

na imagem 15. Este processo é fundamental para assegurar que a plataforma de impressão esteja perfeitamente alinhada, garantindo a qualidade das impressões.

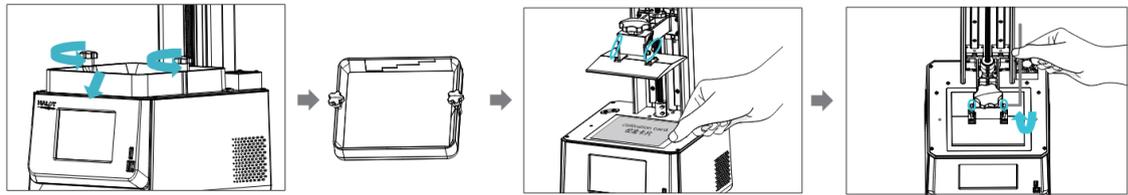


Figura 14 Sequência do processo de nivelamento da mesa de impressão.

Fonte: Creality (2021)

Primeiramente, a plataforma foi elevada e os parafusos de borracha nas laterais da cuba de resina foram afrouxados para removê-la. Em seguida, os quatro parafusos na placa de conexão da plataforma de moldagem foram soltos. Uma folha de calibração foi colocada sobre a tela de impressão e, em seguida, através do menu de configurações, foram acessadas as opções Print Settings → Z axis movement → Leveling para iniciar o processo de nivelamento. Após a confirmação de que a folha de calibração estava uniformemente ajustada, os quatro parafusos da plataforma foram apertados novamente, fixando a posição nivelada.

Com o nivelamento concluído, a impressora estava pronta para a próxima fase de calibração e testes iniciais. Este procedimento garantiu que a mesa de impressão estivesse precisamente ajustada, um passo crucial para obter impressões de alta qualidade e para o sucesso das atividades subsequentes da pesquisa. Ao final, a impressora foi conectada à rede local e o software foi atualizado para a versão v2.303.01, garantindo que o equipamento estivesse operando com as últimas melhorias e correções disponíveis.

3.2.5 DEFINIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO SLICER

Um software slicer, ou fatiador, é uma ferramenta essencial no processo de impressão 3D. Ele converte o modelo 3D digital em instruções específicas que a impressora 3D pode seguir para criar o objeto físico. O slicer divide o modelo em camadas finas e gera o caminho que o extrusor ou a fonte de luz deve seguir para construir cada camada, resultando em um arquivo de impressão compatível com a impressora. Além de fatiar o modelo, o software permite configurar parâmetros de impressão, como altura da camada, velocidade de impressão, suporte e densidade do preenchimento.

A Creality recomenda o uso de um dos seguintes softwares slicer: Halot Box, LycheeSlicer ou CHITUBOX. O Halot Box é desenvolvido especificamente para as impressoras da Creality, como a Halote One, oferecendo uma interface amigável e ajustes precisos para parâmetros de impressão. O LycheeSlicer é versátil e compatível com diversas impressoras 3D de resina, conhecido por sua interface intuitiva e geração automática de suportes. O CHITUBOX, amplamente utilizado, oferece ferramentas eficientes para preparar, fatiar e gerenciar modelos 3D, com recursos avançados como visualização em tempo real das camadas.

Entre esses, o Halot Box foi escolhido para este trabalho. Ele é o software padrão da Creality e também o mais leve de usar, sem perder as funções que os outros softwares oferecem. Ele proporciona uma experiência de usuário simplificada e eficiente, permitindo ajustes detalhados e precisos dos parâmetros de impressão. A versão mais recente do Halot Box utilizada no momento é a v4.6.0.3899, garantindo compatibilidade total com a impressora Halote One e acesso às últimas atualizações e melhorias.

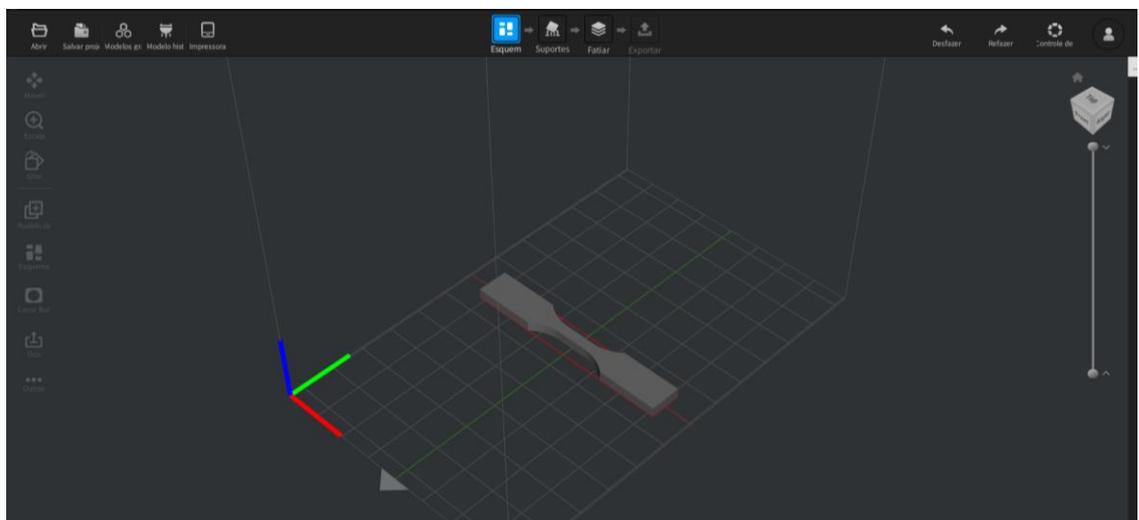


Figura 15 Interface do software Halot Box.

Fonte: Autor (2024)

Para o processo de impressão, é necessário incluir o modelo 3D no software slicer. Como representado na Figura 14, foi utilizado um modelo de corpo de prova tipo "V" conforme a norma ASTM D638-10. O software permite criar suportes que, como o nome sugere, geram estruturas auxiliares para facilitar a impressão de peças com geometrias sem apoio no eixo Z. No entanto, no caso do modelo apresentado, essa necessidade de suportes não se aplica, permitindo que o processo de impressão siga diretamente para a etapa de configuração.

Na etapa de configuração, o software possibilita a definição de vários parâmetros de impressão. Primeiramente, é ajustada a exposição inicial, que define o tempo em segundos de exposição da luz UV para as camadas base. Essas camadas são essenciais para garantir que a peça fique bem presa à plataforma de impressão. Em seguida, define-se a quantidade de camadas base necessárias para fornecer essa resistência inicial.

Além disso, o software permite especificar o tamanho de cada camada em micrômetros, determinando a resolução vertical da impressão. Outro parâmetro importante é o tempo de exposição das camadas normais, que é o tempo de cura para cada camada sucessiva após as camadas base. Por fim, ajustam-se a velocidade e a altura de deslocamento, que controlam o movimento do motor responsável pelo eixo Z durante o processo de impressão.

Por fim, o arquivo é fatiado, ou seja, geradas as informações de cada camada e enviadas à impressora para teste. Para a avaliação da impressora e funcionamento, foi utilizada a definição padrão do software e impresso o modelo em questão, resultando em um sólido conforme mostrado na Figura 15.



Figura 16 Corpo de prova impresso.

Fonte: Autor (2024)

3.2.6 CALIBRAÇÃO DA RESINA ABS-LIKE

Cada resina utilizada na impressora 3D deve ser calibrada individualmente, pois os parâmetros de impressão podem variar significativamente entre diferentes tipos de resina. Esses parâmetros podem mudar porque os materiais que compõem cada resina influenciam na dispersão da luz e na absorção de calor, fatores essenciais para a cura dos polímeros que formam o objeto impresso.

Para este fim, foi trabalhada a calibração da resina ABS-Like. O processo começou com a colocação da resina no VAT, que é o recipiente que comporta a resina na impressora. Em seguida, foi utilizada uma peça de teste e calibração específica, recomendada para calibrações de impressoras de resina, chamada matriz de calibração.

Durante a calibração, foram estabelecidas as configurações padrões recomendadas pelo fabricante da resina. A partir dessas configurações iniciais, os parâmetros de tempo de impressão das camadas padrão foram modificados gradualmente para averiguar as mudanças nas propriedades da peça impressa. As mudanças mais perceptíveis e os resultados da calibração são apresentados na imagem 18.

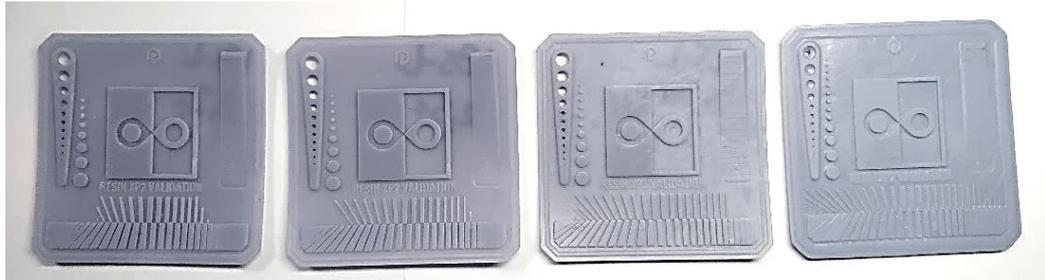


Figura 17 Peças de calibração com diferentes tempos de exposição de camadas, da esquerda para a direita: 2,8s; 3,2s; 3,6; e 4,0.

Fonte: Autor (2024)

Com as peças de calibração impressas, notou-se uma variação na qualidade da impressão e nas dimensões das peças conforme a variação do tempo de exposição. Ao observar as peças impressas com tempo de 2,8 segundos e proximidades, ocorreram falhas em algumas geometrias de impressão, e as dimensões resultantes eram menores do que o esperado. Isso indicou que o tempo de exposição era insuficiente para uma cura completa da resina, comprometendo a precisão dimensional e a integridade estrutural das peças.

À medida que o tempo de exposição foi aumentado, observou-se uma melhora na qualidade da impressão até chegar a 4 segundos. No entanto, nesse ponto, percebeu-se a denominada superexposição de camada, onde as peças se expandiram além das dimensões previstas devido à maior exposição à luz UV do que o necessário. Isso resultou em um aumento das dimensões das peças, ultrapassando as tolerâncias aceitáveis.

Com base nas variações observadas, o tempo de 3,6 segundos foi identificado como o mais adequado. Esse tempo de exposição estabeleceu geometrias satisfatórias e dimensões conformes dentro das tolerâncias do fabricante. Assim, estabeleceu-se 3,6 segundos como o tempo padrão de exposição para a resina ABS-Like. Os demais parâmetros foram mantidos conforme recomendação do fabricante para garantir a consistência e a qualidade das peças impressas. Os dados detalhados das configurações finais estão apresentados na tabela 7.

Tabela 6 Definições de impressão ABS-Like.

Fonte: Autor (2024)

Altura de camada	50 μm
Quant. Camadas base	5 camadas
Exposição da base	30 s
Exposição da camada padrão	3,6 s
Velocidade do motor	2 mm/s
Altura de deslocamento	8 mm

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A análise por difração de raios-X (DRX) revelou que a amostra é predominantemente composta por grafite com estrutura sintética turbostrática, uma forma de carbono grafítico com desordem estrutural característica. O grafite sintético, neste caso o turbostrático, apresenta uma dispersão aleatória nas orientações das camadas de grafeno, ao contrário do grafite ideal, onde as camadas são organizadas de forma ordenada e simétrica (Tul Ain *et al.*, 2019). Essa desordem estrutural resulta em um desalinhamento entre as camadas, causando uma expansão do espaçamento interplanar. O espaçamento interplanar calculado via software (*Xpert Highscore*) foi de 3,519 Å, valor superior ao do grafite ideal (3,35 Å), o que indica essa expansão da rede atribuída à turbostraticidade. Essa forma de grafite pode ser induzida por processos de síntese térmica ou outras condições de processamento que não favorecem a organização estrutural ideal das camadas de grafeno (Qiu *et al.*, 2019).

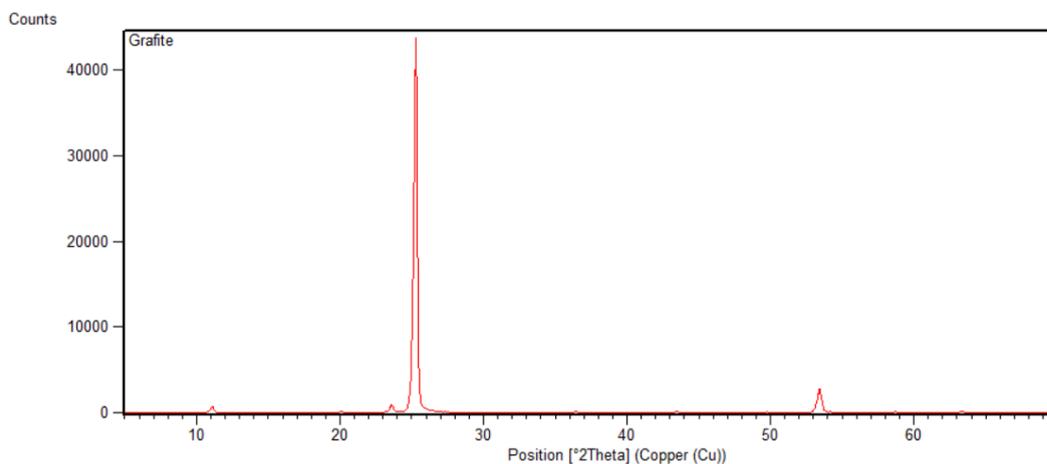


Figura 18 DRX da amostra de grafite representada no Xpert Highscore.

Fonte: Autor (2025)

Conforme imagem acima, o padrão de difração exibiu um pico dominante em 25,306° 2θ, correspondente ao plano cristalográfico (002) dos materiais grafíticos. Este pico apresenta intensidade absoluta de 44.056 contagens e intensidade relativa de 100%, indicando que a fase grafítica representa a grande maioria da amostra (estimada acima de 90%).

Embora a maioria dos picos secundários apresentem intensidade relativa inferior a 2%, destaca-se um conjunto de reflexões em 53,3–53,6° 2θ com intensidade combinada de até 6,25%, sugerindo variações estruturais internas ou pequenas fases organizadas residuais. Ainda

assim, a assinatura geral do difratograma é compatível com grafite sintético, conforme arquivos de referência (ICDD 00-058-1638).

A largura a meia altura (FWHM) foi de $0,216^\circ 2\theta$ e foi utilizada para calcular o tamanho médio do cristalito na amostra, com base na equação de Scherrer, que relaciona a largura do pico de difração com o tamanho dos cristais. A equação é expressa como:

$$D = \frac{K \times \lambda}{\beta \cos \theta}$$

Onde:

- D é o tamanho médio do cristalito, em nanômetros (nm).
- K é o fator empírico, que depende da forma do pico e das condições experimentais. Neste caso, foi utilizado $K = 0,91$.
- λ é o comprimento de onda da radiação utilizada, que, no caso, é $1,5406 \text{ \AA}$ (radiação Cu- $K\alpha$).
- β é a largura a meia altura (FWHM) do pico de difração, que foi $0,216^\circ 2\theta$. Este valor foi convertido para radianos para ser utilizado na fórmula:

$$\beta = 0,216^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 0,00378 \text{ rad}$$

- θ é o ângulo de difração, que, para o pico observado em $25,306^\circ 2\theta$, é $12,6531^\circ$ (meia posição do pico).

$$\theta = 12,6531^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 0,2218 \text{ rad}$$

Aplicando os valores na fórmula:

$$D = \frac{0,91 \times 1,5406}{0,00378 \times \cos(0,2218)}$$

O cálculo resultou em um tamanho médio de cristalito de $381,8 \text{ nm}$, que representa a dimensão média dos cristais presentes na amostra. A diferença observada entre as dimensões obtidas por MEV e o valor calculado por DRX pode ser atribuída ao fato de que o MEV, ao medir as partículas, tende a mostrar dimensões na faixa de micrômetros, enquanto o DRX avalia o tamanho das regiões cristalinas internas, que são menores. Possivelmente, as partículas observadas no MEV são aglomerados de cristalitos menores, o que pode explicar essa discrepância. Conclui-se que a amostra consiste em um material carbonáceo de alta pureza, com desordem estrutural controlada e morfologia cristalina, fatores que podem influenciar diretamente propriedades funcionais como condutividade elétrica e estabilidade térmica.

Observações:

- A radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) foi utilizada, com varredura em passo de $0,02^\circ 2\theta$.
- A análise foi validada por comparação com os dados de referência para o grafite sintético (ICDD 00-058-1638).

4.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para investigar possíveis alterações nas ligações químicas da matriz polimérica ABS-Like em função da adição de grafite em diferentes concentrações. O objetivo principal dessa análise foi avaliar se a incorporação da carga promove modificações estruturais detectáveis ou se os efeitos observados são predominantemente físicos, como atenuação óptica pela presença do aditivo.

Inicialmente, foi analisada a amostra de resina pura, sem adição de grafite, representada na Figura 19. Esse espectro serve como referência para comparação com os demais e apresenta bandas típicas da resina ABS-Like (Jang, S.; Cho, S., 2023). Dentre as regiões principais, observa-se em torno de 3333 cm^{-1} uma banda larga associada ao estiramento da ligação O–H, possivelmente relacionada à presença de grupos hidroxila residuais ou absorção de umidade. Na faixa de 2924 cm^{-1} , ocorrem bandas atribuídas ao estiramento de C–H, típicas de cadeias alifáticas presentes na estrutura da resina. Um pico bem definido é observado próximo a 1720 cm^{-1} , indicando a presença de grupos carbonila (C=O), comuns em resinas acrílicas ou estéricas. Entre 1500 e 1000 cm^{-1} , diversas bandas são visíveis, atribuídas a modos vibracionais como estiramentos simétricos e assimétricos de C–O–C. A região abaixo de 1000 cm^{-1} apresenta bandas associadas a flexões fora do plano de ligações duplas, como C=C, e grupos aromáticos.

A Figura 20 apresenta os espectros comparativos das amostras com 0%, 0.5%, 1.0%, 3.0%, 5.0% e 10.0% de grafite. A comparação direta entre os espectros revela que a forma geral do traçado é preservada ao longo das concentrações, sem o surgimento de novas bandas nem deslocamentos evidentes nos picos principais. Esse comportamento sugere que não houve formação de novas ligações químicas entre a matriz e o aditivo. A banda da carbonila, localizada em torno de 1720 cm^{-1} , permanece presente em todas as amostras com intensidade relativamente constante, reforçando a integridade da estrutura química da matriz. Da mesma forma, a banda na região de 1098 cm^{-1} , relacionada ao estiramento de C–O e outras ligações típicas da resina, mostram pequena atenuação progressiva da intensidade, especialmente nas amostras com maior teor de grafite.

Esse efeito é atribuído ao comportamento óptico do grafite, que é naturalmente opaco à radiação infravermelha e pode atuar como elemento dispersante ou absorvedor da radiação incidente. Portanto, a redução da intensidade das bandas, principalmente nas amostras com 5% e 10% de grafite, é interpretada como um efeito físico e não como um indício de modificação química. Essa mesma tendência é observada nas regiões de C–H ($\sim 2924\text{ cm}^{-1}$) e O–H ($\sim 3333\text{ cm}^{-1}$), que sofrem leve decréscimo de intensidade, mas mantêm suas posições originais.

Dessa forma, a análise por FTIR indica que a adição de grafite à resina ABS-Like ocorre de forma predominantemente física, sem geração de novos grupos funcionais ou reações com a matriz detectáveis por esta técnica. Isso sugere que o grafite atua como uma carga dispersa, preservando a estrutura química do polímero, mas com potencial para influenciar outras propriedades do compósito, como a condutividade elétrica e o comportamento térmico, a serem avaliadas por outras técnicas.

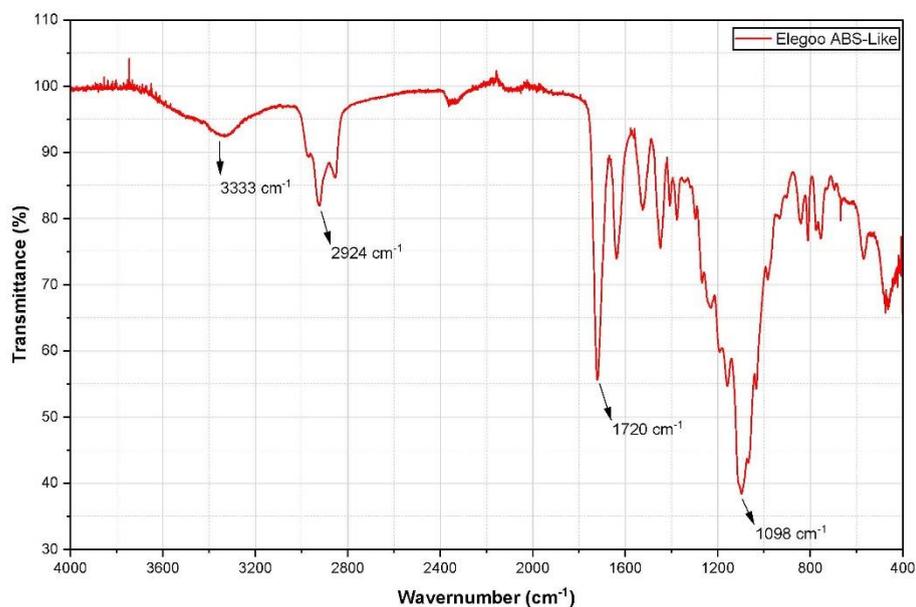


Figura 19 Espectro FTIR da resina ABS-Like pura.

Fonte: Autor (2025)

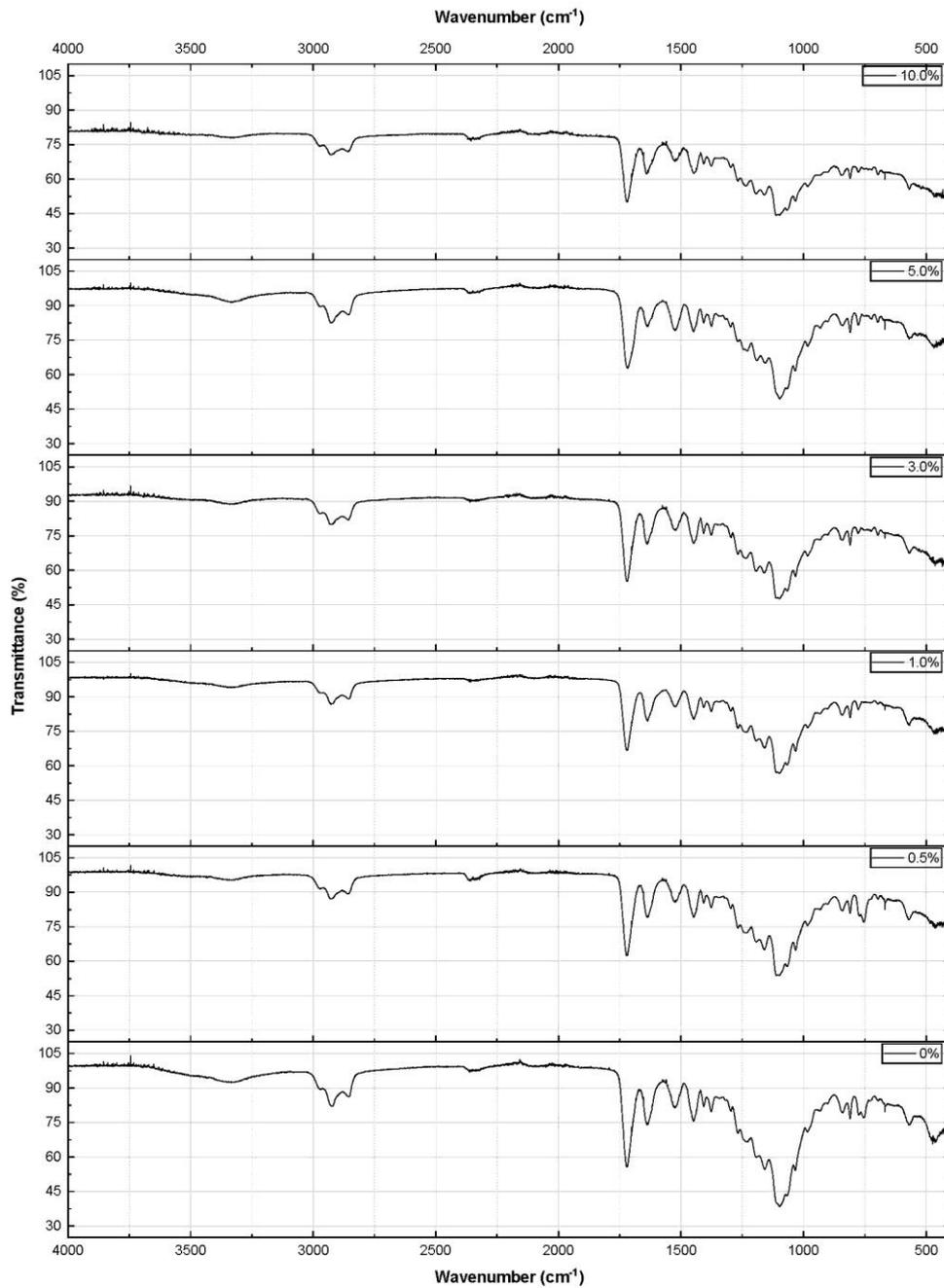


Figura 20 Espectros FTIR da resina ABS-Like com diferentes porcentagens de grafite.

Fonte: Autor (2025)

4.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV-EDS)

A análise das amostras foi realizada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para investigar a morfologia e as características estruturais da resina pura e do grafite

em pó. Como parte da caracterização dos materiais utilizados, foram obtidas imagens com aproximações de até 1 micron e 200 nanômetros, respectivamente, permitindo observar detalhes da estrutura e das partículas de ambos os componentes.

As imagens da resina pura mostraram a morfologia homogênea da matriz polimérica. A resina, por ser um polímero termofixo, apresentou uma estrutura frágil característica desse tipo de material, que foi evidenciado nas imagens de MEV. Não foram observadas imperfeições significativas, como bolhas, vazios ou superfícies irregulares, o que indica que a resina, em sua forma pura, mantém uma distribuição uniforme e sem defeitos visíveis. O padrão visualizado reforçou a natureza frágil desse material. Além disso, as imagens não revelaram qualquer contaminação ou impurezas, indicando a qualidade da resina utilizada.

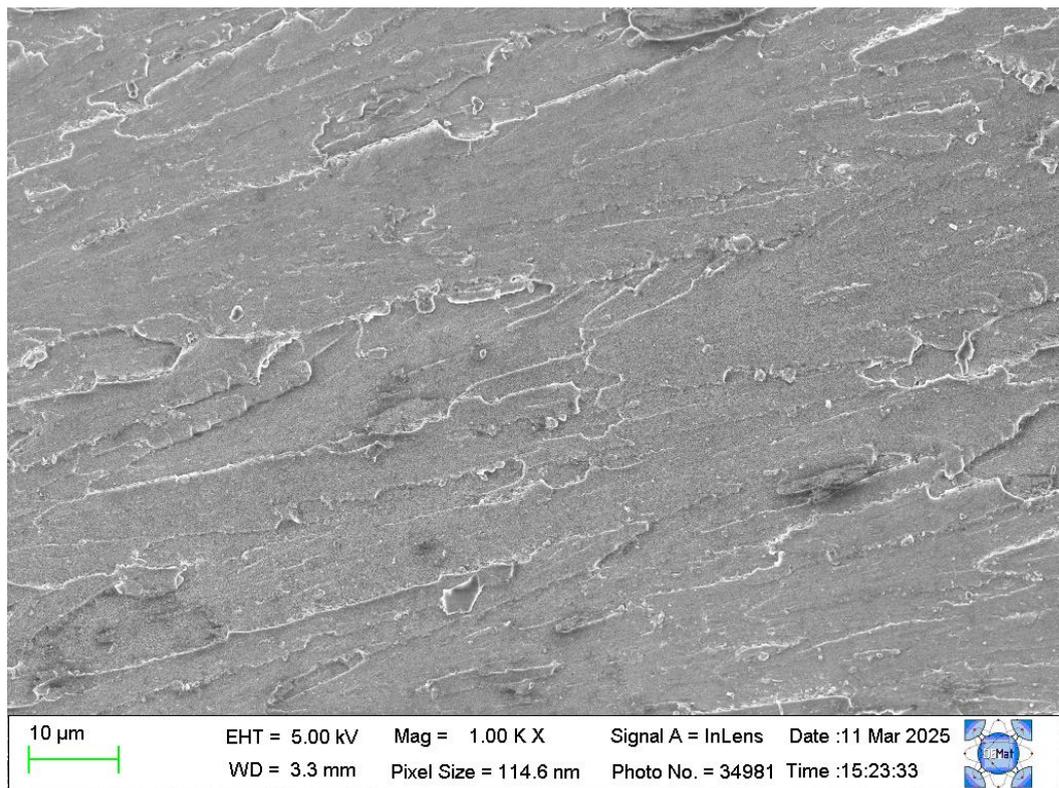


Figura 21 Microscopia eletrônica de varredura da resina ABS-Like com escala de 10 microns.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

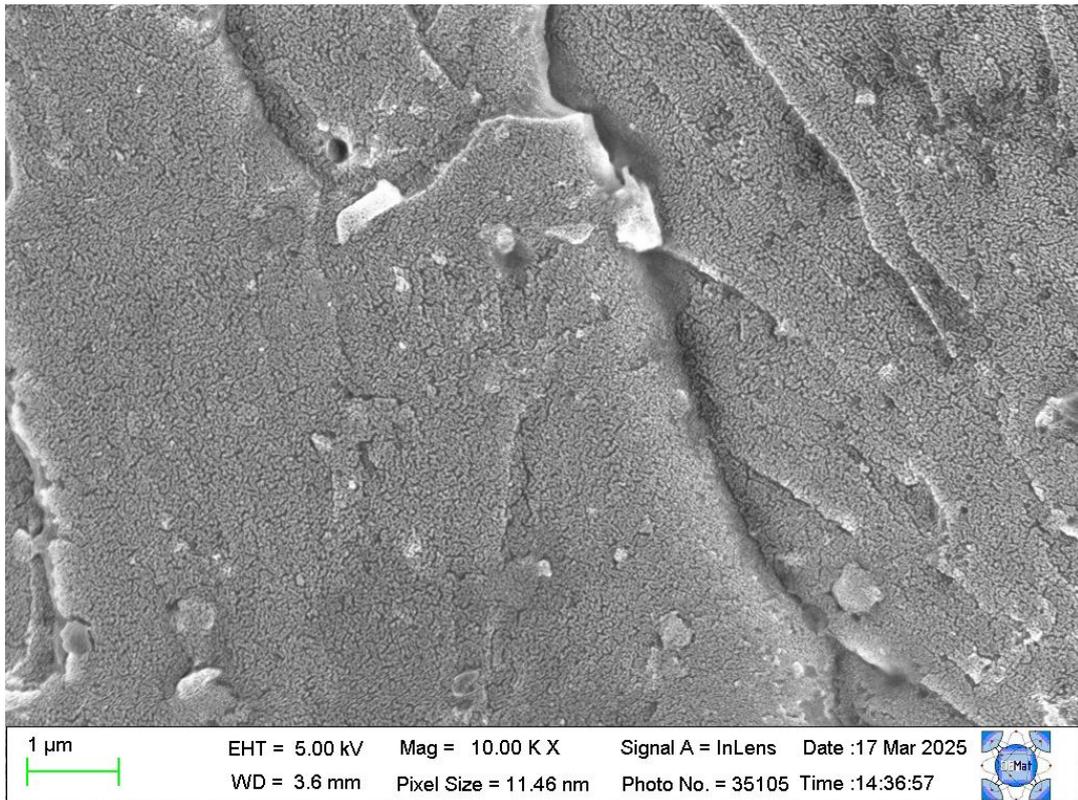


Figura 22 Microscopia eletrônica de varredura da resina ABS-Like com escala de 1 micron.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

As imagens obtidas para o grafite em pó mostraram uma estrutura irregular, com partículas lamelares, características típicas do material grafite (Bilisik, K., & Akter, M, 2022). Essas partículas variavam de tamanho e forma, com algumas apresentando uma distribuição mais alongada e outras mais compacta. O grafite, por sua natureza, possui partículas pequenas e irregulares, o que pode dificultar sua completa dispersão na resina durante a mistura. Além disso, foi possível identificar alguns aglomerados de partículas de grafite, o que sugere que em concentrações mais elevadas, o grafite tende a formar aglomerados visíveis, impactando potencialmente a homogeneidade da mistura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas e elétricas da resina.

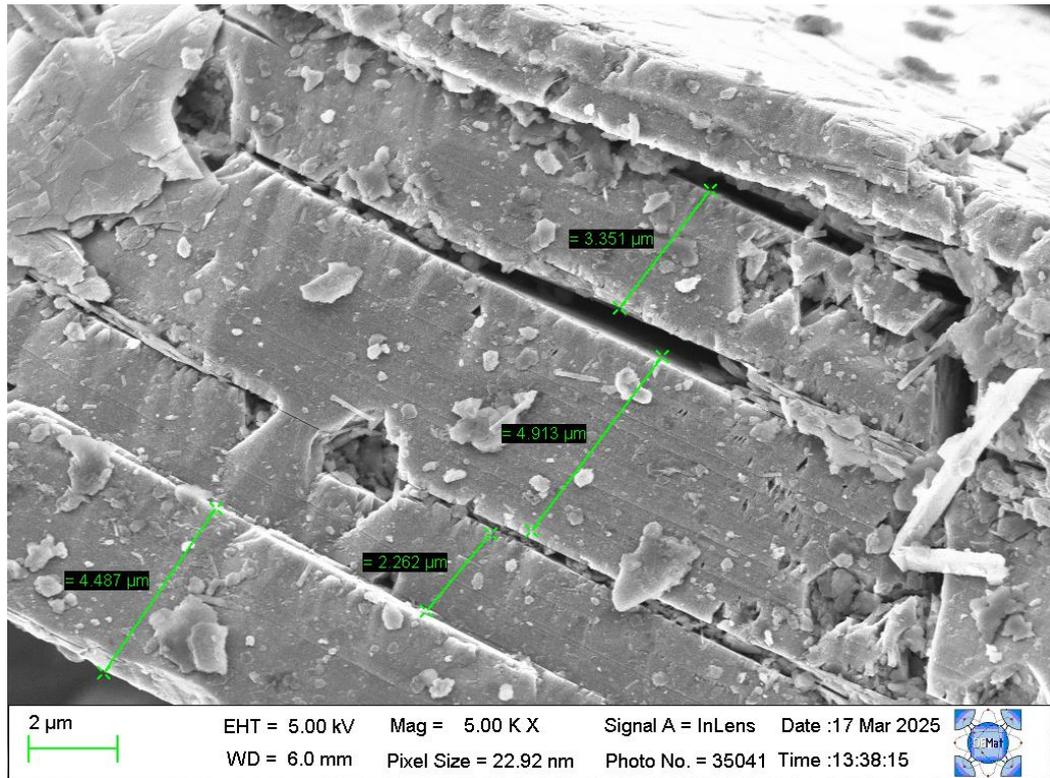


Figura 23 Microscopia eletrônica de varredura do Grafite com escala de 2 microns.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

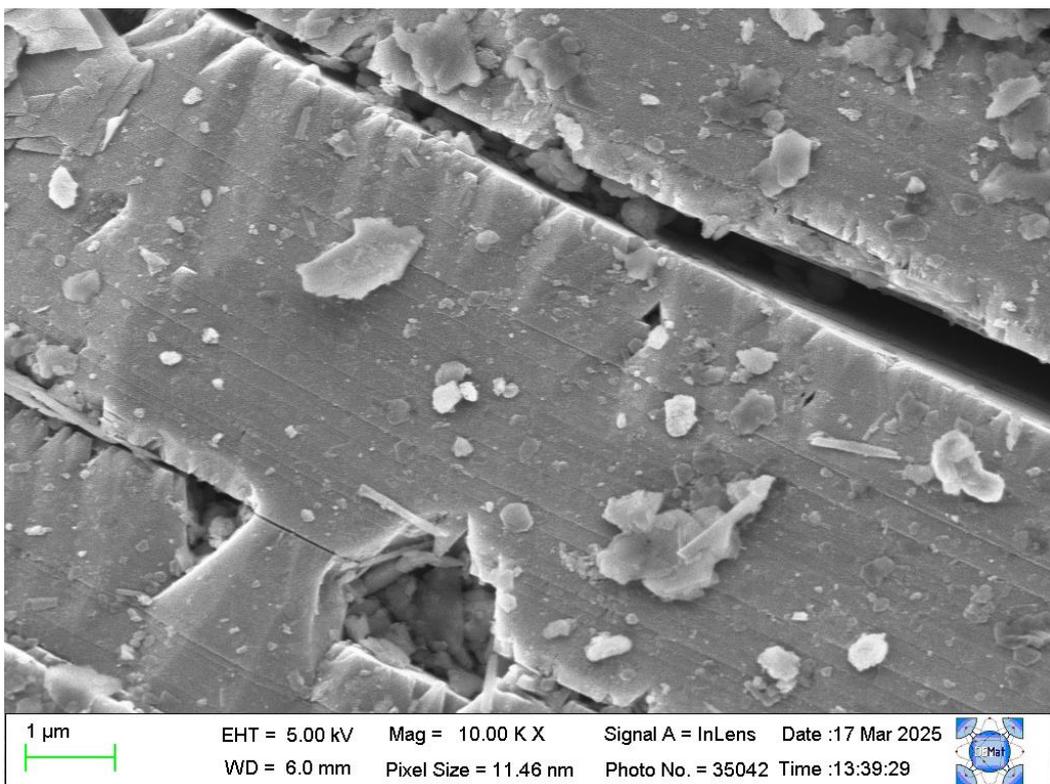


Figura 24 Microscopia eletrônica de varredura do Grafite com escala de 1 micron.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

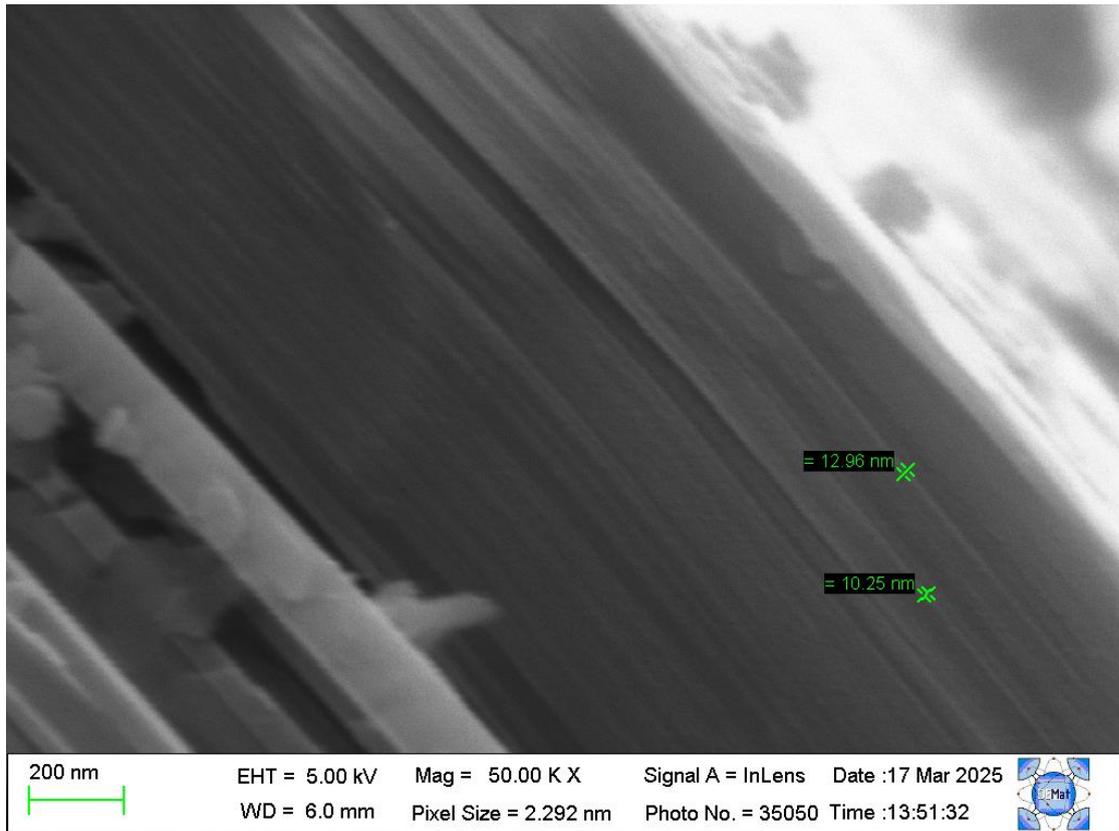


Figura 25 Microscopia eletrônica de varredura do Grafite com aproximação escala de 200 nanômetros.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

As imagens de grafite em pó foram analisadas para caracterizar a morfologia das partículas e a distribuição do tamanho delas. Como esperado, o grafite em pó exibiu uma estrutura lamelar típica, com partículas que apresentam uma superfície plana que pode facilitar a interação com a resina (Azim, 2006). Já as imagens da resina pura mostraram uma superfície de fratura frágil, sem grandes irregularidades ou alterações estruturais visíveis. Isso reforça a ideia de que o grafite, sendo um material frágil, não modificaria drasticamente a fragilidade do polímero, mas poderia impactar a resistência geral da resina quando adicionado em concentrações mais altas.

4.2.1 ANÁLISE EDS DA RESINA ABS-LIKE

A análise espectral da resina revelou a predominância de dois elementos: carbono (C) e oxigênio (O), como apresentado na tabela abaixo.

Tabela 7 Composição elementar da resina ABS-Like obtida por MEV-EDS.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

Elemento	Concentração em Massa (%)	Concentração Atômica (%)	Erro (1σ)
C	55,98	62,88	8,04
O	44,02	37,12	7,10
Total	100,00	100,00	—

A presença majoritária de carbono (55,98%) e oxigênio (44,02%) é condizente com a composição química apresentada pelo fabricante, ao qual é composta por grupos ricos em carbono e oxigênio, confirmados na análise FTIR anterior. Esses compostos incluem grupos funcionais como:

- Acrilatos: apresentam ligações duplas C=C;
- Ésteres: com a função R-COO-R’;
- Álcoois: representados pelo grupo hidroxila (R-OH);
- Anéis alicíclicos: ricos em carbono.

A ausência de picos significativos de outros elementos no espectro, salientando-se que o hidrogênio não ser facilmente detectável por EDS, reforça a interpretação de que a amostra consiste majoritariamente em uma matriz orgânica à base de carbono e oxigênio. O traço de fósforo e nitrogênio, se presentes devido a uma baixa porcentagem na composição da resina, está abaixo do limite de detecção da técnica utilizada. A proporção entre C e O também justifica a elevada fração atômica de carbono (62,88%), coerente com estruturas poliméricas.

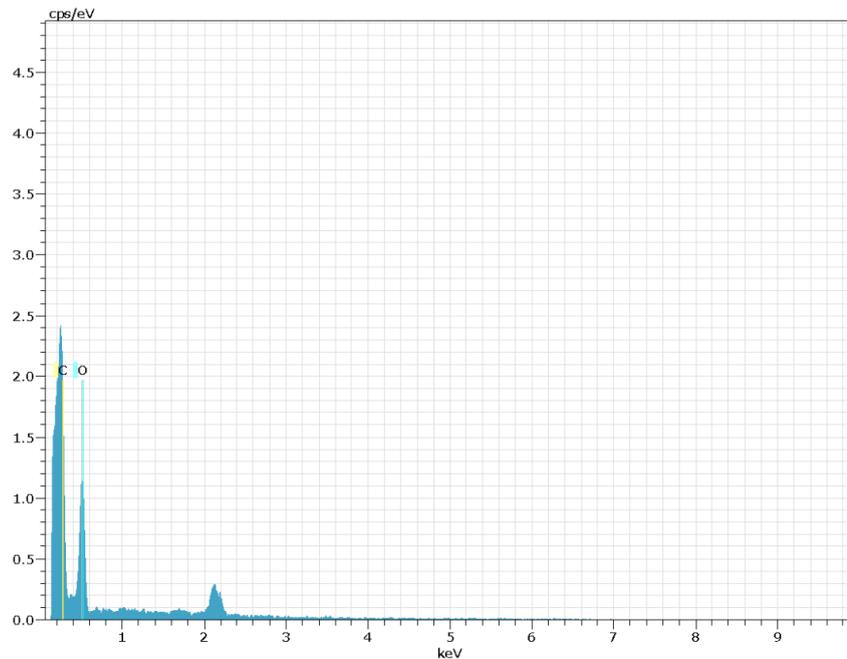


Figura 26 Espectro EDS da resina ABS-Like.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

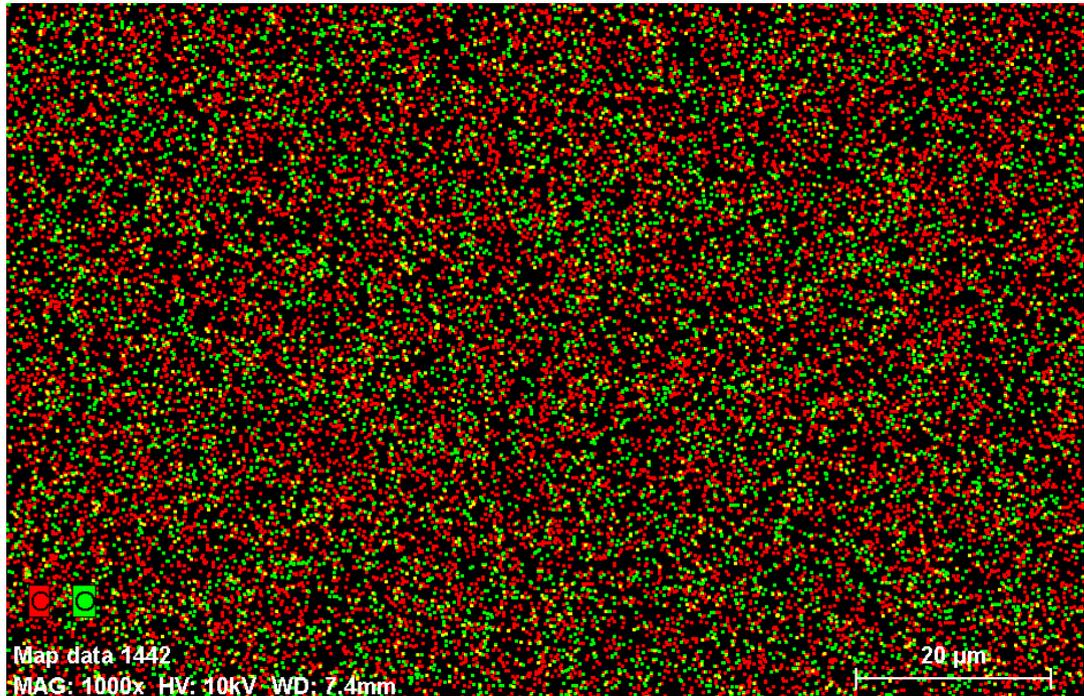


Figura 27 Mapeamento EDS de C e O na resina ABS-Like.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

4.2.2 ANÁLISE EDS DA AMOSTRA DE GRAFITE

A amostra de grafite, analisada separadamente, apresentou um espectro característico com um único pico elementar, do carbono. Os resultados quantitativos confirmam a elevada pureza do material, conforme tabela:

Tabela 8 Composição elementar do grafite em pó obtida por MEV-EDS.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

Elemento	Concentração em Massa (%)	Concentração Atômica (%)	Erro (1σ)
C	100,00	100,00	12,66
Total	100,00	100,00	—

O espectro e a tabela mostram alta pureza da amostra de grafite, sem identificação de impurezas metálicas ou oxigenadas dentro dos limites da máquina. Essa pureza foi relevante para a atuação funcional do grafite como aditivo condutivo, especialmente devido ao objetivo da pesquisa ser a avaliação da interferência da grafite na matriz da resina.

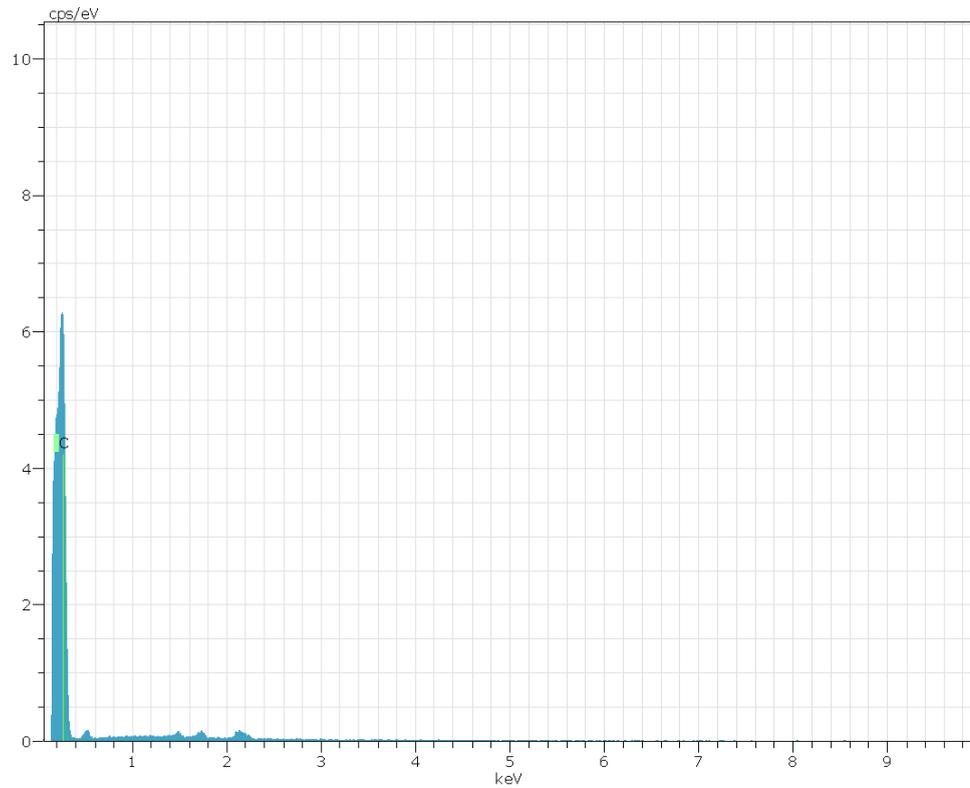


Figura 28 Espectro EDS do grafite.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

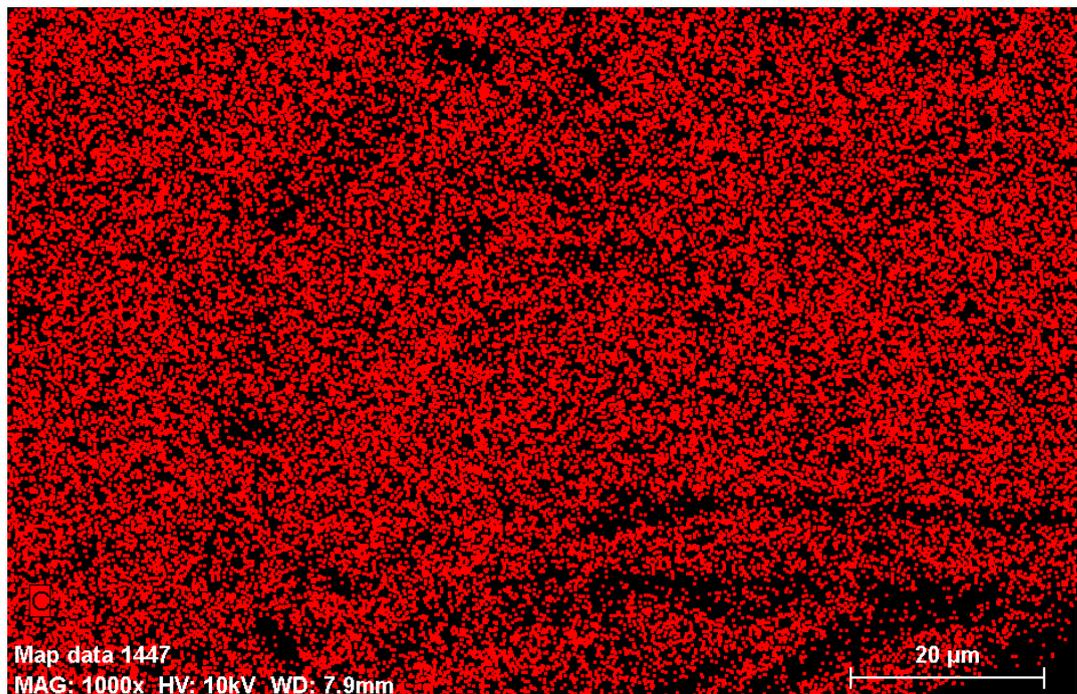


Figura 29 Mapeamento EDS de C do grafite.

Fonte: CT – DEMAT, UFRN (2025)

4.3 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Foi realizada a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) em todas as amostras. A técnica foi aplicada em corpos de prova cilíndricos com 1 cm de diâmetro e altura de 0,5 cm, valor considerado nas análises e ajustado via software. Essa variação de altura decorre de pequenas diferenças no processo de impressão 3D dos corpos de prova.

A análise foi conduzida em uma faixa de frequência de 10^6 Hz até 10 Hz. Frequências inferiores foram testadas inicialmente, mas apresentaram instabilidades e pontos fora da curva quando apresentados no software, comprometendo a confiabilidade dos dados. Por esse motivo, a faixa foi limitada até 10 Hz, garantindo uma melhor resolução dos dados das curvas.

Durante os testes, foram geradas curvas de impedância real (Z') e impedância imaginária (Z''), conhecidas como diagramas de Nyquist. Esses gráficos utilizados para entender a resposta elétrica do material. A componente real da impedância representa a resistência ôhmica do material, enquanto a parte imaginária está associada à sua resposta capacitiva e aos mecanismos de polarização interna. O estudo dessas curvas é utilizado para calcular a resistência estimada da amostra.

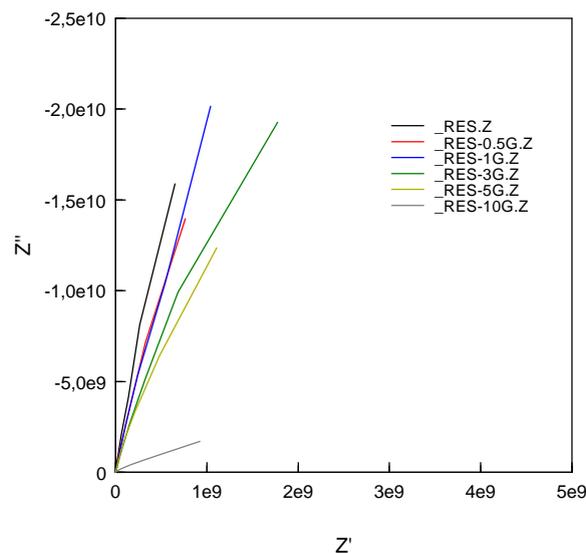


Figura 30 Diagramas de Nyquist das amostras.

Fonte: Autor (2025)

Para interpretar corretamente as curvas obtidas, foi utilizado o software ZView 4, que permite o ajuste das curvas experimentais com modelos de circuitos equivalentes, onde o software fornece automaticamente os parâmetros elétricos com base na menor margem de erro.

Todas as amostras foram ajustadas com o mesmo modelo de circuito equivalente, mostrado na figura abaixo.

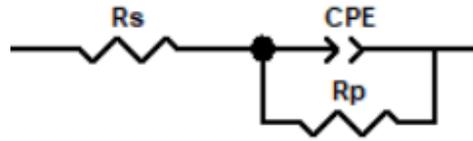


Figura 31 Circuito equivalente utilizado nas amostras.

Fonte: Autor (2025)

O circuito empregado segue a estrutura $R_s - (CPE - R_p)$:

- R_s : resistência associada aos contatos e conexões do sistema;

-CPE (*Constant Phase Element*): elemento de fase constante que representa a resposta dielétrica não ideal do material;

- R_p : resistência de polarização, diretamente relacionada à sua resistência intrínseca.

O uso do circuito equivalente é utilizado para isolar os efeitos puramente resistivos da amostra em meio à resposta complexa medida durante a EIS. O ZView identifica automaticamente o melhor ajuste da curva por método iterativo de minimização de erro, permitindo extração confiável dos parâmetros como R_p , usado para cálculo da resistividade.

Devido à variação de resistência entre as amostras (de $10^{12} \Omega$ a $10^{10} \Omega$), as curvas foram apresentadas separadamente para melhor visualização, visto que a sobreposição atrapalha a melhor leitura de cada gráfico.

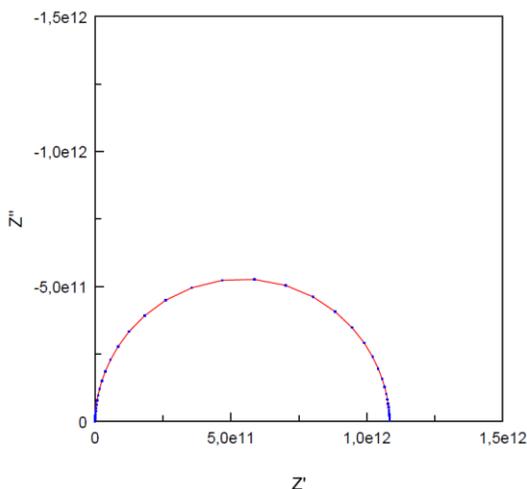


Figura 32 Curva equivalente para a resina base.

Fonte: Autor (2025)

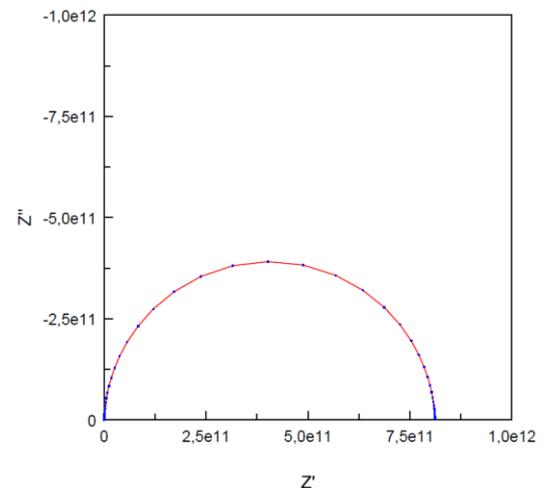


Figura 33 Curva equivalente para a adição de 0,5%.

Fonte: Autor (2025)

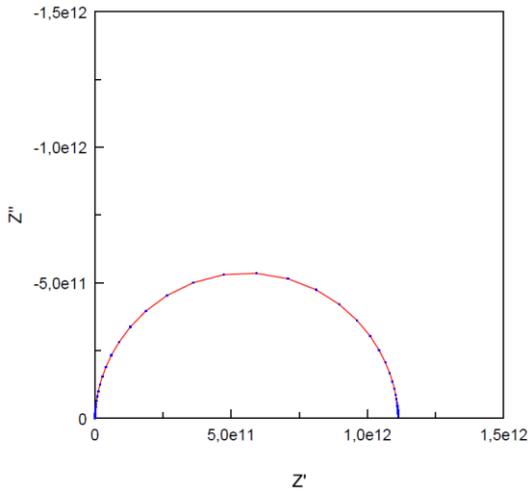


Figura 34 Curva equivalente para a adição de 1%.

Fonte: Autor (2025)

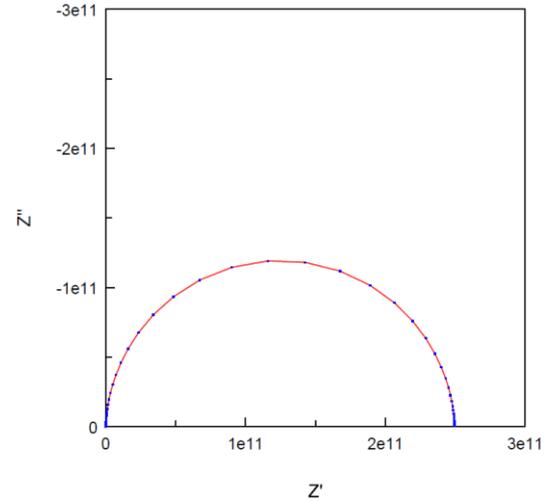


Figura 36 Curva equivalente para a adição de 5%.

Fonte: Autor (2025)

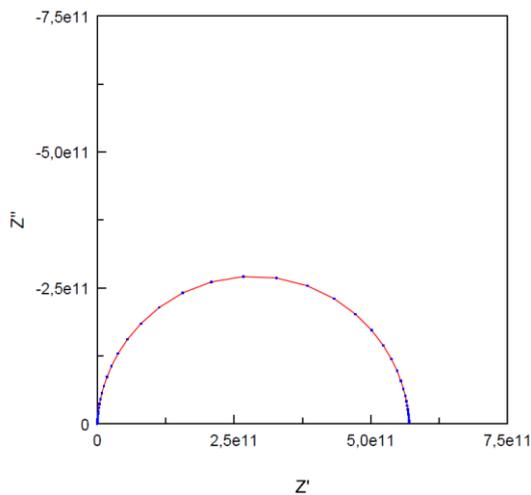


Figura 35 Curva equivalente para a adição de 3%.

Fonte: Autor (2025)

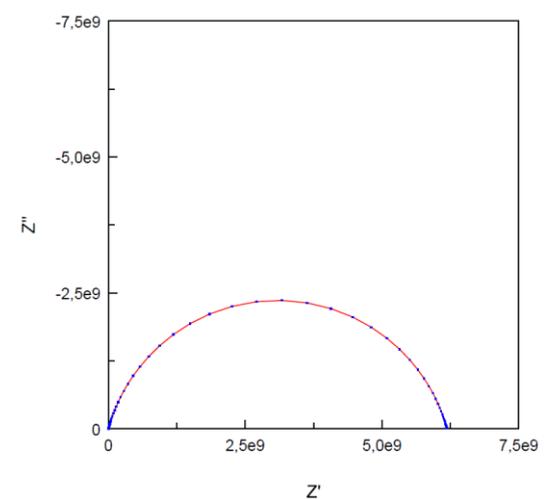


Figura 37 Curva equivalente para a adição de 10%.

Fonte: Autor (2025)

Os resultados indicaram uma tendência linear de redução da resistência da amostra com o aumento da concentração de grafite, refletindo um comportamento condutivo crescente. A exceção foi a amostra com 1% de grafite, que não apresentou redução significativa da resistência em relação à amostra base. Este resultado foi confirmado após repetição dos testes em diferentes corpos de prova, sugerindo que essa concentração não é efetiva para promover ganho na condução, possivelmente por limiar de percolação não atingido ou distribuição inadequada do aditivo.

Os resultados obtidos para os parâmetros R_s e R_p , assim como o diâmetro do arco gerado ($\Delta = R_p - R_s$), estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 9 Valores de R_s , R_p e diâmetro do arco para diferentes concentrações de grafite

Fonte: (Autor, 2025)

Base + Adição de grafite [%]	R_s [Ω]	R_p [Ω]	$\Delta = R_p - R_s$ [Ω]
0	3,524243E+05	1,083827E+12	1,083827E+12
0,5	4,824247E+05	8,114433E+11	8,114428E+11
1	4,794098E+05	1,113660E+12	1,113660E+12
3	5,935916E+05	5,699782E+11	5,699777E+11
5	5,273932E+05	2,495768E+11	2,495763E+11
10	6,182193E+05	6,187202E+09	6,186584E+09

4.3.1 CÁLCULO DA RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE

A resistividade elétrica (ρ) foi calculada com a fórmula:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L}$$

Onde:

-R é a resistência da amostra (Ω),

-A é a área da seção transversal do cilindro ($A = \pi \cdot r^2 \approx 7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$),

-L é a altura da amostra, de 0,005 m.

A condutividade elétrica (σ) foi obtida como o inverso da resistividade:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

A seguir, a tabela consolidada dos valores obtidos:

Tabela 10 Valores de resistência, resistividade e condutividade das amostras com diferentes concentrações de grafite.

Fonte: Autor (2025)

Base + Adição de grafite [%]	Resistência da amostra [Ω]	Resistividade [$\Omega \cdot \text{m}$]	Condutividade [S/m]
0	$1,083827 \times 10^{12}$	$1,701608 \times 10^{10}$	$5,876793 \times 10^{-11}$
0,5	$8,114428 \times 10^{11}$	$1,273965 \times 10^{10}$	$7,849508 \times 10^{-11}$
1	$1,113660 \times 10^{12}$	$1,748446 \times 10^{10}$	$5,719364 \times 10^{-11}$
3	$5,699777 \times 10^{11}$	$8,948650 \times 10^9$	$1,117487 \times 10^{-10}$
5	$2,495763 \times 10^{11}$	$3,918348 \times 10^9$	$2,552096 \times 10^{-10}$
10	$6,186584 \times 10^9$	$9,712937 \times 10^7$	$1,029555 \times 10^{-8}$

A amostra com 10 % de grafite apresentou resistividade de aproximadamente $9,71 \times 10^7 \Omega \cdot m$, valor que a retira da faixa de materiais isolantes, tipicamente caracterizados por resistividades superiores a $10^9 \Omega \cdot m$, e a posiciona na faixa de materiais dissipativos, que compreende resistividades entre 10^4 e $10^8 \Omega \cdot m$ (Narkis *et al.*, 1999). Essa classificação indica que o compósito passa a exibir comportamento adequado para aplicações de proteção eletrostática (ESD), blindagem eletromagnética parcial e controle de cargas superficiais, onde não se exige alta condutividade, mas é necessário evitar o acúmulo de cargas. Portanto, o material modificado com grafite torna-se funcionalmente aplicável em cenários industriais e eletrônicos que requerem controle eletrostático seguro e custo reduzido.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a maior condutividade alcançada foi de $1,03 \times 10^{-8} S/m$ (ou $1,03 \times 10^{-6} S/cm$) para a amostra com 10% em peso de grafite, o que representa uma melhora significativa em relação ao material base, embora ainda em patamar inferior quando comparado a compósitos altamente condutivos descritos na literatura. Por exemplo, Gonzalez *et al.* (2017) obtiveram $2,7 \times 10^{-4} S/cm$ com apenas 0,3% de MWCNT, e Mu *et al.* (2017) alcançaram $8,0 \times 10^{-6} S/cm$ com a mesma carga de nanotubos de carbono. Isso demonstra a superioridade dos nanotubos de carbono em termos de eficiência condutiva, mesmo em baixas concentrações. Por outro lado, estudos com partículas metálicas como os flocos de AgCu utilizados por Tsai *et al.* (2022) apresentaram condutividade extremamente elevada ($10^3 S/cm$) com 70% de carga, e Lee *et al.* (2006) obtiveram $4,0 \times 10^4 S/cm$ com 60% de pó de cobre, evidenciando que altas cargas metálicas são muito mais eficazes na condução elétrica, porém às custas de maior viscosidade e perda de processabilidade. Assim, o desempenho obtido com o uso de grafite em 10% é modesto frente a materiais mais nobres ou com maior teor de carga, mas se destaca por manter baixa carga, menor custo, e boa processabilidade, sendo promissor para aplicações dissipativas ou ESD, onde condutividade extrema não é essencial.

4.3.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE GRAFITE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Com o objetivo de validar estatisticamente os dados de condutividade elétrica obtidos para diferentes concentrações de grafite, foi realizada uma análise de regressão exponencial. Esta abordagem é particularmente útil quando se busca avaliar a existência de uma tendência funcional entre variáveis, mesmo em cenários onde não se dispõe de réplicas experimentais suficientes para a aplicação de testes como a ANOVA.

A regressão exponencial assume a forma:

$$\text{Condutividade} = 7,73 \times 10^{-12} \cdot e^{0,719 \cdot \text{Concentração}}$$

A equação foi ajustada com base nos valores médios de condutividade elétrica para cada concentração de grafite. O modelo obtido apresentou um coeficiente de determinação $R^2=0,9991$, o que indica que mais de 99,9% da variação nos dados pode ser explicada pela equação exponencial. Este resultado evidencia uma forte correlação positiva entre o aumento da concentração de grafite e a elevação da condutividade elétrica do compósito.

Visualmente, observa-se uma tendência exponencial crescente, com um salto mais acentuado a partir da concentração de 5%. Esse comportamento está alinhado com a teoria da transição percolativa, típica em sistemas poliméricos carregados com partículas condutivas. À medida que a concentração de grafite aumenta, formam-se caminhos contínuos de condução elétrica na matriz polimérica isolante, o que leva a uma elevação abrupta da condutividade.

Do ponto de vista estatístico, a análise de regressão aplicada neste contexto permite validar a hipótese de que a condutividade elétrica do material é significativamente afetada pela concentração de grafite. O valor extremamente alto de R^2 e a forma da curva obtida confirmam que a variação nos dados segue um padrão previsível e coerente com o comportamento físico esperado do sistema. Dessa forma, a análise oferece suporte matemático robusto às conclusões experimentais, mesmo na ausência de múltiplas réplicas por grupo.

A Figura a seguir apresenta o gráfico com o ajuste da regressão exponencial, destacando visualmente a tendência identificada:

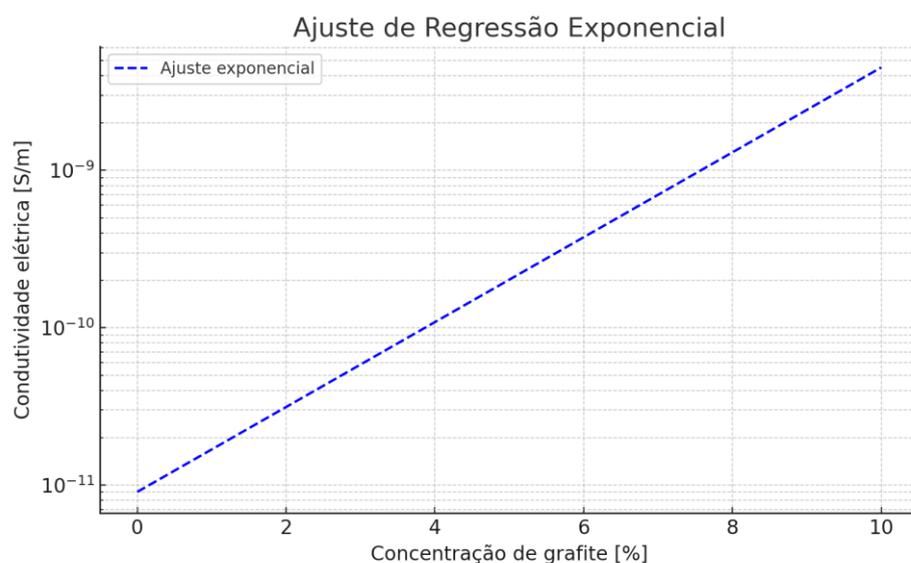


Figura 38 Ajuste exponencial entre a concentração de grafite e a condutividade elétrica

Fonte: Autor (2025)

4.3.3 VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR ANOVA

Como forma de complementar a análise de regressão exponencial apresentada anteriormente, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com o objetivo de verificar se as diferenças observadas na condutividade elétrica das amostras, em função da concentração de grafite, são estatisticamente significativas. Esse procedimento estatístico é amplamente utilizado em estudos experimentais para avaliar se as variações entre grupos podem ser atribuídas ao fator de interesse — neste caso, a concentração de grafite — ou se resultam de variações aleatórias.

A análise foi conduzida considerando os dados médios de condutividade elétrica obtidos para as concentrações de 0%, 0,5%, 1%, 3%, 5% e 10% de grafite. Como não foram realizadas réplicas experimentais, adotou-se uma abordagem exploratória baseada em simulações estatísticas: foram geradas três variações para cada grupo, com desvio de até 5% em torno do valor médio, representando pequenas flutuações que seriam esperadas em condições normais de medição. Essa estratégia foi utilizada apenas para estimar a significância estatística das tendências observadas e não substitui medições independentes reais.

Os resultados da ANOVA indicaram um valor-p de aproximadamente $1,89 \times 10^{21}$, o que confirma que as diferenças entre os grupos são altamente significativas do ponto de vista estatístico. Isso significa que é extremamente improvável que os aumentos observados na condutividade elétrica com o acréscimo de grafite tenham ocorrido por acaso.

Esse resultado reforça a interpretação obtida anteriormente com a regressão exponencial, na qual o coeficiente de determinação $R^2=0,9991$, já indicava uma tendência clara de aumento da condutividade elétrica com a concentração de grafite. Em especial, observa-se uma inflexão acentuada a partir da concentração de 3%, compatível com o fenômeno de percolação condutiva típico em materiais compósitos carregados com partículas condutoras.

A combinação da análise de regressão com a ANOVA confere maior robustez estatística ao estudo, sustentando que a modificação da resina com grafite impacta de forma sistemática e previsível as propriedades elétricas do material. Tais evidências reforçam a aplicabilidade da formulação proposta para usos funcionais em manufatura aditiva, em especial em aplicações onde controle de condutividade é desejável.

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração permitiu observar um padrão claro de enfraquecimento do compósito à medida que a porcentagem de grafite aumentava na resina fotocurável. A tabela a seguir apresenta os valores médios dos ensaios realizados em três amostras para cada porcentagem de grafite adicionada, e não houve pontos fora da curva nos resultados. Isso demonstra que, apesar das pequenas variações entre as amostras, o comportamento observado foi consistente. A partir da análise dos dados, ficou claro que a adicional de grafite causa uma redução linear nas propriedades mecânicas da resina, especialmente na máxima carga e tensão à tração, o que é indicativo do enfraquecimento progressivo do material.

Tabela 11 Dados coletados das amostras.

Fonte: Autor (2025)

Grafite [%]	Máximo Carga [N]	Tensão [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Deslocamento [%]	Deslocamento [mm]
0	292,8377	25,34785	443,8416	21,47362	3,40786
0,5	228,4841	23,42954	527,3222	11,85012	1,88061
1	190,7669	20,41928	508,4421	8,11656	1,2881
3	115,8461	12,55412	346,0599	5,77335	0,91623
5	58,70928	6,88911	216,0535	6,45918	1,02507

Para as amostras de 0% de grafite (a resina pura), a máxima carga registrada foi de 292,84 N, com uma tensão à tração de 25,35 MPa, e o módulo de Young foi de 443,84 MPa. Esses valores são indicativos de uma resina com excelente desempenho mecânico e estrutural, conforme esperado para resinas fotocuráveis com alta resistência e durabilidade do tipo ABS-Like (Golubovic *et al.*, 2023). Com o 0,5% de grafite, a máxima carga diminuiu para 228,48 N e a tensão à tração caiu para 23,43 MPa, o que já indica o impacto da adição do grafite, mas sem grandes alterações no comportamento mecânico da resina.

À medida que a porcentagem de grafite foi aumentada para 1%, observou-se uma redução adicional na máxima carga, que passou para 190,77 N, e na tensão à tração, que caiu para 20,42 MPa. O módulo de Young, apesar de se manter em torno de 508,44 MPa, começou a mostrar uma leve redução em relação à amostra base, o que é consistente com o enfraquecimento progressivo das propriedades mecânicas (Golubovic *et al.*, 2023). Este comportamento foi observado em todas as amostras, onde o aumento do grafite continuou a

diminuir as propriedades mecânicas, devido à natureza do grafite e sua interação com a resina, que gera pontos de fraqueza.

Ao chegar em 3% de grafite, a máxima carga caiu drasticamente para 115,85 N, e a tensão à tração para 12,55 MPa, evidenciando uma deterioração mais significativa nas propriedades mecânicas. O módulo de Young, por sua vez, caiu para 346,06 MPa, mostrando que o material se tornou menos rígido com o aumento da concentração de grafite. Além disso, o deslocamento à tração aumentou consideravelmente, sugerindo que a resina começou a apresentar maior deformação antes da ruptura. Esses resultados indicam que a introdução de mais grafite leva à perda de resistência à tração e rigidez, afetando diretamente a integridade do material sob esforço (Bilisik, K., & Akter, M, 2022).

Quando a percentagem de grafite chegou a 5%, o comportamento do compósito foi ainda mais comprometido. A máxima carga caiu para 58,71 N, e a tensão à tração foi reduzida para 6,89 MPa, refletindo uma grande perda de resistência. O módulo de Young foi de 216,05 MPa, o que é significativamente inferior ao valor obtido com a resina pura. Nesse ponto, o material também apresentou dificuldades em manter a geometria e consistência das amostras durante o processo de impressão. Esse aumento na fragilidade das amostras de grafite a partir de 5% foi um fator significativo que contribuiu para a dificuldade na fabricação dos corpos de prova. Como resultado, não foi possível fabricar corpos de prova com 10% de grafite, devido à falha recorrente no processo de impressão, o que sugere que a limitação de imprimibilidade da resina modificada com grafite pode ser de 5%.



Figura 39 Corpo de prova de resina ABS-Like com adição de 10% de Grafite com falha de impressão.

Autor (2025)

O comportamento das amostras pode ser atribuído não apenas ao efeito do grafite nas propriedades mecânicas, mas também à natureza do grafite. Como material frágil, o grafite não apenas influencia negativamente as propriedades mecânicas do compósito, mas também contribui para a fragilidade natural da resina, que é um polímero termofixo. Isso significa que, por mais que a resina ABS-Like tenha uma boa resistência, a adição de grafite torna o material mais propenso a falhas estruturais, especialmente em concentrações mais altas.

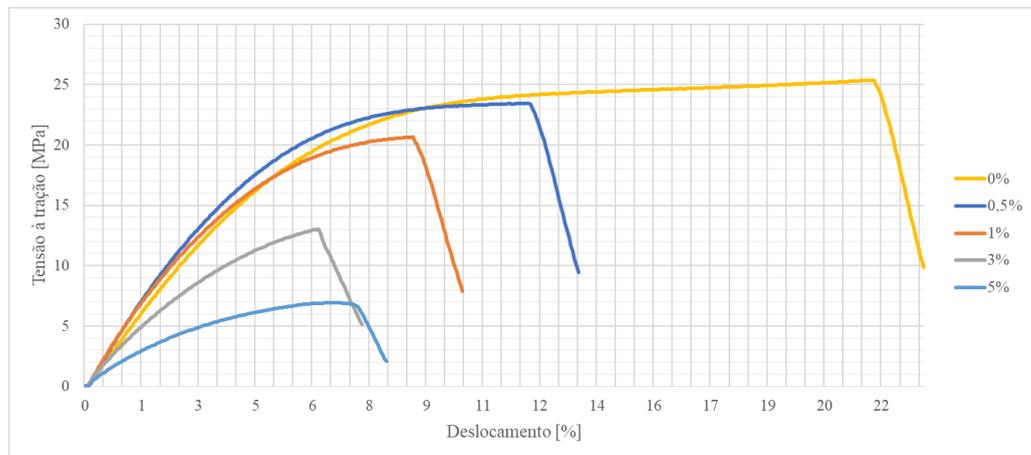


Figura 40 Gráfico de Engenharia do ensaio de tração das amostras.

Fonte: Autor (2025)

A análise de fratura foi verificada utilizando microscopia óptica (MO) em uma etapa posterior do trabalho, permitindo observar em detalhes das fraturas e identificar a distribuição das partículas de grafite, bem como a interação dessas partículas com a matriz da resina.

4.5 MICROSCÓPIO ÓPTICO (MO)

A análise por microscopia óptica foi realizada utilizando um estereoscópio digital com aumento de até 100 vezes, permitindo observar os detalhes a superfície e as camadas formadas nas amostras durante a impressão 3D via DLP. O foco inicial foi direcionado à amostra da resina pura, sem a adição de grafite, permitindo identificar imperfeições e avaliar a formação das camadas ao longo da peça.

Na amostra base (figura 41), foi possível verificar que a altura entre as camadas se manteve próxima ao valor estipulado no software de fatiamento, em torno de 55 micrômetros. No entanto, em algumas regiões, observou-se a presença de subcamadas com espessura aproximadamente pela metade desse valor. Essa diferença pode estar relacionada a pequenas

variações no processo de cura por luz UV, sugerindo que, mesmo em uma única exposição, o material pode estar formando camadas internas mais finas. Também foram identificados alguns vazios, ainda que em pequena quantidade, possivelmente decorrentes da presença de bolhas de ar durante a fotopolimerização, indicados no apêndice A.

À medida que se aumentou a concentração de grafite na resina, foi notada a alteração nas características das camadas formadas. Com a passagem entre as figuras 41 e 46, observou-se uma diminuição na espessura das camadas, indicando que o grafite influencia diretamente na altura final da peça, possivelmente por interferir na penetração da luz UV necessária para a cura completa da camada. Além disso, o aumento da carga revelou um crescimento no número de vazios e a presença de aglomerados de grafite em diversas regiões das amostras. Embora esses aglomerados estivessem presentes, a dispersão geral das partículas ao longo da resina ainda se mostrou satisfatória, com uma distribuição relativamente homogênea na maioria das áreas analisadas.

Outro ponto observado foi que, com o aumento da concentração de grafite, as subcamadas formadas durante a fotopolimerização tornaram-se mais visíveis, sugerindo que o aditivo também afeta a forma como a luz atua internamente na peça. As imagens obtidas durante a análise, que evidenciam os vazios, os aglomerados de grafite e a distribuição das camadas, podem ser consultadas no Apêndice A.

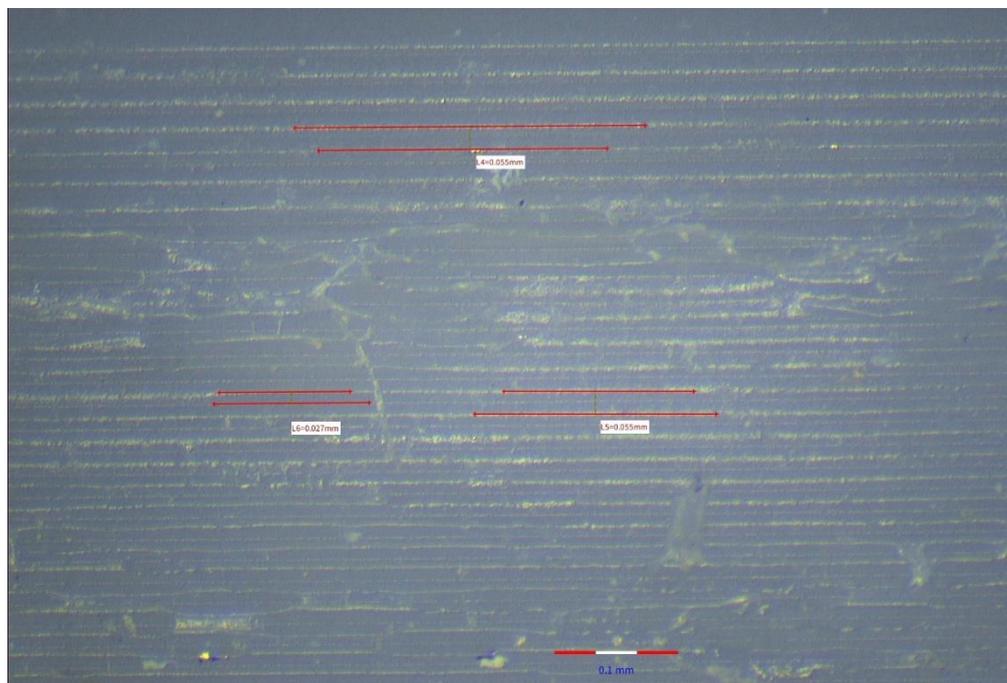


Figura 41 Microscopia óptica da amostra base.

Fonte: Autor (2025)

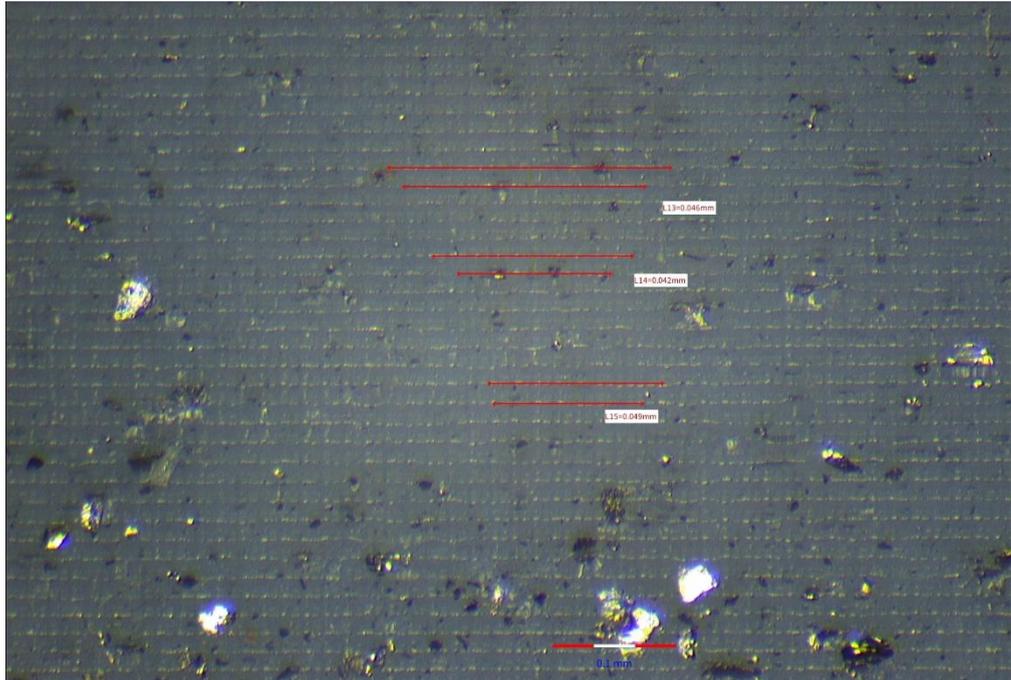


Figura 42 Microscopia óptica da amostra com 0,5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

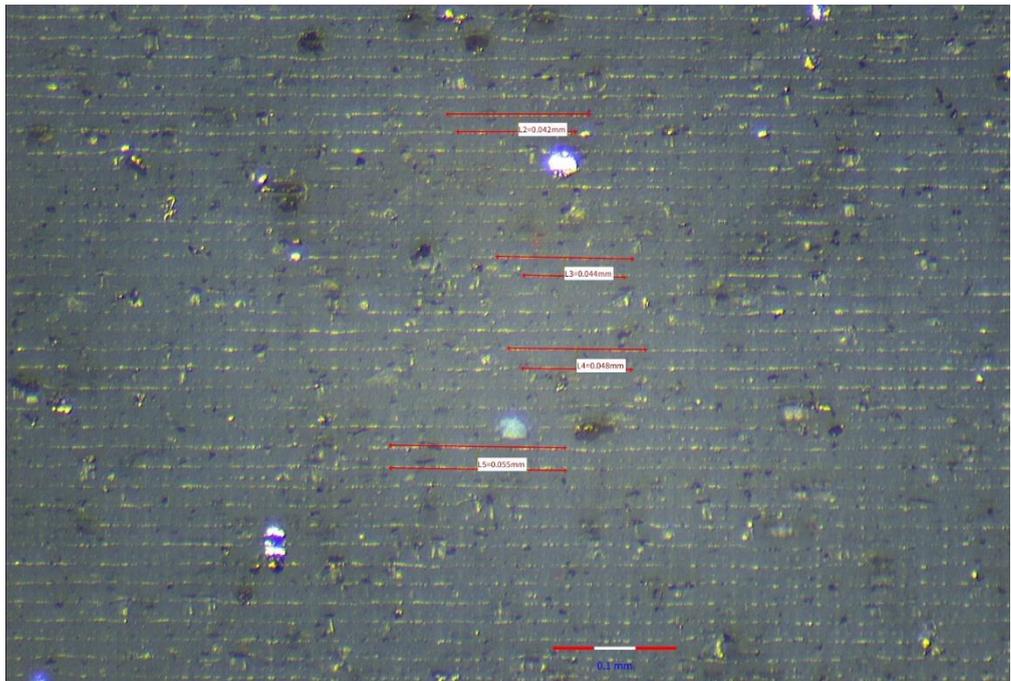


Figura 43 Microscopia óptica da amostra com 1% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

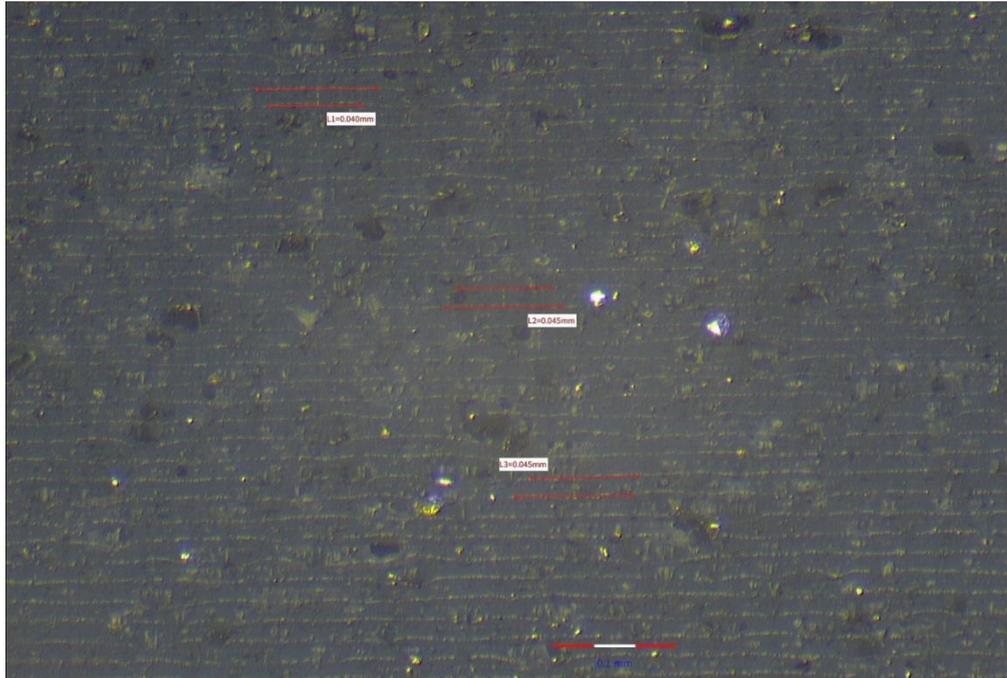


Figura 44 Microscopia óptica da amostra com 3% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

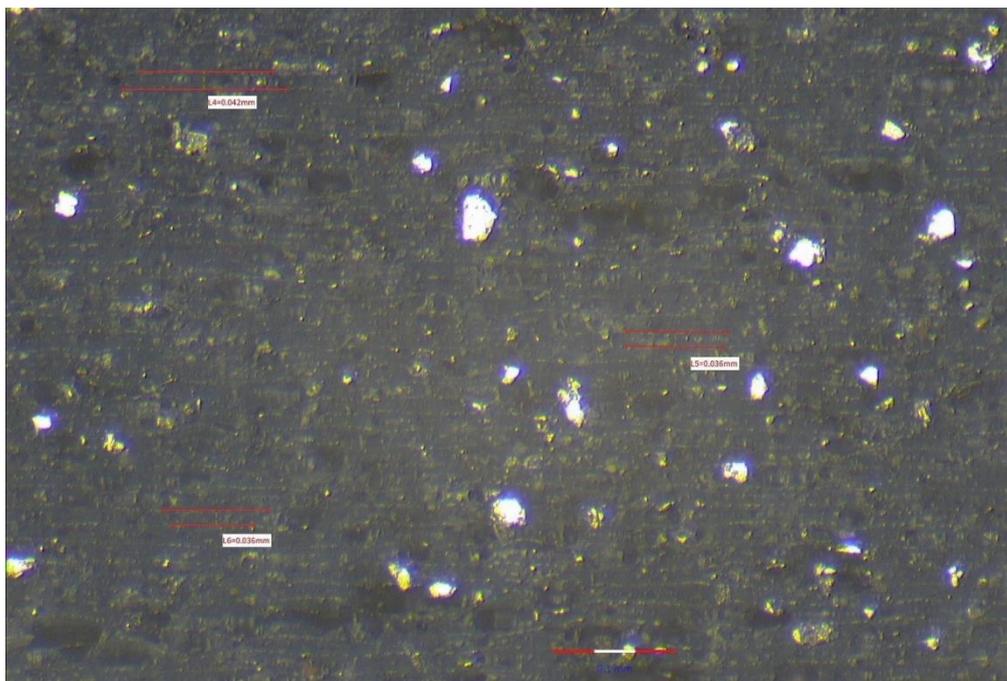


Figura 45 Microscopia óptica da amostra com 5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

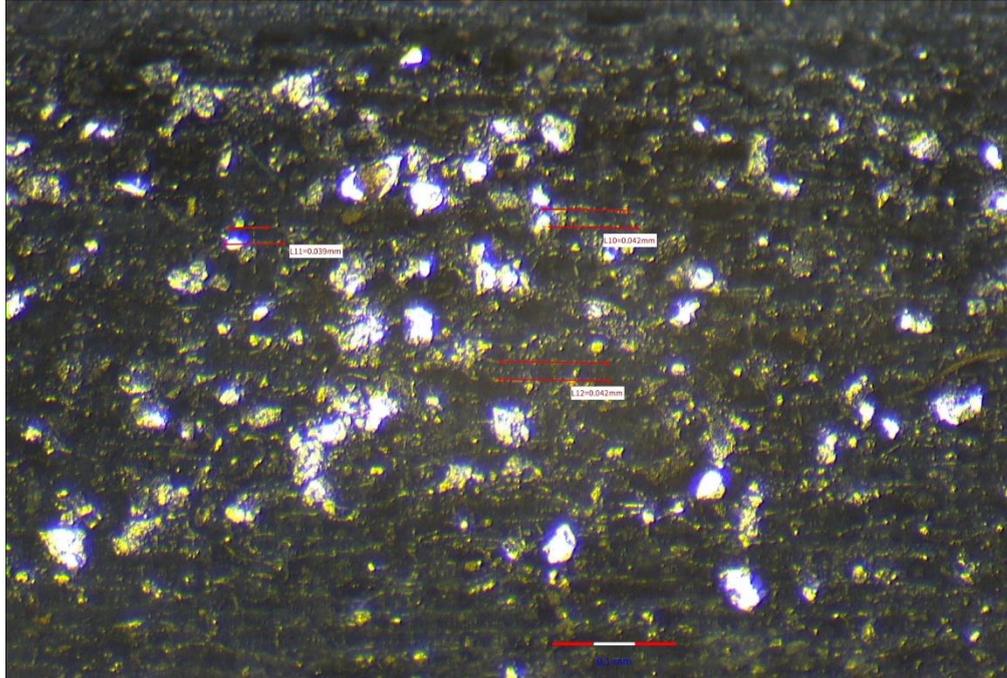


Figura 46 Microscopia óptica da amostra com 10% de grafite

Fonte: Autor (2025)

4.5.1 ANÁLISE DA FRATURA DAS AMOSTRAS

Durante o ensaio de tração dos corpos de prova produzidos com a resina base e suas versões com diferentes porcentagens de adição de grafite, foram observadas alterações significativas no padrão de fratura conforme a carga foi sendo adicionada. A análise das superfícies fraturadas, realizada por microscopia óptica, permitiu identificar mudanças na integridade estrutural da matriz polimérica e no modo de ruptura do material.

A amostra de resina pura (figura 47), sem qualquer adição de grafite, apresentou fratura típica de um polímero termofixo (Callister, 2016), com superfície relativamente plana e lisa, sem sinais de deformação plástica. A ruptura ocorreu de maneira abrupta e retilínea, com poucos defeitos visíveis e pouca variação na propagação da trinca, indicando uma boa coesão entre as camadas geradas no processo de impressão 3D.

Com a adição de 0,5% de grafite (figura 48), ainda se nota um comportamento majoritariamente frágil, mas já são visíveis pequenas alterações na superfície de fratura, como rugosidade moderada e presença de pontos escuros, possivelmente associados a aglomerados de partículas ou microvazios. Esse comportamento sugere que a inserção de grafite começou a interferir, mesmo que suavemente na estrutura da matriz.

A 1% de grafite, essa interferência se intensificou (figura 49). A fratura deixou de ser totalmente retilínea, e surgem pequenas variações no trajeto da ruptura, além de uma superfície um pouco mais irregular. Isso indica que a dispersão da carga pode não ter sido completamente homogênea, levando à formação de regiões com tensões concentradas e propagação de trincas por múltiplos caminhos.

Na amostra com 3% de grafite (figura 50), o padrão de ruptura muda de forma mais evidente. A fratura apresenta trajetórias curvas e mais abertas, e a superfície se mostrou mais rugosa e heterogênea. Esse comportamento evidenciou a atuação das partículas como pontos de nucleação de falha, comprometendo a continuidade da matriz. A trinca já não se propaga mais de contínua.

Por fim, com 5% de grafite (figura 51), o material demonstrou um nível ainda maior de fragilidade. A superfície fraturada é bastante áspera e irregular, com sinais de múltiplas fraturas internas. A presença excessiva de partículas claramente comprometeu a coesão do polímero, favorecendo falhas ainda mais frágeis, indicando perda significativa das propriedades mecânicas.

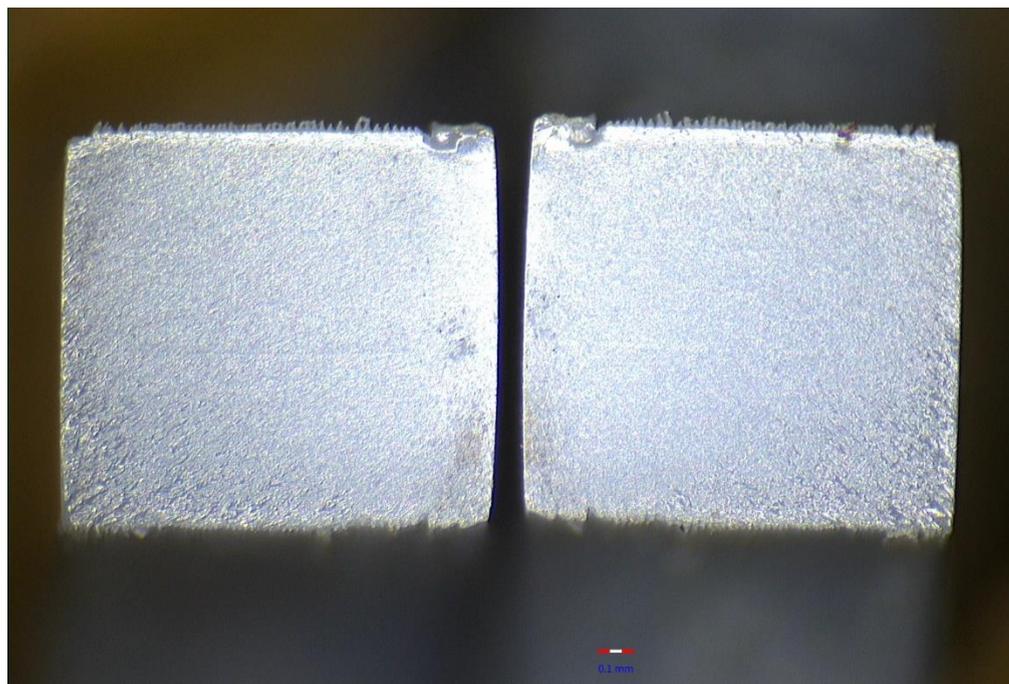


Figura 47 Avaliação da fratura da amostra base.

Fonte: Autor (2025)

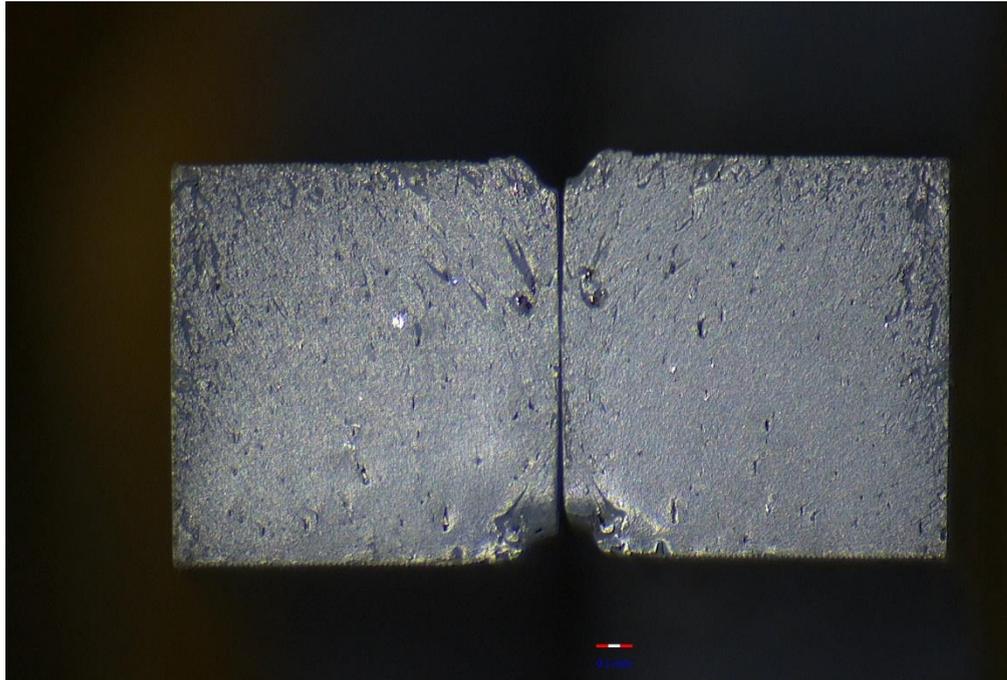


Figura 48 Avaliação da fratura da amostra com 0,5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

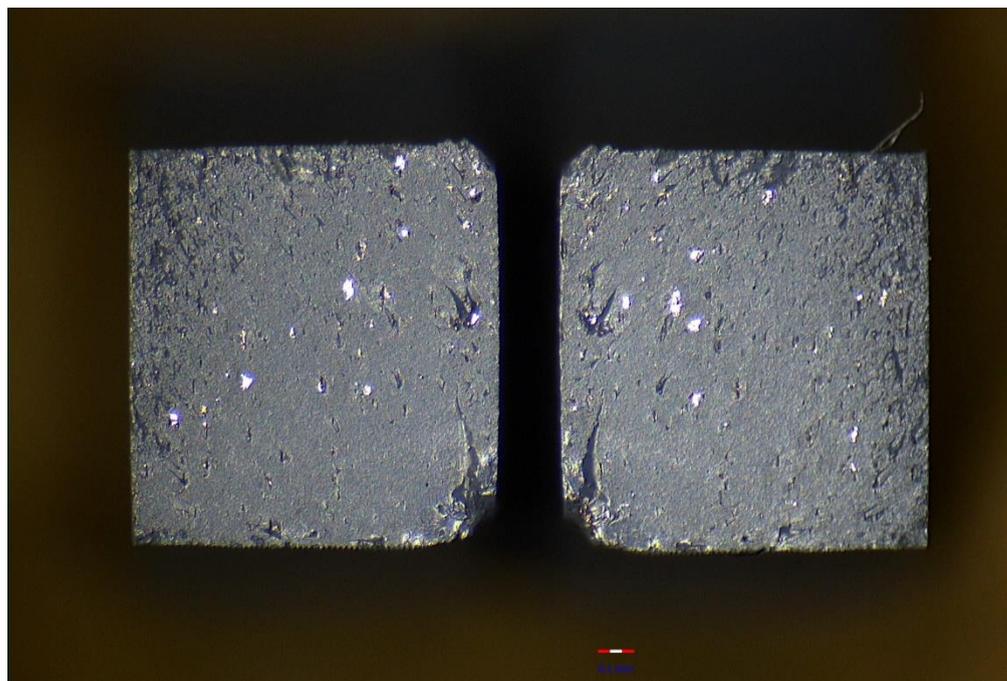


Figura 49 Avaliação da fratura da amostra com 1% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

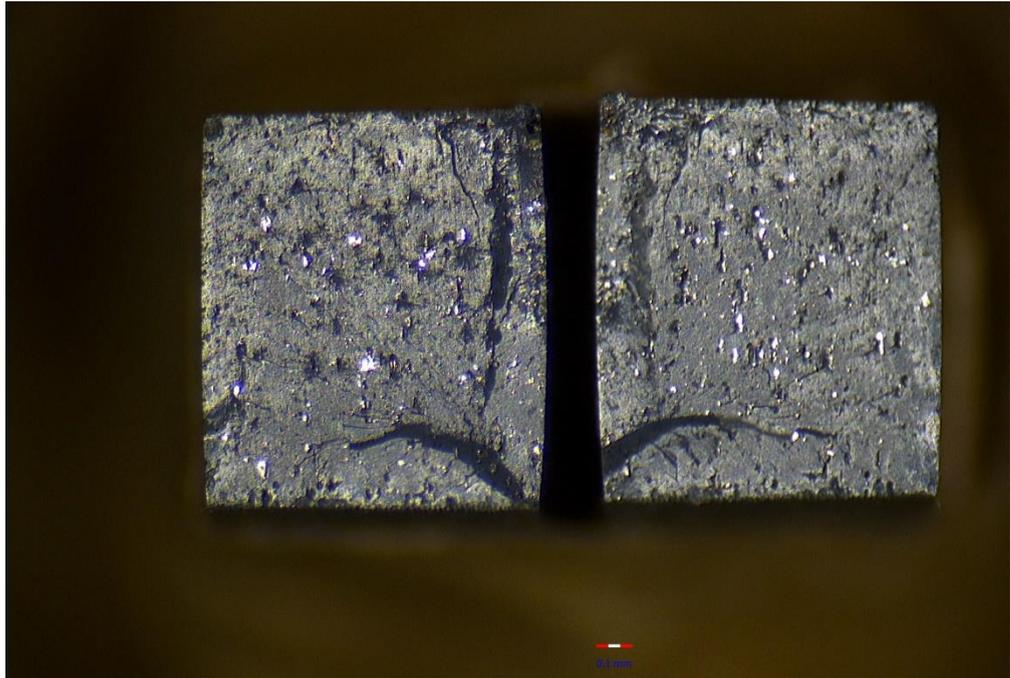


Figura 50 Avaliação da fratura da amostra com 3% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

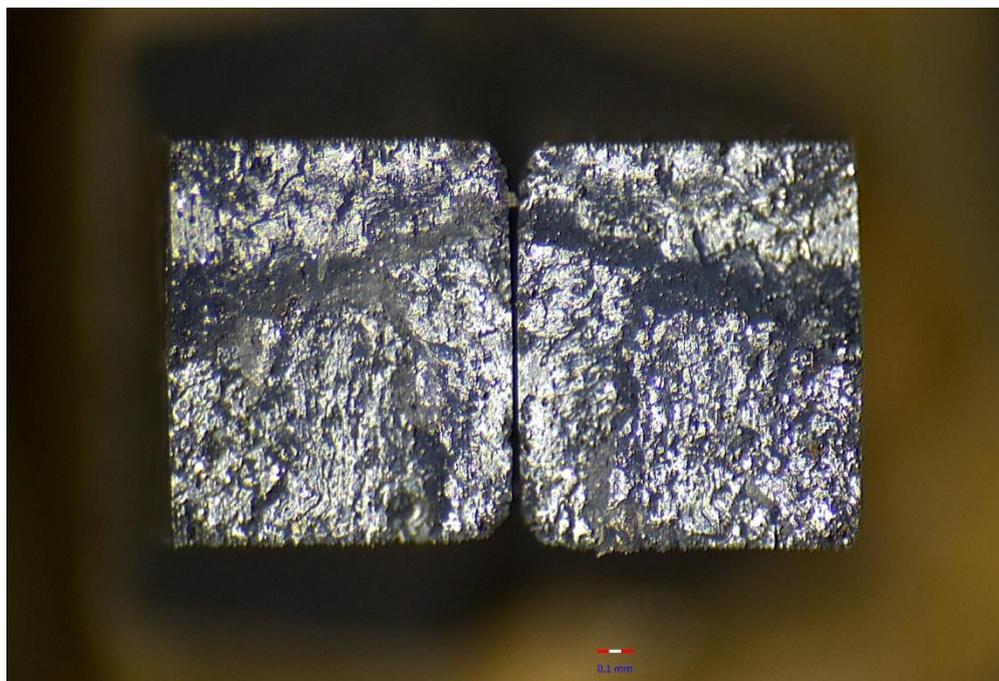


Figura 51 Avaliação da fratura da amostra com 5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

A amostra com 10% de grafite não pôde ser avaliada no ensaio de tração, uma vez que o corpo de prova não foi completamente formado, inviabilizando sua utilização no teste

mecânico. No entanto, foi realizada uma análise óptica da peça impressa com o objetivo de compreender os fatores que levaram à falha de fabricação. Observou-se um padrão evidente de descamamento entre camadas, indicando perda de adesão entre camadas. Esse comportamento pode estar relacionado tanto à alta concentração de grafite, que tende a dificultar a fotopolimerização uniforme da resina, quanto à redução na altura efetiva das camadas durante a impressão, conforme discutido na seção anterior. Esse fenômeno sugere que o aumento na carga do aditivo promoveu a formação de microvazios entre camadas sucessivas, o que comprometeu a coesão do material e impediu a correta "colagem" entre elas, resultando em uma estrutura incompleta e mecanicamente inviável.



Figura 52 Avaliação da adesão entre camadas da amostra com adição de 10% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

4.6 APLICAÇÕES POTENCIAIS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, que mostram um aumento significativo da condutividade elétrica e uma resistência mecânica mantida como moderada devido à adição de grafite em resina fotossensível ABS-Like, este capítulo discute as aplicações práticas do material desenvolvido. A modificação da resina com grafite abre novas possibilidades em várias

áreas, especialmente em manufatura aditiva. A seguir, são apresentadas algumas das principais aplicações em que esse material pode ser utilizado.

4.6.1 SENSORES IMPRESSOS

A adição de grafite à resina ABS-Like oferece um caminho promissor para a fabricação de sensores impressos. A condutividade elétrica proporcionada pelo grafite torna este material adequado para a criação de sensores de toque, pressão, proximidade ou deformação.

A principal vantagem dessa aplicação é que, ao ser impresso em 3D, o sensor pode ser incorporado diretamente em peças com geometrias complexas, sem a necessidade de montagem adicional. A resposta elétrica dos sensores se dá quando há estímulos mecânicos, como a pressão ou deformação, o que faz o grafite ser uma escolha interessante para dispositivos de interação ou monitoramento de condições.

Esses sensores podem ser aplicados em diversas áreas, como tecnologia vestível, dispositivos de controle de interação ou monitoramento ambiental, devido à flexibilidade de integrar os sensores diretamente nas peças, ajustando sua geometria conforme a necessidade do projeto. Esse tipo de sensor integrado pode ampliar as possibilidades de manufatura aditiva, que, além de peças estruturais ou estéticas, agora permite a produção de componentes multifuncionais, como sensores personalizados.

4.6.2 MATERIAIS DISSIPATIVOS DE CARGA ELETROSTÁTICA (ESD)

Outro uso relevante do material modificado com grafite é em materiais dissipativos de carga eletrostática (ESD). A adição de grafite à resina pode permitir que o material seja utilizado em bandejas, suportes, caixas e outros componentes destinados ao manuseio de circuitos eletrônicos sensíveis.

Em um ambiente industrial ou de produção de componentes eletrônicos, é essencial controlar o acúmulo de carga eletrostática que pode danificar circuitos e dispositivos. O grafite presente na resina pode permitir que o material tenha condutividade controlada, dissipando as cargas eletrostáticas de forma eficiente, o que é necessário para proteger os circuitos sensíveis ao manuseio.

Esse tipo de material poderá ser altamente útil para a criação de embalagens de proteção ESD, estruturas de manuseio e dispositivos de armazenamento e transporte de componentes

eletrônicos. Com isso, o material modificado com grafite demonstra seu potencial não apenas para peças estruturais, mas também como soluções funcionais e protetoras para componentes eletrônicos sensíveis.

4.6.3 BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA LEVE

Outro uso interessante para o material modificado com grafite é na fabricação de componentes funcionais para protótipos, especialmente em aplicações onde se deseja condutividade elétrica leve ou resposta térmica, sem exigir alta rigidez mecânica. Exemplos típicos incluem conectores de baixa tensão, interfaces de toque e elementos de aquecimento resistivo com controle externo.

A capacidade de ajustar a condutividade elétrica do material com diferentes concentrações de grafite o torna ideal para protótipos rápidos, especialmente quando as propriedades elétricas precisam ser modificadas de forma controlada. Esses componentes podem ser aplicados em uma variedade de dispositivos de baixo custo, como elementos de aquecimento em protótipos de eletrônicos e conectores simples.

No entanto, este material não é recomendado para componentes de alta carga mecânica ou circuitos de alta precisão elétrica, pois a resistência mecânica diminui com o aumento da concentração de grafite e a condutividade elétrica ainda não é suficientemente estável para aplicações de alta precisão.

5. CONCLUSÃO

A caracterização estrutural e funcional dos materiais demonstrou que a adição de grafite na resina ABS-Like fotocurável impacta suas propriedades elétricas, mecânicas e morfológicas. A análise por DRX confirmou a presença de grafite sintético, espaçamento interplanar ampliado (3,519 Å) e cristalitos com tamanho médio de 381,8 nm. A MEV revelou morfologia homogênea para a resina pura e partículas lamelares com aglomerações no grafite. A pureza do aditivo foi confirmada via EDS (100% C), enquanto a resina apresentou composição rica em C e O, coerente com sua natureza polimérica. A análise por FTIR foi empregada para confirmar a interação do compósito, não detectando novos picos significativos, o que indica que o grafite não alterou a estrutura química da resina, mas influenciou suas propriedades físicas.

Nos testes elétricos, verificou-se um aumento progressivo da condutividade com a adição de grafite, com resposta mais marcada a partir de 3%. A amostra com 10% não foi testada mecanicamente devido a falhas na impressão, mas sua análise óptica revelou delaminação entre camadas, possivelmente causada pela interferência do grafite no processo de cura UV e pela diminuição da espessura das camadas proporcional ao aumento de grafite na mistura. Nos ensaios mecânicos, foi observada uma redução linear na resistência à tração com o aumento do teor de grafite, indicando que a carga impacta diretamente na integridade estrutural do material. A microscopia óptica revelou falhas interlaminares e vazios inclusive na resina base, sugerindo que o próprio processo DLP contribuiu para a fragilidade das peças.

Adicionalmente, observou-se que, conforme a concentração de grafite aumentava, a distribuição das partículas tornava-se menos homogênea, com formação de aglomerados em regiões da matriz. Esses aglomerados dificultam a dispersão uniforme da carga condutiva, impactando tanto a resistência mecânica quanto a sua resposta elétrica. A estabilidade do processo de impressão foi comprometida em concentrações elevadas, resultando em falhas na formação das camadas. No entanto, formulações com 5% mantiveram boa imprimibilidade, com desempenho satisfatório entre condutividade elétrica e estabilidade mecânica.

Com o controle adequado da mistura e dispersão das partículas, é possível adaptar esse compósito a diferentes campos de aplicação elétrica, como sensores impressos, materiais dissipativos de carga eletrostática (ESD) e blindagem eletromagnética leve. Além disso, ao controlar a dispersão das partículas, a natureza isolante da resina pode ser modificada, inserindo-a na categoria de materiais dissipativos funcionais. Esse avanço abre novos caminhos para o uso da impressão 3D em dispositivos multifuncionais, com aplicações em sensores de toque, dispositivos de monitoramento de condições e peças protetivas para circuitos sensíveis.

6. PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES

1º Ano - 2023												
Atividades	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
1. Cursar as disciplinas												
2. Pesquisa e aprendizado sobre o tema												
3. Aprendizado no uso dos equipamentos												
2º Ano - 2024												
-	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
4. Testes preliminares e validações Iniciais												
5. Preparar mistura de ABS-Like e particulado												
6. Produzir corpos de prova												
7. Intervenção médica												
8. Ensaio de condutividade elétrica												
1º Ano - 2023												
Atividades	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º	12º
8. Ensaio de condutividade elétrica												
9. Ensaio mecânicos												
10. Realizar ensaios de caracterização dos compósitos												
11. Elaboração do relatório final												
12. Elaboração de artigos científicos												

Figura 53 Planejamento de atividades.

Fonte: Autor (2025)

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKTITIZ, Í. *et al.* In-situ synthesis of 3D printable mono- and Bi-metallic (Cu/Ag) nanoparticles embedded polymeric structures with enhanced electromechanical properties. *Polymer Testing*, v. 90, p. 106724, out. 2020.

AMANCIO-FILHO, S. T.; DOS SANTOS, J. F. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends. *Polymer Engineering & Science*, v. 49, n. 8, p. 1461–1476, ago. 2009.

ANDRIAMBELOSON, J. A.; WIID, P. G. A 3D-printed PLA plastic conical antenna with conductive-paint coating for RFI measurements on MeerKAT site. 2015 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), p. 945-948, 7 set. 2015.

ANGEL, K. *et al.* Selective electroplating of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*, v. 20, p. 164–172, mar. 2018.

AZIM, S. S. *et al.* Studies on graphite based conductive paint coatings. *Progress in Organic Coatings*, v. 55, n. 1, p. 1–4, jan. 2006.

BADER, M. G. Polymer composites in 2000: structure, performance, cost and compromise. *Journal of Microscopy*, 1 fev. 2001.

BAGHERI SAED, A. *et al.* Functionalized poly l-lactic acid synthesis and optimization of process parameters for 3D printing of porous scaffolds via digital light processing (DLP) method. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 56, p. 550–561, ago. 2020.

BAUGHMAN, R. H. Carbon Nanotubes--the Route Toward Applications. *Science*, v. 297, n. 5582, p. 787–792, 2 ago. 2002.

BELOBORODOV, I. S. *et al.* Granular electronic systems. *Reviews of Modern Physics*, v. 79, n. 2, p. 469–518, 2 abr. 2007.

BILISIK, K., & AKTER, M. Polymer nanocomposites based on graphite nanoplatelets (GNPs): a review on thermal-electrical conductivity, mechanical and barrier properties. *Journal of Materials Science*, 57, pp. 7425 – 7480, 9 abr. 2022.

BODANI, J.; PANCHAL, U.; MODI, PROF. M. Research Paper Fabrication of 3D Printer. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, v. 10, n. 4, p. 1156–1159, 30 abr. 2022.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. Tradução: Sergio M. S. Soares. 9.ed Rio de Janeiro: GEN, 2016. 466-529 p.

CHANDRASEKAR MUTHUKUMAR *et al.* Role of characterization techniques in evaluating the material properties of nanoparticle-based polymer materials. Elsevier eBooks, p. 21–39, 1 jan. 2020.

FALAHATI, M., AHMADVAND, P., SAFAEE, S., CHANG, Y.-C., LYU, Z., CHEN, R., LI, L., & LIN, Y. Smart polymers and nanocomposites for 3D and 4D printing. *Materials Today*, v. 40, p. 215–245, nov. 2020.

FALCON, É.; CASTAING, B. Electrical conductivity in granular media and Branly's coherer: A simple experiment. *American Journal of Physics*, v. 73, n. 4, p. 302–307, 14 mar. 2005.

FANTINO, E. *et al.* 3D Printing of Conductive Complex Structures with In Situ Generation of Silver Nanoparticles. *Advanced Materials*, v. 28, n. 19, p. 3712–3717, maio 2016.

FORMLABS. Strength from Metal Strategies and Use Cases for Electroplating SLA Parts. White Paper, set. 2021. Disponível em: <<https://formlabs.com>> Acesso em: 15 out. 2023.

GOLUBOVIC, Z., DANILOV, I., BOJOVIĆ, B., PETROV, L., SEDMAK, A., MIŠKOVIĆ, Ž., & MITROVIĆ, N. A Comprehensive Mechanical Examination of ABS and ABS-like Polymers Additively Manufactured by Material Extrusion and Vat Photopolymerization Processes. *Polymers*, v. 15, p. 4197, 24 out. 2023.

GONZALEZ, G. *et al.* Development of 3D printable formulations containing CNT with enhanced electrical properties. *Polymer*, v. 109, p. 246–253, jan. 2017.

HANON, M.; M. KOVÁCS; LÁSZLÓ ZSIDAI. Tribological Behaviour Comparison of ABS Polymer Manufactured Using Turning and 3D Printing. *International journal of engineering and management sciences*, v. 4, n. 1, p. 46–57, 3 mar. 2019.

HORBAN, M. A. *et al.* Produção de poli (ácido láctico) a partir do soro do leite. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 3, n. 8, p. 1136–1150, 20 set. 2017.

HOVSEPYAN, R. K.; POGOSYAN, A. P.; ELBAKYAN, E. E. Conductivity of granular structures based on wide band gap ZnO semiconductors. *Journal of contemporary physics*, v. 50, n. 1, p. 64–71, 1 jan. 2015.

HUANG, S., KONG, X., XIONG, Y., ZHANG, X., CHEN, H., JIANG, W., NIU, Y., XU, W., & REN, C. An overview of dynamic covalent bonds in polymer material and their applications. *European Polymer Journal*, v. 141, p. 110094, dez. 2020.

ISLAM, A.; HANSEN, H. N.; TANG, P. T. Direct electroplating of plastic for advanced electrical applications. *CIRP Annals*, v. 66, n. 1, p. 209–212, jun. 2017.

JAIN, S. *et al.* Synthesis and size control of copper nanoparticles and their catalytic application. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 25, n. 12, p. 3995–4000, 1 dez. 2015.

JO, Y. *et al.* 3D-printable, highly conductive hybrid composites employing chemically-reinforced, complex dimensional fillers and thermoplastic triblock copolymers. *Nanoscale*, v. 9, n. 16, p. 5072–5084, 23 jan. 2017.

JOSHI, A.; JONATHAN KENNETH GOH; GOH, J. Polymer-based conductive composites for 3D and 4D printing of electrical circuits. *Elsevier eBooks*, p. 45–83, 1 jan. 2020.

KALSOOM, U.; N. NESTERENKO, P.; PAULL, B. Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Advances*, v. 6, n. 65, p. 60355–60371, 15 jun. 2016.

KOZHEVIN, V. M. *et al.* Effect of oxidation on the electrical properties of granular copper nanostructures. *Physics of the solid state*, 1 out. 2003.

KULKARNI, M.; ELANGO VAN, K.; REDDY, K. Development of electroplating process for plating polyamides. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 48, n. 3, p. 205–212, 15 dez. 2013.

KWOK, S. W. *et al.* Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. *Applied Materials Today*, v. 9, p. 167–175, dez. 2017.

LAMARTI *et al.* Analysis of Polymer Behavior (ABS) Under Mechanical Solicitation Based on Statistical Models. *The International journal of engineering and science*, v. 06, n. 07, p. 37–40, 1 jul. 2017.

LAZARUS, N. *et al.* Selective Electroplating for 3D-Printed Electronics. *Advanced Materials Technologies*, v. 4, n. 8, p. 1900126, 20 maio 2019.

LEE, J. W.; LEE, I. H.; CHO, D.-W. Development of micro-stereolithography technology using metal powder. *Microelectronic Engineering*, v. 83, n. 4-9, p. 1253–1256, abr. 2006.

LU, L. Ultrahigh Strength and High Electrical Conductivity in Copper. *Science*, v. 304, n. 5669, p. 422–426, 16 abr. 2004.

MARINO, J. Estudo da eletrodeposição da liga Zn/Co sobre aço carbono e sua resistência à corrosão. 8 jul. 2019.

MEIRE NORIKO HOSOKAWA *et al.* Compósitos de acrilonitrila-butadienoestireno (ABS) reciclado com fibras vegetais visando economia circular. p. 8–23, 31 maio 2021.

MU, Q. *et al.* Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing*, v. 18, p. 74–83, dez. 2017.

NARKIS, M., LIDOR, G., VAXMAN, A., & ZURI, L. New injection moldable electrostatic dissipative (ESD) composites based on very low carbon black loadings. *Journal of Electrostatics*, v. 47, p. 201-214, 1999.

OLIVERA, S. *et al.* Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of Materials Science*, v. 51, n. 8, p. 3657–3674, 4 jan. 2016.

PAIVA, T; NOGUEIRA, C. Estudo comparativo das principais tecnologias de impressão 3D no Brasil. *JNT-Facit Business And Technology Journal*, v. 1, n. 24, p. 193-212, mar. 2021.

QIU, TIAN & YANG, JIAN-GUO & BAI, XUE-JIE & WANG, YU-LING. The preparation of synthetic graphite materials with hierarchical pores from lignite by one-step impregnation and their characterization as dye absorbents. *RSC Advances*. v. 9, p. 12737-12746, 2019.

RAJ, S. A.; MUTHUKUMARAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 5, p. 11219–11226, 2018.

RAVVE. *Naturally Occurring Polymers*. p. 537–565, 1 jan. 2012.

SHI, S. *et al.* Preparation and 3D-printing of highly conductive polylactic acid/carbon nanotube nanocomposites via local enrichment strategy. *RSC Advances*, v. 9, n. 51, p. 29980–29986, 1 jan. 2019.

TSAI, S.-C. *et al.* Photo curable resin for 3D printed conductive structures. *Additive Manufacturing*, v. 51, p. 102590, 1 mar. 2022.

TUL AIN, QURA & HAQ, SAMINA & ALSHAMMARI, ABEER & AL-MUTLAQ, MOUDHI & ANJUM, MUHAMMAD. The systemic effect of PEG-nGO-induced oxidative stress in vivo in a rodent model. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. v. 10, p. 901-911, 2019.

WANG, X. *et al.* Initiator-Integrated 3D Printing Enables the Formation of Complex Metallic Architectures. v. 6, n. 4, p. 2583–2587, 16 dez. 2013.

WEI, Z., DUAN, H., WENG, G., & HE, J. Metals in polymers: hybridization enables new functions. *Journal of Materials Chemistry C*, v. 8, p. 15956-15980, 06 out. 2020.

WINEY, K. I.; KASHIWAGI, T.; MU, M. Improving Electrical Conductivity and Thermal Properties of Polymers by the Addition of Carbon Nanotubes as Fillers. *MRS Bulletin*, v. 32, n. 4, p. 348–353, abr. 2007.

ZHANG, Y. *et al.* Radical photoinitiation with LEDs and applications in the 3D printing of composites. *Chemical Society Reviews*, v. 50, n. 6, p. 3824–3841, 29 mar. 2021.

ZHAO, Z.; TIAN, X.; SONG, X. Engineering materials with light: recent progress in digital light processing based 3D printing. *Journal of Materials Chemistry C*, v. 8, n. 40, p. 13896–13917, 2020.

JANG, S.; CHO, S. The Effects of Polyaniline Nanofibers and Graphene Flakes on the Electrical Properties and Mechanical Properties of ABS-like Resin Composites Obtained by DLP 3D Printing. *Polymers* 2023, v. 15, n. 14, p. 3079, 18 jul. 2023.

8. APÊNDICE A

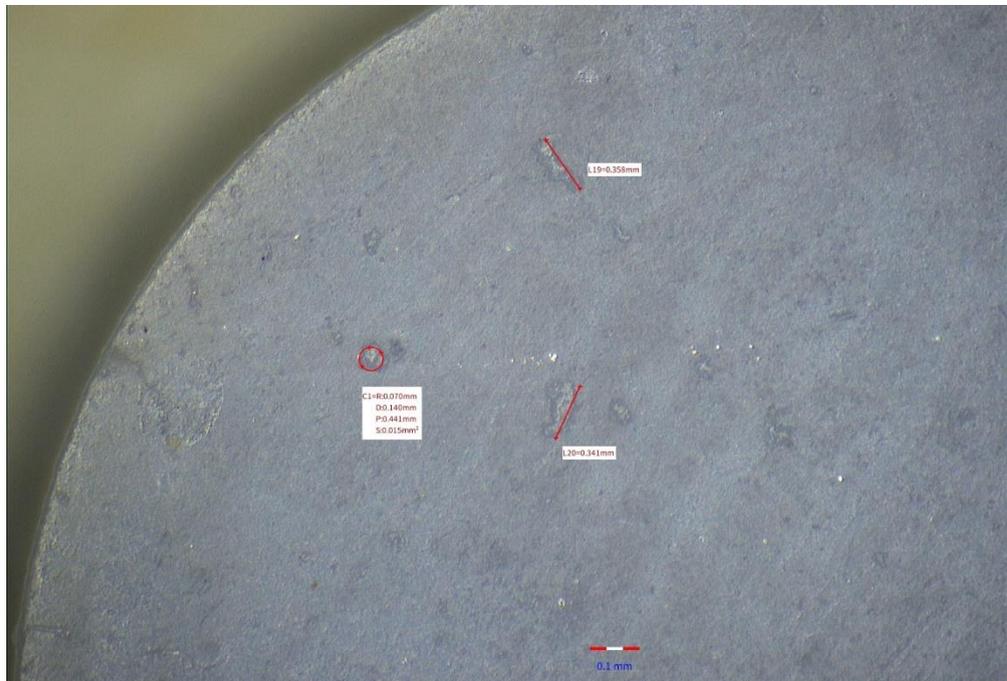


Figura A 1 Detalhes superiores da amostra base.

Fonte: Autor (2025)

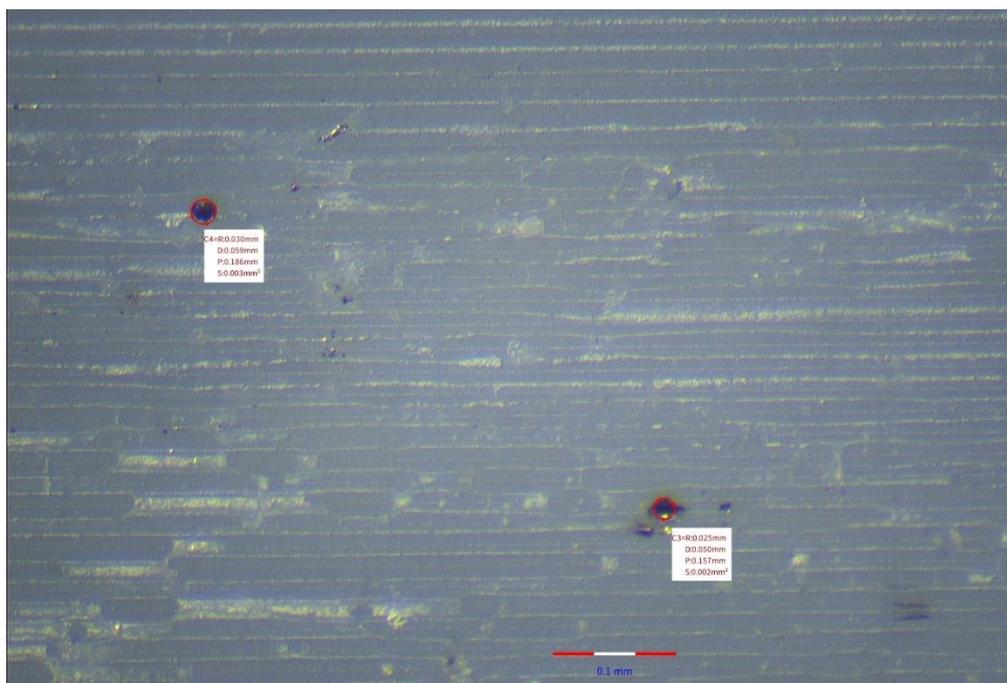


Figura A 2 Detalhes laterais da amostra base.

Fonte: Autor (2025)

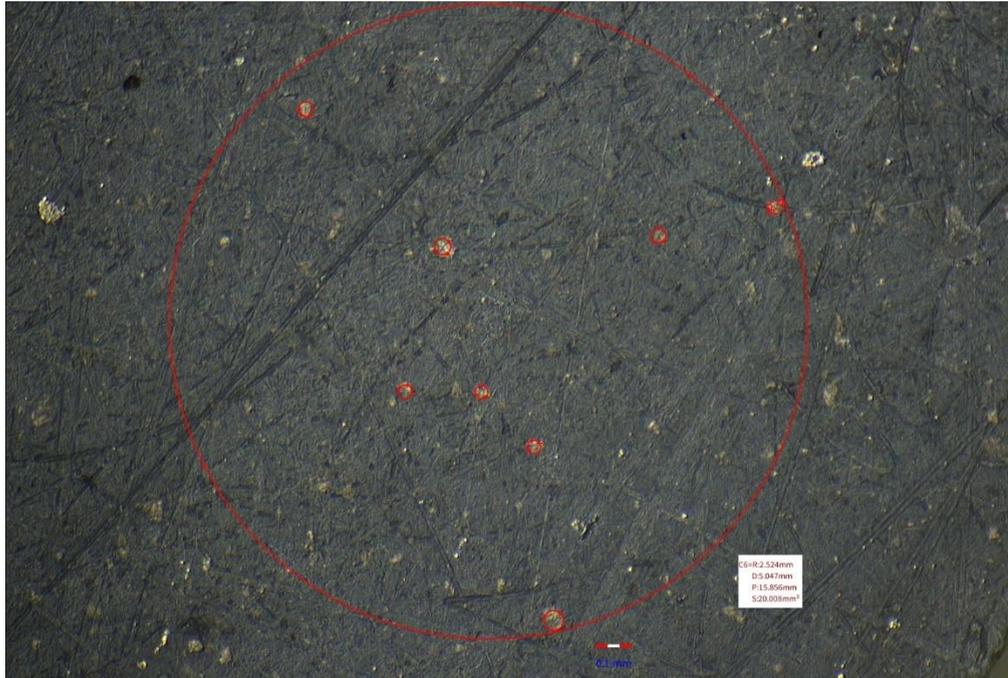


Figura A 3 Detalhes superiores da amostra com 0,5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

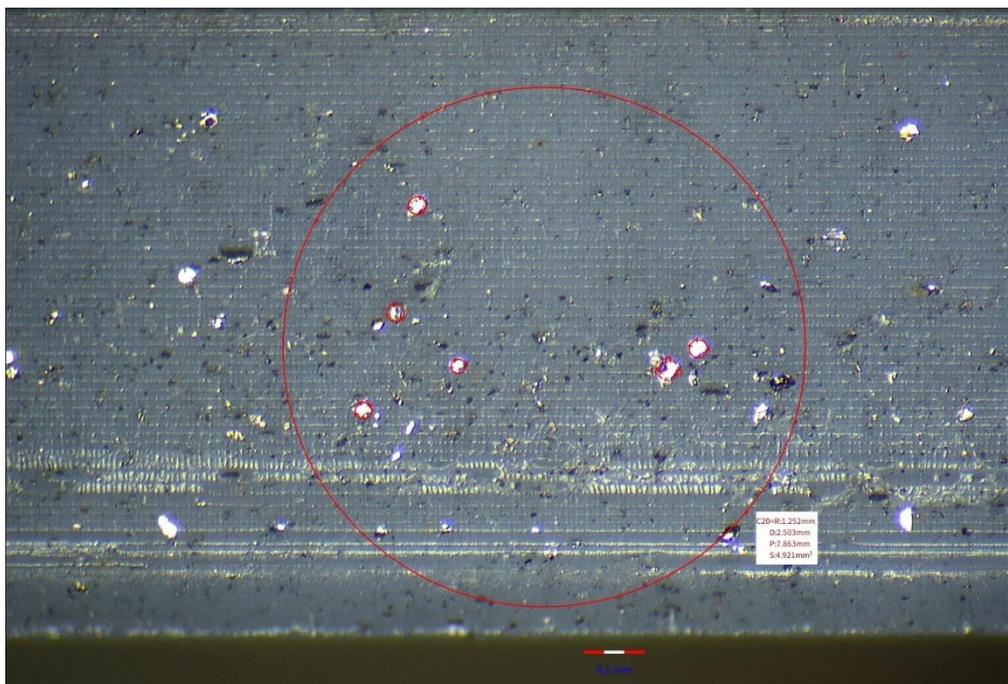


Figura A 4 Detalhes laterais da amostra com 0,5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

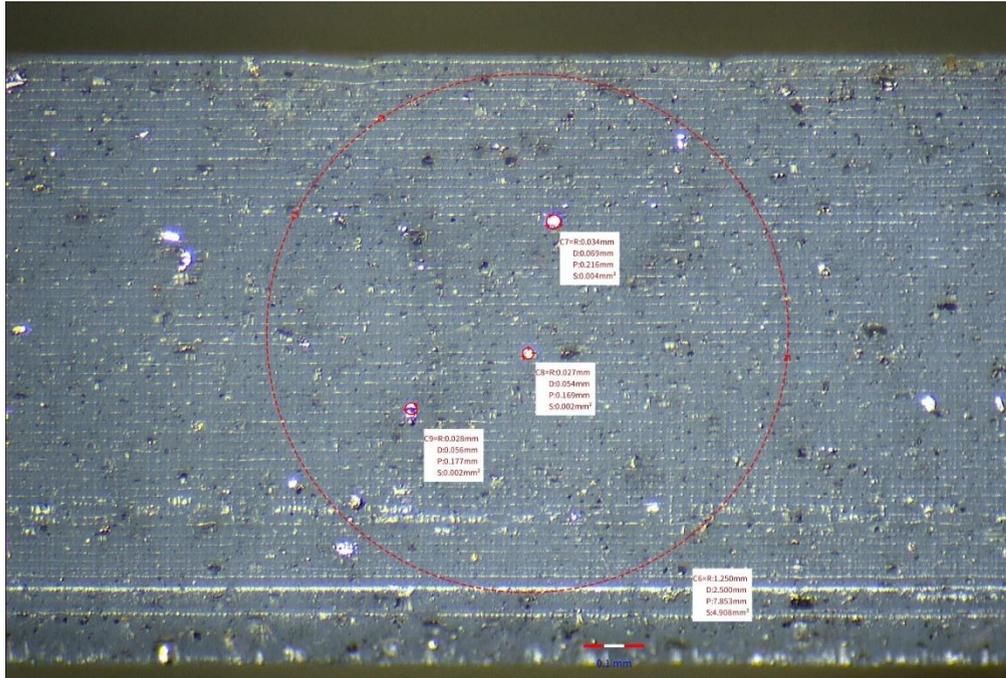


Figura A 5 Detalhes superiores da amostra com 1% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

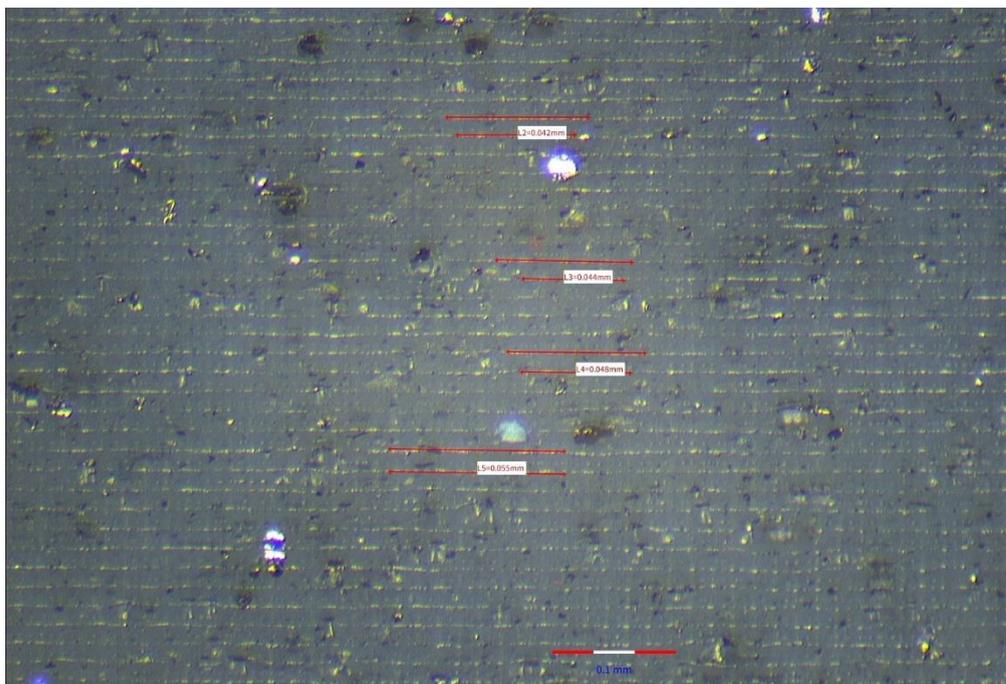


Figura A 6 Detalhes laterais da amostra com 1% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

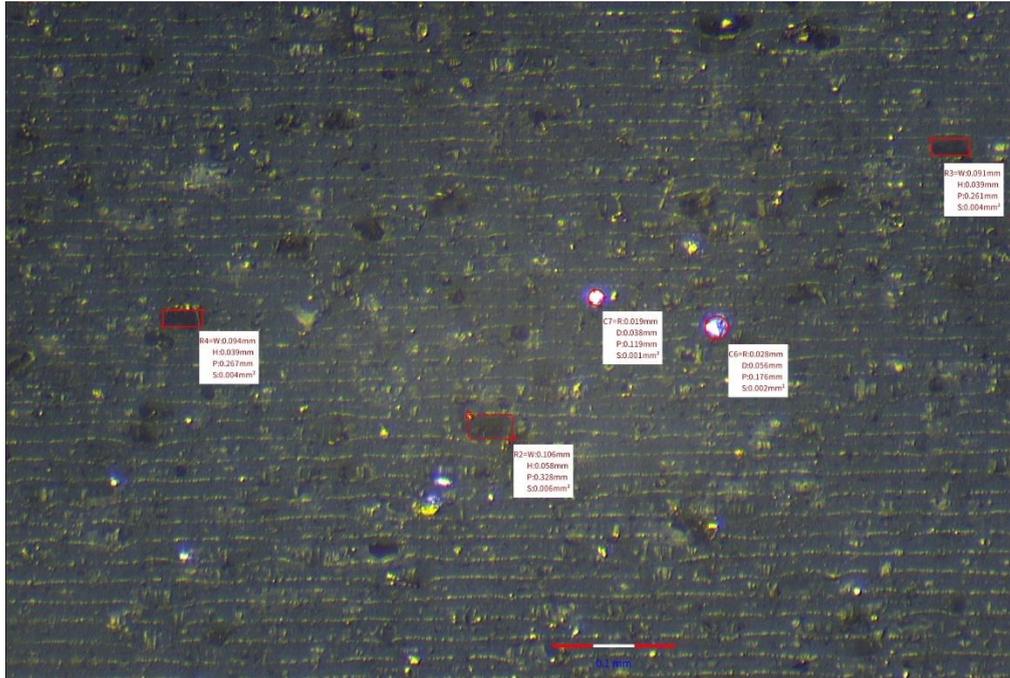


Figura A 7 Detalhes superiores da amostra com 3% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

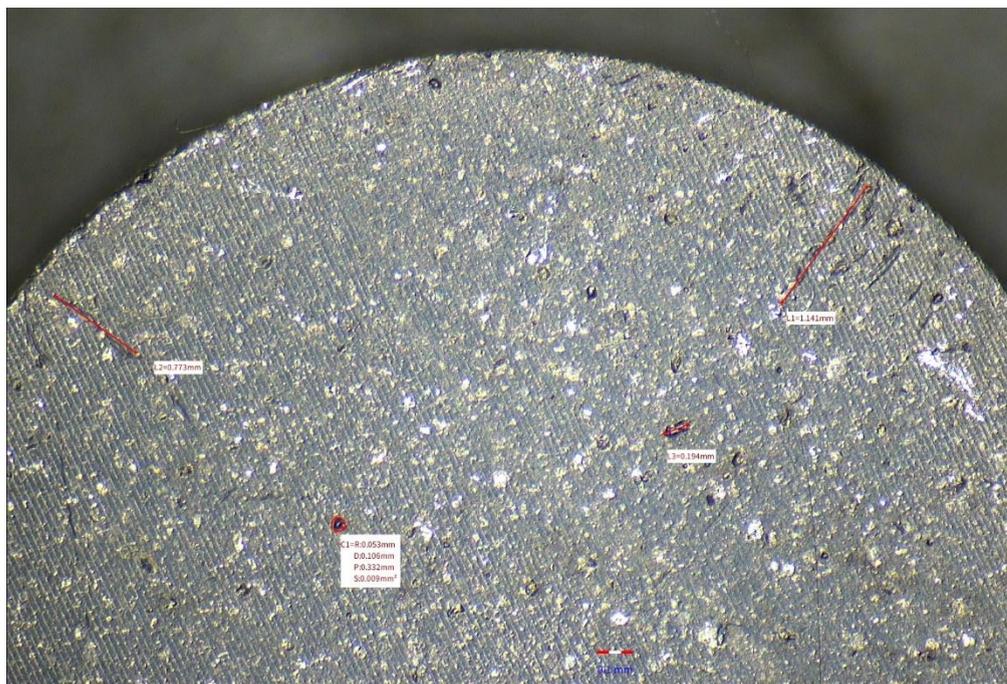


Figura A 8 Detalhes laterais da amostra com 3% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

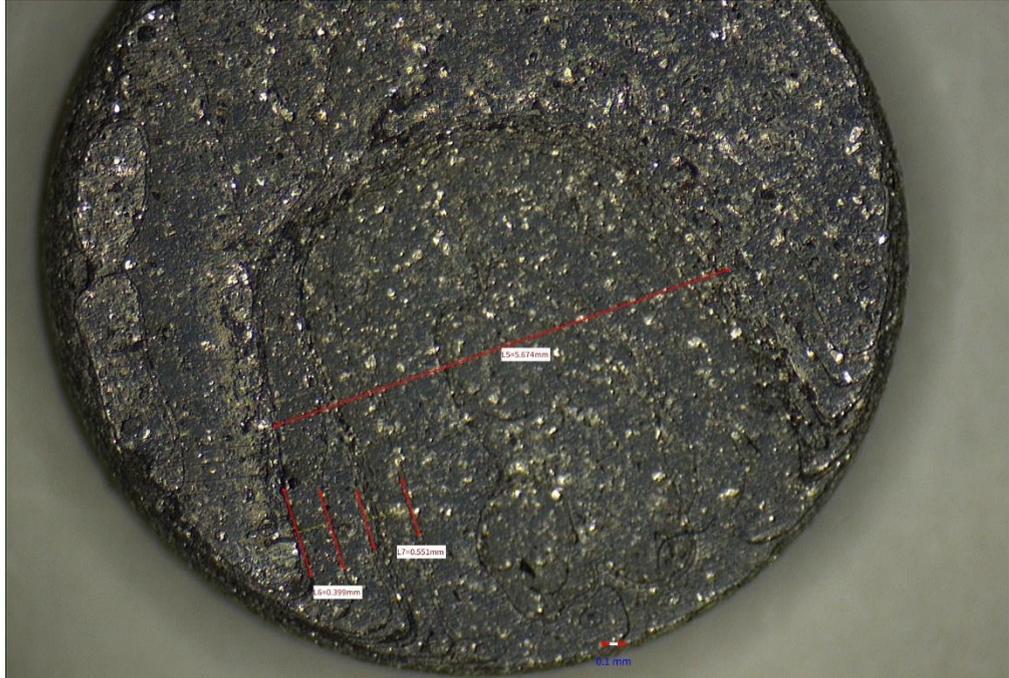


Figura A 9 Detalhes superiores da amostra com 5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

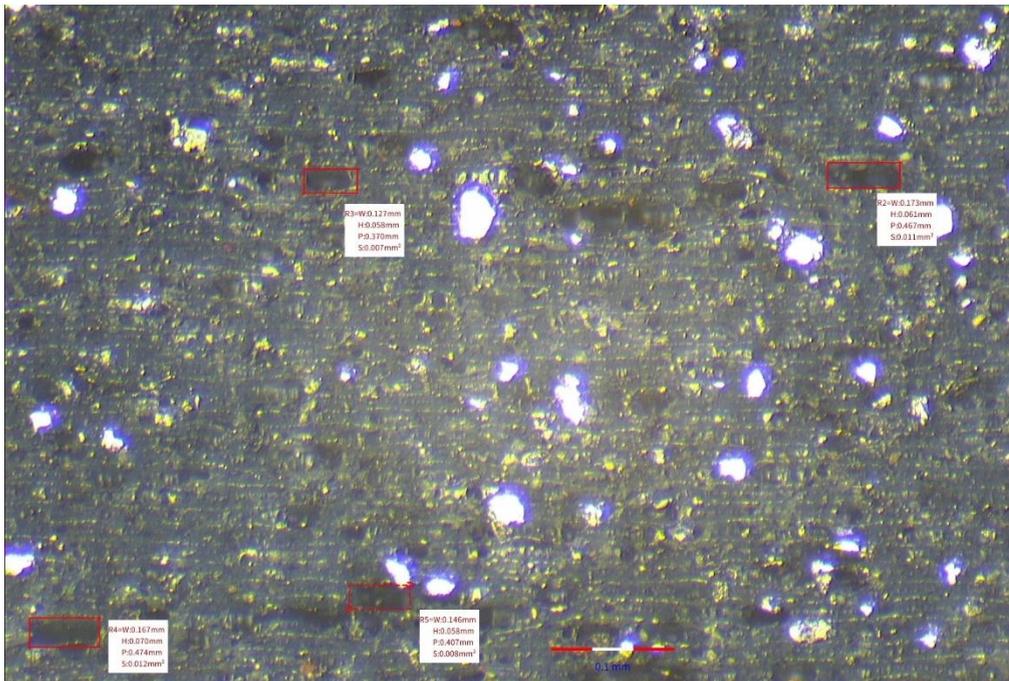


Figura A 10 Detalhes laterais da amostra com 5% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

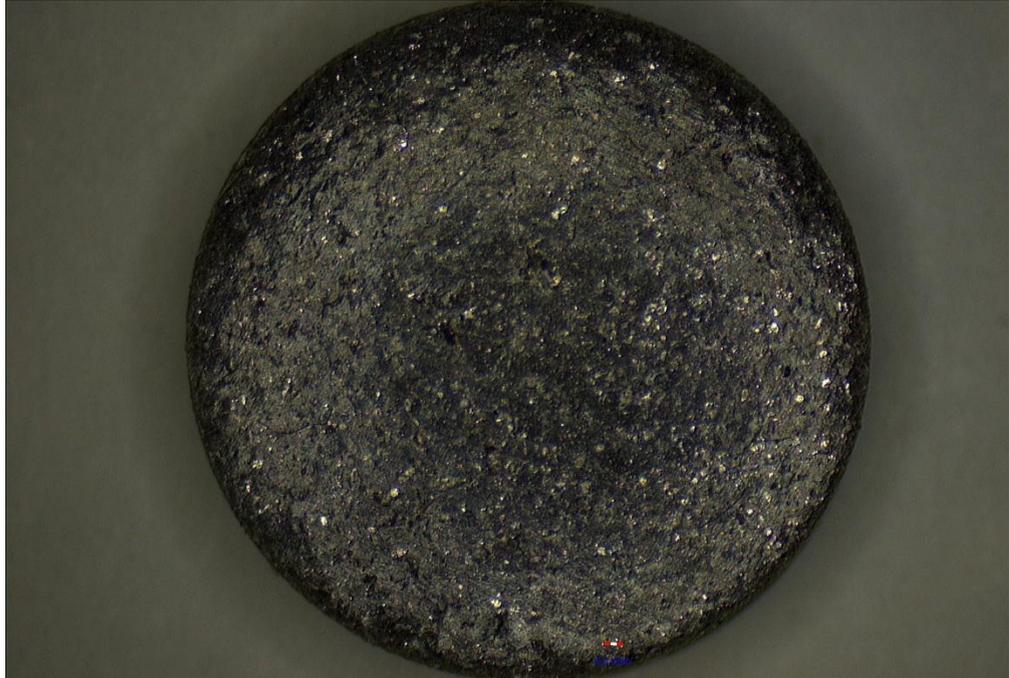


Figura A 11 Detalhes superiores da amostra com 10% de grafite.

Fonte: Autor (2025)

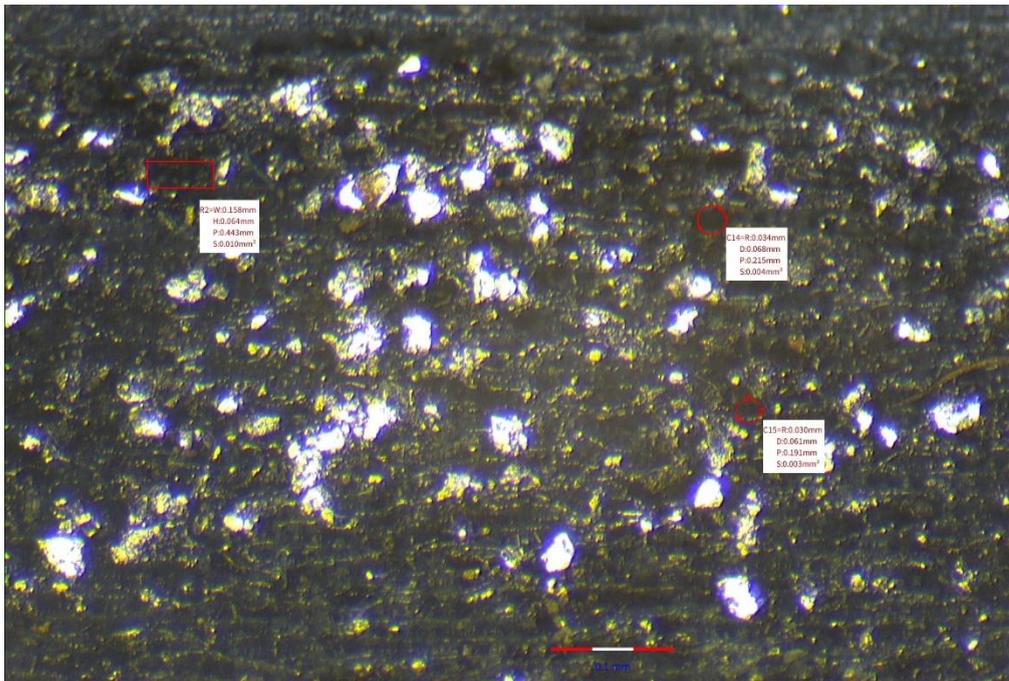


Figura A 12 Detalhes laterais da amostra com 10% de grafite.

Fonte: Autor (2025)