

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

FÁBIO AUGUSTO SAMPAIO DE ASSUNÇÃO

**INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS ADITIVOS NO FILAMENTO DE PLA, NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS IMPRESSAS UTILIZANDO O
MÉTODO FDM**

Guaratinguetá - SP
2025



Fábio Augusto Sampaio de Assunção

**INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS ADITIVOS NO FILAMENTO DE PLA, NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS IMPRESSAS UTILIZANDO O
MÉTODO FDM**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

Guaratinguetá - SP
2025

A851i

Assunção, Fabio Augusto Sampaio de

Influência de elementos aditivos no filamento de PLA, nas propriedades mecânicas de peças impressas utilizando o método FDM / Fabio Augusto Sampaio de - Guaratinguetá, 2025.

64 f : il.

Bibliografia: f. 62-64

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

1. Manufatura aditiva. 2. Fibras de carbono. 3. Polímeros.
4. Materiais compostos. I. Título.

CDU 620.1

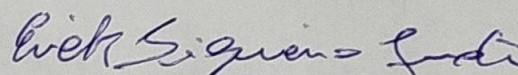
FÁBIO AUGUSTO SAMPAIO DE ASSUNÇÃO

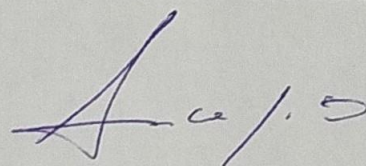
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

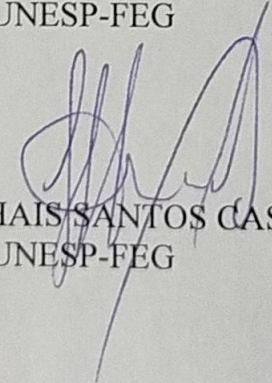
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUÍDI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANTONIO DOS REIS DE FARIA NETO
UNESP-FEG


Prof.^a Dr.^a THAIS SANTOS CASTRO
UNESP-FEG

OUTUBRO DE 2025

RESUMO

O trabalho investiga o efeito da adição de grafeno e fibra de carbono descontínua ao ácido polilático (PLA) nas propriedades mecânicas de peças produzidas por manufatura aditiva (FDM). Foram impressos corpos de prova de PLA sem aditivos, PLA com grafeno e PLA com fibra de carbono descontínua, sob orientações de 00°, 45° e 90°, e submetidos a ensaios de tração, flexão e impacto, conforme as normas ISO 527, ISO 178 e ISO 179. Os resultados mostraram que a orientação de impressão exerce forte influência sobre o desempenho mecânico: peças impressas a 00° apresentaram maior resistência, enquanto as a 45° tiveram desempenho inferior e, as a 90° tiveram o menor resultado. Entre os materiais, o PLA sem aditivos apresentou a maior resistência à tração, seguido de perto pelo PLA com grafeno, cujo comportamento indica que a adição não produziu ganhos significativos nas condições testadas. Já o PLA com fibra de carbono descontínua demonstrou menor resistência à tração, mas melhor desempenho em impacto, sugerindo comportamento mais vantajoso sob esforços dinâmicos. Conclui-se que a escolha do aditivo e dos parâmetros de impressão influencia diretamente o desempenho mecânico final. O grafeno mostrou potencial limitado nas condições testadas, enquanto a fibra de carbono descontínua pode ser útil em aplicações sujeitas a impacto. Os resultados contribuem para a compreensão do comportamento estrutural de compósitos de PLA em manufatura aditiva e para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes para aplicações industriais.

PALAVRAS-CHAVE: manufatura aditiva; FDM; PLA; grafeno; fibra de carbono descontínua; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

This study investigates the effect of adding graphene and discontinuous carbon fiber to polylactic acid (PLA) on the mechanical properties of parts produced by additive manufacturing (FDM). Test specimens of PLA, PLA with graphene, and PLA with carbon fiber were printed at orientations of 00°, 45°, and 90°, and subjected to tensile, flexural, and impact tests according to ISO 527, ISO 178, and ISO 179 standards. The results showed that the printing orientation has a strong influence on mechanical performance: specimens printed at 00° exhibited the highest strength, those at 45° showed intermediate performance, and those at 90° had the lowest results. Among the materials, PLA presented the highest tensile strength, followed closely by PLA with graphene, whose behavior indicates that the additive did not produce significant improvements under the tested conditions. PLA with carbon fiber showed lower tensile strength but better impact performance, suggesting a more advantageous behavior under dynamic loads. It is concluded that the choice of additive and printing parameters directly influences the final mechanical performance. Graphene showed limited potential under the tested conditions, whereas carbon fiber may be useful for applications subjected to impact. The results contribute to understanding the structural behavior of PLA composites in additive manufacturing and to developing more efficient techniques for industrial applications.

KEYWORDS: additive manufacturing; FDM; PLA; graphene; carbon fiber; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação dos métodos de impressão 3D.....	15
Figura 2 – Esquema do processo de impressão FDM	16
Figura 3 – Representação dos padrões geométricos, percentuais de preenchimento e orientações de deposição em FDM.....	18
Figura 4 – Representação esquemática do ensaio de tração em máquina universal.....	20
Figura 5 – Rolos de PLA utilizados	22
Figura 6 – Impressora Ender 3 v2 utilizada.....	23
Figura 7 – Parâmetros Ultimaker Cura.....	24
Figura 8 – Parâmetros Ultimaker Cura.....	24
Figura 9 – Representação da orientação dos corpos de prova	25
Figura 10 – Corpos de prova sendo impressos.....	27
Figura 11 – Corpos de prova impressos para o ensaio de tração.....	28
Figura 12 – Corpos de prova impressos para o ensaio de impacto	28
Figura 13 – Corpos de prova impressos para o ensaio de flexão	29
Figura 14 – Corpos de prova com orientação 90°	33
Figura 15 – Corpos de prova com orientação 90° após a fratura	33
Figura 16 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA sem aditivos em 00°	34
Figura 17 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA sem aditivos em 45°	35
Figura 18 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA sem aditivos em 90°	36
Figura 19 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com grafeno em 00°	37
Figura 20 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com grafeno em 45°	38
Figura 21 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com grafeno em 90°	39
Figura 22 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 00°.....	40
Figura 23 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 45°.....	41
Figura 24 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 90°.....	42
Figura 25 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 00° ..	44
Figura 26 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 45° ..	44
Figura 27 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 90° ..	45
Figura 28 – Corpos de prova com orientação 45°	45

Figura 29 – Corpos de prova com orientação 45° após a fratura	45
Figura 30 – Corpos de prova de PLA com orientação 90°	48
Figura 31 – Corpos de prova de PLA com orientação 90° após a fratura	48
Figura 32 – Curva Força x Deslocamento do PLA sem aditivos para orientação 00°	49
Figura 33 – Curva Força x Deslocamento do PLA sem aditivos para orientação 45°	50
Figura 34 – Curva Força x Deslocamento do PLA sem aditivos para orientação 90°	51
Figura 35 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com grafeno para orientação 00°	52
Figura 36 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com grafeno para orientação 45°	53
Figura 37 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com grafeno para orientação 90°	54
Figura 38 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com fibra de carbono descontínua para orientação 00°	55
Figura 39 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com fibra de carbono descontínua para orientação 45°	56
Figura 40 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com fibra de carbono descontínua para orientação 90°	57
Figura 41 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 00° ..	59
Figura 42 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 45° ..	59
Figura 43 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 90° ..	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de impressão	26
Tabela 2 – Medição dos corpos de prova para o ensaio de tração.....	31
Tabela 3 – Medição dos corpos de prova para o ensaio de impacto	31
Tabela 4 – Medição dos corpos de prova para o ensaio de flexão	32
Tabela 5 – Valores médios das medições dos corpos de prova.....	32
Tabela 6 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA sem aditivos em 00°	34
Tabela 7 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA sem aditivos em 45°	35
Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA sem aditivos em 90°	36
Tabela 9 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com grafeno em 00°	37
Tabela 10 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com grafeno em 45°	38
Tabela 11 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com grafeno em 90°	39
Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 00°.....	40
Tabela 13 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 45°.....	41
Tabela 14 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 90°.....	42
Tabela 15 – Valores obtidos em todos os ensaios de tração.....	43
Tabela 16 – Valores coletados no ensaio de impacto	46
Tabela 17 – Valores da tenacidade	47
Tabela 18 – Valores obtidos no ensaio para PLA sem aditivos com orientação em 00°	49
Tabela 19 – Valores obtidos no ensaio para PLA sem aditivos com orientação em 45°	50
Tabela 20 – Valores obtidos no ensaio para PLA sem aditivos com orientação em 90°	51
Tabela 21 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com grafeno com orientação em 00°.....	52
Tabela 22 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com grafeno com orientação em 45°.....	53
Tabela 23 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com grafeno com orientação em 90	54

Tabela 24 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua com orientação em 00°	55
Tabela 25 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua com orientação em 45°	56
Tabela 26 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua com orientação em 90°	57
Tabela 27 – Valores obtidos em todos os ensaios de flexão	58

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

3D	Three-Dimensional (Tridimensional)
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
E	Módulo de Elasticidade (Módulo de Young)
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição Fundida)
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional de Padronização)
MPa	Megapascal (Unidade de pressão / tensão)
PLA	Polylactic Acid (Ácido Polilático)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	MANUFATURA ADITIVA E O PROCESSO FDM	14
2.2	O PLA E SUAS APLICAÇÕES NA IMPRESSÃO 3D	16
2.3	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	17
2.4	COMPÓSITOS DE PLA: SEM ADITIVO, COM CARBONO E COM GRAFENO	19
2.5	ENSAIOS MECÂNICOS E NORMALIZAÇÃO	20
2.6	APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS COM PLA	21
3	MÉTODO E MATERIAIS	22
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	22
3.2	PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	23
3.3	GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA	25
3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	26
3.5	PROCEDIMENTO DE IMPRESSÃO	26
3.6	CORPOS DE PROVA IMPRESSOS	27
3.7	ENSAIOS MECÂNICOS	29
3.8	GEOMETRIA E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	29
3.9	TRATAMENTO DOS DADOS	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O conceito de manufatura aditiva teve seu começo no início dos anos 1980, tendo sido desenvolvidas as primeiras tecnologias de prototipagem rápida, uma delas sendo a estereolitografia (SLA). Ao passar dos anos, a tecnologia de impressão 3D tem avançado aceleradamente, isso permitiu sua transição de apenas uma ferramenta de desenvolvimento de protótipos para uma plataforma robusta de fabricação dos produtos, sendo possível aplicá-la em vários setores industriais. No final dos anos 1980, houve a introdução do método Fused Deposition Modeling (FDM), isso democratizou o acesso a impressão 3D devido ao seu baixo custo, simplicidade e compatibilidade com diversos termoplásticos. Nos dias de hoje a impressão FDM é uma das tecnologias mais utilizadas nos ambientes acadêmicos, makers e até industriais (VOLPATO, 2017; CHACÓN et al., 2020).

A fabricação de peças via manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, proporciona uma nova perspectiva na produção de peças complexas, na prototipagem e na criação de peças personalizadas. O princípio do seu funcionamento baseia-se na deposição de material camada por camada, e um imenso potencial tem sido demonstrado por essa tecnologia para os setores aeroespacial, biomédico, automotivo e educacional (VOLPATO, 2017; SILVA et al., 2020).

Existem alguns métodos para se criar peças via MA, o Fused Deposition Modeling (FDM), possui o ponto forte de ter um custo reduzido, uma operação simples e uma ampla compatibilidade com materiais termoplásticos, exemplo o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), politereftalato de etileno glicol (PETG) e, o mais abrangente, o ácido polilático (PLA), que possui uma biodegradabilidade e é oriundo de fontes renováveis (MAURYA et al., 2022; JARDINI et al., 2017). O PLA possui uma boa rigidez e estabilidade dimensional em relação aos outros termoplásticos, porém, a sua resistência mecânica ainda impede que ele seja usado em aplicações estruturais mais exigentes (CROUCILLO et al., 2018).

O PLA possui limitações que podem ser superadas com aditivos, dentre eles a fibra de carbono descontínua e nanopartículas de grafeno, tendo o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. O grafeno possui uma estrutura bidimensional e uma elevada resistência mecânica, é um dos principais aditivos para a fabricação de compósitos poliméricos de alto desempenho (MAQSOOD; RIMAŠAUSKAS, 2021; RODRÍGUEZ-REYNA et al., 2022).

Na manufatura aditiva, a escolha do material é apenas uma etapa, outra parte importante são os parâmetros técnicos de impressão que serão utilizados no processo FDM, esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho mecânico das peças. Parâmetros como a orientação de impressão, altura da camada, padrão de preenchimento, densidade do preenchimento, temperatura do bico e a velocidade de extrusão afetam diretamente a resistência mecânica, adesão entre as camadas e a homogeneidade das peças (PELEGRINO et al., 2019; MAURYA et al., 2022).

A utilização do PLA aditivado com o grafeno mostra um grande potencial para aumentar a resistência à tração, o módulo de elasticidade e melhorar as características das peças submetidas a esforços dinâmicos. Porém, é possível obtermos resultados distintos ao fazer a interação entre os aditivos e os parâmetros de impressão, o que reforça a necessidade da realização de ensaios normatizados que garantam reprodutibilidade e confiabilidade nos resultados obtidos (CHACÓN et al., 2017; GARCÍA-DOMÍNGUEZ et al., 2020).

Por meio de ensaios padronizados, é possível determinar as propriedades mecânicas do PLA e dos seus compósitos. O ensaio de tração, descrito nas normas ISO 527-1 e ISO 527-2, tem como objetivo a determinação da resistência à tração, do módulo elástico e da deformação até a ruptura (ISO 527-1:2012; ISO 527-2:2012). Para a determinação da resistência à flexão, é utilizada a norma ISO 178:2010, enquanto a resistência ao impacto é determinada conforme a norma ISO 179-1:2000, por meio do ensaio Charpy (ISO 178:2010; ISO 179-1:2000).

É importante destacar que essas normas foram originalmente desenvolvidas para plásticos injetados e, apesar das adaptações feitas para o contexto da impressão 3D, ainda existem limitações devido à anisotropia e à morfologia interna dos corpos de prova fabricados por FDM (GARCÍA-DOMÍNGUEZ et al., 2020; KRISTIAWAN et al., 2021).

Com esses fatos, este trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparando as propriedades mecânicas do PLA, PLA com fibra de carbono descontínua e o PLA com nanopartículas de grafeno, tendo em vista a influência dos parâmetros de impressão e com o objetivo de identificar os ganhos estruturais decorrentes da adição dos aditivos e da configuração adequada do processo de manufatura.

1.1 OBJETIVOS

Comparar as propriedades mecânicas do PLA com aquelas do PLA aditivado com grafeno e fibra de carbono descontínua, todos eles fabricados por MA utilizando o método FDM, baseando-nos em ensaios padronizados de tração, flexão e impacto, com os corpos de prova com 100% de preenchimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MANUFATURA ADITIVA E O PROCESSO FDM

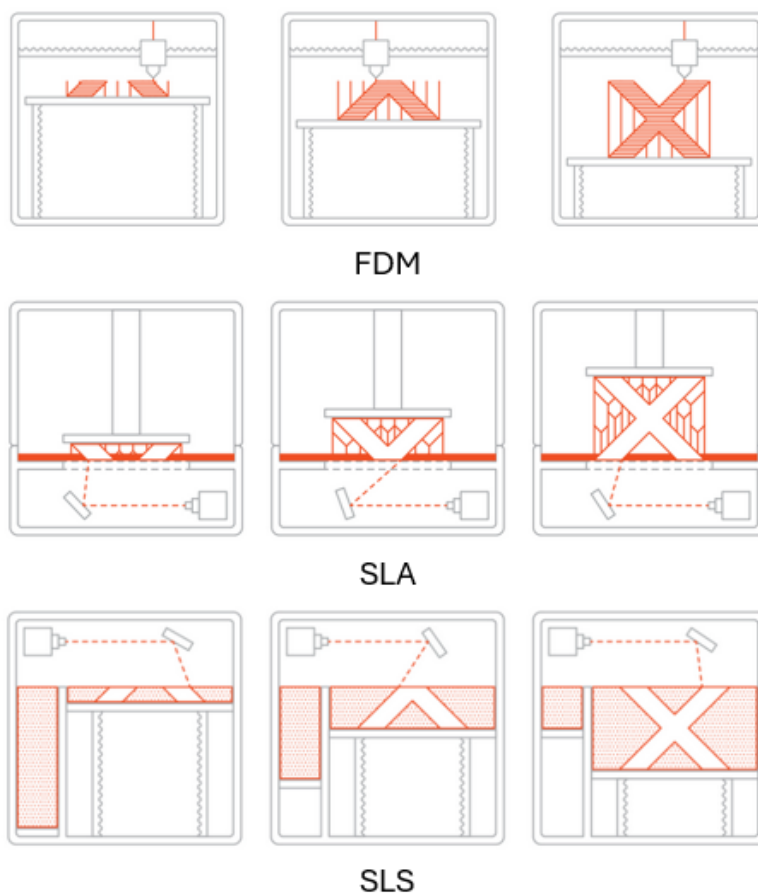
A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação onde o material deposita a nova camada sobre a camada anterior, utilizando como base um modelo digital de três dimensões. Sua maior vantagem está na capacidade de produzir peças com geometria complexa e personalizada, reduzindo assim os desperdícios de material e custo de ferramentas (SILVA et al., 2020; VOLPATO, 2017). A tecnologia tem avançado rapidamente, com aplicações nos setores aeroespacial, automotivo, biomédico e educacional, entre outros (JARDINI et al., 2017; CHACÓN et al., 2020).

Os principais métodos de manufatura aditiva incluem:

- Fused Deposition Modeling (FDM): método mais popular, utiliza filamentos termoplásticos;
- Stereolithography (SLA): utiliza resinas foto poliméricas curadas por laser;
- Selective Laser Sintering (SLS): sinteriza pós poliméricos ou metálicos por laser;
- Digital Light Processing (DLP): semelhante ao SLA, mas usa projeção digital;
- Binder Jetting: deposita aglutinantes sobre pós, criando peças sem calor;
- Electron Beam Melting (EBM) e Direct Metal Laser Sintering (DMLS): aplicados para metais em alta precisão (VOLPATO, 2017).

É possível ver representações do funcionamento dos métodos FDM, SLA e SLS na Figura 1.

Figura 1 – Exemplificação dos métodos de impressão 3D.



Fonte: Adaptado de ENGIPRINTERS (2021).

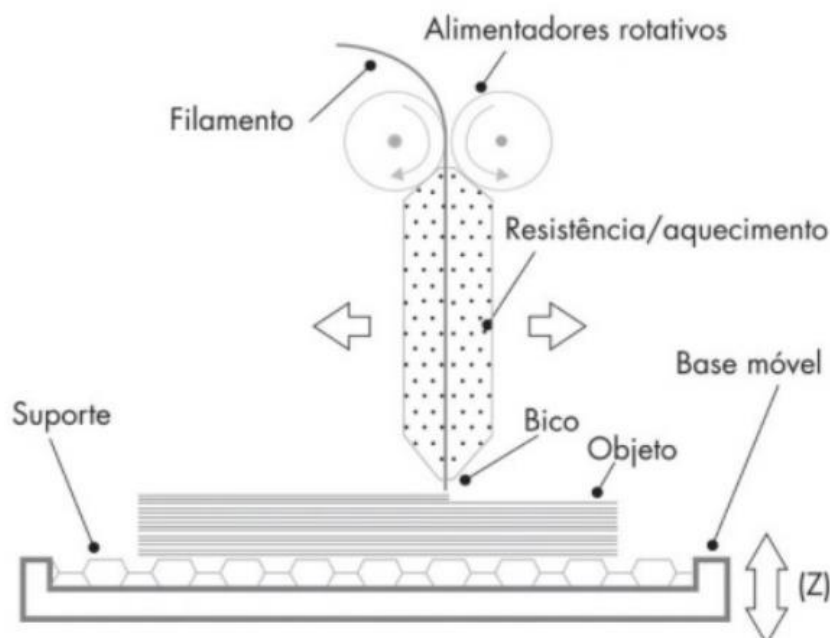
Esses métodos têm sido comparados quanto às suas capacidades de fabricarem peças com precisão dimensional, integridade mecânica e eficiência de produção, sendo o FDM o método mais acessível e amplamente difundido em ambientes acadêmicos, makers e industriais.

O método FDM destaca-se pela sua simplicidade e acessibilidade. Neste método, um filamento termoplástico é fundido em um extrusor aquecido e depositado camada por camada sobre a base de construção (KRISTIawan et al., 2021). O modelo em três dimensões, geralmente no formato STL, é processado por fatiadores, softwares responsáveis por converter o modelo 3D em instruções de movimento e temperatura (GCODE), definindo parâmetros como a altura da camada, o padrão de preenchimento e a velocidade de impressão (VOLPATO, 2017).

Com o avanço das tecnologias de controle, alguns estudos exploram também o uso de sensores acoplados para controle de qualidade em tempo real durante o processo FDM,

otimizando a qualidade das camadas depositadas e prevenindo falhas, há uma representação do sistema de extrusão do método FDM na Figura 2 (SILVA et al., 2020).

Figura 2 – Esquema do processo de impressão FDM.



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

Os modelos em três dimensões em formato STL são processados por softwares de fatiamento, também conhecidos como slicers, sendo eles o Ultimaker Cura, o PrusaSlicer ou o Simplify3D. Esses programas são responsáveis por converter o modelo tridimensional em instruções GCODE que coordenam os movimentos da impressora, a temperatura de extrusão, a altura das camadas e a densidade de preenchimento. Parâmetros como padrão de preenchimento, presença de estruturas de suporte, retração e velocidade de impressão são definidos no fatiador, afetando diretamente a qualidade final e as propriedades mecânicas das peças produzidas (KRISTIAWAN et al., 2021).

2.2 O PLA E SUAS APLICAÇÕES NA IMPRESSÃO 3D

O ácido polilático (PLA) é um polímero termoplástico biodegradável obtido a partir de fontes renováveis, como milho e cana-de-açúcar. É um poliéster linear semicristalino ou amorfo, caracterizado por sua facilidade de processamento, boa adesão entre camadas, baixa contração térmica e rigidez moderada (CROUCILLO et al., 2018; MAURYA et al., 2022).

Além da sua biodegradabilidade, o PLA também possui baixa toxicidade e resistência térmica relativamente baixa, sendo mais indicado para aplicações não estruturais e para uma prototipagem rápida. Suas limitações incluem fragilidade sob impacto e baixa resistência a deformações plásticas (TUCKER et al., 2021).

Mais fatores que tornam o PLA um material amplamente estudado são as suas compatibilidades com a fabricação de próteses, dispositivos biomédicos e peças técnicas de engenharia leve. A estabilidade dimensional do PLA permite impressões com menor desvio dimensional, mesmo sem o uso da cama aquecida (JARDINI et al., 2017).

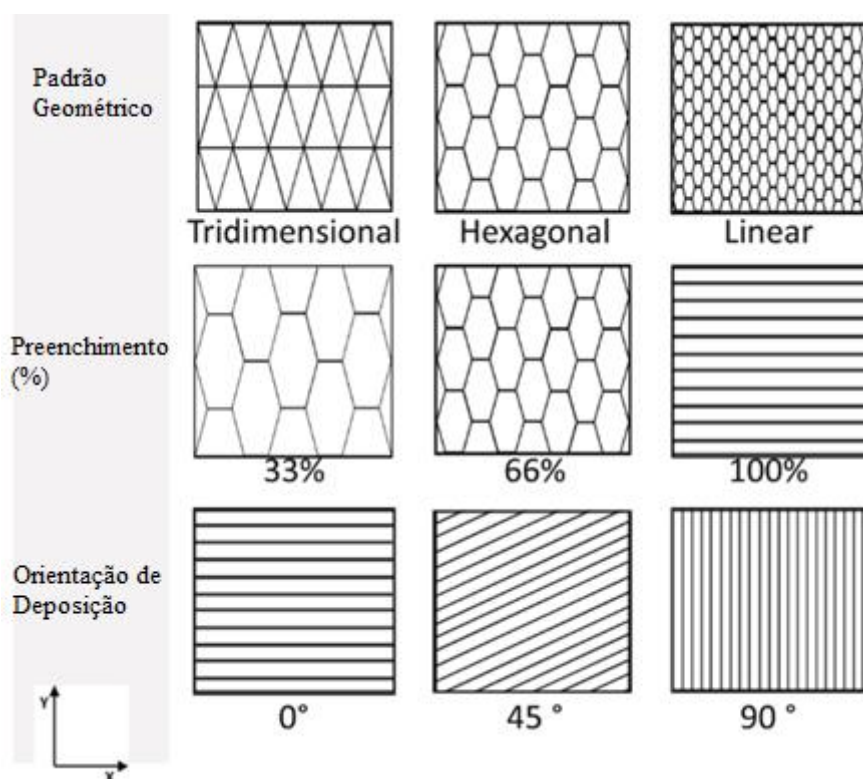
2.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Os parâmetros de impressão influenciam diretamente nas propriedades mecânicas das peças fabricadas. Os principais parâmetros são:

- Orientação da impressão;
- Altura da camada;
- Densidade e padrão de preenchimento;
- Temperatura do bico e da mesa;
- Velocidade de extrusão (PELEGRINO et al., 2019; MAURYA et al., 2022).

Há na Figura 3, uma representação de como os parâmetros podem influenciar a peça criada, dependendo de seus ajustes.

Figura 3 – Representação dos padrões geométricos, percentuais de preenchimento e orientações de deposição em FDM.



Fonte: Adaptado de RODRÍGUEZ-REYNA et al. (2022).

Estudos mostram que camadas mais finas (0,14 mm) e orientação inclinada ($\pm 45^\circ$) proporcionam maior resistência à tração. A densidade de preenchimento de 100% garante continuidade estrutural, fundamental para ensaios mecânicos normatizados (GARCÍA-DOMÍNGUEZ et al., 2020).

Além disso, a taxa de resfriamento entre camadas e a velocidade da ventoinha também influenciam na adesão entre elas, sendo fatores importantes para garantir uma peça com uma boa propriedade mecânica (CHACÓN et al., 2017).

2.4 COMPÓSITOS DE PLA: SEM ADITIVO, COM CARBONO E COM GRAFENO

O PLA pode ser utilizado em três principais formas:

- PLA: apresenta facilidade de impressão e biodegradabilidade, mas limitações em resistência mecânica e térmica (SINGH et al., 2021; PANDEY et al., 2020; LIMA, 2021);

- PLA com fibra de carbono descontínua: apresenta ganhos significativos em rigidez e resistência à tração, mas pode tornar o material mais quebradiço (MAQSOOD; RIMAŠAUSKAS, 2021);
- PLA com grafeno: melhora a resistência à tração, módulo elástico e condutividade térmica, com menor comprometimento da ductilidade (RODRÍGUEZ-REYNA et al., 2022).

A eficácia dos compósitos depende da dispersão homogênea dos aditivos, da porcentagem incorporada e dos parâmetros de impressão utilizados (MAQSOOD; RIMAŠAUSKAS, 2021; KRISTIAWAN et al., 2021; WANG et al., 2022).

Alguns estudos também abordam os desafios na homogeneização da mistura entre PLA e grafeno, sendo comum o uso de extrusoras de duplo fuso para melhor dispersão do nanomaterial. A interação entre o PLA e o grafeno ainda é alvo de pesquisa contínua, visando o aumento da aderência entre camadas (KRISTIAWAN et al., 2021; GARCÍA et al., 2020; ZHONG et al., 2017).

O PLA reforçado com fibras de carbono tem ganhado destaque por sua capacidade de combinar a facilidade de processamento do PLA com as excelentes propriedades mecânicas da fibra de carbono descontínua. A adição de fibras curtas de carbono ao PLA resulta em um aumento expressivo no módulo de elasticidade e na rigidez do material, tornando-o mais adequado para componentes que demandam maior estabilidade dimensional e resistência à tração (MAQSOOD; RIMAŠAUSKAS, 2021). No entanto, esse ganho de rigidez costuma vir acompanhado de uma redução na ductilidade, deixando o compósito mais suscetível a fraturas sob carregamentos de impacto (TAMMARO et al., 2022). Outro ponto a considerar é que a presença das fibras aumenta a abrasividade do filamento, acelerando o desgaste de bicos de latão convencionais e, exigindo o uso de bicos de aço endurecido ou revestidos. Apesar dessas limitações, o PLA com fibra de carbono descontínua já tem sido utilizado em aplicações que requerem elevada rigidez específica, como suportes estruturais, drones, peças automotivas e prototipagem funcional, consolidando-se como uma alternativa viável entre os compósitos poliméricos para manufatura aditiva (RODRÍGUEZ-REYNA et al., 2022).

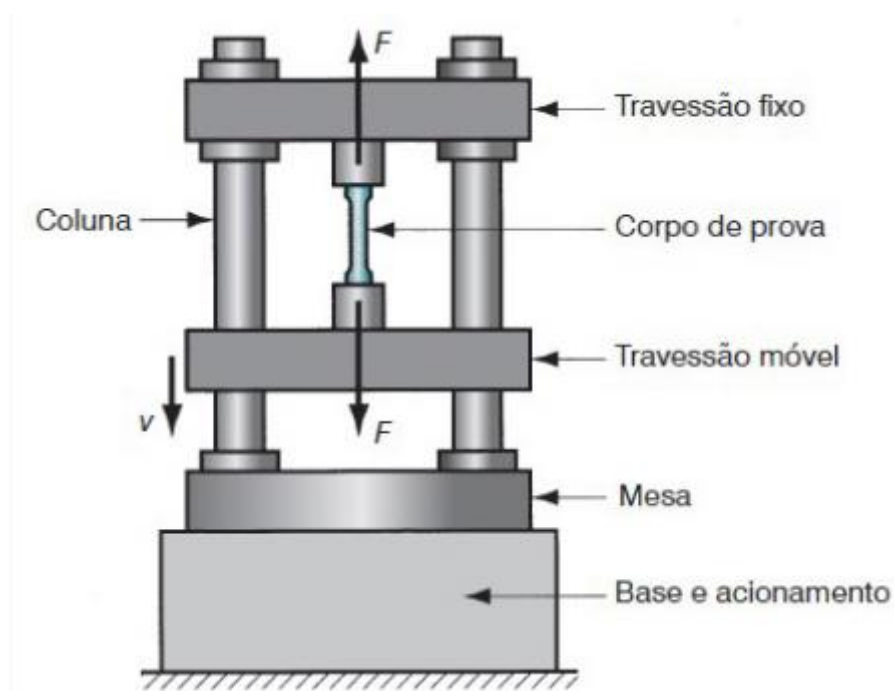
2.5 ENSAIOS MECÂNICOS E NORMALIZAÇÃO

A caracterização mecânica de peças impressas por FDM segue normas internacionais:

- Tração: ISO 527-1 e ISO 527-2;
- Flexão: ISO 178;
- Impacto: ISO 179-1 (Charpy).

Na Figura 4 há um esquema que demonstra como o ensaio de tração vai ser realizado.

Figura 4 – Representação esquemática do ensaio de tração em máquina universal.



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

As normas ISO 178, ISO 179-1, ISO 527-1 e ISO 527-2, foram desenvolvidas para plásticos injetados e, mesmo que amplamente utilizadas, podem apresentar limitações quando aplicadas em peças fabricadas por impressão 3D, devido à anisotropia e à estrutura porosa do material (GARCÍA-DOMÍNGUEZ et al., 2020).

Além dos ensaios mecânicos tradicionais, a literatura tem apontado para o uso crescente de métodos não destrutivos (END), como a termografia infravermelha e o ultrassom, para inspeção da qualidade interna de peças impressas por FDM. Essas técnicas permitem identificar porosidades e falhas de adesão entre camadas sem comprometer o

corpo de prova, sendo promissoras para aplicações industriais onde a inspeção contínua é necessária (SILVA et al., 2020).

2.6 APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS COM PLA

Ao aditivar os polímeros com reforços funcionais, como o grafeno e a fibra de carbono descontínua, a manufatura aditiva ganhou um aumento significativo de possíveis aplicações, principalmente o método FDM. Melhorando propriedades como rigidez, resistência à tração e condutividade térmica ou elétrica, esses compósitos podem ser utilizados em aplicações antes impraticáveis com PLA (RODRÍGUEZ-REYNA et al., 2022; MAQSOOD; RIMAŠAUSKAS, 2021).

Na área da medicina, os compósitos de PLA têm sido utilizados na fabricação de próteses personalizadas, especialmente devido à compatibilidade biológica do PLA e ao aumento de rigidez obtido com aditivos. Já no setor automotivo, esses materiais têm sido aplicados em componentes de acabamento interno e suportes de sensores, onde a redução de peso e o baixo custo são fatores importantes (JARDINI et al., 2017).

Na indústria aeroespacial, o uso de PLA com grafeno permite a fabricação de suportes leves, canaletas de cabos e elementos de fixação com bom desempenho estrutural em regiões de menor exigência térmica. A capacidade de fabricar peças sob demanda, com geometrias complexas e reforço localizado, torna o FDM com PLA aditivado uma alternativa promissora também para dispositivos de teste (CHACÓN et al., 2017).

Essas aplicações demonstram que a adição de reforços ao PLA não apenas supera suas limitações naturais, mas também amplia consideravelmente seu potencial de uso em ambientes reais, especialmente quando associados à flexibilidade da impressão 3D.

3 MÉTODO E MATERIAIS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados três tipos de filamento para impressão 3D:

- PLA: marca Vooltd3D, cor branca, diâmetro 1,75 mm, produção nacional;
- PLA com grafeno: marca Vooltd3D, cor preta, diâmetro 1,75 mm, produção nacional;
- PLA com fibra de carbono descontínua: sem marca específica (OEM), cor preta, diâmetro 1,75 mm, produção chinesa;

A Figura 5 mostra os rolos de filamento de PLA e de PLA aditivado com grafeno, que foram utilizados para a criação dos corpos de prova.

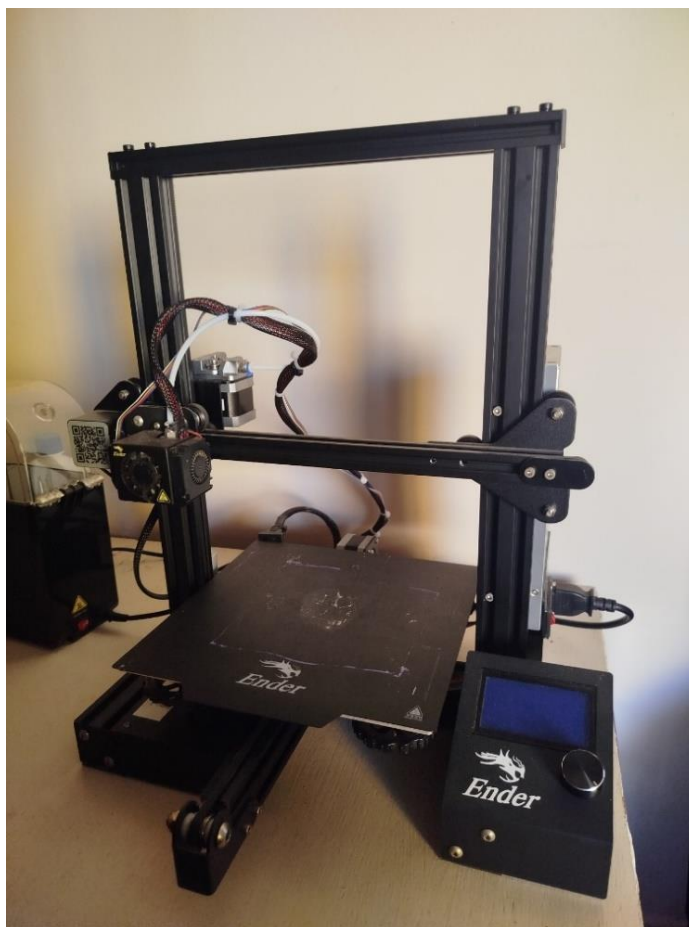
Figura 5 – Rolos de PLA utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 6 mostra a impressora que foi utilizada para imprimir todos os corpos de prova ensaiados.

Figura 6 – Impressora Ender 3 v2 utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A fabricação dos corpos de prova foi realizada em uma impressora Creality Ender 3 V2, equipada com mesa magnética, extrusor metálico, nivelador automático e bico de latão de 0,4 mm de diâmetro.

3.2 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

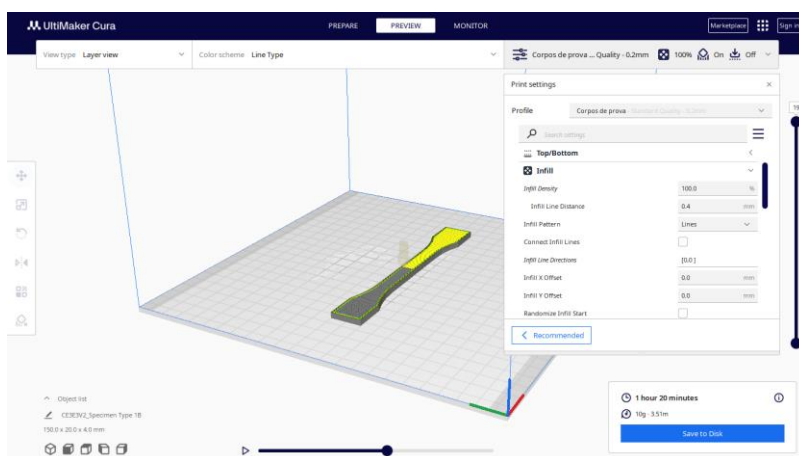
A configuração utilizada no software de fatiamento Ultimaker Cura foi definida com base em parâmetros que garantem boa qualidade superficial e homogeneidade do material. Os principais parâmetros adotados foram:

- Altura de camada: 0,20 mm;
- Temperatura do bico: 215 °C;
- Temperatura da mesa: 65 °C;
- Velocidade de impressão: 50 mm/s;
- Densidade de preenchimento: 100%;

- Perímetros (paredes): 3;
- Padrão de preenchimento: Linhas;
- Orientações de impressão: 00°, 45° e 90°.

A Figura 7 mostra o software de fatiamento com os parâmetros já inseridos para a criação do arquivo que a impressora vai ler.

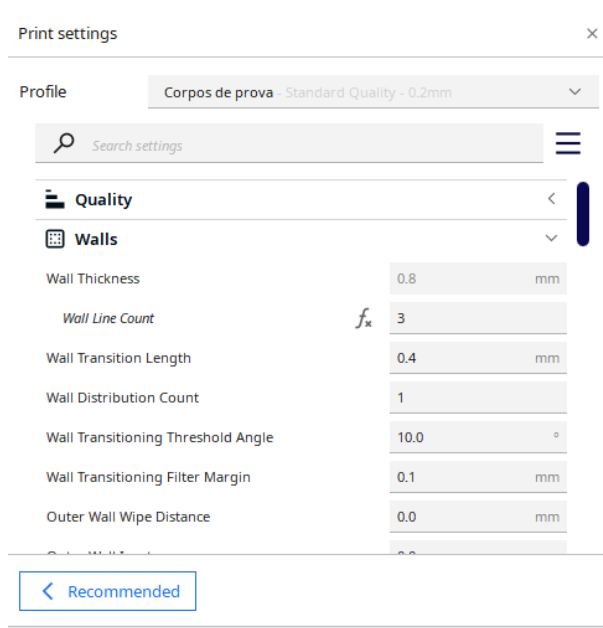
Figura 7 – Parâmetros Ultimaker Cura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 8 mostra os parâmetros de impressão utilizados para a criação das paredes no corpo de prova.

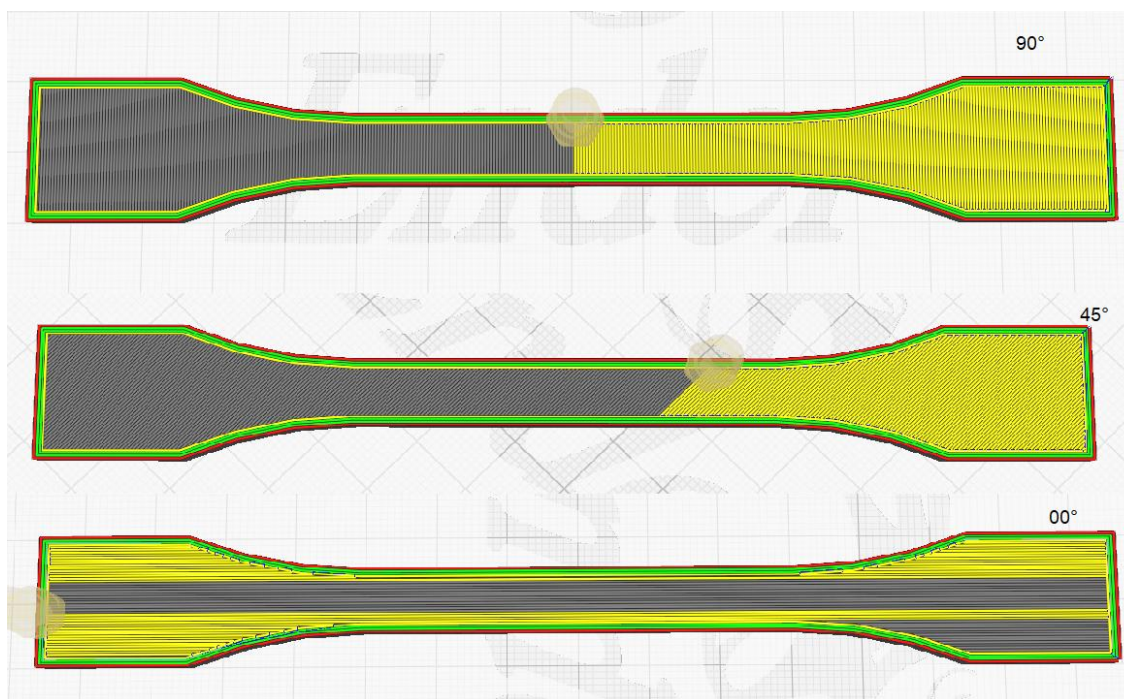
Figura 8 – Parâmetros Ultimaker Cura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 9 mostra a orientação dos corpos de prova impressos, uma representação digital que o software de fatiamento nos permite ver.

Figura 9 – Representação da orientação dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As orientações foram definidas conforme o ângulo entre o comprimento do corpo de prova e a direção de deposição das linhas de material, de forma a permitir a avaliação da influência da anisotropia típica do processo FDM.

3.3 GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA

A geometria foi definida conforme as normas ISO correspondentes a cada tipo de ensaio:

- Ensaio de tração: normas ISO 527-1 e ISO 527-2, utilizando corpos de prova tipo 1B;
- Ensaio de flexão: norma ISO 178, utilizando corpos retangulares com dimensões de acordo com a especificação normativa;
- Ensaio de impacto: norma ISO 179-1, utilizando corpos retangulares com entalhe central conforme o método Charpy.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para cada ensaio mecânico foram fabricados 5 corpos de prova por condição, considerando:

- Material: PLA, PLA com grafeno e PLA com fibra de carbono descontínua;
- Orientação de impressão: 00°, 45° e 90°;
- Tipo de ensaio: tração, flexão e impacto.

O total de corpos de prova é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de impressão.

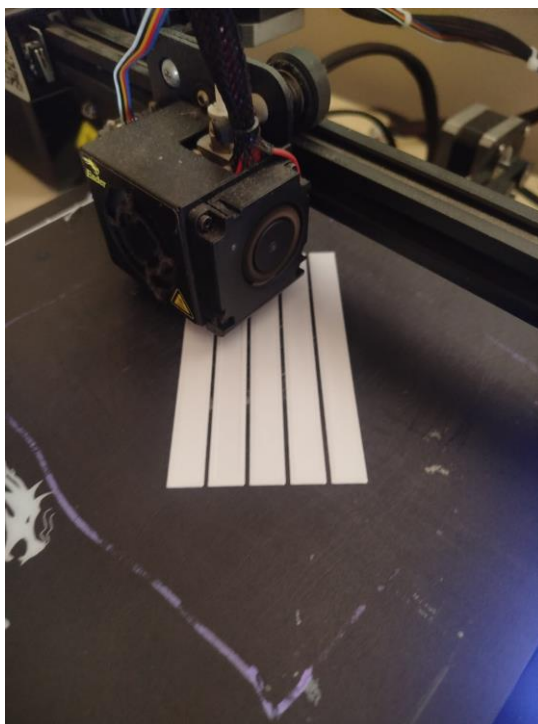
Material	Orientações (°)	Corpos de prova por condição	Total de peças
Tração			
PLA	0°, 45°, 90°	5	15
PLA + grafeno	0°, 45°, 90°	5	15
PLA + fibra de	0°, 45°, 90°	5	15
Flexão			
PLA	0°, 45°, 90°	5	15
PLA + grafeno	0°, 45°, 90°	5	15
PLA + fibra de	0°, 45°, 90°	5	15
Impacto			
PLA	0°, 45°, 90°	5	15
PLA + grafeno	0°, 45°, 90°	5	15
PLA + fibra de	0°, 45°, 90°	5	15
Total			135

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.5 PROCEDIMENTO DE IMPRESSÃO

As peças foram modeladas em CAD, exportadas no formato STL e processadas no Ultimaker Cura para a geração do GCODE, que foi transferido para a impressora via cartão micro SD. O processo de impressão foi monitorado visualmente para garantir a correta adesão da primeira camada e evitar falhas de deposição, como pode ser visto na Figura 10, os corpos de prova sendo criados.

Figura 10 – Corpos de prova sendo impressos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.6 CORPOS DE PROVA IMPRESSOS

Os corpos de prova foram impressos de acordo com as normas ISO178, ISSO 179 e ISSO 527, isso garante que eles estão aptos para serem ensaiados e para que os valores encontrados sejam válidos. Os corpos para o ensaio de tração foram feitos a partir do mesmo arquivo para todos os materiais e, eles foram identificados de acordo, a Figura 11 mostra como ficaram.

Figura 11 – Corpos de prova impressos para o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o ensaio de impacto, foi feito o mesmo procedimento, as dimensões do corpo de prova foram determinadas com base na máquina de ensaio como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Corpos de prova impressos para o ensaio de impacto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O mesmo procedimento foi seguido para o ensaio de flexão, seguindo o dimensionamento para se adequar ao equipamento onde seria feito o ensaio, como é mostrado na Figura 13 o corpo de prova.

Figura 13 – Corpos de prova impressos para o ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Após a fabricação, os corpos de prova foram condicionados em temperatura ambiente (25 ± 2 °C) e umidade relativa de $50 \pm 5\%$ por, no mínimo, 40 horas antes dos ensaios, conforme recomendações normativas.

Tração: realizado em máquina universal de ensaios, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, registrando carga máxima, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura;

Flexão: ensaio de três pontos conforme ISO 178, com velocidade de deflexão de 3 mm/min;

Impacto: método Charpy conforme ISO 179-1, registrando a energia absorvida.

3.8 GEOMETRIA E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A obtenção de resultados consistentes em ensaios mecânicos depende não apenas das normas adotadas, mas também da preparação correta dos corpos de prova. Para este estudo, foram seguidas as orientações das normas ISO 527-1, ISO 527-2, ISO 178 e ISO 179-1.

Tração (ISO 527-2 tipo 1B): Corpo de prova em formato do tipo “ampulheta” ou “dog bone”, com largura de 10 mm, espessura de 4 mm e comprimento total de aproximadamente 150 mm. Essa geometria garante concentração uniforme de tensões na região central, onde se espera a ruptura.

Flexão (ISO 178): Utiliza corpos de prova com formato retangular, tipicamente com 100 mm de comprimento, 10 mm de largura e 4 mm de espessura. O ensaio é realizado com apoio em três pontos, com aplicação de carga no centro da barra.

Impacto (ISO 179-1): Corpo de prova retangular com ou sem entalhe, dependendo do tipo de teste. As dimensões mais comuns são 80 mm de comprimento, 10 mm de largura e 4 mm de espessura.

A preparação dos corpos de prova foi realizada em impressora FDM com preenchimento de 100%, orientação das camadas no eixo longitudinal (00°) e altura de camada de 0,2 mm, buscando minimizar variações estruturais que comprometam a reprodutibilidade dos ensaios (GARCÍA-DOMÍNGUEZ et al., 2020; PELEGRINO et al., 2019).

3.9 TRATAMENTO DOS DADOS

Os resultados obtidos serão tratados estatisticamente, utilizando média aritmética e desvio padrão para cada condição de ensaio. Os gráficos comparativos e Tabelas vão ser elaborados no Microsoft Excel, permitindo a visualização clara das diferenças de desempenho entre PLA, PLA com grafeno e PLA com fibra de carbono descontínua.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente os corpos foram medidos, para se ter certeza de que os corpos de prova estão dentro das especificações necessárias, como mostrado na Tabela 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Medição dos corpos de prova para o ensaio de tração.

T00 PLA	Largura	Altura	T45 PLA	Largura	Altura	T90 PLA	Largura	Altura
1-2	10,04	3,94	1-2	10,08	4,02	1-2	10,10	3,88
3-4	10,10	3,92	3-4	10,10	3,97	3-4	10,13	3,93
5-6	10,09	3,94	5-6	10,07	4,12	5-6	10,12	3,90
7-8	10,13	3,95	7-8	10,09	4,00	7-8	10,13	3,95
9-10	10,16	3,94	9-10	10,06	4,03	9-10	10,12	3,99
Média	10,10 ± 0,05	3,94 ± 0,01	Média	10,08 ± 0,02	4,03 ± 0,06	Média	10,12 ± 0,01	3,93 ± 0,04

T00 PLA + G	Largura	Altura	T45 PLA + G	Largura	Altura	T90 PLA + G	Largura	Altura
1-2	10,03	3,99	1-2	10,00	4,02	1-2	10,03	3,89
3-4	10,10	3,96	3-4	9,99	3,92	3-4	10,08	3,92
5-6	10,05	3,92	5-6	10,03	3,94	5-6	10,02	3,94
7-8	10,09	3,92	7-8	10,02	3,97	7-8	10,08	3,94
9-10	10,09	3,88	9-10	10,01	3,98	9-10	10,06	3,96
Média	10,07 ± 0,03	3,93 ± 0,04	Média	10,01 ± 0,02	3,97 ± 0,04	Média	10,05 ± 0,03	3,93 ± 0,03

TC00 PLA + FC	Largura	Altura	TC45 PLA + FC	Largura	Altura	TC90 PLA + FC	Largura	Altura
1-2	9,88	3,96	1-2	9,88	3,92	1-2	9,91	3,79
3-4	9,92	3,95	3-4	9,89	3,93	3-4	9,94	3,87
5-6	9,93	3,95	5-6	9,90	3,91	5-6	9,98	3,84
7-8	9,93	3,91	7-8	9,89	3,93	7-8	9,98	3,89
9-10	9,93	3,93	9-10	9,90	3,95	9-10	9,98	3,92
Média	9,92 ± 0,02	3,94 ± 0,02	Média	9,89 ± 0,01	3,93 ± 0,01	Média	9,96 ± 0,03	3,86 ± 0,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 3 – Medição dos corpos de prova para o ensaio de impacto.

I00 PLA	Largura	Altura	I45 PLA	Largura	Altura	I90 PLA	Largura	Altura
1-2	10,22	4,00	1-2	10,11	3,98	1-2	10,09	3,95
3-4	10,23	3,99	3-4	10,12	3,93	3-4	10,08	3,95
5-6	10,19	3,98	5-6	10,11	3,98	5-6	10,09	3,94
7-8	10,19	3,98	7-8	10,14	3,98	7-8	10,07	4,00
9-10	10,21	4,02	9-10	10,12	4,05	9-10	10,11	3,98
Média	10,21 ± 0,02	3,99 ± 0,02	Média	10,12 ± 0,01	3,98 ± 0,04	Média	10,09 ± 0,01	3,96 ± 0,03

I00 PLA + G	Largura	Altura	I45 PLA + G	Largura	Altura	I90 PLA + G	Largura	Altura
1-2	10,10	3,96	1-2	9,97	3,93	1-2	9,97	3,88
3-4	10,09	3,94	3-4	9,98	3,93	3-4	9,93	3,87
5-6	10,08	3,93	5-6	9,98	3,91	5-6	9,95	3,85
7-8	10,04	3,97	7-8	10,00	3,96	7-8	9,94	3,90
9-10	10,11	3,92	9-10	10,00	4,00	9-10	9,96	3,92
Média	10,08 ± 0,03	3,94 ± 0,02	Média	9,99 ± 0,01	3,95 ± 0,04	Média	9,95 ± 0,02	3,88 ± 0,03

IC00 PLA + FC	Largura	Altura	IC45 PLA + FC	Largura	Altura	IC90 PLA + FC	Largura	Altura
1-2	9,95	3,93	1-2	9,92	3,93	1-2	9,98	3,87
3-4	9,93	3,93	3-4	9,94	3,92	3-4	10,00	3,86
5-6	9,91	3,93	5-6	9,94	3,92	5-6	10,00	3,87
7-8	9,93	3,91	7-8	9,94	3,94	7-8	9,96	3,89
9-10	9,98	3,90	9-10	9,93	3,96	9-10	9,98	3,95
Média	9,94 ± 0,03	3,92 ± 0,01	Média	9,93 ± 0,01	3,93 ± 0,02	Média	9,98 ± 0,02	3,89 ± 0,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 4 – Medição dos corpos de prova para o ensaio de flexão.

F00 PLA	Largura	Altura	F45 PLA	Largura	Altura	F90 PLA	Largura	Altura
1-2	10,17	3,97	1-2	10,15	4,02	1-2	10,11	3,99
3-4	10,12	3,93	3-4	10,12	4,00	3-4	10,11	3,96
5-6	10,15	3,94	5-6	10,11	3,97	5-6	10,13	3,95
7-8	10,11	3,97	7-8	10,11	3,96	7-8	10,12	3,95
9-10	10,23	3,99	9-10	10,09	3,96	9-10	10,16	3,99
Média	10,16 ± 0,05	3,96 ± 0,02	Média	10,12 ± 0,02	3,98 ± 0,03	Média	10,13 ± 0,02	3,97 ± 0,02

F00 PLA + G	Largura	Altura	F45 PLA + G	Largura	Altura	F90 PLA + G	Largura	Altura
1-2	10,01	3,94	1-2	9,97	3,93	1-2	10,06	3,89
3-4	10,00	3,91	3-4	9,99	3,95	3-4	10,05	3,90
5-6	10,02	3,99	5-6	9,99	3,94	5-6	10,05	3,92
7-8	9,99	3,90	7-8	10,02	3,94	7-8	10,05	3,95
9-10	10,02	3,91	9-10	10,03	3,95	9-10	10,06	4,00
Média	10,01 ± 0,01	3,93 ± 0,04	Média	10,00 ± 0,02	3,94 ± 0,01	Média	10,05 ± 0,01	3,93 ± 0,04

FC00 PLA + FC	Largura	Altura	FC45 PLA + FC	Largura	Altura	FC90 PLA + FC	Largura	Altura
1-2	9,93	3,93	1-2	9,88	3,93	1-2	9,98	3,91
3-4	9,93	3,92	3-4	9,88	3,92	3-4	9,97	3,95
5-6	9,97	3,92	5-6	9,90	3,92	5-6	9,97	3,90
7-8	9,90	3,90	7-8	9,90	3,93	7-8	9,98	3,92
9-10	9,93	3,92	9-10	9,90	3,93	9-10	9,98	3,96
Média	9,93 ± 0,02	3,92 ± 0,01	Média	9,89 ± 0,01	3,93 ± 0,01	Média	9,98 ± 0,01	3,93 ± 0,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os corpos de prova, (tração, impacto e flexão) apresentaram um desvio padrão das médias muito bom (0,04 mm) para as dimensões do corpo, que era de 10 mm e 4 mm (a dimensão da região onde o ensaio foi realizado), o que mostra que o processo de produção foi bom e uma variação média menor do que 0,15 mm mostra que todos os corpos estão bem dimensionados e prontos para os ensaios. Os corpos de prova foram marcados com os códigos 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 e 9-10 para a identificação quando houvesse a fratura e os corpos fossem separados em duas partes, na Tabela 5 é mostrado a média das medições.

Tabela 5 – Valores médios das medições dos corpos de prova.

PLA		
Média	10,12 ± 0,04	3,97 ± 0,03
PLA + Grafeno		
Média	10,02 ± 0,04	3,97 ± 0,03
PLA + Fibra de Carbono		
Média	9,94 ± 0,03	3,92 ± 0,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Começando com o ensaio de Tração, os corpos de prova foram preparados para a realização do ensaio, mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Corpos de prova com orientação 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os corpos foram testados no equipamento, onde o corpo de prova tinha suas extremidades fixadas no equipamento, o equipamento então começaria a tracionar o corpo de prova, mantendo uma velocidade constante e reportando a força necessária para haver o deslocamento, até o momento em que houvesse a fratura do corpo de prova, a Figura 15 mostra o momento pós ensaio.

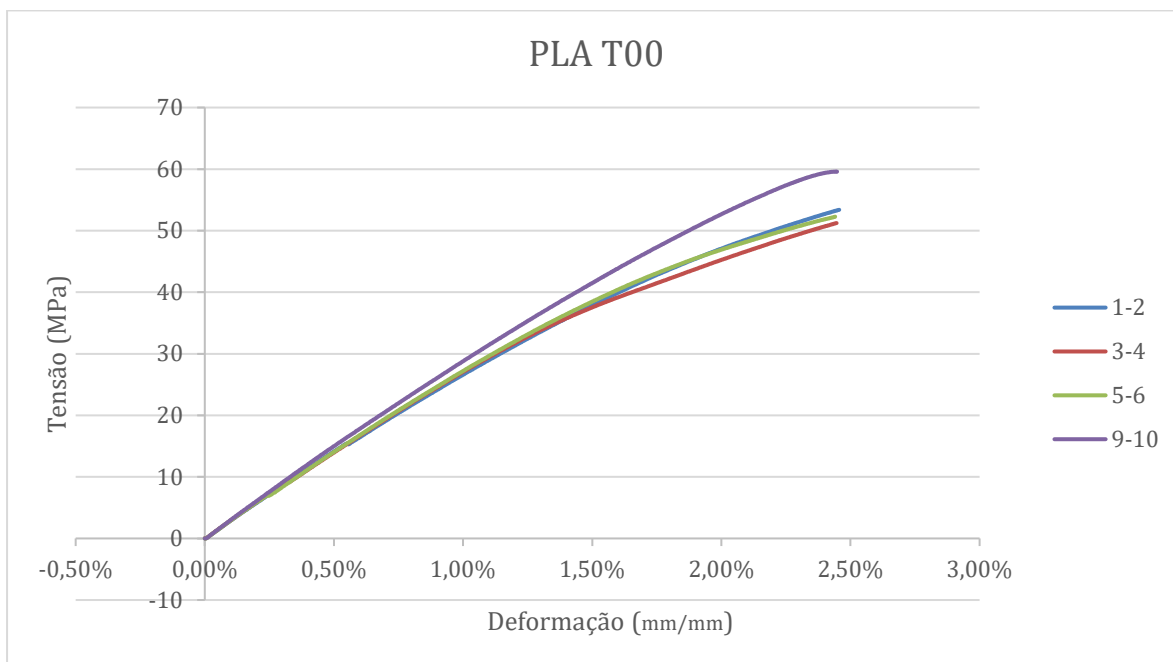
Figura 15 – Corpos de prova com orientação 90° após a fratura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com o ensaio realizado, foram obtidos os resultados da Tensão máxima (MPa), módulo de Young (MPa) e quanto o corpo de prova teve de alongamento. Para o primeiro ensaio, do PLA sem aditivos em 00°, ocorreu um defeito durante o ensaio e o corpo de prova 7-8 se desprende do equipamento durante o ensaio, por esse motivo o seu valor foi desconsiderado, é observado na Figura 16 o gráfico e a Tabela 6 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos quatro corpos de prova para PLA sem aditivos em 00°.

Figura 16 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA sem aditivos em 00°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

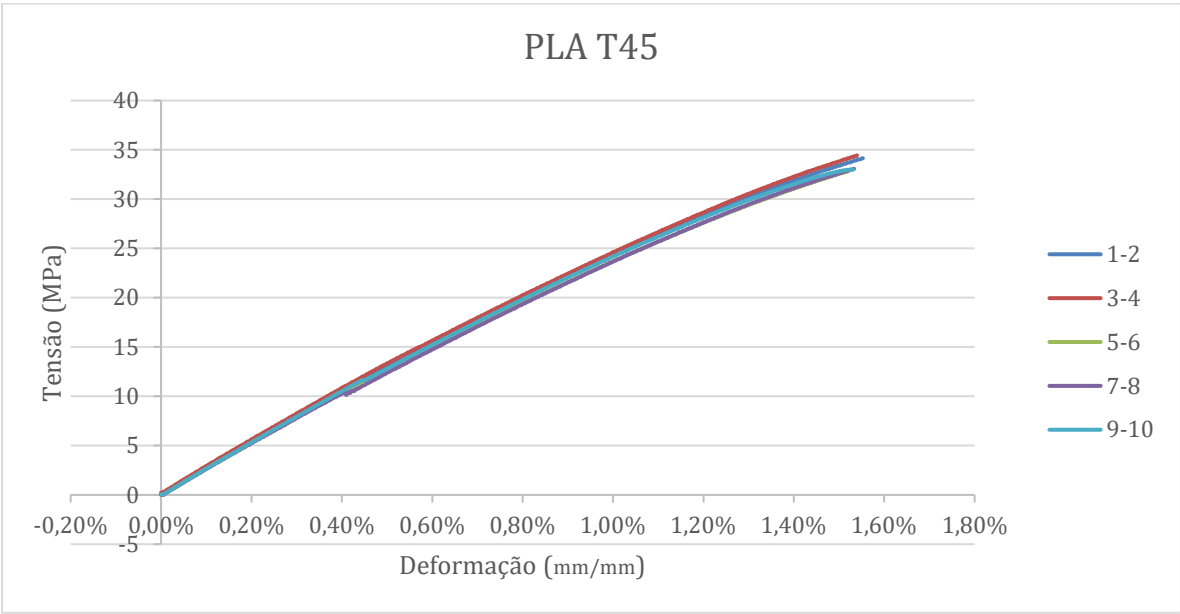
Tabela 6 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA sem aditivos em 00°.

Amostra	Força Máxima (N)	Posição Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	2214,43	2,98	55,98	2,76	3032,05
CDP3-4	2299,02	3,65	58,07	3,38	3099,06
CDP5-6	2184,89	3,18	54,96	2,94	3026,86
CDP7-8	-	-	-	-	-
CDP9-10	2383,90	2,70	59,55	2,50	3091,68
Valor Mínimo	2184,89	2,70	54,96	2,50	3026,86
Valor Máximo	2383,90	3,65	59,55	3,38	3099,06
Valor Médio	2270,56 ± 89,72	3,13 ± 0,40	57,14 ± 2,06	2,89 ± 0,37	3062,41 ± 38,23

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 17 o gráfico e a Tabela 7 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA sem aditivos em 45°.

Figura 17 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA sem aditivos em 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

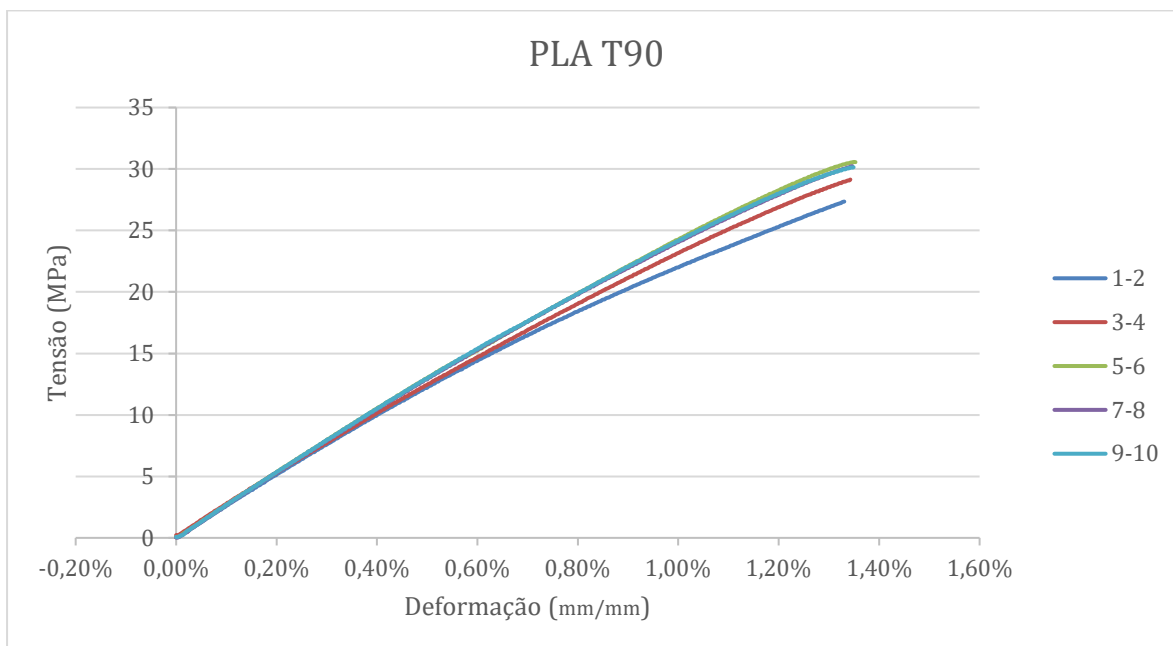
Tabela 7 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA sem aditivos em 45°.

Amostra	Força Máxima (N)		Posição Máxima (mm)		Tensão Máxima (MPa)		Alongamento (%)		Módulo de Young (MPa)	
CDP1-2	1514,51		2,09		37,38		1,93		2697,01	
CDP3-4	1582,45		2,26		39,82		2,10		2856,69	
CDP5-6	1482,65		2,14		35,74		1,98		2646,50	
CDP7-8	1451,71		2,16		36,71		2,00		2674,33	
CDP9-10	1320,25		1,68		32,57		1,55		2759,57	
Valor Mínimo	1320,25		1,68		32,57		1,55		2646,50	
Valor Máximo	1582,45		2,26		39,82		2,10		2856,69	
Valor Médio	1431,46	±	112,43	1,98 ± 0,28	35,48	± 3,06	1,84	± 0,26	2716,72	± 90,95

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 18 o gráfico e a Tabela 8 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA sem aditivos em 90°.

Figura 18 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA sem aditivos em 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

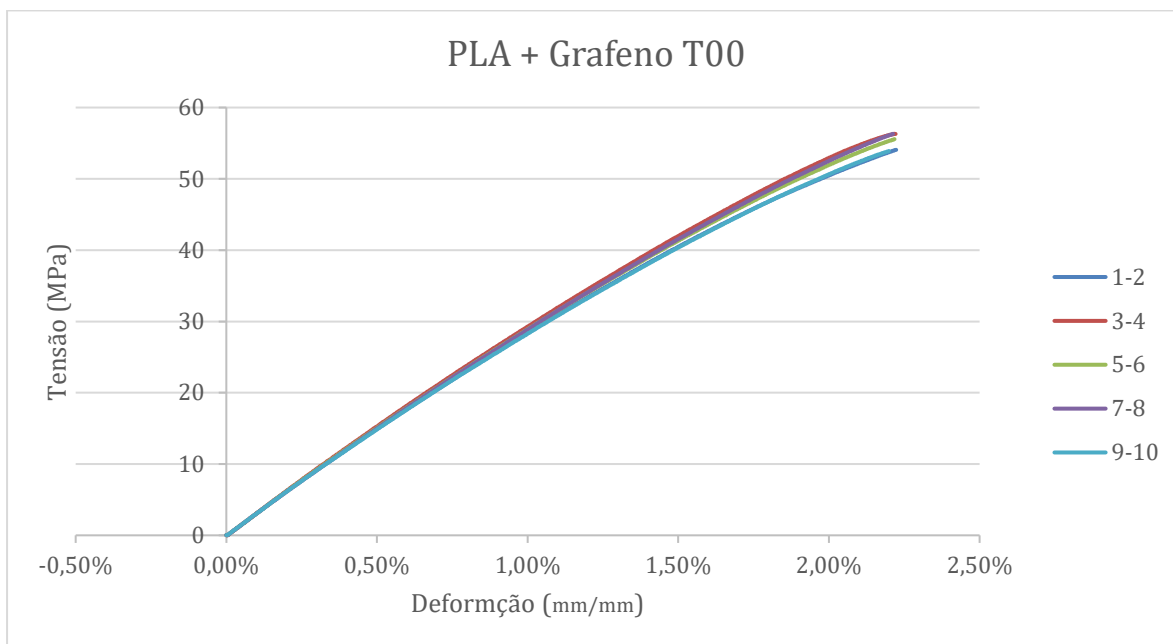
Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA sem aditivos em 90°.

Amostra	Força Máxima (N)	Posição Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	1242,30	1,83	31,70	1,69	2743,49
CDP3-4	1209,90	1,56	30,39	1,45	2762,32
CDP5-6	1222,82	1,46	30,98	1,36	2808,15
CDP7-8	1242,27	1,55	31,05	1,43	2785,16
CDP9-10	1205,72	1,47	29,86	1,36	2804,61
Valor Mínimo	1205,72	1,46	29,86	1,36	2743,49
Valor Máximo	1242,30	1,83	31,70	1,69	2808,15
Valor Médio	1217,29 ± 15,63	1,50 ± 0,05	30,43 ± 0,58	1,39 ± 0,05	2780,75 ± 27,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 19 o gráfico e a Tabela 9 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com grafeno em 00°.

Figura 19 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com grafeno em 00°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

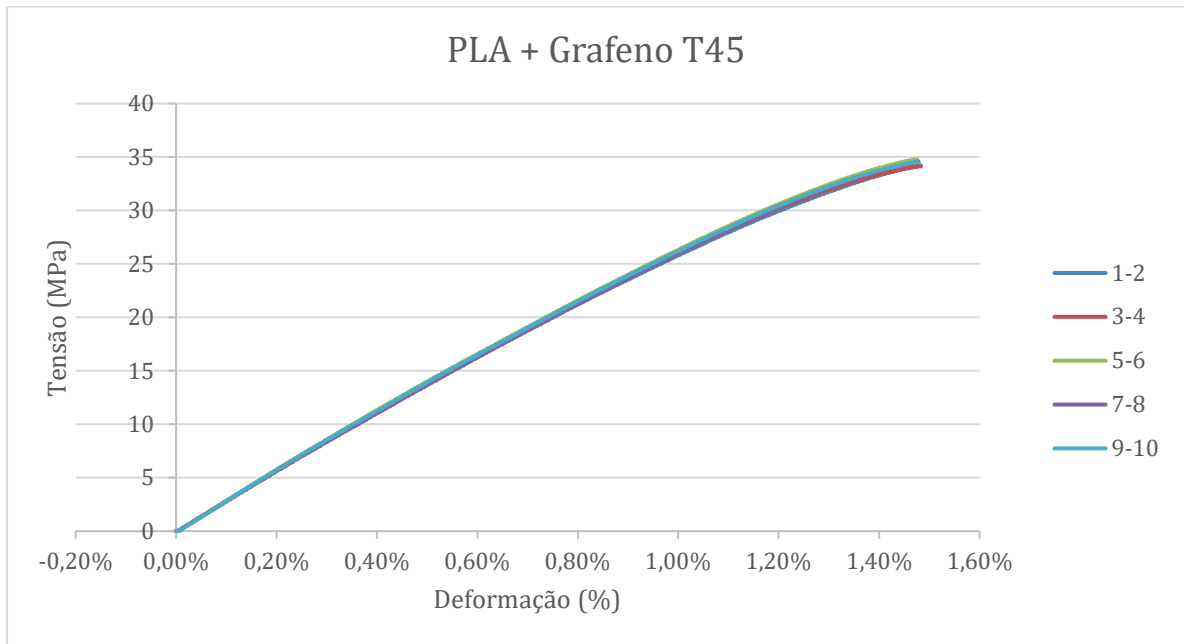
Tabela 9 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com grafeno em 00°.

Amostra	Força Máxima (N)	Posição Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	2241,25	2,58	56,00	2,39	3168,50
CDP3-4	2252,68	2,40	56,32	2,23	3168,94
CDP5-6	2270,32	2,57	57,63	2,38	3218,04
CDP7-8	2315,35	2,54	58,20	2,35	3150,00
CDP9-10	2198,36	2,51	56,15	2,32	3198,02
Valor Mínimo	2198,36	2,40	56,00	2,23	3150,00
Valor Máximo	2315,35	2,58	58,20	2,39	3218,04
Valor Médio	2247,01 ± 49,95	2,49 ± 0,08	56,86 ± 0,99	2,30 ± 0,07	3177,00 ± 30,20

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 20 o gráfico e a Tabela 10 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com grafeno em 45°.

Figura 20 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com grafeno em 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

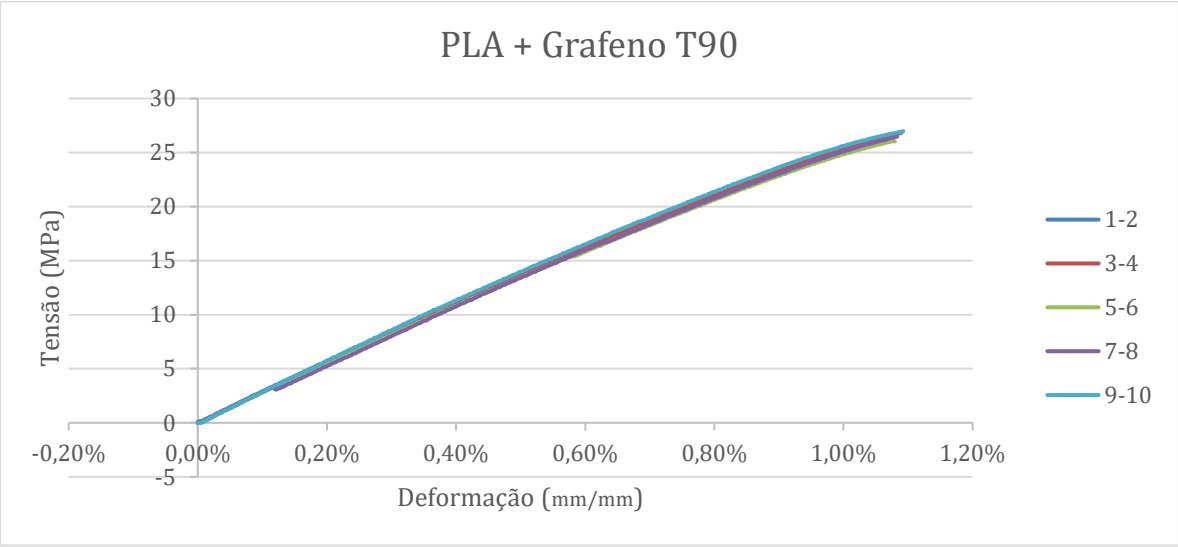
Tabela 10 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com grafeno em 45°.

Amostra	Força Máxima (N)	Posição Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	1386,70	1,67	34,50	1,55	2926,69
CDP3-4	1374,18	1,66	35,09	1,53	2968,86
CDP5-6	1392,14	1,60	35,23	1,48	3054,48
CDP7-8	1397,33	1,65	35,13	1,53	2906,01
CDP9-10	1382,56	1,60	34,70	1,48	3055,81
Valor Mínimo	1374,18	1,60	34,50	1,48	2906,01
Valor Máximo	1397,33	1,67	35,23	1,55	3055,81
Valor Médio	1384,08 ± 10,48	1,62 ± 0,03	34,93 ± 0,31	1,50 ± 0,03	2978,24 ± 74,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 21 o gráfico e a Tabela 11 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com grafeno em 90°.

Figura 21 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com grafeno em 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

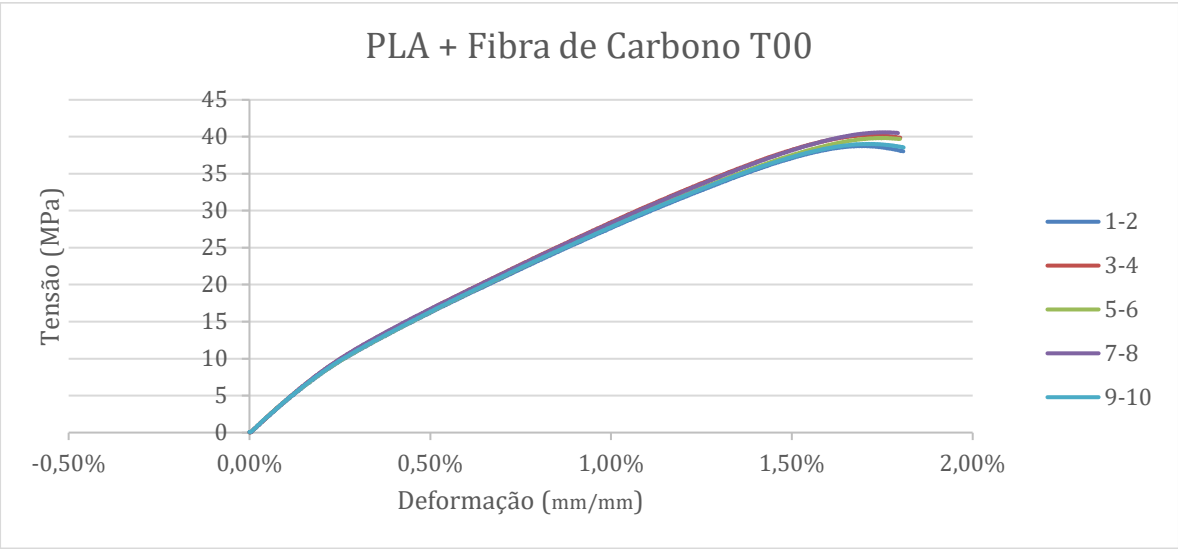
Tabela 11 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com grafeno em 90°.

Amostra	Força Máxima (N)		Posição Máxima (mm)		Tensão Máxima (MPa)		Alongamento (%)		Módulo de Young (MPa)	
CDP1-2	1085,53		1,23		27,82		1,13		2980,70	
CDP3-4	1094,39		1,23		27,70		1,14		3005,21	
CDP5-6	1041,73		1,17		26,39		1,08		2870,55	
CDP7-8	1078,71		1,21		27,16		1,12		2952,39	
CDP9-10	1088,51		1,21		27,32		1,12		3027,61	
Valor Mínimo	1041,73		1,17		26,39		1,08		2870,55	
Valor Máximo	1094,39		1,23		27,82		1,14		3027,61	
Valor Médio	1069,01	± 25,53	1,20	± 0,03	26,99	± 0,58	1,11	± 0,03	2945,26	± 73,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 22 o gráfico e a Tabela 12 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 00°.

Figura 22 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 00°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

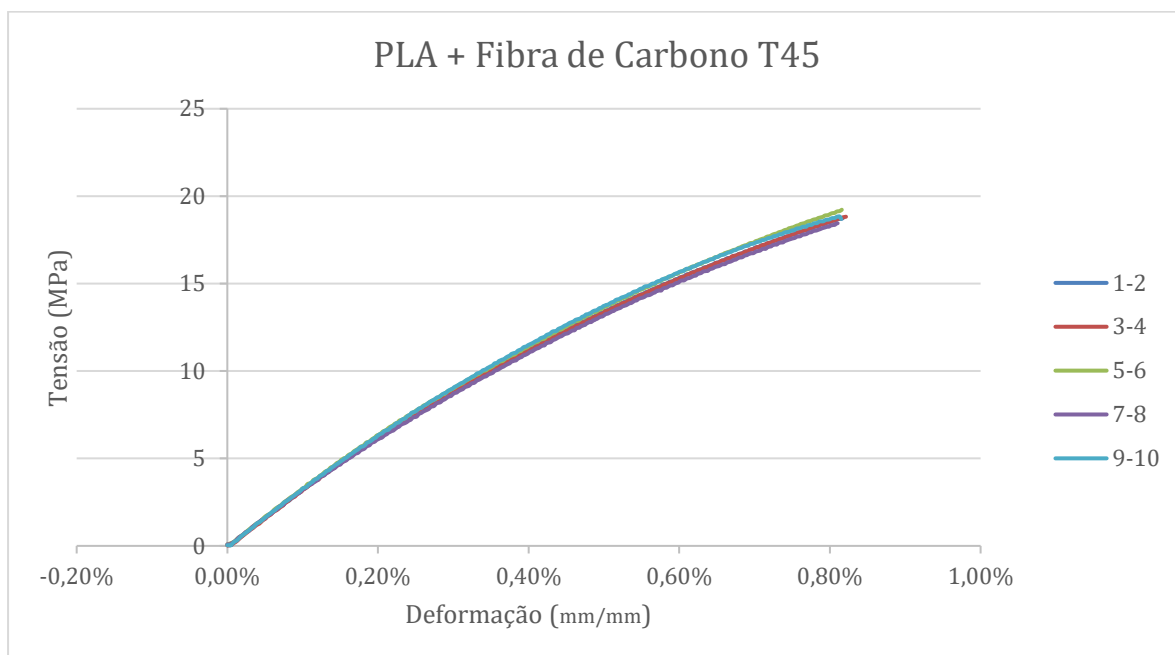
Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 00°.

Amostra	Força Máxima (N)		Posição Máxima (mm)		Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)		Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	1550,22		10,52		39,62	9,74		4215,99
CDP3-4	1609,01		7,27		41,06	6,73		4387,83
CDP5-6	1593,41		12,81		40,62	11,86		4474,50
CDP7-8	1624,07		9,19		41,83	17,77		4501,68
CDP9-10	1561,29		10,25		10,01	9,49		4359,16
Valor Mínimo	1550,22		7,27		10,01	6,73		4215,99
Valor Máximo	1624,07		12,81		41,83	17,77		4501,68
Valor Médio	1587,60	± 31,27	9,36	± 2,32	28,71	± 17,07	10,52	± 4,59 4387,83 ± 112,72

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 23 o gráfico e a Tabela 13 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 45°.

Figura 23 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

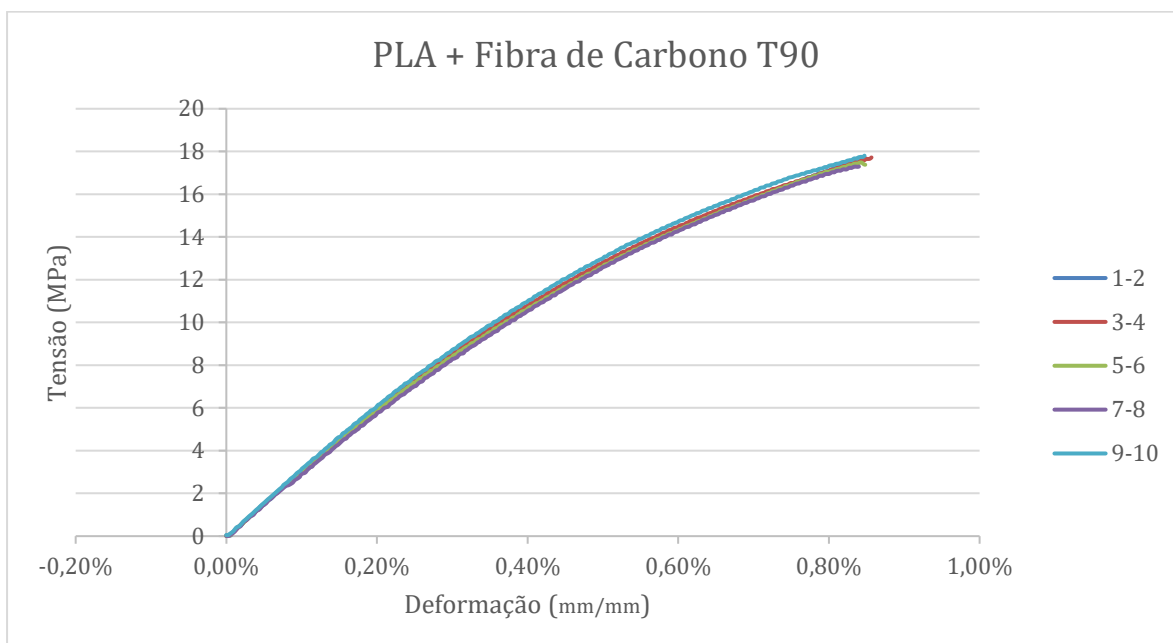
Tabela 13 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 45°.

Amostra	Força Máxima (N)	Posição Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	803,13	1,07	20,74	0,99	3459,41
CDP3-4	825,34	1,07	21,23	0,99	3432,18
CDP5-6	866,16	1,12	22,38	1,03	3245,62
CDP7-8	776,38	0,97	19,98	0,90	3364,73
CDP9-10	753,63	0,88	19,27	0,82	3321,73
Valor Mínimo	753,63	0,88	19,27	0,82	3245,62
Valor Máximo	866,16	1,12	22,38	1,03	3459,41
Valor Médio	795,03 ± 49,38	0,98 ± 0,11	20,43 ± 1,35	0,91 ± 0,10	3321,98 ± 80,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É observado na Figura 24 o gráfico e a Tabela 14 com os valores mostrando o resultado do ensaio de tração dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 90°.

Figura 24 – Gráfico Tensão x Deformação para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 14 – Valores obtidos no ensaio de tração para o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 90°.

Amostra	Força Máxima (N)	Posição Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Young (MPa)
CDP1-2	721,84	0,97	19,22	0,90	3211,52
CDP3-4	729,39	1,05	18,96	0,97	3293,18
CDP5-6	699,48	0,92	18,25	0,85	3391,32
CDP7-8	699,52	0,97	18,02	0,90	3001,11
CDP9-10	747,75	1,13	19,11	1,04	3160,48
Valor Mínimo	699,48	0,92	18,02	0,85	3001,11
Valor Máximo	747,75	1,13	19,22	1,04	3391,32
Valor Médio	715,12 ± 22,36	1,00 ± 0,09	18,47 ± 0,53	0,92 ± 0,08	3169,44 ± 174,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A orientação de impressão teve uma influência direta na tensão máxima que o corpo de prova conseguiu suportar, para os três materiais o corpo de prova com a orientação em 00° (longitudinal) apresentou a maior tensão máxima média, o corpo de prova com orientação de 45° apresentou uma queda significativa na tensão máxima média e, o corpo com orientação de 90° (transversal) apresentou a menor tensão máxima média, isso ocorreu para os três materiais.

Avaliando o material do corpo de prova, o PLA sem aditivos obteve a maior tensão máxima média nas três orientações, o corpo de prova com PLA aditivado com grafeno, obteve resultados muito próximos do PLA sem aditivos, porém, ainda foi um valor menor,

isso demonstra que o grafeno pode não estar tendo efeito algum nas propriedades mecânicas do PLA, o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua foi o que obteve o menor valor de tensão máxima média, o valor foi significativamente menor do que os outros modelos, isso demonstra que a fibra de carbono descontínua pode estar tendo um efeito negativo no PLA, durante o ensaio no corpo de prova longitudinal (00°) o seu alongamento foi muito superior ao dos outros materiais, o que mostra que o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua pode ter seu uso em um cenário específico, com a Tabela 15 mostrando os valores obtidos para cada corpo de prova.

Tabela 15 – Valores obtidos em todos os ensaios de tração.

PLA								
Tração 00°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tração 45°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tração 90°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1-2	55,98	3032,05	1-2	37,38	2697,01	1-2	31,70	2743,49
3-4	58,07	3099,06	3-4	39,82	2856,69	3-4	30,39	2762,32
5-6	54,96	3026,86	5-6	35,74	2646,50	5-6	30,98	2808,15
7-8	-	-	7-8	36,71	2674,33	7-8	31,05	2785,16
9-10	59,55	3091,68	9-10	32,57	2759,57	9-10	29,86	2804,61
Valor médio	57,14 ± 2,06	3062,41 ± 38,23	Valor médio	36,44 ± 2,64	2726,82 ± 83,72	Valor médio	30,80 ± 0,70	2780,75 ± 27,69

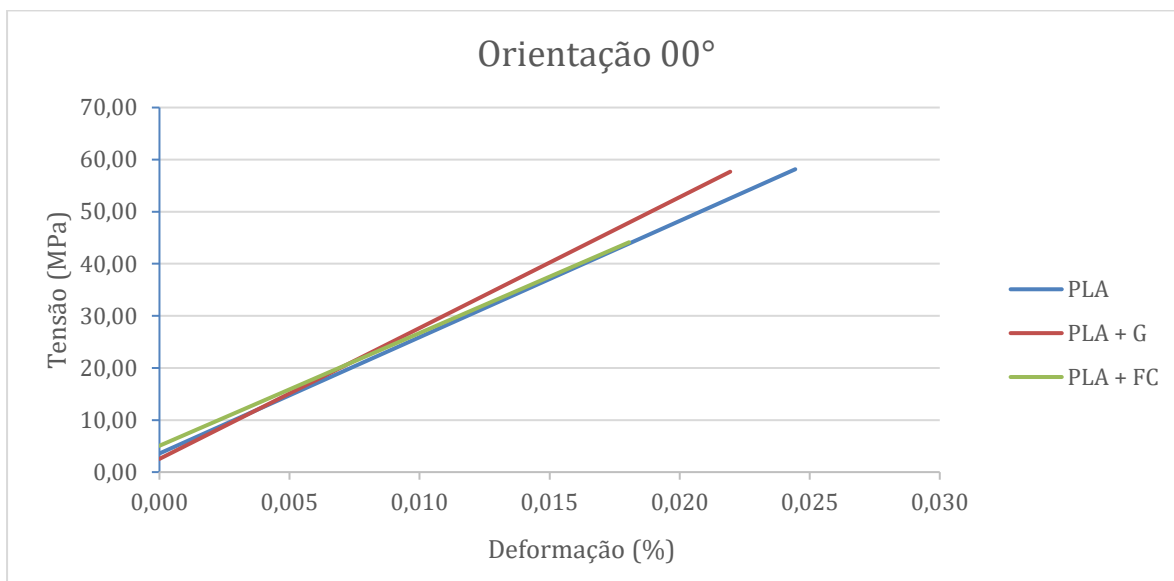
PLA + GRAFENO								
Tração 00°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tração 45°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tração 90°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1-2	56,00	3168,50	1-2	34,50	2926,69	1-2	27,82	2980,70
3-4	56,32	3168,94	3-4	35,09	2968,86	3-4	27,70	3005,21
5-6	57,63	3218,04	5-6	35,23	3054,48	5-6	26,39	2870,55
7-8	58,20	3150,00	7-8	35,13	3054,48	7-8	27,16	2952,39
9-10	56,15	3198,02	9-10	34,70	2906,01	9-10	27,32	3027,61
Valor médio	56,86 ± 0,99	3180,70 ± 27,04	Valor médio	34,93 ± 0,31	2982,11 ± 69,84	Valor médio	27,28 ± 0,57	2967,29 ± 60,91

PLA + FIBRA DE CARBONO DESCONTÍNUA								
Tração 00°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tração 45°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tração 90°	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1-2	39,62	4215,99	1-2	20,74	3459,41	1-2	19,22	3211,52
3-4	41,06	4387,83	3-4	21,23	3432,18	3-4	18,96	3293,18
5-6	40,62	4474,50	5-6	22,38	3245,62	5-6	18,25	3391,32
7-8	41,83	4501,68	7-8	19,98	3364,73	7-8	18,02	3001,11
9-10	10,01	4359,16	9-10	19,27	3321,73	9-10	19,11	3160,48
Valor médio	34,63 ± 13,79	4387,83 ± 112,72	Valor médio	20,72 ± 1,19	3364,73 ± 85,95	Valor médio	18,71 ± 0,54	3211,52 ± 146,52

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

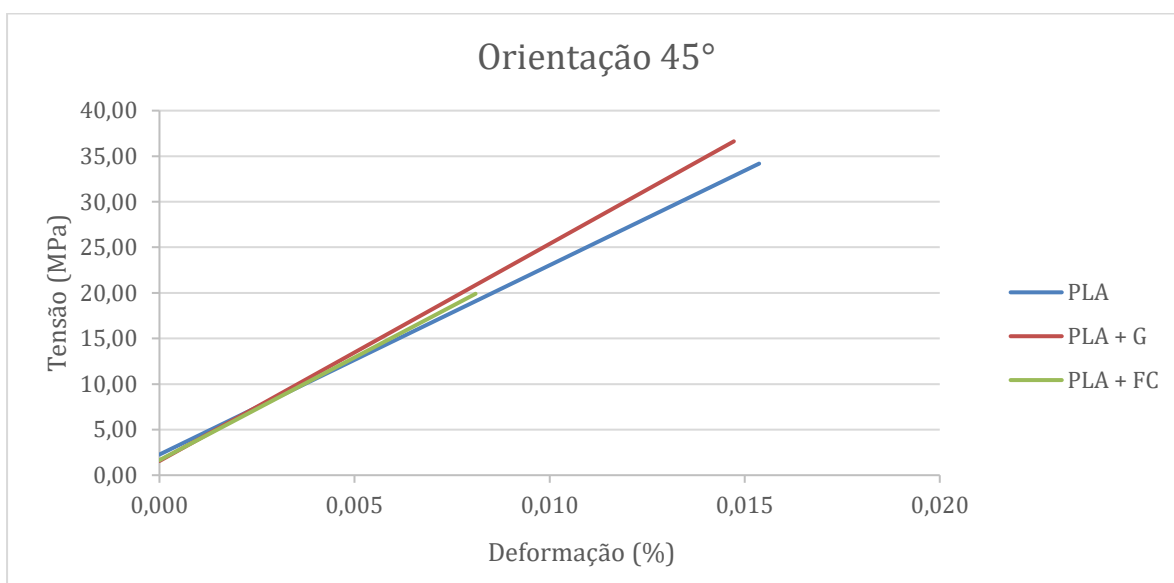
Para que seja realizada uma melhor análise, é possível analisar nas Figuras 25, 26 e 27 os gráficos que mostram a variação na tensão durante o ensaio para os três tipos de filamentos em cada orientação.

Figura 25 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 00°.



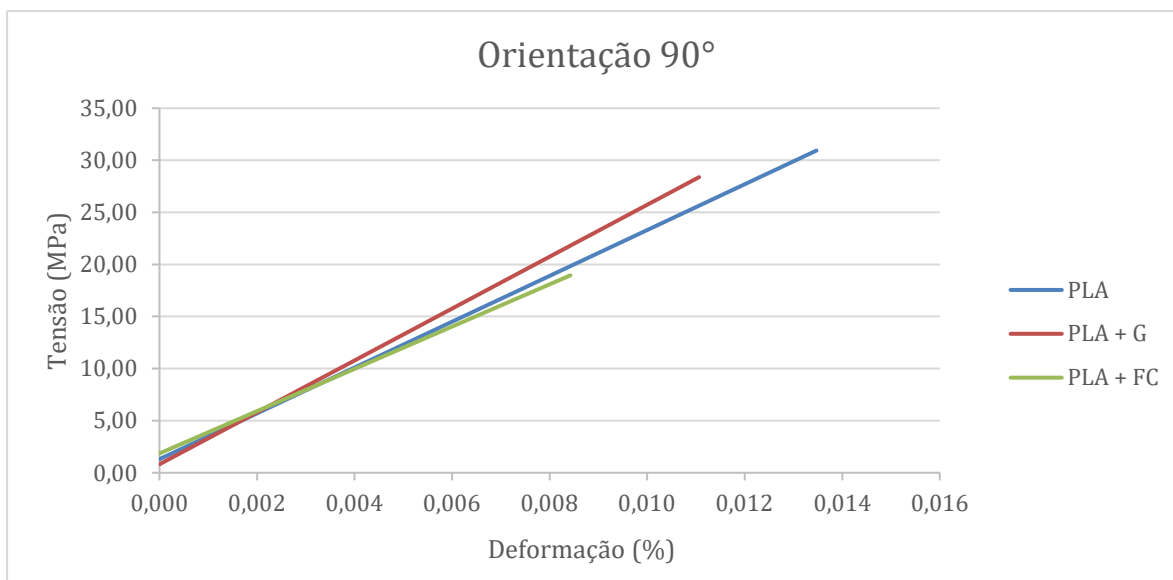
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 26 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 27 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o ensaio de impacto, o sistema de numeração foi o mesmo que os corpos de tração, os corpos de prova foram separados para o ensaio, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Corpos de prova com orientação 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os corpos de prova foram então colocados no equipamento de ensaio com a face onde a numeração foi feita sendo a região de impacto do martelo, após o ensaio os corpos de prova foram partidos em duas partes, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Corpos de prova com orientação 45° após a fratura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com cada corpo de prova sendo ensaiado o valor da energia absorvida no impacto foi sendo anotada, com a Tabela 16 mostrando os valores coletados.

Tabela 16 – Valores coletados no ensaio de impacto.

PLA					
Impacto 00	Joules	Impacto 45	Joules	Impacto 90	Joules
1-2	0,46	1-2	0,42	1-2	0,24
3-4	0,46	3-4	0,46	3-4	0,23
5-6	0,39	5-6	0,42	5-6	0,24
7-8	0,60	7-8	0,42	7-8	0,16
9-10	0,59	9-10	0,42	9-10	0,12
Valor médio	0,50 ± 0,09	Valor médio	0,43 ± 0,02	Valor médio	0,20 ± 0,05

PLA + GRAFENO					
Impacto 00	Joules	Impacto 45	Joules	Impacto 90	Joules
1-2	0,71	1-2	0,35	1-2	0,20
3-4	0,35	3-4	0,33	3-4	0,16
5-6	0,59	5-6	0,34	5-6	0,17
7-8	0,61	7-8	0,29	7-8	0,16
9-10	0,71	9-10	0,30	9-10	0,14
Valor médio	0,59 ± 0,15	Valor médio	0,32 ± 0,03	Valor médio	0,17 ± 0,02

PLA + FIBRA DE CARBONO					
Impacto 00	Joules	Impacto 45	Joules	Impacto 90	Joules
1-2	0,70	1-2	0,25	1-2	0,23
3-4	0,57	3-4	0,26	3-4	0,30
5-6	0,54	5-6	0,24	5-6	0,30
7-8	0,63	7-8	0,23	7-8	0,17
9-10	0,70	9-10	0,22	9-10	0,16
Valor médio	0,63 ± 0,07	Valor médio	0,24 ± 0,02	Valor médio	0,23 ± 0,07

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para que os dados coletados possam ser utilizados de acordo com as normas, utilizaremos os valores de tenacidade, sendo a área de impacto 10 mm x 4 mm.

$$Tenacidade = \frac{E}{A} \quad (1)$$

Sendo 'E' a energia em joules absorvida e 'A' a área de impacto.

$$A = 10 * 10^{-3} * 4 * 10^{-3} = 4 * 10^{-5} m^2 \quad (2)$$

Com a Tabela 17 mostrando os valores já calculados utilizando as Equações 2 e 3.

Tabela 17 – Valores da tenacidade.

PLA					
Impacto 00°	kJ/m ²	Impacto 45°	kJ/m ²	Impacto 90°	kJ/m ²
1-2	11,50	1-2	10,50	1-2	6,00
3-4	11,50	3-4	11,50	3-4	5,75
5-6	9,75	5-6	10,50	5-6	6,00
7-8	15,00	7-8	10,50	7-8	4,00
9-10	14,75	9-10	10,50	9-10	3,00
Valor médio	12,50 ± 2,28	Valor médio	10,70 ± 0,45	Valor médio	4,95 ± 1,37

PLA + GRAFENO					
Impacto 00°	kJ/m ²	Impacto 45°	kJ/m ²	Impacto 90°	kJ/m ²
1-2	17,75	1-2	8,75	1-2	5,00
3-4	8,75	3-4	8,25	3-4	4,00
5-6	14,75	5-6	8,50	5-6	4,25
7-8	15,25	7-8	7,25	7-8	4,00
9-10	17,75	9-10	7,50	9-10	3,50
Valor médio	14,85 ± 3,68	Valor médio	8,05 ± 0,65	Valor médio	4,15 ± 0,55

PLA + FIBRA DE CARBONO					
Impacto 00°	kJ/m ²	Impacto 45°	kJ/m ²	Impacto 90°	kJ/m ²
1-2	17,50	1-2	6,25	1-2	5,75
3-4	14,25	3-4	6,50	3-4	7,50
5-6	13,50	5-6	6,00	5-6	7,50
7-8	15,75	7-8	5,75	7-8	4,25
9-10	17,50	9-10	5,50	9-10	4,00
Valor médio	15,70 ± 1,83	Valor médio	6,00 ± 0,40	Valor médio	5,80 ± 1,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com os dados coletados, pode ser averiguado que para a orientação de 00° o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua obteve o melhor resultado médio, para a orientação de 45° o PLA sem aditivos obteve o melhor resultado médio e, para 90° PLA aditivado com fibra de carbono descontínua obteve o melhor resultado médio, isso demonstra que o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua é mais vantajoso em cenários de impacto.

Para o ensaio de flexão, o sistema de numeração foi o mesmo que os corpos de tração, os corpos de prova foram separados para o ensaio, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Corpos de prova de PLA com orientação 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Durante a realização do ensaio, a força foi aplicada no centro do corpo de prova e, a distância entre os suportes era de 65,4 mm, com os testes realizados, alguns corpos de prova se romperam e outros se deformaram, como a Figura 31 mostra.

Figura 31 – Corpos de prova de PLA com orientação 90° após a fratura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com os dados coletados, foi possível calcular o valor da tensão máxima a partir da Equação 3:

$$\sigma = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2} \quad (3)$$

Sendo:

- σ = tensão máxima (MPa)
- F = força máxima (N)
- L = distância entre apoios (mm)
- b = largura do corpo de prova (mm)
- h = espessura (mm)

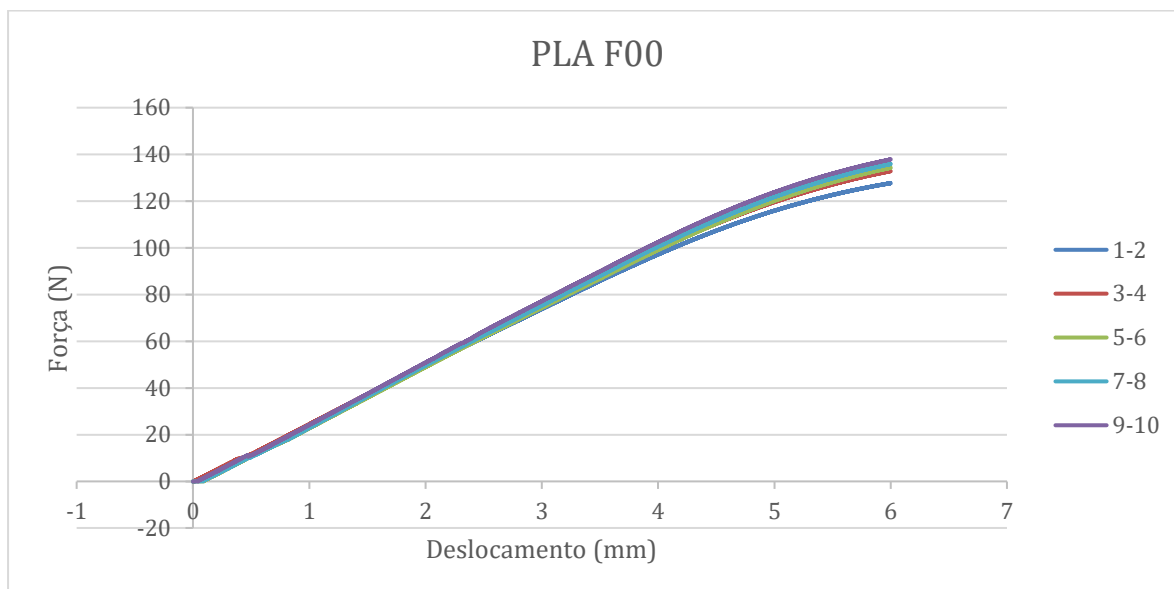
Com os valores do corpo de prova sendo:

- $L = 65,4$ mm (valor medido durante a realização do ensaio)

- $b = 10 \text{ mm}$
- $h = 4 \text{ mm}$

Pode ser visto na Figura 32 o gráfico e a Tabela 18 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA sem aditivos em 00° .

Figura 32 – Curva Força x Deslocamento do PLA sem aditivos para orientação 00° .



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

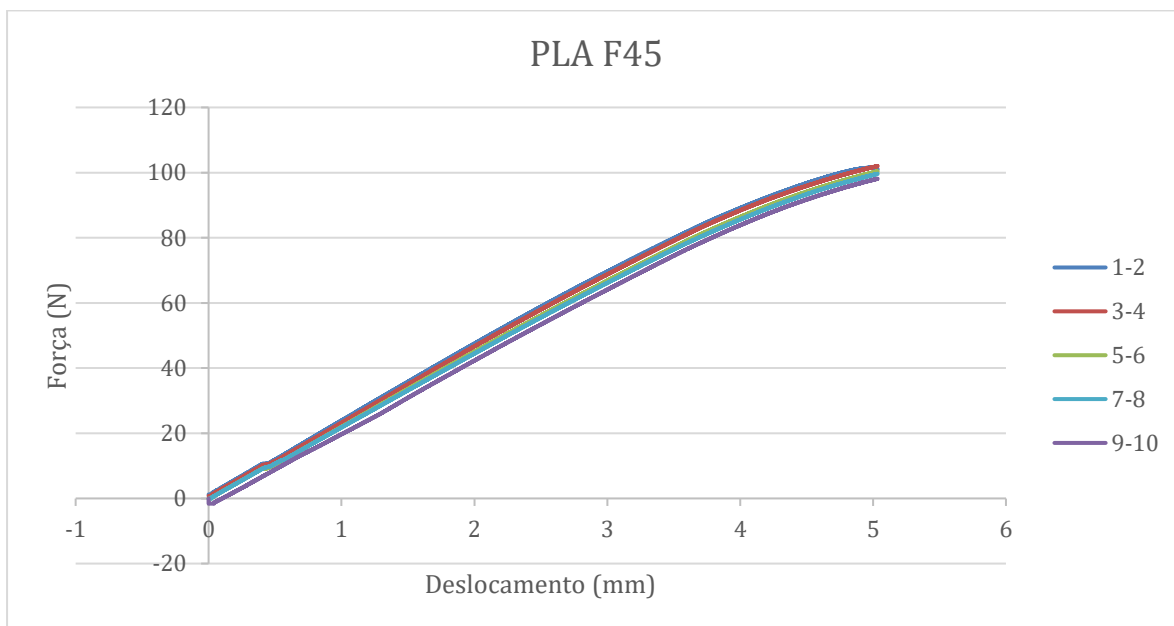
Tabela 18 – Valores obtidos no ensaio para PLA sem aditivos com orientação em 00° .

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	127,70	78,29
3-4	132,85	81,45
5-6	134,28	82,33
7-8	135,91	83,33
9-10	137,87	84,53
Média	133,72 ± 3,85	81,99 ± 2,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 33 o gráfico e a Tabela 19 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA sem aditivos em 45° .

Figura 33 – Curva Força x Deslocamento do PLA sem aditivos para orientação 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

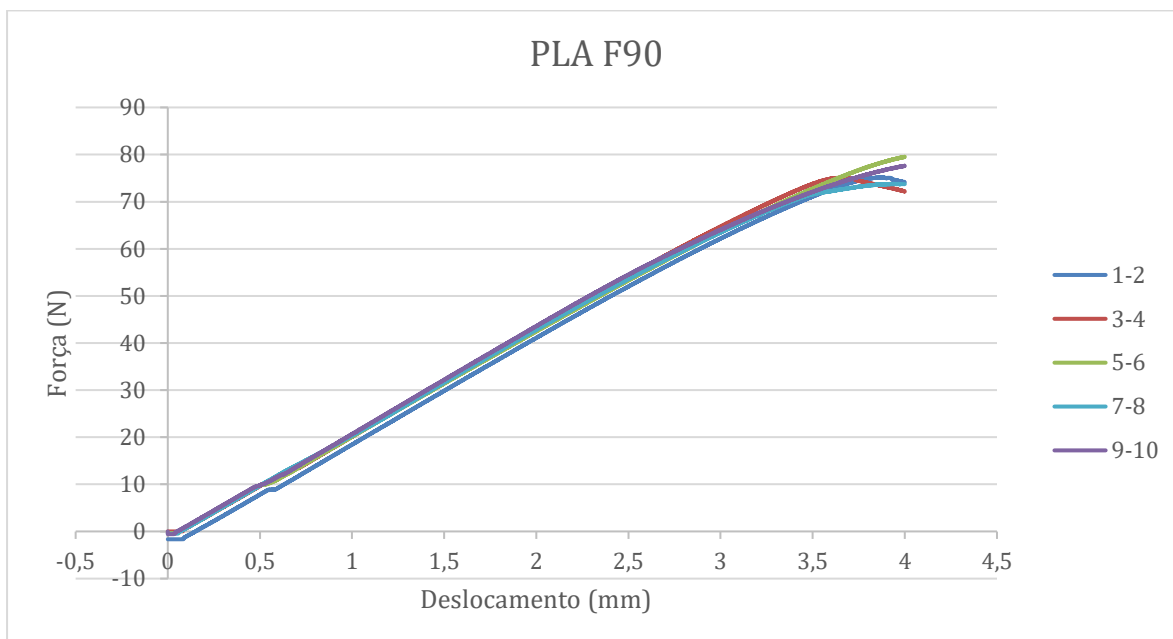
Tabela 19 – Valores obtidos no ensaio para PLA sem aditivos com orientação em 45°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	101,57	62,27
3-4	102,04	62,56
5-6	100,42	61,57
7-8	99,66	61,10
9-10	98,15	60,18
Média	100,37 ± 1,55	61,54 ± 0,95

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 34 o gráfico e a Tabela 20 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA sem aditivos em 90°.

Figura 34 – Curva Força x Deslocamento do PLA sem aditivos para orientação 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

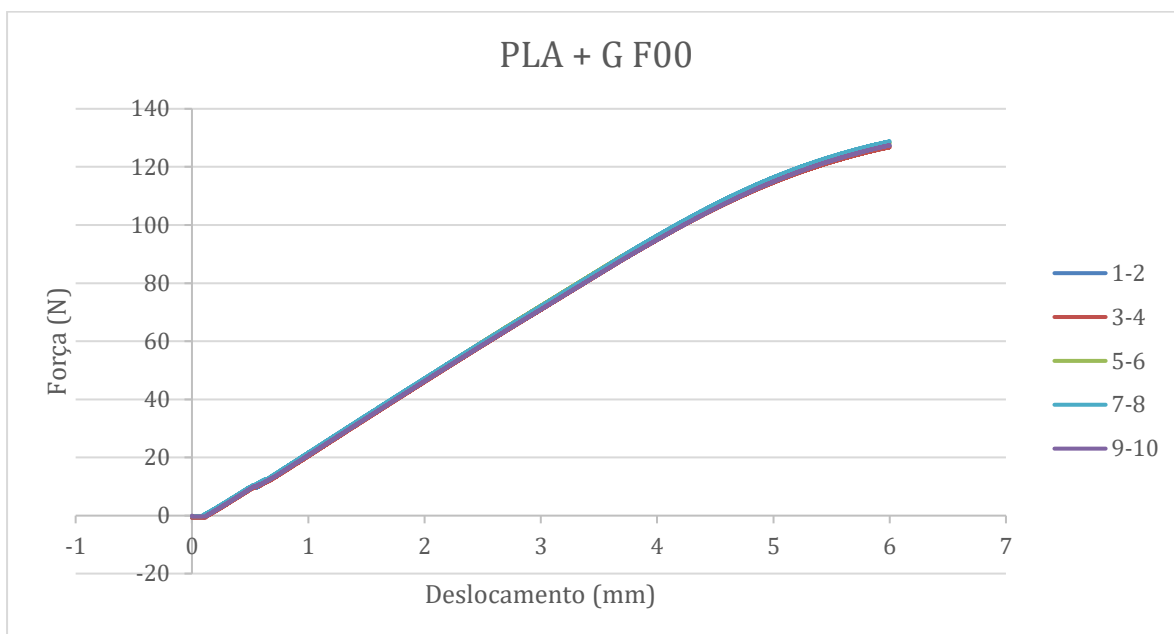
Tabela 20 – Valores obtidos no ensaio para PLA sem aditivos com orientação em 90°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	75,16	46,08
3-4	75,11	46,05
5-6	79,55	48,78
7-8	73,84	45,27
9-10	77,65	47,61
Média	76,26 ± 2,30	46,76 ± 1,41

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 35 o gráfico e a Tabela 21 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com grafeno em 00°.

Figura 35 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com grafeno para orientação 00°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

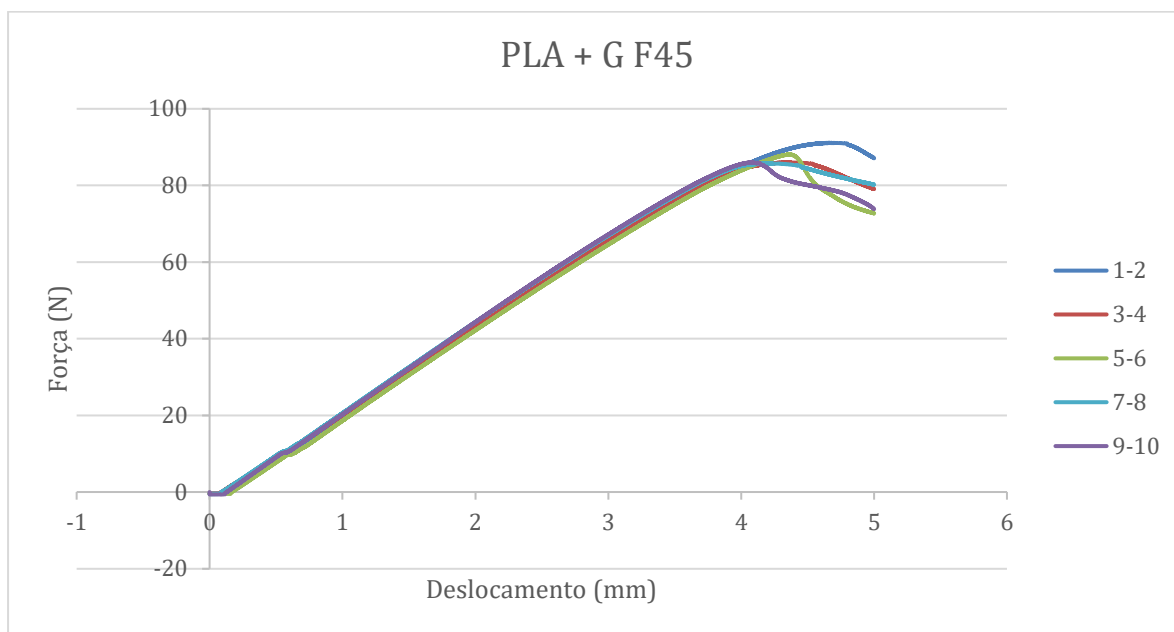
Tabela 21 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com grafeno com orientação em 00°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	127,24	78,02
3-4	126,83	77,76
5-6	128,20	78,60
7-8	128,78	78,96
9-10	127,45	78,14
Média	127,70 ± 0,78	78,30 ± 0,48

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 36 o gráfico e a Tabela 22 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com grafeno em 45°.

Figura 36 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com grafeno para orientação 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

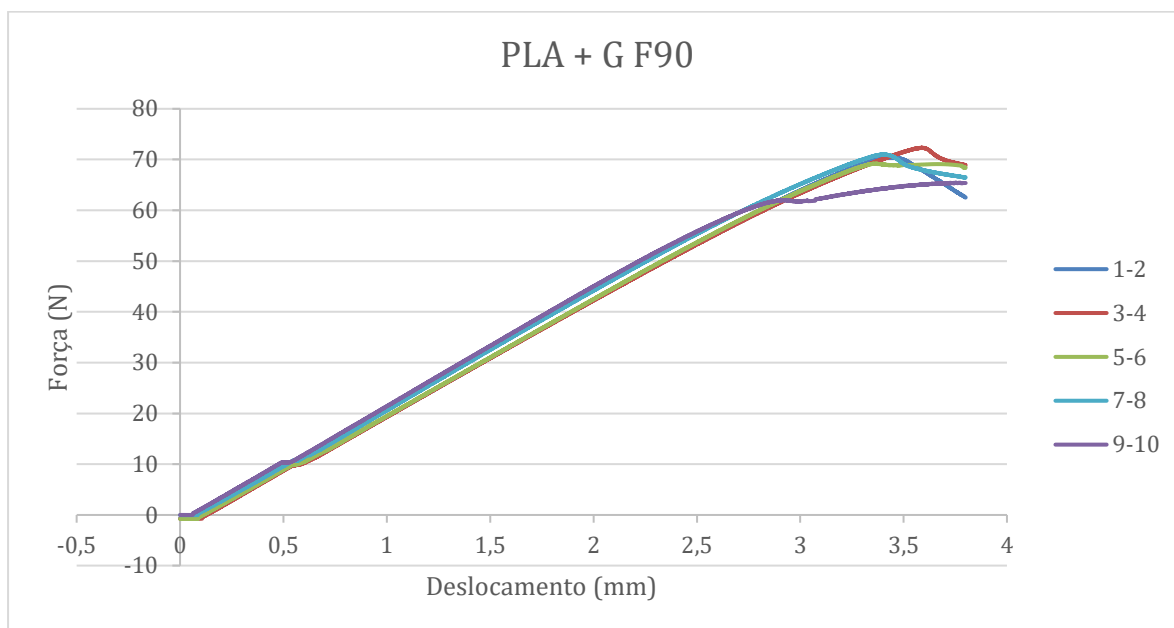
Tabela 22 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com grafeno com orientação em 45°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	91,13	55,87
3-4	86,02	52,74
5-6	88,09	54,01
7-8	85,76	52,58
9-10	85,99	52,72
Média	87,40 ± 2,29	53,58 ± 1,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 37 o gráfico e a Tabela 23 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com grafeno em 90°.

Figura 37 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com grafeno para orientação 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

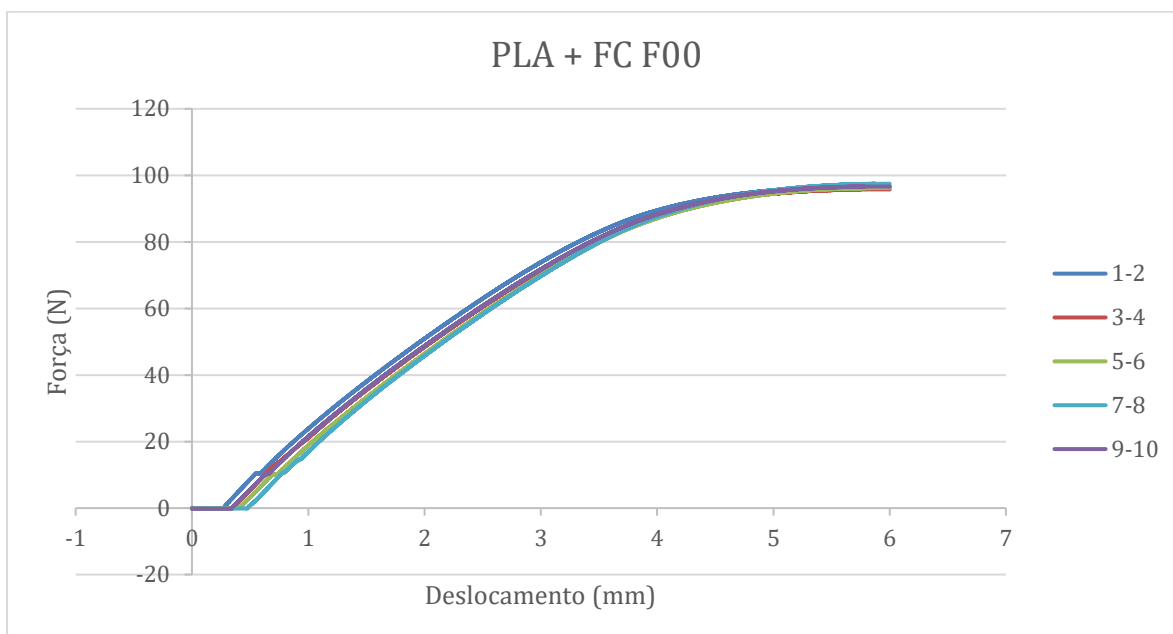
Tabela 23 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com grafeno com orientação em 90°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	70,44	43,19
3-4	72,37	44,37
5-6	69,20	42,43
7-8	71,04	43,55
9-10	65,46	40,14
Média	69,70 ± 2,63	42,74 ± 1,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 38 o gráfico e a Tabela 24 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 00°.

Figura 38 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com fibra de carbono descontínua para orientação 00°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

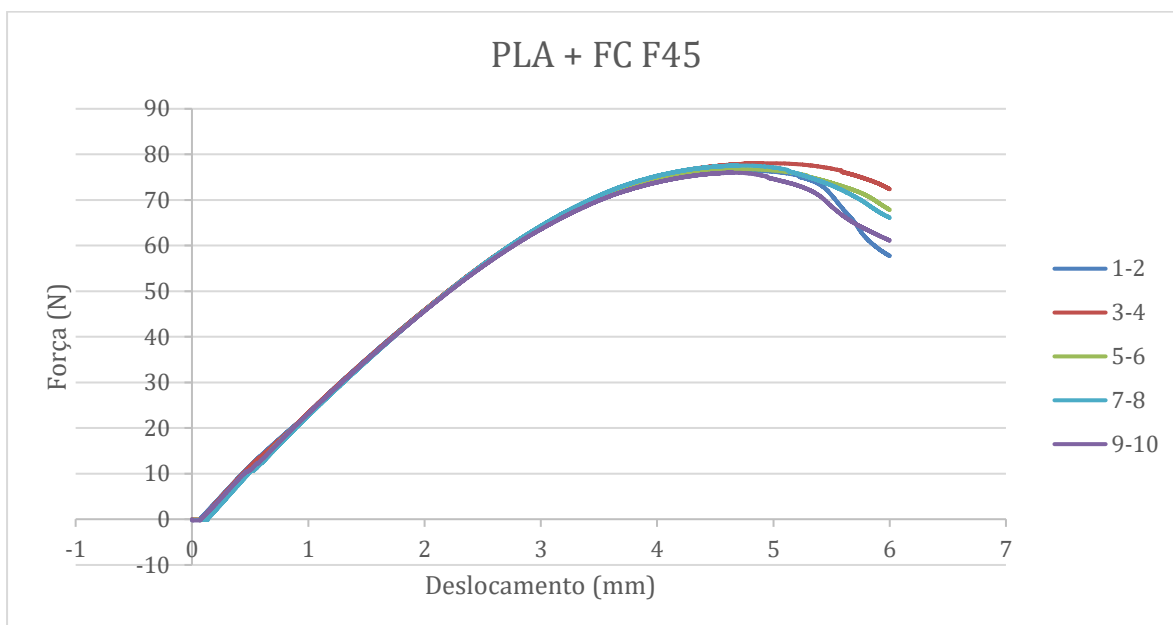
Tabela 24 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua com orientação em 00°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	96,69	59,28
3-4	95,82	58,75
5-6	96,23	59,00
7-8	97,49	59,78
9-10	96,67	59,27
Média	96,58 ± 0,62	59,22 ± 0,38

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 39 o gráfico e a Tabela 25 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 45°.

Figura 39 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com fibra de carbono descontínua para orientação 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

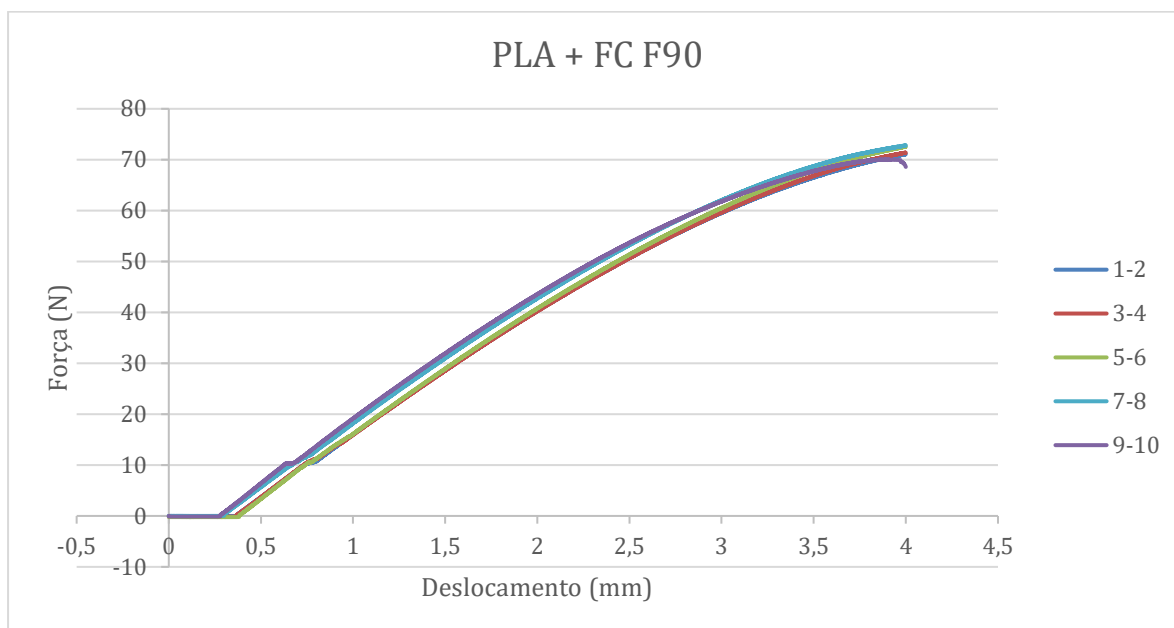
Tabela 25 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua com orientação em 45°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	76,42	46,85
3-4	78,10	47,89
5-6	76,85	47,12
7-8	77,61	47,58
9-10	76,01	46,60
Média	77,00 ± 0,86	47,21 ± 0,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pode ser visto na Figura 40 o gráfico e a Tabela 26 com os valores mostrando o resultado do ensaio de flexão dos cinco corpos de prova para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua em 90°.

Figura 40 – Curva Força x Deslocamento do PLA aditivado com fibra de carbono descontínua para orientação 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 26 – Valores obtidos no ensaio para PLA aditivado com fibra de carbono descontínua com orientação em 90°.

CDP	Máxima Força (N)	Máxima Tensão (MPa)
1-2	71,11	43,60
3-4	71,40	43,78
5-6	72,57	44,50
7-8	72,82	44,65
9-10	70,04	42,94
Média	71,59 ± 1,13	43,89 ± 0,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a Tabela 27 mostrando os valores obtidos para cada corpo de prova.

Tabela 27 – Valores obtidos em todos os ensaios de flexão.

PLA					
Tração 00°	Tensão Máxima (MPa)	Tração 45°	Tensão Máxima (MPa)	Tração 90°	Tensão Máxima (MPa)
1-2	78,29	1-2	62,27	1-2	46,08
3-4	81,45	3-4	62,56	3-4	46,05
5-6	82,33	5-6	61,57	5-6	48,78
7-8	83,33	7-8	61,10	7-8	45,27
9-10	84,53	9-10	60,18	9-10	47,61
Valor médio	81,99 ± 2,36	Valor médio	61,54 ± 0,95	Valor médio	46,76 ± 1,41

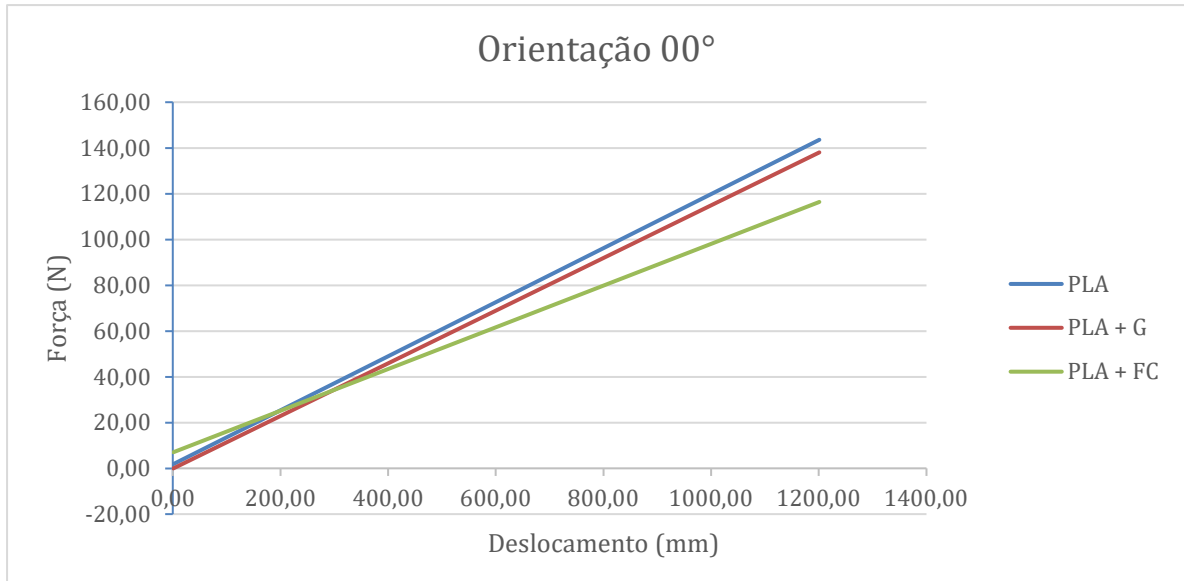
PLA + GRAFENO					
Tração 00°	Tensão Máxima (MPa)	Tração 45°	Tensão Máxima (MPa)	Tração 90°	Tensão Máxima (MPa)
1-2	78,02	1-2	55,87	1-2	43,19
3-4	77,76	3-4	52,74	3-4	44,37
5-6	78,60	5-6	54,01	5-6	42,43
7-8	78,96	7-8	52,58	7-8	43,55
9-10	78,14	9-10	52,72	9-10	40,14
Valor médio	78,30 ± 0,48	Valor médio	53,58 ± 1,40	Valor médio	42,74 ± 1,61

PLA + FIBRA DE CARBONO DESCONTÍNUA					
Tração 00°	Tensão Máxima (MPa)	Tração 45°	Tensão Máxima (MPa)	Tração 90°	Tensão Máxima (MPa)
1-2	59,28	1-2	46,85	1-2	43,60
3-4	58,75	3-4	47,89	3-4	43,78
5-6	59,00	5-6	47,12	5-6	44,50
7-8	59,78	7-8	47,58	7-8	44,65
9-10	59,22	9-10	46,60	9-10	42,94
Valor médio	59,21 ± 0,38	Valor médio	47,21 ± 0,53	Valor médio	43,89 ± 0,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

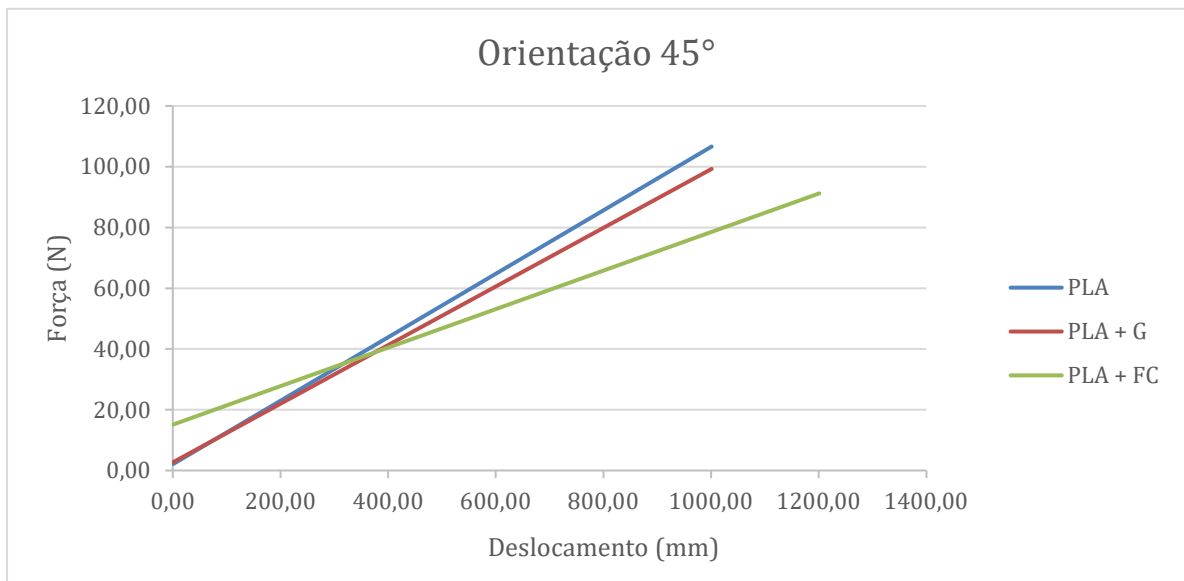
Para que seja realizada uma melhor análise, é possível analisar nas Figuras 41, 42 e 43 os gráficos que mostram a variação na tensão durante o ensaio para os três tipos de filamentos em cada orientação.

Figura 41 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 00°.



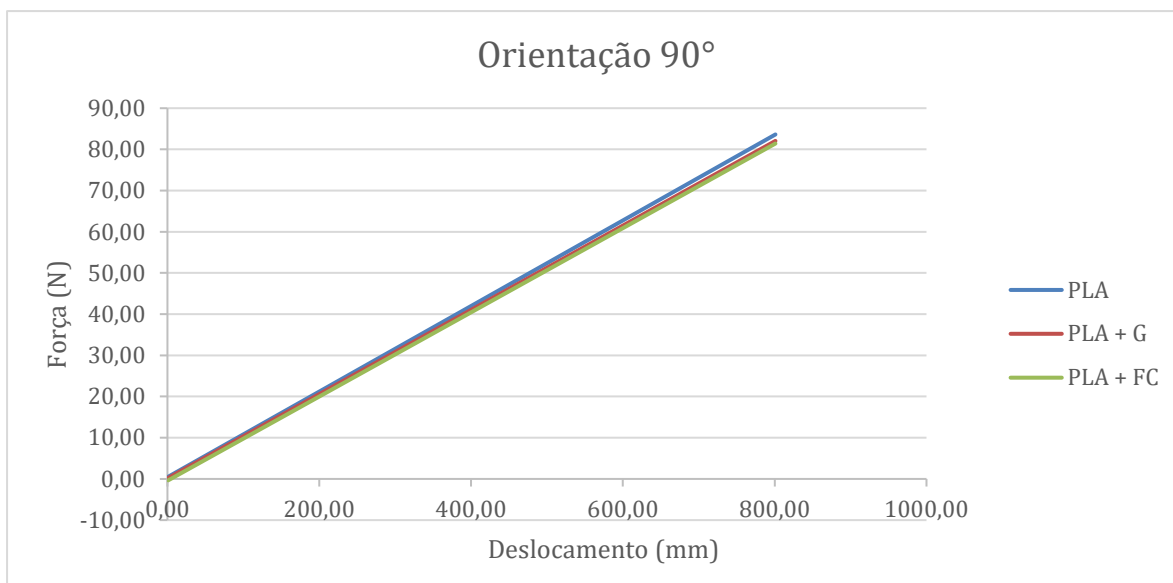
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 42 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 45°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 43 – Gráfico Tensão x Deformação para os três filamentos em orientação de 90°.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com os valores médios obtidos no ensaio, pode ser afirmado que o PLA sem aditivos demonstrou ser o material que obteve a maior tensão máxima, seguido pelo PLA aditivado com grafeno e por último o grafeno aditivado com fibra de carbono descontínua, é possível afirmar que o PLA aditivado com grafeno não possui melhorias em relação ao PLA sem aditivos, e o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua demonstra sofrer um prejuízo nas propriedades mecânicas. A orientação também se mostrou determinante na tensão máxima que o corpo de prova suporta, sendo a orientação em 00° a maior tensão, em 45° em seguida e, por último a orientação em 90°.

5 CONCLUSÃO

Com base nos dados coletados, pode ser afirmado que a orientação de impressão do corpo de prova teve um impacto significativo na tensão máxima que o corpo suporta e na quantidade de energia que ele consegue absorver, sendo o corpo impresso com orientação de 00° se mostrando em média o corpo com as maiores tensões máxima e a maior quantidade de energia absorvida, seguido pela orientação de 45° e por último a orientação de 90° , romper o filamento mostrou requerer mais energia do que romper as camadas de filamento.

Quanto ao material o qual o filamento é feito, no ensaio de tração para a tensão máxima, o PLA sem aditivos se mostrou o melhor, seguido pelo PLA aditivado com grafeno e o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua por último, isso demonstra que a quantidade de grafeno adicionado no filamento não foi o suficiente para causar um impacto nesse ensaio (tendo em vista a proximidade dos valores) e que a adição de fibra de carbono descontínua aumentou muito o módulo de Young do material em relação aos outros dois filamentos, no ensaio de impacto foi analisada a tenacidade dos corpos de prova, o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua apresentou valores maiores do que o PLA sem aditivos e do que o PLA aditivado com grafeno (os valores ficaram próximos, o que nos mostra que há pouca adição de grafeno no PLA) e, no ensaio de flexão o PLA sem aditivos obteve os maiores valores de tensão máxima, seguido pelo PLA aditivado com grafeno (os valores ficaram próximos), e por último o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua.

Pode ser concluído que o filamento de PLA aditivado com grafeno, possui uma baixa concentração de grafeno em sua composição e, que dependendo da situação o PLA sem aditivos é mais recomendado, como os teste de tração (para a tensão máxima) e flexão demonstraram, e que em situações diferentes o PLA aditivado com fibra de carbono descontínua demonstra ser melhor, como o ensaio de impacto e o ensaio de tração (para o módulo de Young) demonstrou, algo que todos os ensaios demonstraram foi a importância da orientação do filamento, que o longitudinal (00°) demonstrou ter os maiores valores em todos os ensaios.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se investigar o desgaste do bico do extrusor causado pelos diferentes tipos de filamento, assim como o efeito dos aditivos sobre a vida útil dos componentes da impressora.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792-12a**: standard terminology for additive manufacturing technologies. West Conshohocken: ASTM International, 2012. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/F2792.htm>. Acesso em: 16 jun. 2025.

CHACÓN, J. M. *et al.* Additive manufacturing: a review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 173, p. 1–16, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817342944>. Acesso em: 16 jun. 2025.

CROUCILLO, A. P. R. *et al.* Avaliação das características mecânicas do PLA, impressa em 3D, para aplicação em próteses em animais de pequeno e médio porte. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 221–225, 2018. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/doi/10.4322/2176-1523.1593>. Acesso em: 16 jun. 2025.

ENGIPRINTERS. **Os tipos de tecnologia de impressão 3D**. São Paulo, [202-?]. Disponível em: <https://engiprinters.com.br/os-tipos-de-tecnologia-de-impressao-3d/>. Acesso em: 16 jun. 2025.

GARCÍA-DOMÍNGUEZ, A. *et al.* Considerations on the applicability of test methods for mechanical characterization of materials manufactured by FDM. **Materials**, Basel, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/1/28>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 178**: plastics: determination of flexural properties. Geneva: ISO, 2010. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/44958.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 179-1**: plastics: determination of Charpy impact properties: Part 1: non-instrumented impact test. Geneva: ISO, 2000. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/29342.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1**: plastics: determination of tensile properties: Part 1: general principles. Geneva: ISO, 2012.

Disponível em: <https://www.iso.org/standard/56093.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-2**: plastics: determination of tensile properties: Part 2: test conditions for moulding and extrusion plastics. Geneva: ISO, 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/56094.html>.

Acesso em: 16 jun. 2025.

JARDINI, A. L. *et al.* **Manufatura aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/livro/manufatura-aditiva-tecnologias-e-aplicacoes-da-impressao-3-d/1831>. Acesso em: 16 jun. 2025.

KRISTIAWAN, R. B. *et al.* A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: filament processing, materials, and printing parameters. **Open Engineering**, Warsaw, v. 11, p. 639–649, 2021. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2021-0063/html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MAQSOOD, N.; RIMAŠAUSKAS, M. Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling. **Composites Part C: Open Access**, Amsterdam, v. 4, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/composites-part-c-open-access>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MAURYA, S. *et al.* Investigation of different parameters of cube printed using PLA by FDM 3D printer. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 64, p. 1217–1222, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/materials-today-proceedings>. Acesso em: 16 jun. 2025.

PELEGRINO, A. N. *et al.* Comparação de direção de impressão 3D em ABS e PLA produzidos pelo método FDM. **Caderno da Graduação**, Curitiba, 2019. Memorial TCC.

RODRÍGUEZ-REYNA, S. L. *et al.* Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing. **Materials Today Communications**, [S.l.], v. 33, p. 104774, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822005391>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SILVA, P. C. *et al.* Manufatura aditiva: revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 11, p. 84502–84515, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/84502>. Acesso em: 16 jun. 2025.

TAMMARO, L. *et al.* Effects of carbon fibre reinforcement on the geometric properties of PETG-based filament using FFF additive manufacturing. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/composites-part-b-engineering>. Acesso em: 16 jun. 2025.

TUCKER, B. *et al.* Size effect in PLA and PETG specimens obtained using FDM. **Polymer Testing**, [S.l.], v. 97, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941820306391>. Acesso em: 16 jun. 2025.

VOLPATO, N. (org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/article-details/manufatura-aditiva-tecnologias-e-aplicaes-da-impresso-3d-25382>. Acesso em: 16 jun. 2025.