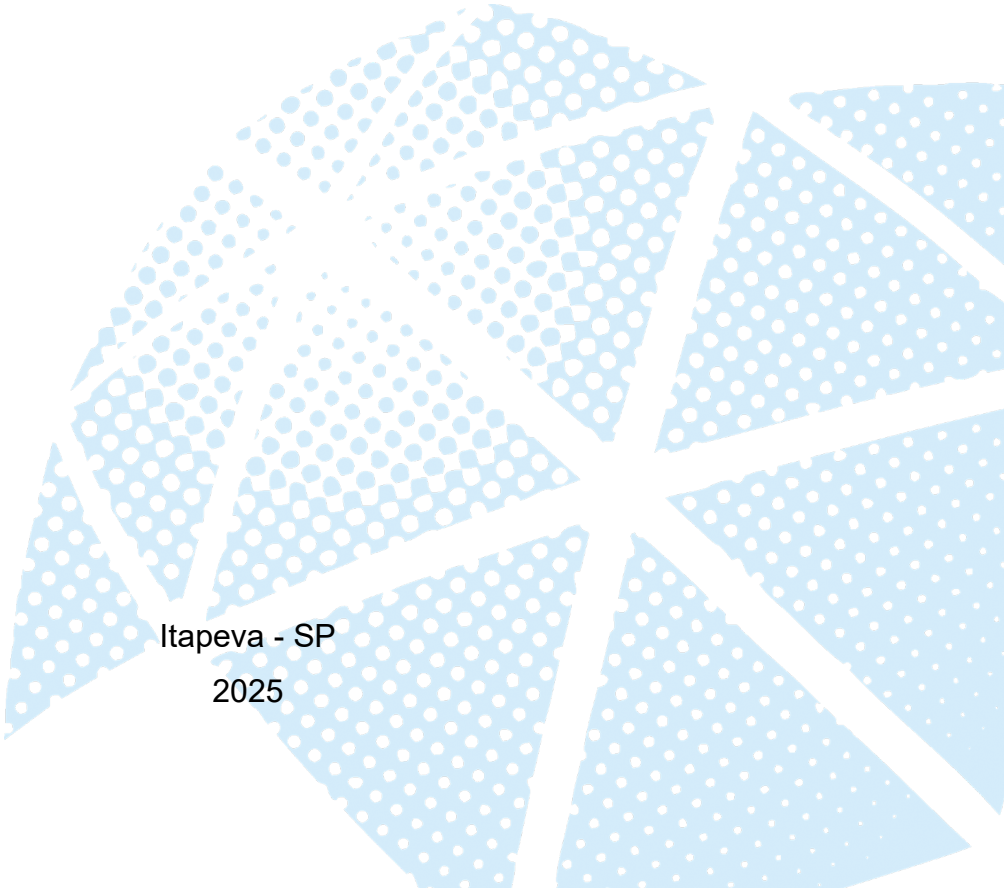


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Ciências e Engenharia - Campus de Itapeva

CAIO HENRIQUE ANTUNES RODRIGUES

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPÓSITOS PLA CF E PLA HT**

Itapeva - SP
2025



CAIO HENRIQUE ANTUNES RODRIGUES

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DE COMPÓSITOS PLA CF E PLA HT**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e
Engenharia, Câmpus de Itapeva, para
obtenção do título de Grau acadêmico
Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Reis
Santos

Itapeva - SP

2025

R696i Rodrigues, Caio Henrique Antunes
Influência do tratamento térmico nas propriedades físico-mecânicas
de compósitos PLA CF e PLA HT / Caio Henrique Antunes
Rodrigues. -- Itapeva, 2025
90 f. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de
Produção) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de
Ciências e Engenharia, Itapeva
Orientador: Washington Luis Reis Santos

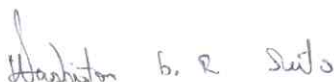
1. Manufatura aditiva. 2. Impressão tridimensional. 3. Compósitos
poliméricos. 4. Poli (ácido lático). 5. Tratamento térmico. I. Título.

CAIO HENRIQUE ANTUNES RODRIGUES

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS
DE COMPÓSITOS PLA CF E PLA HT**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. Washington Luis Reis Santos
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



2º Examinador: Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva



3º Examinador: Prof. Dr. Ricardo Ghantous Cervi
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 29/09/2025.

A minha família pela compreensão, carinho
e apoio incansável.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho e minha trajetória acadêmica.

Primeiramente, agradeço aos meus pais e avós, cujo apoio incondicional foi fundamental ao longo de toda a minha jornada.

Ao meu orientador, Washington, agradeço pela orientação, paciência e incentivo essenciais para o sucesso deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer a todos os professores que tive o privilégio de aprender ao longo de toda graduação. Cada um de vocês contribuiu de maneira única para minha formação, ampliando meu horizonte de conhecimento e influenciando positivamente a pessoa que sou hoje.

Por fim, agradeço à minha namorada, Kethelyn, pelo apoio constante e por estar ao meu lado em todas as etapas deste processo. Sem você, este TCC não teria sido possível.

“A desistência é um atributo dos fracos. Os fortes não desistem, eles vão até o fim para buscar o que desejam.” (Ozires Silva).

RESUMO

A manufatura aditiva, em especial a tecnologia de *Fused Deposition Modeling* (FDM), tem se destacado pela capacidade de produzir peças complexas de forma rápida e econômica. O poli (ácido láctico) (PLA) é amplamente utilizado devido à sua origem renovável e biodegradabilidade; entretanto, apresenta limitações em propriedades mecânicas e térmicas. Neste trabalho, investigou-se a influência do tratamento térmico nas propriedades físico-mecânicas de compósitos de PLA reforçados com fibra de carbono (PLA CF) e PLA aditivado de alta tenacidade (PLA HT), ambos produzidos por FDM. Foram realizados ensaios de tração e impacto, análises dimensionais e microscopia óptica. Os resultados demonstraram que o tratamento térmico promoveu efeitos distintos: no PLA CF, observou-se incremento na resistência à tração (31,37 MPa contra 23,03 MPa sem tratamento), associado à melhor adesão Interlaminar e menor porosidade, mas sem ganhos relevantes em resistência ao impacto. Já no PLA HT, o tratamento elevou a resistência ao impacto (12,65 kJ/m² contra 3,30 kJ/m²), embora tenha reduzido a resistência à tração (18,42 MPa em comparação a 31,55 MPa sem tratamento). As análises microscópicas corroboraram com esses resultados, evidenciando maior homogeneidade estrutural e coesão interlaminar após o recozimento. Conclui-se que o efeito do tratamento térmico depende da composição do material e do tipo de solicitação mecânica, podendo atuar como estratégia eficaz para aplicações específicas que demandem maior absorção de energia ou maior resistência estática.

Palavras-chave: manufatura aditiva; impressão 3D; compósitos poliméricos; poli (ácido láctico); tratamento térmico.

ABSTRACT

Additive manufacturing, particularly Fused Deposition Modeling (FDM), has gained prominence due to its ability to produce complex parts quickly and cost-effectively. Polylactic acid (PLA) is widely used because of its renewable origin and biodegradability; however, it presents limitations in mechanical and thermal performance. This study investigated the influence of heat treatment on the physical-mechanical properties of carbon-fiber-reinforced PLA (PLA CF) and high-toughness PLA (PLA HT), both manufactured via FDM. Tensile and impact tests, dimensional analyses, and optical microscopy were conducted. Results showed that heat treatment had distinct effects: for PLA CF, it increased tensile strength (31.37 MPa compared to 23.03 MPa without treatment), due to improved interlayer adhesion and reduced porosity, but showed no relevant gains in impact strength. Conversely, PLA HT exhibited a remarkable increase in impact resistance (12.65 kJ/m² compared to 3.30 kJ/m²), while its tensile strength decreased (18.42 MPa versus 31.55 MPa without treatment). Microscopy analyses confirmed these findings, revealing enhanced structural homogeneity and interlayer cohesion after annealing. It is concluded that the effect of heat treatment strongly depends on material composition and loading conditions, representing an effective strategy for specific applications requiring either higher energy absorption or enhanced static strength.

Keywords: additive manufacturing; 3D printing; polymer composites; poly(lactic acid); heat treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representações esquemáticas dos copolímeros (a) aleatório, (b) alternado, (c) em bloco, e (d) enxertado. Os dois tipos de unidades repetidas diferentes são designados por círculos azuis e vermelhos.	16
Figura 2 - Comportamento tensão-deformação.	18
Figura 3 - Representação esquemática da estrutura detalhada de uma esferulita.	20
Figura 4 - Representação esquemática de um material compósito.	22
Figura 5 - Processo de fabricação aditivo e subtrativo, respectivamente.	23
Figura 6 - Chuck Hull (à esquerda) junto a um dos protótipos do que viria a ser a impressora 3D.	25
Figura 7 - Casa impressa em 3D pela empresa mineira Cosmos 3D, em exposição na Expo Construção Offsite 2024, em São Paulo.	26
Figura 8 - Um diagrama de desenhos cartesianos e delta.	27
Figura 9 - Processo de impressão <i>Vat Photopolymerization</i> .	27
Figura 10 - Processo de impressão SLS.	28
Figura 11 - Processo de impressão <i>Binder Jetting</i> .	28
Figura 12 - Processo de impressão <i>Material Jetting</i> .	29
Figura 13 - Processo de impressão <i>Sheet Lamination</i> .	30
Figura 14 - Processo de impressão Deposição de Energia Direcionada.	30
Figura 15 - Princípio de funcionamento de uma impressora 3D FDM.	31
Figura 16 - Deposição de termoplástico fundido camada a camada.	32
Figura 17 - Defeito na adesão da primeira camada (<i>warping</i>).	34
Figura 18 - Efeito da redução da altura de camada.	35
Figura 19 - Principais características de raster e contorno.	36
Figura 20 - Falha na camada de topo.	37
Figura 21 - Diferentes tipos de padrões e densidades de preenchimentos.	38
Figura 22 - Filamento PLA HT e PLA CF.	47
Figura 23 - Corpos de Prova em 3D.	47
Figura 24 - Impressora Ender 3 S1 Pro em funcionamento.	48
Figura 25 - Software de Fatiamento PrusaSlicer.	48
Figura 26 - Corpo de prova impresso antes do tratamento térmico.	51
Figura 27 - Copos de prova do pré-teste após tratamento.	52
Figura 28 - Corpos de prova em tratamento térmico na estufa.	52
Figura 29 - Ensaio de tração em execução na máquina EMIC.	54

Figura 30 - Processo de entalhe dos corpos de prova.	54
Figura 31 - Ensaio de impacto tipo Izod com corpo de prova entalhado.	55
Figura 32 - Microscópio Óptico utilizado na análise.	56
Figura 33 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos 4 grupos experimentais.	61
Figura 34 - Teste de Tukey para o módulo de elasticidade dos quatro grupos experimentais.	61
Figura 35 - Análise de variância da resistência dos 4 grupos experimentais.	62
Figura 36 - Teste de Tukey para a resistência dos quatro grupos experimentais.	62
Figura 37 - Resultado da análise de variância dos grupos.	64
Figura 38 - Resultado da comparação múltipla.	65
Figura 39 - Imagem microscópica de fratura no PLA CF.	66
Figura 40 - Vista microscópica da fratura do Ensaio de Impacto.	67
Figura 41 - Vista microscópica da fratura do Ensaio de Tração.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Impressão.	49
Tabela 2 - Média dimensional dos corpos de prova ensaio de tração.	57
Tabela 3 - Média dimensional dos corpos de prova ensaio de Impacto.	58
Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração.	60
Tabela 5 - Resultados do ensaio de impacto.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACI	American Concrete Institute
AM	Additive Manufacturing (Manufatura Aditiva)
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer-Aided Design (Projeto Assistido por Computador)
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
DLP	Digital Light Processing (Processamento Digital de Luz)
DRX	Difração de Raios-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FFF	Fused Filament Fabrication (Fabricação por Filamento Fundido)
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelagem por Deposição Fundida)
GLT	Glued Laminated Timber (Madeira Lamelada Colada)
HT	High Temperature (Alta Temperatura)
ISO	International Organization for Standardization
LOM	Laminated Object Manufacturing (Fabricação por Laminação de Objetos)
MA	Manufatura Aditiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PAN	Poliacrilonitrila
PCL	Policaprolactona
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol-modificado
PLA	Poli(ácido láctico)
PLA CF	Poli(ácido láctico) Carbono Fiber (Fibra de Carbono)
PLA HT	Poli(ácido láctico) High Temperature (Alta Temperatura)
PS	Poliestireno
SLA	Stereolithography (Estereolitografia)
SLM	Selective Laser Melting (Fusão seletiva a laser)
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterização a laser seletiva)
STL	Standard Triangle Language (<i>Linguagem Padrão de Triângulos</i>)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
3.	REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1.	POLÍMEROS	16
3.1.1.	Classes de Polímeros.....	16
3.1.2.	Polímeros Biodegradáveis.....	17
3.1.3.	Propriedades dos Polímeros	17
3.1.4.	Mecanismos de Aumento de Resistência.....	18
3.1.5.	Cristalinidade dos Polímeros	19
3.1.6.	Compósitos - Fibra de Carbono	21
3.2.	MANUFATURA ADITIVA.....	22
3.2.1.	Tecnologias de AM.....	26
3.3.	MATERIAIS DE IMPRESSÃO FDM.....	38
3.3.1.	ABS	39
3.3.2.	PETG.....	39
3.3.3.	Nylon	40
3.3.4.	TPU	41
3.3.5.	PLA (Poli(Ácido Láctico))	42
3.3.6.	PLA HT (Poli(Ácido Láctico) de Alta Temperatura)	43
3.3.7.	PLA CF (com Fibra de Carbono).....	44
4.	MATERIAIS E METÓDIOS	46
4.1.	MATERIAIS UTILIZADOS.....	46
4.2.	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	47
4.3.	TRATAMENTO TÉRMICO	51
4.3.1.	Objetivo e Procedimento	51
4.3.2.	Análise dimensional.....	52
4.4.	ENSAIOS MECÂNICOS	53
4.5.	ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	55
4.6.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1.	INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA ESTABILIDADE DIMENSIONAL.....	57
5.1.1.	Corpos de prova de tração	57

5.1.2.	Corpos de prova de impacto	58
5.2.	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	59
5.3.	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO.....	63
5.4.	AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA.....	65
6.	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS.....	71
	APÊNDICES	87

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), especialmente os processos baseados em extrusão de material — como o *Fused Deposition Modeling* (FDM) — consolidou-se como rota tecnológica estratégica para a produção de geometrias complexas, prototipagem rápida e customização em pequena escala, com redução de custos e prazos (Turner; Strong; Gold, 2014; Wang *et al.*, 2017). Dentre os polímeros termoplásticos, o poli(ácido láctico) (PLA) destaca-se por sua origem renovável, biodegradabilidade e facilidade de processamento, atributos que o tornam atraente para aplicações em que sustentabilidade, custo e segurança toxicológica são determinantes (Garlotta, 2001; Jamshidian *et al.*, 2010; Farah; Anderson; Langer, 2016). Entretanto, limitações de resistência térmica, tenacidade e estabilidade dimensional do PLA restringem seu emprego em componentes submetidos a maiores solicitações.

A incorporação de reforços fibrosos — em particular, fibra de carbono ou partículas/carregamentos carbonáceos — tem sido proposta como estratégia eficiente para elevar rigidez, resistência e estabilidade térmica de matrizes poliméricas impressas por FDM, formando compósitos aptos a aplicações estruturais de maior responsabilidade (Wang *et al.*, 2017). Em paralelo, tratamentos térmicos pós-processamento (recozimento) emergem como rota de engenharia microestrutural capaz de elevar a cristalinidade, aliviar tensões residuais e, por consequência, modificar o desempenho físico-mecânico do PLA e de seus compósitos (Sun *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2015). Apesar do avanço do estado da arte, persistem lacunas na compreensão quantitativa da interação entre parâmetros de tratamento térmico, evolução microestrutural e propriedades finais do compósito PLA/fibra de carbono processado por FDM.

A manufatura aditiva vem se consolidando como uma tecnologia estratégica na indústria por permitir a produção de geometrias complexas, redução de massa e elevada personalização de componentes. Seu uso já é observado em setores como a aeronáutica e automobilística, aplicam a técnica para reduzir peso estrutural e otimizar sistemas, resultando em menor consumo de combustível e custos de montagem. Além disso, na área automotiva, peças como pistões otimizados por softwares de otimização topológica demonstram ganhos em desempenho e eficiência. A manufatura aditiva também tem avançado na ferramentaria rápida, possibilitando a confecção de moldes e dispositivos de produção de forma ágil, e no setor biomédico,

viabilizando próteses e implantes personalizados com alta complexidade geométrica. Tais aplicações reforçam seu papel como uma ferramenta de inovação industrial, ampliando as fronteiras do design e da fabricação tradicional (Lettori *et al.*, 2020).

2. OBJETIVOS

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar, de forma sistemática, a influência do tratamento térmico nas propriedades físico-mecânicas e na estabilidade dimensional de compósitos de PLA reforçado com fibra de carbono (PLA CF) e PLA de alta temperatura (PLA HT) aditivado e produzidos por manufatura aditiva. Para isso, foram conduzidos ensaios mecânicos e caracterizações microestruturais, com vistas a correlacionar as alterações induzidas termicamente na morfologia e cristalinidade do material com o desempenho obtido. Os objetivos específicos foram:

- Analisar a resistência à tração e resistência ao impacto das amostras de inserir PLA CF e PLA HT após o tratamento térmico;
- Investigar o impacto do tratamento térmico na estabilidade dimensional dos compósitos;
- Comparar as propriedades físico-mecânicas das amostras tratadas com as amostras não tratadas;
- Realizar análises microscópicas para observar alterações estruturais e de adesão interlaminar.

3. REVISÃO DA LITERATURA

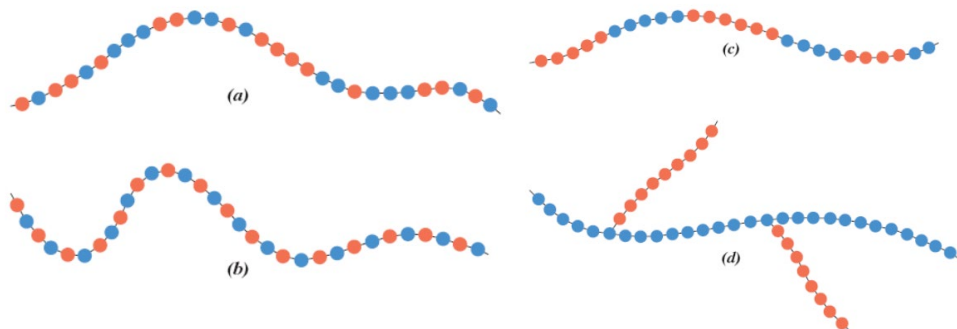
3.1. POLÍMEROS

3.1.1. Classes de Polímeros

Os polímeros são macromoléculas formadas por unidades menores, que são chamadas de monômeros, que se unem através de ligações covalentes. Estes podem ser naturais, como é o exemplo da celulose, que está presente nas plantas, ou sintéticos, produzidos em laboratório para as mais diversas finalidades. Os polímeros são materiais muito versáteis, que podem apresentar diferentes propriedades de acordo com a sua classificação e por isso são muito usados na engenharia.

Os polímeros podem ser classificados de diferentes maneiras, considerando aspectos como sua estrutura química como na Figura 1, método de obtenção, desempenho ou comportamento mecânico. A classificação mecânica agrupa os polímeros em três categorias principais: plásticos, elastômeros e fibras (Canevarolo Júnior, 2002).

Figura 1 - Representações esquemáticas dos copolímeros (a) aleatório, (b) alternado, (c) em bloco, e (d) enxertado. Os dois tipos de unidades repetidas diferentes são designados por círculos azuis e vermelhos.



Fonte: Callister (2020).

Os plásticos são polímeros derivados principalmente do petróleo e são classificados em termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos amolecem ao calor e endurecem ao resfriar, podendo ser remodelados várias vezes, enquanto os

termofixos possuem estrutura reticulada e não podem ser remodelados, oferecendo maior resistência térmica e rigidez (Maia, 2025).

Segundo Krutzmann (2015), os elastômeros são polímeros capazes de sofrer grandes deformações e retornar à sua forma original após a remoção da tensão, devido às ligações cruzadas presentes em suas cadeias moleculares, que permitem essa recuperação. Um exemplo clássico dessa classe de materiais é a borracha.

Fibras são polímeros termoplásticos orientados com alta razão comprimento/diâmetro, cuja estrutura alongada e alinhada durante a fiação garante maior resistência mecânica, possibilitando seu uso como fios finos (Canevarolo Júnior, 2002). Alguns exemplos incluem poliacrilonitrila (PAN), náilon e poliéster (PET).

3.1.2. Polímeros Biodegradáveis

Os polímeros biodegradáveis apresentam grande relevância no contexto ambiental, pois são capazes de se decompor naturalmente, contribuindo para a redução da poluição causada por resíduos plásticos convencionais. Além disso, são obtidos de fontes renováveis (como milho, cana-de-açúcar, celulose e outros), o que diminui a dependência de derivados do petróleo. O poli(ácido láctico) (PLA), o polihidroxibutirato (PHB) e o polihidroxibutirato-co-poli(hidroxihexanoato) (PHBHx) são alguns dos principais exemplos de biopolímeros (Brito, 2011).

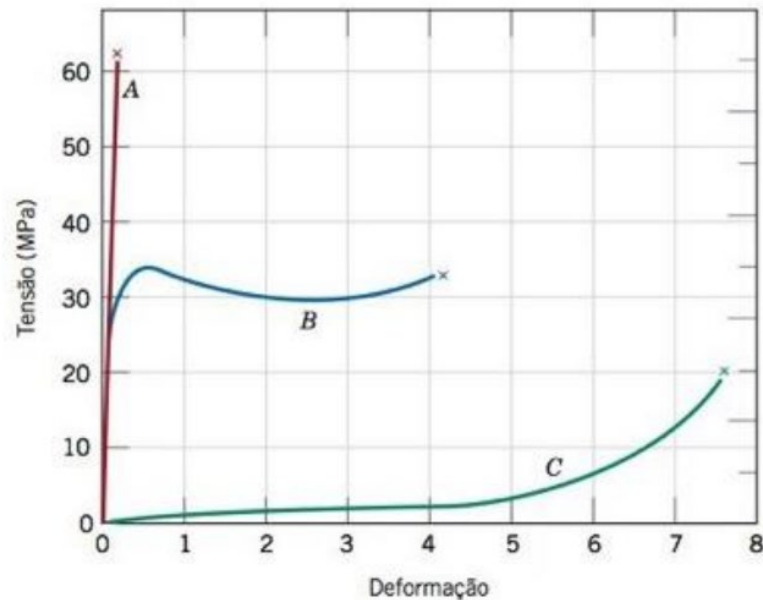
3.1.3. Propriedades dos Polímeros

Para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais poliméricos, é de grande importância a aplicação de ensaios de tensão-deformação. Esses ensaios permitem avaliar como o material se comporta quando submetido a diferentes forças, fornecendo informações cruciais sobre sua resistência, elasticidade e comportamento geral em situações críticas.

Calister (2020) descreve que os polímeros podem apresentar três tipos distintos de comportamento na curva tensão-deformação, conforme ilustrado na Figura 2. A primeira curva (A) representa materiais frágeis, que apresentam pouca deformação antes da ruptura. A segunda curva (B) reflete o comportamento dos materiais plásticos, caracterizado por uma deformação permanente após o limite elástico. Já a

terceira curva (C) demonstra uma deformação totalmente elástica, típica dos elastômeros, que retornam a sua forma original após a remoção da carga.

Figura 2 - Comportamento tensão-deformação.



Fonte: Callister (2020).

3.1.4. Mecanismos de Aumento de Resistência

A deformação por estiramento, reforço por fibras e o tratamento térmico são alguns dos processos que podem ser aplicados para aprimorar as propriedades mecânicas dos polímeros.

Segundo Callister (2020), o processo de estiramento consiste no alongamento do material, promovendo o deslizamento e o alinhamento das cadeias moleculares, o que resulta em um aumento significativo da rigidez, principalmente na direção da deformação. Os efeitos do estiramento são anisotrópicos: enquanto o módulo de tração e o limite de resistência à tração podem aumentar de duas a cinco vezes na direção do estiramento, essas propriedades tendem a diminuir em direções perpendiculares.

Outra forma eficiente de melhorar as propriedades mecânicas dos polímeros é o reforço com fibras. Essas fibras, que podem ser de vidro, carbono, aramida ou outras origens sintéticas e naturais, possuem resistência mecânica geralmente superior à da

matriz polimérica, contribuindo significativamente para o aumento da resistência e rigidez do material composto (Maia, 2025).

Já o tratamento térmico, quando aplicado a polímeros semicristalinos, tende a aumentar a cristalinidade e o tamanho dos cristalitos, resultando em maior rigidez e limite de escoamento, mas menor ductilidade. Em polímeros que já foram estirados, o recozimento pode ter o efeito oposto, reduzindo o módulo de elasticidade devido à perda da orientação das cadeias (Callister, 2020).

3.1.5. Cristalinidade dos Polímeros

A cristalização em polímeros é um processo complexo e ainda amplamente investigado, pois o grau de cristalinidade influencia diretamente propriedades como resistência mecânica, estabilidade térmica, permeabilidade, entre outras (MICHELL *et al.*, 2013). Diferentemente dos sólidos convencionais, os polímeros apresentam longas cadeias moleculares que resultam em estruturas parcialmente ordenadas. Por isso, raramente são completamente cristalinos, sendo mais comumente classificados como materiais semicristalinos, com regiões cristalinas intercaladas por regiões amorfas (Canevarolo Júnior, 2010; Callister, 2020).

A estrutura das cadeias poliméricas determina a capacidade de cristalização. Polímeros com cadeias lineares e regulares tendem a cristalizar mais facilmente, enquanto ramificações, ligações cruzadas ou grupos laterais volumosos dificultam esse processo (Callister, 2020). Polímeros isotáticos e sindiotáticos, por exemplo, apresentam maior regularidade estrutural e cristalizam com maior facilidade, ao contrário dos polímeros atáticos.

Durante a cristalização, que ocorre geralmente no resfriamento da massa fundida, as cadeias poliméricas precisam de tempo suficiente para se alinharem e formarem estruturas ordenadas. A taxa de resfriamento, portanto, é um fator determinante no grau de cristalinidade: quanto mais lento o resfriamento, maior a probabilidade de formação de regiões cristalinas (Callister, 2020; Canevarolo Júnior, 2002).

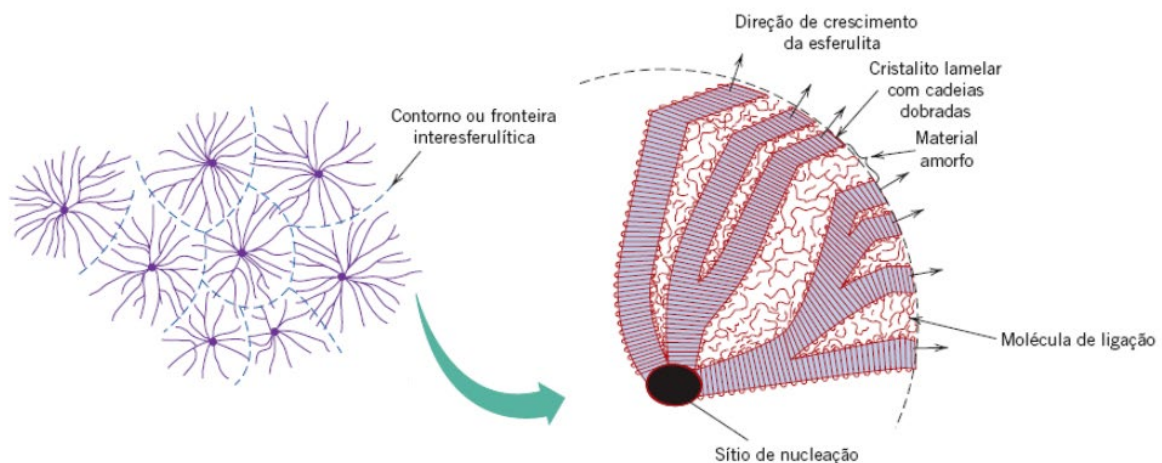
Segundo Akcelrud (2007 apud Magalhães, 2017), no estado sólido os polímeros podem ser:

- Amorfos: com cadeias dispostas de forma desordenada;
- Cristalinos: com alinhamento e periodicidade espacial das cadeias.

Na prática, a maioria dos polímeros se encontra em um estado semicristalino, onde apenas parte da molécula adota a conformação ordenada, enquanto outra permanece amorfa. As regiões cristalinas, chamadas de cristalitos ou lamelas, são pequenas e contêm imperfeições, estando conectadas a regiões amorfas (Callister, 2020; Canevarolo Júnior, 2010).

A estrutura semicristalina pode formar esferulitas demonstrado na Figura 3, estruturas radiais compostas por lamelas com cadeias dobradas, intercaladas por regiões amorfas. As esferulitas crescem a partir de um ponto de nucleação e se expandem até tocarem umas nas outras, formando fronteiras visíveis em microscopia com luz polarizada cruzada (Callister, 2020).

Figura 3 - Representação esquemática da estrutura detalhada de uma esferulita.



Fonte: Callister (2020).

O grau de cristalinidade, que pode variar de completamente amorfo até aproximadamente 95% cristalino, influencia diretamente diversas propriedades:

- Módulo elástico: tende a aumentar com a cristalinidade, devido à maior rigidez das regiões ordenadas;
- Temperatura de transição vítrea (T_g): pode se elevar entre 5% a 15%;
- Coeficiente de expansão térmica e volume específico: diminuem com o aumento da cristalinidade;
- Solubilidade e permeabilidade: também tendem a reduzir com maior grau de cristalinidade (Manrich, 2005).

A massa específica dos polímeros cristalinos é geralmente maior do que a dos amorfos, devido à compactação das cadeias nas regiões ordenadas. A cristalinidade

pode ser medida indiretamente por meio da massa específica, utilizando-se os valores conhecidos para os estados amorfo e cristalino (Callister, 2020).

3.1.6. Compósitos - Fibra de Carbono

Nos últimos anos, os materiais compósitos reforçados com fibras têm se destacado como alternativas promissoras para diversas aplicações estruturais, especialmente devido à sua elevada resistência específica, leveza e resistência à corrosão. Dentre esses, os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibra de carbono (CFRP - *Carbon Fibre Reinforced Polymer*) têm ganhado destaque por suas excelentes propriedades mecânicas e físico-químicas.

As fibras de carbono, segundo Callister (2019), apresentam alta resistência à tração, rigidez específica, excelente resistência à fadiga, propriedades de amortecimento de vibrações e estabilidade dimensional. Além disso, destacam-se por sua boa condutividade elétrica e térmica, sendo quimicamente inertes, com exceção de sua susceptibilidade à oxidação. Tais características tornam essas fibras especialmente indicadas para aplicações em que desempenho estrutural e leveza são fatores críticos.

A principal motivação para o reforço de polímeros com fibras é o aumento da rigidez do material composto. Conforme aponta Taylor (1994), esse reforço também promove melhorias significativas na resistência à tração, compressão, impacto e fadiga. A seleção adequada das fibras, suas geometrias e do tipo de matriz polimérica utilizada possibilita a personalização dos compósitos para atender requisitos específicos de aplicação.

A depender do tipo de fibra empregada, os compósitos podem ser classificados como GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*), AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Polymer*) e CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*). Dentre essas, os CFRPs se destacam por oferecerem a melhor combinação entre resistência mecânica, leveza e durabilidade (Beber, 1999).

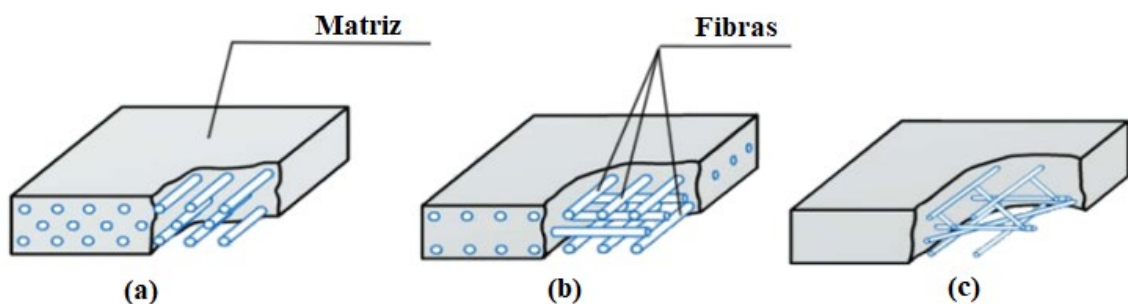
Beber (2003) destaca ainda que os compósitos poliméricos reforçados com fibras apresentam uma relação resistência/peso muito superior aos materiais tradicionais, além de excelente resistência à corrosão eletroquímica, o que os torna particularmente vantajosos em ambientes agressivos. A matriz e as fibras, quando combinadas, são capazes de redistribuir as tensões aplicadas ao compósito,

proporcionando resistência superior ao que cada componente isoladamente poderia suportar. A eficiência dessa redistribuição depende fundamentalmente da qualidade da aderência na interface matriz-fibra. Em alguns casos, agentes de acoplamento são utilizados para potencializar essa interação, especialmente quando a interface está sujeita a tensões de cisalhamento (American Concrete Institute. ACI, 1996; Hollaway; Leeming, 1999).

Outro aspecto relevante é o comportamento de amortecimento interno proporcionado por muitos compósitos reforçados, o que favorece a dissipação de energia dinâmica e reduz a transmissão de vibrações para outras partes da estrutura (ACI, 1996).

As propriedades finais dos compósitos também são fortemente influenciadas pela orientação das fibras no material. De acordo com Hollaway e Leeming (1999), a orientação pode ser: (a) unidirecional, com todas as fibras alinhadas em uma mesma direção, maximizando a resistência nessa direção; (b) bidirecional, com fibras dispostas ortogonalmente, oferecendo resistência em dois eixos principais; (c) aleatória, com distribuição difusa das fibras, conferindo propriedades mecânicas mais isotrópicas, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática de um material compósito.



Fonte: Domingues (2020).

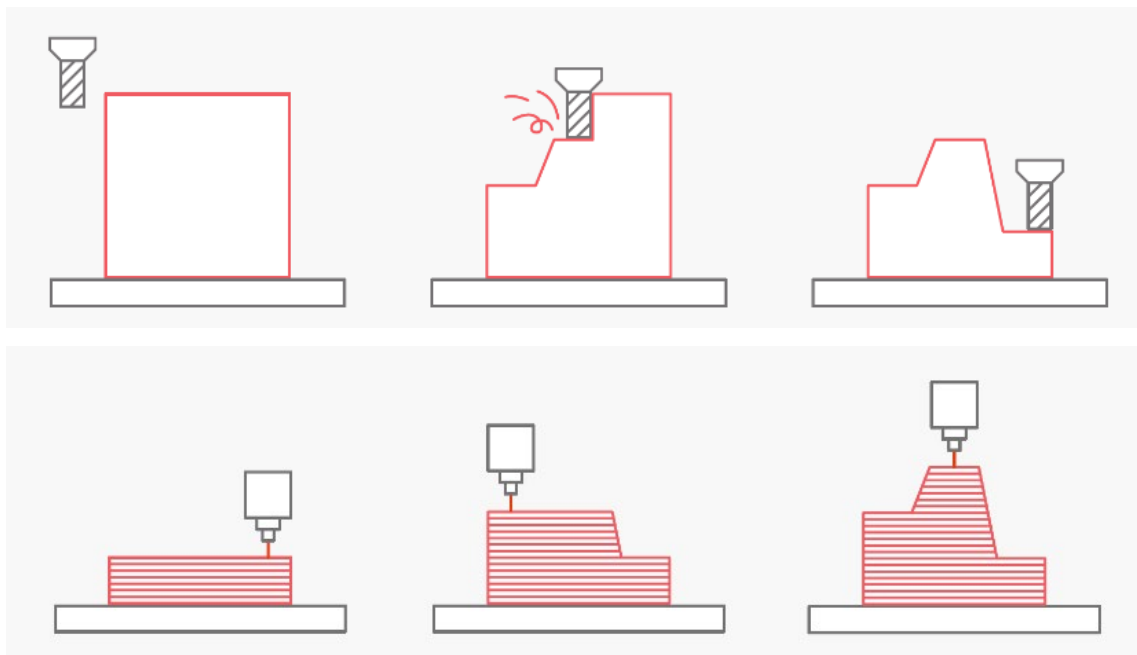
Em suma, os CFRPs oferecem uma combinação única de propriedades estruturais e durabilidade, sendo materiais altamente promissores para aplicações tanto em engenharia civil quanto em componentes industriais e aeroespaciais.

3.2. MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva é um conjunto de métodos de fabricação de objetos tridimensionais através da deposição controlada de camadas (também chamado de fatias) sucessivas de material, até formar a estrutura ou componente final desejado. Assim, ao contrário da manufatura subtrativa, que depende da remoção de material para a fabricação (como torneamento, fresamento e retificação), a aditiva otimiza a produção ao inserir apenas a quantidade necessária para a construção do objeto, ou seja, um processo mais econômico (Alcaide; Wiltgen, 2018).

As principais diferenças entre a manufatura subtrativa e aditiva estão ilustradas na Figura 5.

Figura 5 - Processo de fabricação aditivo e subtrativo, respectivamente.



Fonte: Redwood , Schöffner e Garret (2017).

Entre as principais vantagens da manufatura aditiva, destacam-se a redução do desperdício de materiais, produção rápida e o uso eficiente de energia. Adicionalmente, ressalta-se a possibilidade de combinar materiais distintos e a ampla liberdade geométrica proporcionada no processo de fabricação (Volpato, 2021).

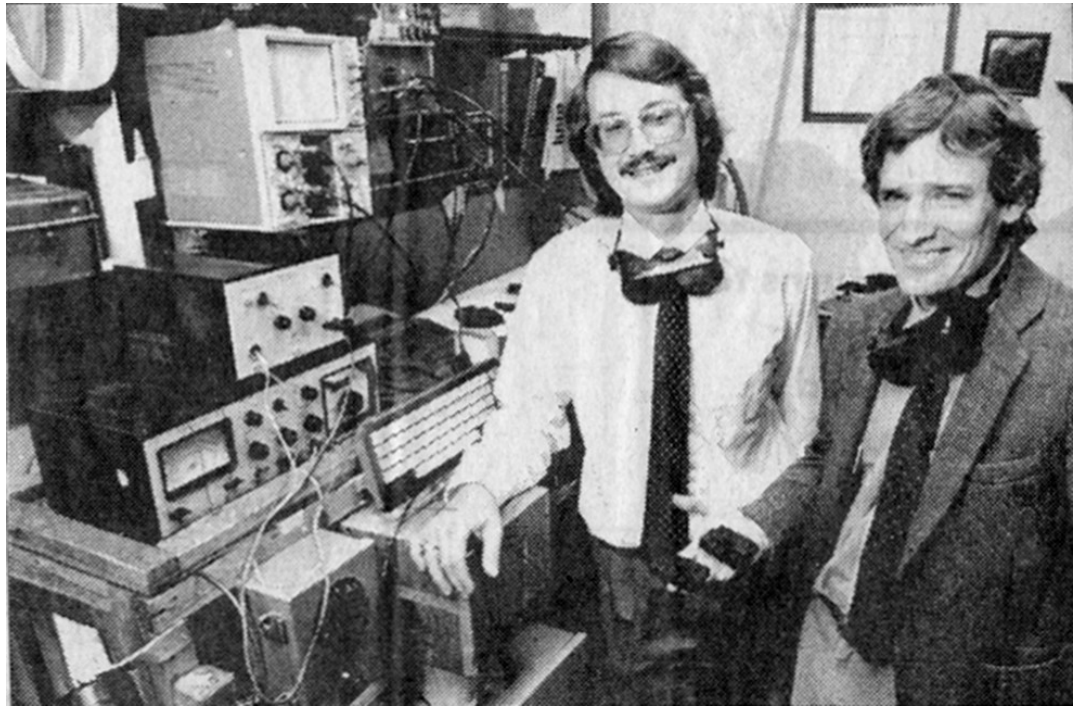
De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2021, a manufatura aditiva (AM) é definida como o "processo de união de materiais para a construção de objetos a partir de dados tridimensionais, geralmente camada por camada, em oposição aos métodos subtrativos de fabricação" (ISO/ASTM, 2021, p. 1). A norma também classifica as

diferentes tecnologias de AM em sete categorias principais, sendo uma delas a extrusão de material (*material extrusion*).

Na qual o material é depositado seletivamente por meio de um bico ou orifício. Dentro dessa categoria, destaca-se a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) que é o objeto de estudo desse presente trabalho, também conhecida como *Fused Filament Fabrication* (FFF), amplamente utilizada devido à sua simplicidade operacional, baixo custo e versatilidade de materiais, como o PLA, ABS, PETG, materiais compósitos e outros. O processo FDM se baseia na extrusão de um filamento termoplástico aquecido que é depositado camada a camada para formar o objeto final, com suas propriedades mecânicas altamente influenciadas pelos parâmetros de impressão e orientação das camadas.

A manufatura aditiva, também é popularmente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia de fabricação que permite a criação de objetos tridimensionais a partir da deposição sucessiva de camadas de material. Diferentemente dos métodos tradicionais de manufatura subtrativa, essa técnica permite maior liberdade geométrica, redução de desperdício de material e customização em massa. A origem da impressão 3D remonta à década de 1980, com a criação da stereolithography (SLA) em 1986, considerada o marco inicial da manufatura aditiva moderna (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Desde então, diversas tecnologias surgiram, incluindo *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Selective Laser Sintering* (SLS) e *Digital Light Processing* (DLP), cada uma com características específicas quanto a materiais, resolução e aplicações.

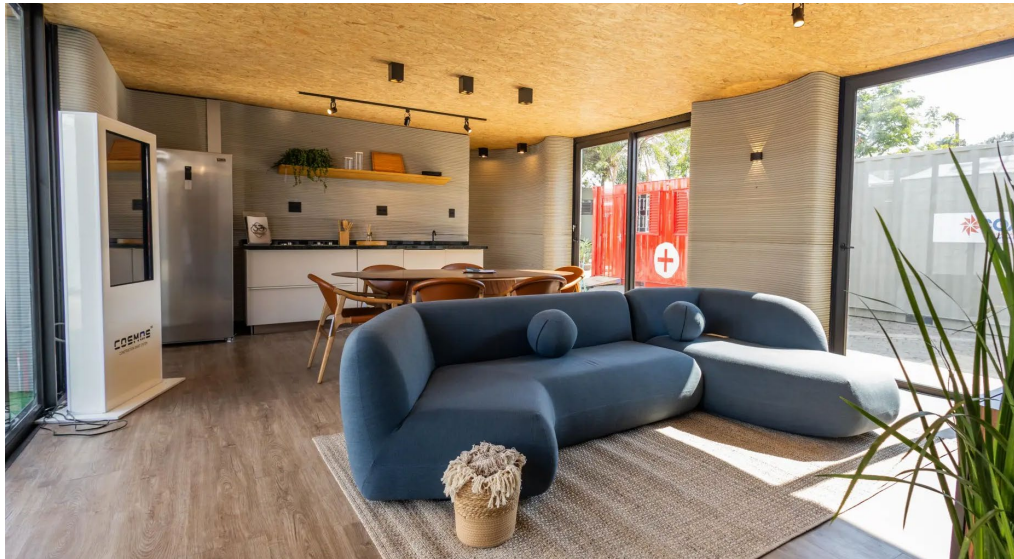
Figura 6 - Chuck Hull (à esquerda) junto a um dos protótipos do que viria a ser a impressora 3D.



Fonte: Techtudo (2014).

A evolução da impressão 3D tem sido marcada pela ampliação de seus campos de aplicação, saindo de usos restritos a prototipagem rápida e alcançando setores como medicina, aeroespacial, automotivo e até construção civil (Figura 7). Com o avanço dos materiais, especialmente os termoplásticos reforçados com fibras, tornou-se possível produzir componentes funcionais com desempenho mecânico aprimorado, impulsionando ainda mais o uso da impressão 3D na engenharia de materiais (Volpato, 2021). Essa trajetória de desenvolvimento tem sido acompanhada por uma crescente acessibilidade das tecnologias, como é o caso das impressoras FDM de baixo custo, que democratizaram o acesso à manufatura aditiva, inclusive em ambientes acadêmicos e domésticos.

Figura 7 - Casa impressa em 3D pela empresa mineira Cosmos 3D, em exposição na Expo Construção Offsite 2024, em São Paulo.



Fonte: Laporta (2024).

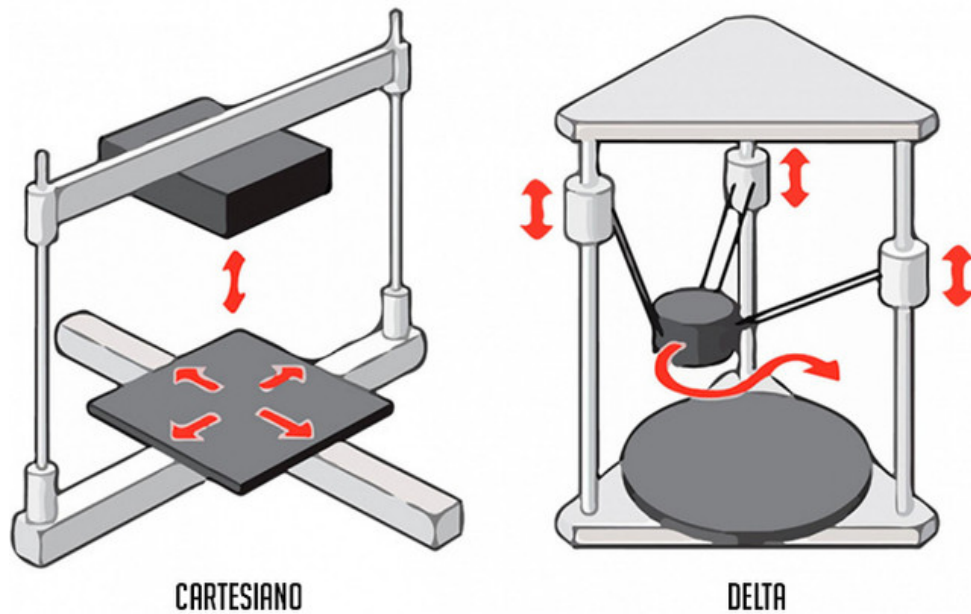
3.2.1. Tecnologias de AM

A norma ISO/ASTM 52900 (2021) estabelece uma classificação padronizada dos processos de manufatura aditiva, agrupando-os em sete categorias principais, cada uma baseada em seu princípio de funcionamento, tipo de material utilizado e forma de deposição. Essa padronização visa facilitar a comunicação técnica e promover a uniformização de terminologias na indústria e na academia (ISO/ASTM, 2021; Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

1. *Material Extrusion* (Extrusão de Material)

Neste processo, o material, geralmente um termoplástico, é aquecido e extrudado através de um bico, sendo depositado camada por camada sobre uma base. O exemplo mais comum é o *Fused Deposition Modeling* (FDM) ou *Fused Filament Fabrication* (FFF). É amplamente utilizado devido ao baixo custo e facilidade de operação, embora apresente limitações quanto à qualidade superficial e propriedades mecânicas (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Existe muitas variações de construção de impressoras como o modo de extrusão de material, qual o tipo de movimento é executado para deposição do material, como é o caso das impressoras cartesianas e delta (Figura 8), porém todas seguem o mesmo princípio de depositar material camada sobre camada com um bico aquecido que torna o material fluído.

Figura 8 - Um diagrama de desenhos cartesianos e delta.

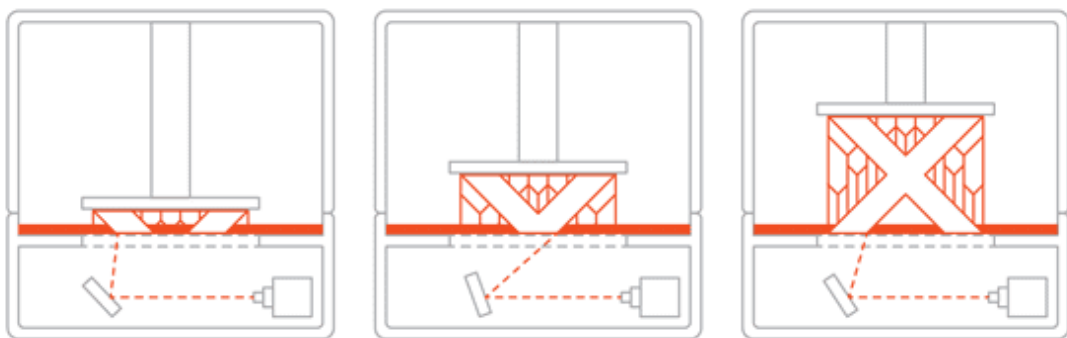


Fonte: Engiprinters (2019).

2. *Vat Photopolymerization* (Foto polimerização em Cuba)

Utiliza um recipiente contendo resina líquida fotossensível que é solidificada camada por camada por uma fonte de luz, como laser ou projetor. O exemplo mais conhecido é a Estereolitografia (SLA) e Processo Digital de Luz (DLP) (Figura 9). Esse processo permite alta resolução e excelente acabamento superficial, sendo muito utilizado em aplicações biomédicas e odontológicas (Volpato, 2021).

Figura 9 - Processo de impressão *Vat Photopolymerization*.

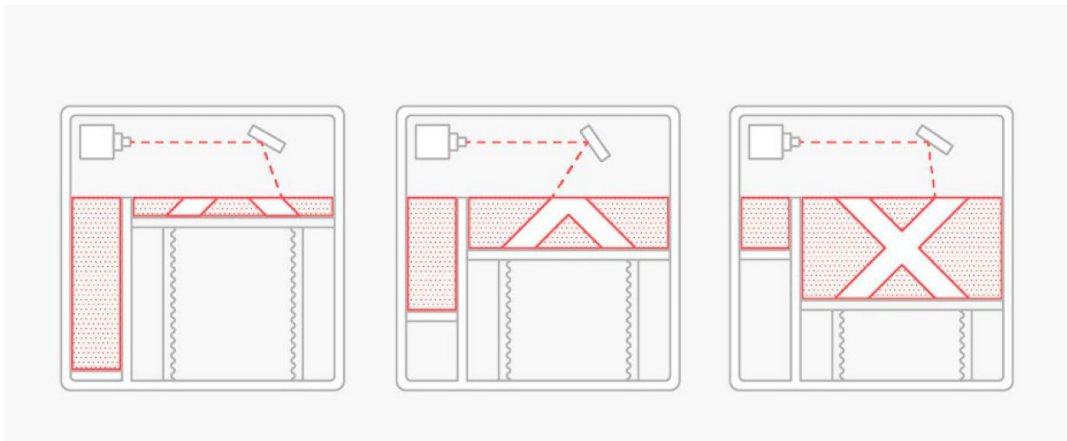


Fonte: Redwood , Schöffer e Garret (2017).

3. *Powder Bed Fusion* (Fusão em Leito de Pó)

Consiste na fusão seletiva de partículas de pó metálico ou polímero por meio de uma fonte térmica, como laser ou feixe de elétrons. Exemplos incluem *Selective Laser Sintering* (SLS) (Figura 10) e *Selective Laser Melting* (SLM). Esse método produz peças com boas propriedades mecânicas, sendo amplamente empregado em setores como aeroespacial e médico (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Figura 10 - Processo de impressão SLS.

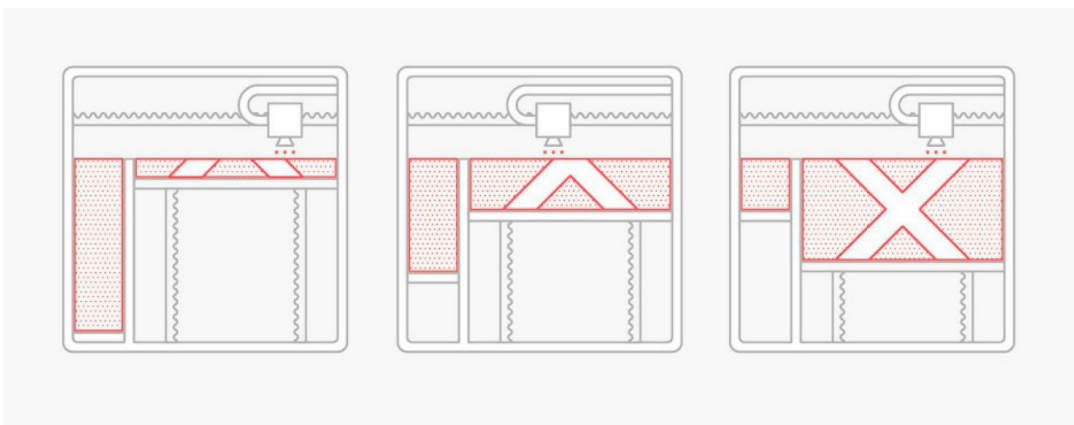


Fonte: Redwood , Schöffner e Garret (2017).

4. *Binder Jetting* (Jateamento de Ligante)

Nesse processo, um agente ligante é depositado seletivamente sobre um leito de pó para formar as camadas (Figura 11). Após a impressão, a peça verde resultante é geralmente sinterizada. É uma técnica rápida e econômica, usada principalmente para prototipagem e peças com geometrias complexas (ISO/ASTM, 2021).

Figura 11 - Processo de impressão *Binder Jetting*.

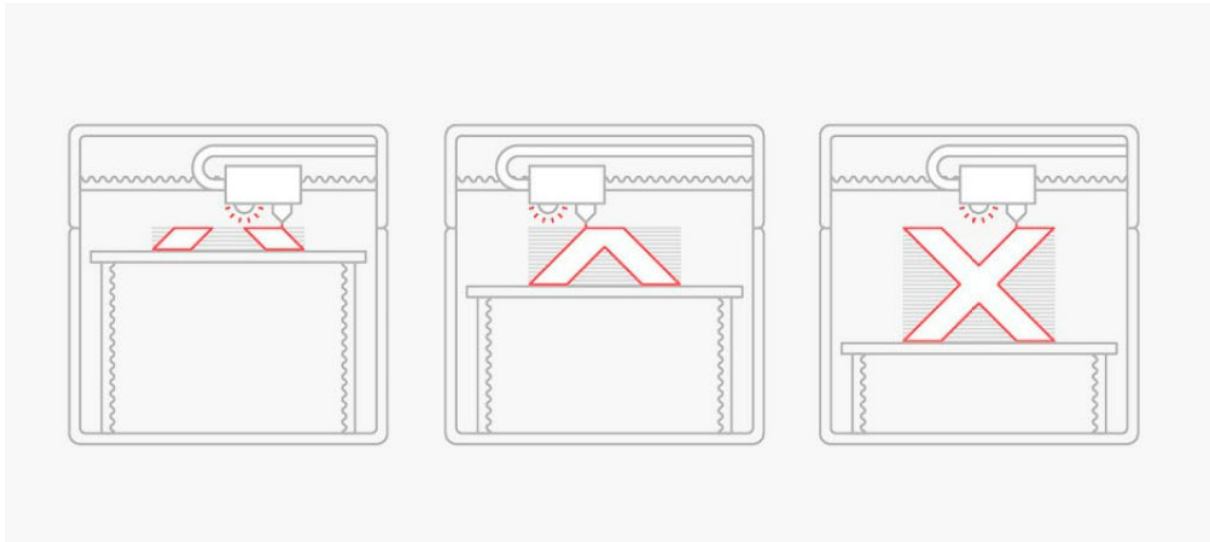


Fonte: Redwood , Schöffner e Garret (2017).

5. *Material Jetting* (Jateamento de Material)

Funciona de forma similar à impressão a jato de tinta, onde gotículas de material (como foto polímeros) são depositadas seletivamente e curadas com luz UV (Figura 12). Permite alta precisão e uso de múltiplos materiais em uma única peça, sendo aplicado em prototipagem visual e biomodelos (Volpato, 2021).

Figura 12 - Processo de impressão *Material Jetting*.

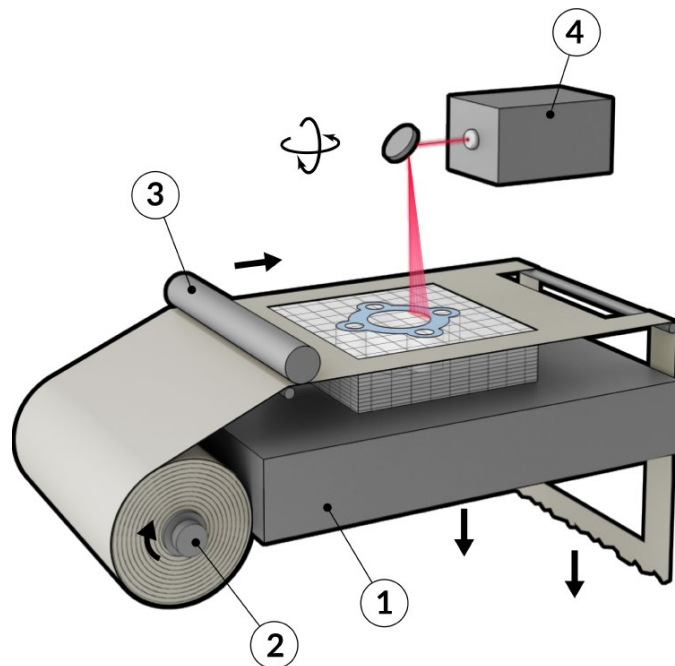


Fonte: Redwood , Schöffner e Garret (2017).

6. *Sheet Lamination* (Laminação de Folhas)

Emprega folhas de material (papel, plástico ou metal) que são cortadas e coladas ou fundidas camada a camada. O principal exemplo é o *Laminated Object Manufacturing* (LOM) (Figura 13). Embora ofereça baixa resolução, é útil para modelos de conceito e peças de grande escala a baixo custo (Gibson; Rosen; Stucker, 2015).

Figura 13 - Processo de impressão *Sheet Lamination*.

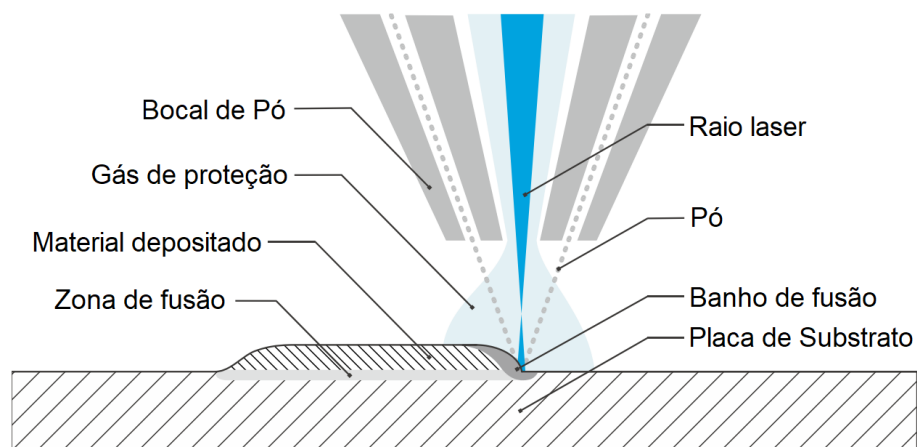


Fonte: Manufacturing Guide ([2025]).

7. *Directed Energy Deposition* (Deposição de Energia Direcionada)

Utiliza uma fonte de energia focada (laser, feixe de elétrons ou arco elétrico) para fundir material, geralmente metálico, que é simultaneamente alimentado por pó ou arame (Figura 14). É um processo utilizado para reparo e fabricação de peças metálicas de alto desempenho (ISO/ASTM, 2021).

Figura 14 - Processo de impressão Deposição de Energia Direcionada.



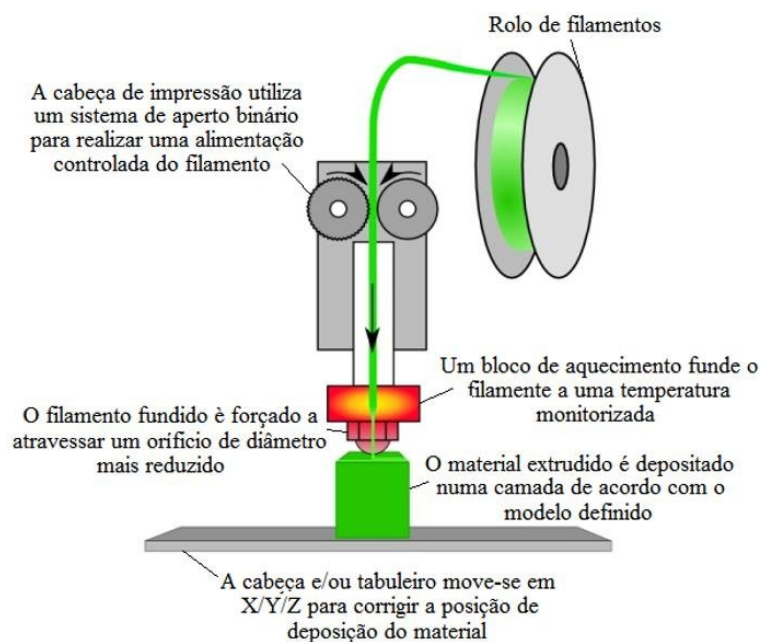
Fonte: Adaptado de Petrat (2019).

2.2.1.1 FDM (Modelagem por Deposição Fundida)

O processo de extrusão de material, conforme classificado pela ISO/ASTM 52900 (2021), é uma das técnicas mais amplamente utilizadas na manufatura aditiva, especialmente devido à sua acessibilidade e simplicidade operacional. Dentro desta categoria, destaca-se a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), também conhecida comercialmente como *Fused Filament Fabrication* (FFF). Ambos os termos se referem à mesma técnica, diferenciando-se apenas por questões de nomenclatura comercial: FDM é uma marca registrada da Stratasys, inventado por Crump (1992), enquanto FFF surgiu como alternativa de uso livre (Rashid; Koç, 2021). A patente encontra-se expirada desde 2009, e por ser um termo pioneiro ainda a tecnologia é popularmente conhecida como FDM.

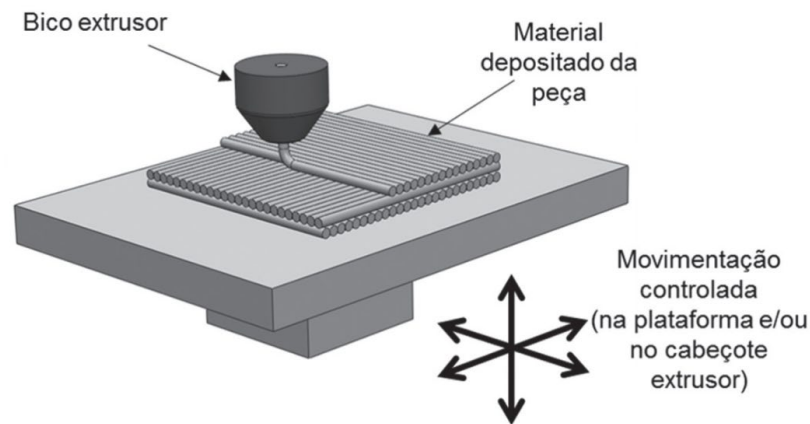
No processo FDM/FFF, um filamento termoplástico é alimentado mecanicamente a um bico aquecido, onde é fundido e depositado camada a camada sobre uma mesa de impressão ilustrado na Figura 15 e Figura 16. O material solidifica-se rapidamente ao ser exposto ao ambiente, unindo-se às camadas anteriores. Os termoplásticos mais comumente utilizados incluem PLA (poli(ácido láctico)), ABS (acrilonitrila butadieno estireno), PETG, entre outros. Além disso, há um crescente uso de compósitos poliméricos reforçados com fibras curtas (como fibra de carbono ou vidro) para aplicações que exigem melhores propriedades mecânicas (Maqsood, 2021).

Figura 15 - Princípio de funcionamento de uma impressora 3D FDM.



Fonte: Moreira (2016).

Figura 16 - Deposição de termoplástico fundido camada a camada.



Fonte: Volpato (2021).

A versatilidade do processo FDM permite uma ampla gama de aplicações, desde protótipos até peças funcionais. No entanto, suas principais limitações incluem a anisotropia mecânica resultante da direção de deposição das camadas, baixa adesão interlaminar e superfícies com baixa resolução comparadas a outros métodos de *Additive Manufacturing* (AM). Por isso, parâmetros de impressão como temperatura do bico, velocidade de deposição, espessura de camada, orientação de impressão e densidade de preenchimento têm influência significativa nas propriedades finais das peças (Cojocarú *et al*, 2022).

A busca por melhorias nesse processo levou ao desenvolvimento de estudos voltados à otimização dos parâmetros de impressão, ao uso de tratamentos térmicos pós-processamento e ao uso de materiais modificados, como os compósitos PLA com fibras de carbono, foco do presente trabalho. Esses avanços têm ampliado as aplicações do FDM em áreas como engenharia, biomédica e automotiva (Santos *et al.*, 2020; Salmi, 2021).

3.2.1.1. Parâmetros de Impressão 3D

Na manufatura aditiva (MA), especialmente na tecnologia de *Fused Filament Fabrication* (FFF), os parâmetros de impressão têm papel determinante na qualidade, resistência mecânica, precisão dimensional e eficiência da produção. Esses parâmetros são definidos no software de fatiamento (*slicer*) e afetam diretamente o comportamento das camadas do material fundido. Segundo Silva (2021), o ajuste

adequado desses parâmetros permite prever e controlar o desempenho final das peças, sendo essencial para aplicações com exigências estruturais e funcionais.

3.2.1.1.1. Temperatura de extrusão

A temperatura de extrusão é um dos parâmetros mais críticos na impressão FFF. Ela determina a fluidez do filamento e a adesão entre as camadas depositadas. Dave e Patel (2021) indicam que, uma temperatura inadequada pode causar falhas de fusão ou degradação térmica. Para o PLA, a faixa recomendada está entre 190 °C e 220 °C (Rivera-López *et al.*, 2024), sendo comum ajustes conforme a marca do filamento ou aditivos como fibras de carbono.

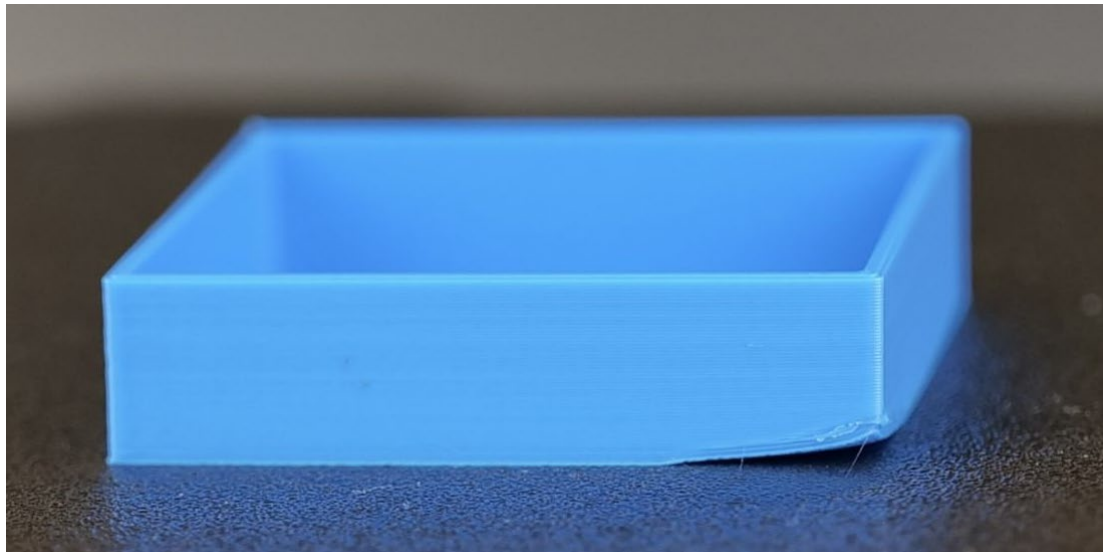
Temperaturas mais altas favorecem a fluidez, mas também aumentam o risco de degradação, enquanto temperaturas mais baixas dificultam a fusão entre camadas. Silva *et al.* (2021) propõem uma abordagem de controle térmico na extrusão que minimiza a degradação, e Zeynivandnejad, Moradi e Sadeghi (2023) demonstram que aumento da temperatura pode aumentar a fluidez, porém causa escorregamento ou degradação do polímero, reduzindo sua integridade mecânica. Mehraein (2018) demonstrou que, para o Policaprolactona (PCL), temperaturas subótimas comprometeram a resistência mecânica das peças, reforçando a necessidade de testes prévios com o material escolhido.

Estudos também mostram que a temperatura pode ser influenciada pelo ambiente da impressora e pelo diâmetro do bico. A presença de fibras no PLA+CF, por exemplo, exige temperaturas mais altas para garantir boa homogeneidade do material durante a extrusão (Zawadzki *et al.*, 2025).

3.2.1.1.2. Temperatura da mesa de impressão

A temperatura da mesa tem como principal função garantir a adesão da primeira camada da peça, evitando falhas como *warping* (deformação) como na Figura 17 que representa esse termo onde a primeira camada descola da mesa e contraí devido a diferença de temperatura, provocando uma delaminação inicial. Dave e Patel (2021) recomendam que, a temperatura esteja ligeiramente acima da temperatura de transição vítrea do material. Para o PLA, isso corresponde a cerca de 60 °C, embora estudos como o de ALL3DP (2023) mencionem faixas de 20 °C a 70 °C.

Figura 17 - Defeito na adesão da primeira camada (*warping*).



Fonte: Bambu Lab Wiki (2025).

Fernandes (2016) destaca que, uma mesa adequadamente aquecida promove o resfriamento homogêneo da peça, evitando contrações e deformidades. Carneiro e Barbar (2019) observaram variações significativas nas propriedades dimensionais e mecânicas de amostras de ABS ao variar essa temperatura entre 80 °C e 110 °C.

Para materiais como PLA+CF, uma mesa aquecida contribui para reduzir a tensão interna entre camadas, importante para evitar delaminações, que são mais comuns quando há reforço com fibras.

3.2.1.1.3. Velocidade de impressão

A velocidade de impressão regula a taxa de deposição do material e afeta diretamente a qualidade e o tempo de fabricação. Kumar et al. (2023) mostram experimentalmente que velocidades mais altas tendem a comprometer a adesão interlaminar, aumentando porosidade e fissuras entre camadas, enquanto velocidades moderadas possibilitam maior tempo de fusão entre camadas e melhor resistência mecânica.

Estudos experimentais que variaram amplamente a velocidade de impressão (20–140 mm/s) indicam que valores na faixa ~40–60 mm/s (com variações conforme impressora, material e espessura de camada) costumam oferecer um bom compromisso entre qualidade superficial e propriedades mecânicas, com vários autores observando bons resultados próximos de 50–60 mm/s para PLA em

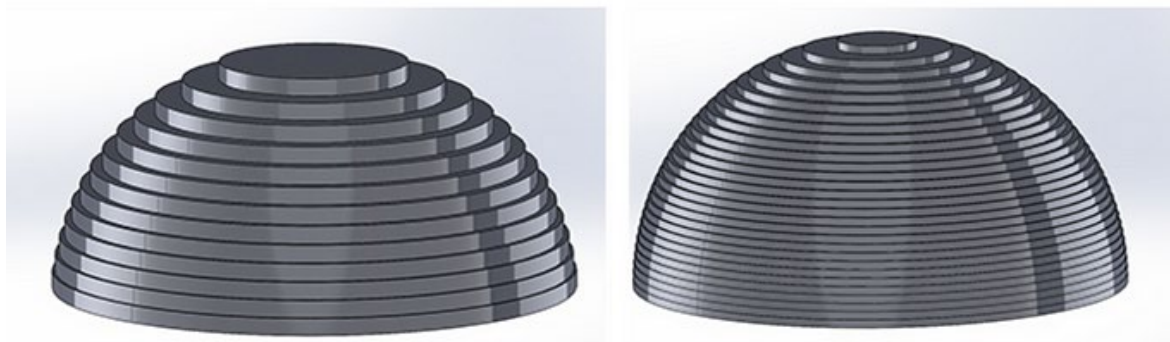
condições típicas de laboratório/desktop. Um exemplo experimental é Kamer et al. (2022), que encontrou desempenho mecânico e qualidade de superfície favoráveis na faixa de 40–60 mm/s, enquanto revisões sistemáticas consolidam essa ordem de grandeza como comum na literatura. Silvestre e Ferreira (2024) ressaltam que, o ideal é equilibrar a velocidade com outros parâmetros, como altura da camada e temperatura, esses parâmetros irão determinar a vazão volumétrica do material.

Alzahrani (2017) demonstrou que, em ambientes de alta produtividade, a escolha errada da velocidade leva a falhas estruturais visíveis, como porosidade entre camadas e falhas de contorno.

3.2.1.1.4. Altura da camada

A altura de camada, ou espessura, está diretamente relacionada à resolução da peça. Segundo Figueiredo (2021), camadas menores resultam em maior resolução e acabamento como ilustrado na Figura 18, embora aumentem o tempo de impressão.

Figura 18 - Efeito da redução da altura de camada.



Fonte: Brasília Fab Lab (2017).

Christiyan *et al.* (2016) observaram que, menores alturas de camada melhoram a resistência à tração no ABS, e Abreu (2017) define que, faixas entre 0,1 mm e 0,3 mm são as mais comuns, sendo 0,1 mm ideal para detalhes finos.

Ivo (2023) recomenda que, a altura da camada seja entre 25% e 80% do diâmetro do bico. Isso assegura que o material seja adequadamente comprimido durante a deposição, promovendo melhor adesão intercamadas.

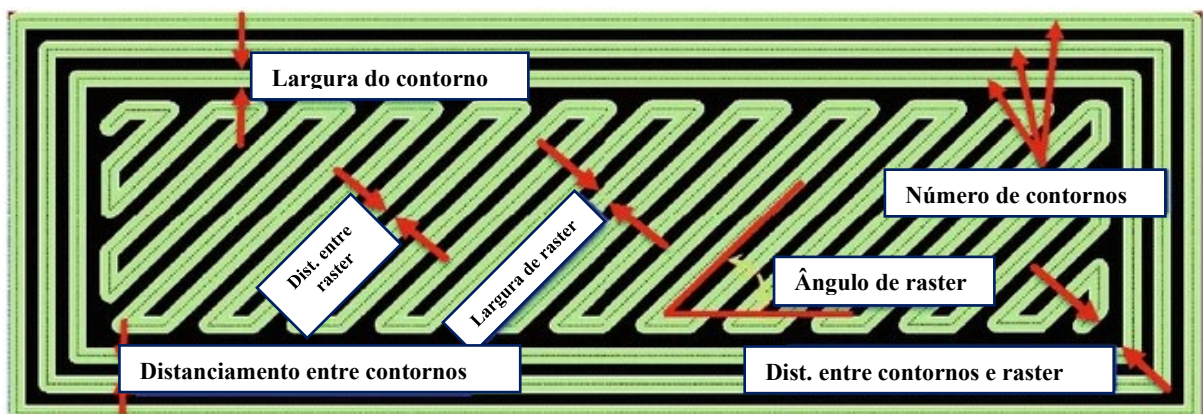
3.2.1.1.5. Largura de raster e contornos

O raster é a largura da trilha de material extrudado, que pode ser ajustada em regiões de contorno ou preenchimento (Figura 19). Esse parâmetro impacta diretamente a distribuição de tensões e a qualidade visual da peça. Segundo Volpato (2017), ajustar o raster de forma proporcional ao bico permite maior controle da geometria externa.

O aumento do número de contornos é uma estratégia utilizada para reforçar a região perimetral da peça. Medeiros et al. (2020) reforça que, contornos adicionais podem mitigar falhas estruturais, principalmente em aplicações que exigem maior resistência a esforços externos.

Além disso, contornos bem definidos proporcionam melhor acabamento e selagem, especialmente importante para peças ocas ou recipientes, onde a estanqueidade é crítica.

Figura 19 - Principais características de raster e contorno.



Fonte: Mohamed, Masood e Bhowmik (2015)

3.2.1.1.6. Camadas superiores e inferiores

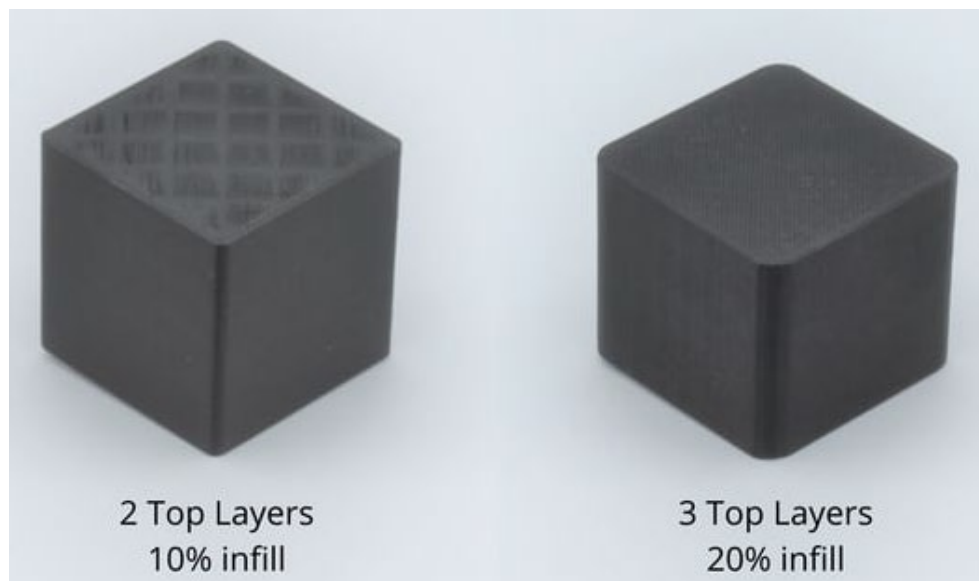
Essas camadas, normalmente impressas com 100% de densidade, têm grande impacto na resistência à compressão e no acabamento superficial. Volpato (2017) destaca que camadas mal definidas nessas regiões podem levar a falhas estruturais, como rachaduras ou buracos.

O número de camadas superiores deve ser suficiente para garantir superfícies planas e uniformes, especialmente quando se utilizam baixos níveis de preenchimento interno. Em geral, recomenda-se de 3 a 5 camadas superiores e inferiores, variando conforme a altura da camada.

Para materiais como o PLA+CF, essas regiões também ajudam a conter as fibras, promovendo distribuição homogênea e prevenindo falhas de delaminação nas extremidades da peça.

Na Figura 20 pode se observar na peça com 2 camadas de topo que pelo aspecto visual apresentou um acabamento superficial com falhas e quanto a segunda peça com maior preenchimento e 3 camadas de topo apresentou um melhor acabamento.

Figura 20 - Falha na camada de topo.



Fonte: BCN3D (2025).

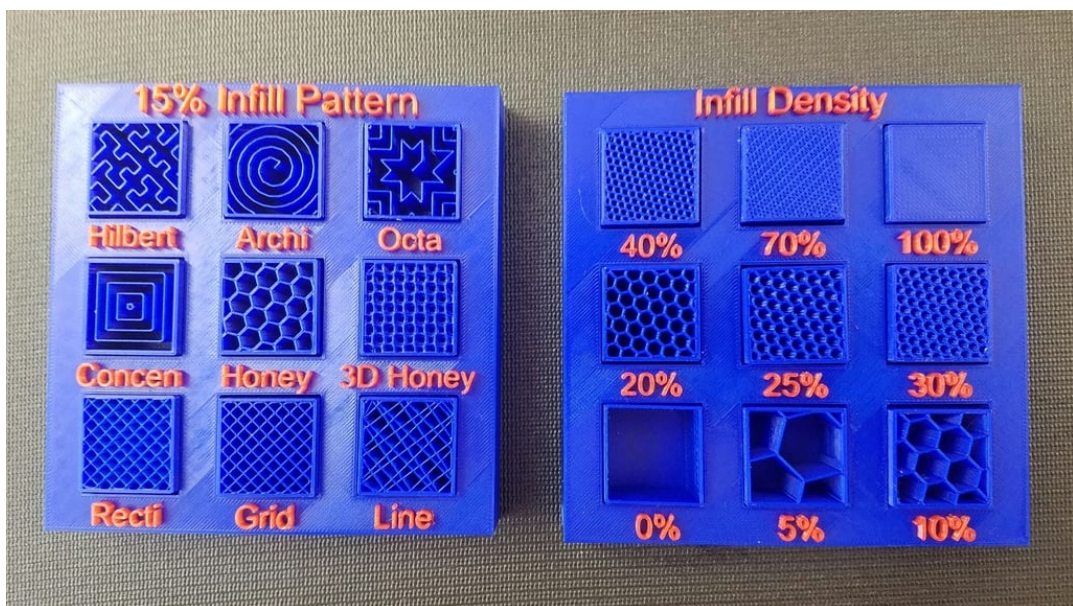
3.2.1.1.7. Tipo e nível de preenchimento

O tipo de preenchimento se refere ao padrão geométrico utilizado no interior da peça. Existem vários padrões disponíveis, como linhas paralelas, grade, concêntrico, cúbico, hexágono, giróide e outros como ilustrado na Figura 21. Segundo Dave e Patel (2021), a escolha do padrão influencia na forma como os esforços mecânicos são distribuídos, podendo otimizar a resistência da peça com o mínimo uso de material.

Martins (2021) mostrou que, para o PLA reforçado com fibra de carbono, o padrão giróide oferece excelentes resultados mecânicos e melhora o desempenho sob esforços de torção. Sousa (2022) obteve desempenho satisfatório com o padrão giróide aplicado a peças de ABS, reforçando sua versatilidade.

Quanto ao nível de preenchimento, este define a densidade do material depositado no interior da peça, variando de 0% (vazio) a 100% (maciço). Karad *et al.* (2023) observou que densidades a partir de 50% proporcionam significativo aumento na resistência à tração. Já Pandžić; Hodžić; Kadrić (2021) indicam que densidades superiores a 60% oferecem equilíbrio entre resistência e leveza, sendo apropriadas para peças funcionais.

Figura 21 - Diferentes tipos de padrões e densidades de preenchimentos.



Fonte: Kronr (2016).

3.3. MATERIAIS DE IMPRESSÃO FDM

O processo de manufatura aditiva pode empregar uma ampla variedade de materiais, escolhidos conforme a aplicação e as características desejadas no produto final. Entre esses materiais, destacam-se não apenas os polímeros, mas também metais, concreto e até alimentos, dependendo da tecnologia utilizada. No entanto, no processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), o insumo mais comumente utilizado é o polímero termoplástico. Dentre os principais termoplásticos aplicados na

impressão FDM, estão o poli(ácido láctico) (PLA), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), o politereftalato de etileno glicol (PETG), o nylon e termoplástico poliuretano (TPU) (Maia, 2025).

3.3.1. ABS

O acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) é um filamento muito utilizado na impressão 3D. Ele é constituído por três monômeros - acrilonitrila, butadieno e estireno - que podem ser misturados em diferentes proporções durante a sua fabricação, tornando possível que o ABS tenha então diversas versões com propriedades diferentes, como maior resistência ou flexibilidade, dependendo do seu uso final (Martins, 2018).

Durante o processo de impressão 3D, o ABS é aquecido até atingir seu ponto de fusão, o que possibilita sua modelagem. No entanto, esse aquecimento libera gases nocivos que podem causar desconforto ao operador, sendo vital que a impressão seja feita em ambientes com ventilação adequada (Bates-Green *et al.*, 2017).

Segundo Martins (2018), uma das vantagens do ABS é sua capacidade de produzir peças com superfícies uniformes e bom acabamento visual. Por conta dessas propriedades, o material é amplamente utilizado na fabricação de componentes que exigem tanto resistência mecânica quanto uma boa aparência estética.

3.3.2. PETG

O PETG (Polietileno Tereftalato Glicol-modificado) é um polímero termoplástico amorfo, derivado do PET, amplamente utilizado na impressão 3D por *Fused Deposition Modeling* (FDM) devido à sua elevada tenacidade, flexibilidade e facilidade de processamento. Sua temperatura de transição vítrea situa-se em torno de 80 °C, e suas propriedades mecânicas são comparáveis às do PET, porém com maior capacidade de deformação e menor rigidez, características que o tornam especialmente adequado para aplicações que exigem resistência a impacto e elasticidade moderada (Wang *et al.*, 2013).

Estudos realizados por Martins et al. (2024) mostram que o PETG impresso por FFF apresenta resistência à tração da ordem de ~33 a 41 MPa (dependendo da

orientação de impressão), módulo de elasticidade entre $\sim 1,1$ e $\sim 1,3$ GPa e alongamento próximo a 5–7%. Já em análises conduzidas por Focke *et al.* (2009), foram obtidos valores superiores para essas mesmas propriedades: 50,4 MPa de resistência à tração, 73% de alongamento na ruptura e módulo de 2,02 GPa. Tais variações podem ser atribuídas a diferentes composições, condições de impressão e estratégias de fabricação. Além disso, o PETG é considerado mais estável termicamente do que o PLA, mantendo suas propriedades mesmo após o processamento por moldagem ou impressão (Alzahrani, 2017).

Diversos guias práticos e técnicos sobre o uso do PETG reforçam suas vantagens, como a boa aderência entre camadas, baixa contração durante o resfriamento e resistência química, além de indicarem cuidados específicos como controle da umidade e uso de superfícies de impressão adesivas (Locker, 2017; Matterhackers, 2017). Tais características fazem do PETG um dos materiais mais equilibrados para aplicações que exigem desempenho mecânico moderado e confiabilidade no processo de impressão.

3.3.3. Nylon

As poliamidas, conhecidas comercialmente como nylons, pertencem a uma classe de polímeros termoplásticos de engenharia bastante valorizada na manufatura aditiva, em especial no processo de impressão 3D por FDM. Essa valorização se deve à combinação de propriedades como alta estabilidade dimensional, excelente resistência química e boa resistência ao impacto em peças não entalhadas, o que torna o material ideal para componentes funcionais sujeitos a cargas dinâmicas ou ambientes agressivos (Hage Junior; Pessan; Bassani, 2002).

Apesar dessas qualidades, o nylon apresenta limitações que demandam cuidados específicos. É um material altamente higroscópico, absorvendo rapidamente a umidade do ar, o que pode comprometer tanto a qualidade da impressão quanto as propriedades finais da peça se não for adequadamente seco e armazenado. Além disso, as poliamidas são sensíveis ao entalhe, comportando-se de maneira dúctil quando não entalhadas, mas apresentando fratura frágil quando há concentração de tensões, devido à sua baixa resistência à propagação de trincas (Hage Junior; Pessan; Bassani, 2002).

Do ponto de vista prático, a impressão com filamentos de nylon evoluiu significativamente. Embora ainda não atinja a facilidade de impressão do PLA, o nylon tornou-se consideravelmente mais acessível com os avanços dos fabricantes. Atualmente, a impressão pode ser realizada com relativa facilidade, desde que sejam observadas as configurações ideais. De acordo com a Wishbox (2021), recomenda-se temperatura do bico entre 230 °C e 260 °C, cama aquecida entre 60 °C e 70 °C, uso de cola bastão PVA como adesivo para a primeira camada, e preferência por impressoras fechadas para melhor controle térmico.

3.3.4. TPU

O poliuretano termoplástico (TPU) é um tipo de elastômero termoplástico amplamente utilizado na impressão 3D por FDM, inserido na categoria dos chamados filamentos flexíveis. O poliuretano, de forma geral, é um polímero extremamente versátil produzido a partir da reação entre isocianatos e polióis, permitindo a fabricação de materiais que vão desde estruturas rígidas até espumas e elastômeros. Além disso, o poliuretano pode ser tanto termofixo quanto termoplástico, sendo o TPU a principal forma reaproveitável dentro desse grupo (Roda, 2014).

O TPU, especificamente, é um copolímero em bloco com regiões não polares longas e móveis, responsáveis por sua alta flexibilidade, e regiões polares curtas que tendem à cristalização, o que confere estrutura e definição dimensional ao material (Touchet; Cosgriff-Hernandez, 2016). Essa composição estrutural permite que as ligações físicas entre as cadeias sejam desfeitas com o uso de calor ou solventes, possibilitando o reprocessamento do material sem degradação severa (Touchet; Cosgriff-Hernandez, 2016). Por isso, o TPU é classificado como um material reciclável, o que amplia seu potencial de aplicação em soluções sustentáveis e técnicas.

Do ponto de vista prático, a TPU é amplamente empregada em peças que exigem resistência à abrasão, elasticidade e absorção de impacto, como protetores, calçados, gaxetas e partes móveis. Segundo Silva *et al.* (2020), a popularidade desse material na impressão 3D cresceu em virtude de sua capacidade de se adaptar ao movimento e à tridimensionalidade das superfícies vestíveis. A temperatura de extrusão do filamento de TPU gira em torno de 230 °C, podendo variar conforme a impressora e o ambiente, sendo altamente recomendável o uso de extrusores do tipo

direct drive, que oferecem maior controle sobre a alimentação de materiais flexíveis (3DLAB, 2024). A boa adesão entre camadas e a resistência ao desgaste fazem do TPU um dos materiais mais versáteis para aplicações funcionais na manufatura aditiva.

3.3.5. PLA (Poli(Ácido Lático))

O poli(ácido lático) (PLA) é um poliéster alifático biodegradável semicristalino e de base biológica, derivado de fontes renováveis como milho, batata e cana-de-açúcar, sendo considerado um polímero compostável industrialmente (Castro-Aguirre *et al.*, 2016). Sua estrutura é composta a partir do monômero ácido láctico, obtido por fermentação de açúcares, cujos enantiômeros (L- e D-) influenciam diretamente a cristalinidade e as propriedades térmicas e mecânicas do material (Petersson *et al.*, 2007; Bordes *et al.*, 2009). O PLA tem ganhado relevância como alternativa aos polímeros petroquímicos, especialmente no contexto de redução de resíduos sólidos urbanos (Ren, 2011).

Inicialmente utilizado em aplicações médicas e farmacêuticas devido à sua biocompatibilidade, o PLA expandiu sua presença em setores industriais como embalagens, fibras têxteis, filmes agrícolas, eletrônicos e, mais recentemente, na impressão 3D (Castro-Aguirre *et al.*, 2016). Essa popularização se deve a propriedades como temperatura de fusão em torno de 175 °C, temperatura de transição vítrea entre 55 °C e 60 °C, módulo de elasticidade próximo de 3 GPa e resistência à tração entre 50 MPa e 70 MPa, sendo comparável ao PET, PS e PP (Raquez *et al.*, 2013; Auras *et al.*, 2004; Vink; Davies, 2015).

No campo da manufatura aditiva, o PLA é amplamente empregado por sua biodegradabilidade, reciclabilidade e facilidade de extrusão, destacando-se ao lado de materiais como ABS e policarbonato (Farah; Anderson; Langer, 2016; Torres *et al.*, 2015). Porém, apesar das vantagens, sua performance pode ser afetada por fatores térmicos durante a impressão, especialmente pela transição vítrea (entre 50 °C e 70 °C), que influencia diretamente a estabilidade dimensional das peças fabricadas (Senatov *et al.*, 2016). Parâmetros inadequados podem levar a alterações na rigidez e resistência dos produtos finais (Lanzotti *et al.*, 2015; Grasso *et al.*, 2018).

Limitações como baixa resistência ao impacto, alta sensibilidade à umidade e permeabilidade a gases ainda restringem seu uso em algumas aplicações

(Jamshidian *et al.*, 2010; Van Tuil *et al.*, 2000). Tais desafios têm motivado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de modificações estruturais e compósitos, com o objetivo de ampliar sua aplicabilidade e desempenho técnico.

3.3.6. PLA HT (Poli(Ácido Lático) de Alta Temperatura)

O PLA HT (do inglês *High Temperature*) é uma variação avançada do poli(ácido láctico), desenvolvida para superar uma das principais limitações do PLA convencional: a baixa resistência térmica. Enquanto o PLA comum apresenta temperatura de transição vítrea entre 55 °C e 60 °C, o PLA HT pode alcançar até 120 °C após passar por um tratamento térmico conhecido como recozimento (*annealing*) (3DFILA, 2023; 3DPRIME, 2025).

Esse comportamento é explicado pela transição do estado amorfo para semicristalino do polímero, que reorganiza suas cadeias moleculares e confere ao material maior estabilidade térmica e mecânica. Em termos comparativos, o PLA HT IMPACT, após recozimento, apresenta resistência ao impacto superior ao ABS, com valores de até 9,57 kJ/m², contra 4,38 kJ/m² do ABS sem tratamento (3DPRIME, 2025).

Além da resistência térmica, o PLA HT também dobra sua resistência ao impacto quando tratado, partindo de valores próximos a 0,74 kJ/m² para mais de 4,93 kJ/m² na versão padrão HT, e de 6,67 kJ/m² para 9,57 kJ/m² na versão HT IMPACT, o que o torna ideal para aplicações industriais, peças funcionais, e componentes submetidos a esforços mecânicos (3DPRIME, 2025).

Para alcançar essas propriedades, recomenda-se o recozimento das peças impressas em forno a 110–120 °C durante 10 a 30 minutos, seguido de resfriamento até a temperatura ambiente. Durante esse processo, é comum ocorrer leve contração dimensional e perda de brilho superficial, o que deve ser considerado no projeto (3DFILA, 2023).

A temperatura de impressão do PLA HT varia de 190 °C a 240 °C, dependendo da impressora e da velocidade de extrusão, sendo ideal utilizar cama aquecida a 60 °C. Apesar do desempenho superior, o PLA HT ainda mantém a facilidade de impressão característica do PLA convencional, com boa adesão entre camadas, baixo odor e menor tendência ao *warping*, podendo ser impresso até mesmo em impressoras abertas (3DPRIME, 2025).

Além das abordagens comerciais para aprimoramento das propriedades do PLA, estudos acadêmicos têm investigado a incorporação de aditivos com diferentes finalidades. No trabalho de Pereira e Morales (2014), avaliou-se o efeito de dois tipos de aditivos: um nucleante (Biomax Thermal 300, da DuPont) e um modificador de impacto (Biostrength 280, da Arkema), sobre as propriedades térmicas e mecânicas do PLA. O modificador de impacto teve como objetivo flexibilizar as cadeias poliméricas, reduzindo a tensão interna nas embalagens e facilitando processos como corte e conformação. Observou-se ainda que o modificador de impacto limitou o grau de cristalinidade do PLA, sugerindo que sua presença restringe a formação de fases cristalinas durante o processo de solidificação do material.

Por outro lado, o efeito mais significativo observado foi promovido pelo tratamento de recozimento a 105 °C por 90 minutos. Esse processo elevou o grau de cristalinidade do PLA puro de 3% para até 43%, o que resultou em aumentos consideráveis nas temperaturas de Vicat (de 60 °C para 138 °C) e HDT (de 50 °C para 60 °C). Em termos mecânicos, o módulo de elasticidade apresentou elevação de até 50% com a incorporação dos aditivos. Curiosamente, o modificador de impacto, ao contrário do esperado, também contribuiu para o aumento da rigidez do material. Após o recozimento, entretanto, houve uma redução nas propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade e a resistência à tração, possivelmente atribuída à degradação térmica do PLA sob as condições do tratamento térmico. Isso evidencia que, para aplicações industriais, é essencial considerar não apenas os aditivos, mas também as condições de processamento e pós-processamento do material (Pereira; Morales, 2014).

Diante disso, este estudo busca verificar se o tratamento térmico pode compensar as limitações de impacto do PLA HT.

3.3.7. PLA CF (com Fibras de Carbono)

O PLA com fibra de carbono (PLA-CF) é um compósito formado pela incorporação de fibras curtas de carbono em uma matriz de ácido polilático (PLA). Essa combinação tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas do polímero base, sem comprometer significativamente sua processabilidade. As fibras de carbono utilizadas nesses filamentos são obtidas por carbonização de fibras precursoras orgânicas, como o poliácridonitrila (PAN), ou materiais derivados de

petróleo e carvão, como o pitch. Esse processo confere às fibras uma estrutura com alto grau de alinhamento atômico, resultando em excelente resistência mecânica, rigidez e estabilidade dimensional (Machado, 2002; Callister, 2019).

A incorporação de fibras curtas ao PLA aumenta sua rigidez, resistência à tração e módulo elástico. Além disso, o PLA-CF apresenta vantagens adicionais como resistência à fadiga, amortecimento de vibrações e maior estabilidade térmica, tornando-o apropriado para aplicações funcionais e estruturais em impressão 3D (Callister, 2019; Biron, 2020). Contudo, a adição das fibras também acarreta maior abrasividade, o que provoca desgaste acelerado nos bicos da impressora, sendo recomendável o uso de bicos reforçados (exemplo aço endurecido).

Segundo Oliveira (2021), a presença das fibras modifica também o comportamento reológico do filamento, aumentando a viscosidade do material fundido e exigindo temperaturas de extrusão mais elevadas. Ainda assim, o PLA-CF mantém compatibilidade com impressoras 3D FDM convencionais, adotando em grande parte as mesmas configurações de impressão do PLA comum.

Em termos estruturais, as fibras atuam como reforço mecânico, suportando as cargas aplicadas, enquanto a matriz de PLA envolve, protege e transfere essas cargas para as fibras (Ning *et al.*, 2015). A qualidade da peça final, no entanto, depende fortemente dos parâmetros de impressão, como orientação das camadas, temperatura, velocidade e geometria do modelo (Tekinalp *et al.*, 2014; Karsli; Aytac, 2013).

Compósitos de PLA com fibras de carbono vêm sendo estudados como alternativas viáveis para superar as limitações dos materiais poliméricos puros fabricados por FDM, que geralmente apresentam baixa resistência mecânica. Sua aplicação tem se expandido para áreas como aeronáutica, automotiva, energia eólica e equipamentos médicos, onde são exigidos materiais com maior desempenho e leveza (Shofner *et al.*, 2003; Chung, 2010).

Apesar do uso crescente do PLA CF em manufatura aditiva, os efeitos do tratamento térmico ainda são pouco explorados na literatura, especialmente quanto à correlação entre cristalinidade e resistência ao impacto.

4. MATERIAIS E METÓDIOS

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

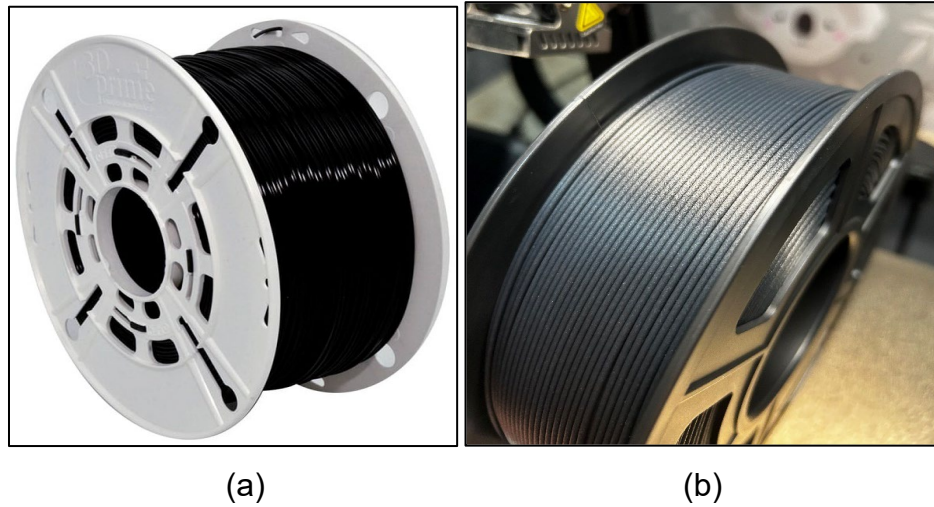
Neste estudo, foram analisados dois tipos de materiais com matriz de ácido polilático (PLA), originando quatro grupos experimentais distintos:

1. PLA HT sem tratamento térmico;
2. PLA HT com tratamento térmico;
3. PLA com fibra de carbono (PLA CF) sem tratamento térmico;
4. PLA com fibra de carbono (PLA CF) com tratamento térmico.

O PLA HT (High Temperature) fabricado pela marca 3D Prime ilustrado na Figura 22 (a), enquanto o PLA CF, composto por PLA reforçado com 20% de fibras curtas de carbono dispostas de forma aleatória, foi adquirido da marca GTMax3D ilustrado na Figura 22 (b). Ambos os filamentos apresentavam diâmetro padrão de 1,75 mm e foram mantidos em embalagens a vácuo até sua utilização. A densidade do PLA CF é de aproximadamente 1,282 g/cm³.

A inclusão de fibras de carbono nos materiais poliméricos visa conferir ao compósito características superiores de rigidez, resistência e estabilidade térmica. Tais propriedades tornam os compósitos PLA CF promissores para aplicações estruturais em setores como aeroespacial, automotivo e biomédico. O PLA HT, por sua vez, apresenta maior resistência térmica quando comparado ao PLA convencional, o que o torna adequado para aplicações que exigem maior estabilidade dimensional em temperaturas elevadas.

Figura 22 - Filamento PLA HT e PLA CF.

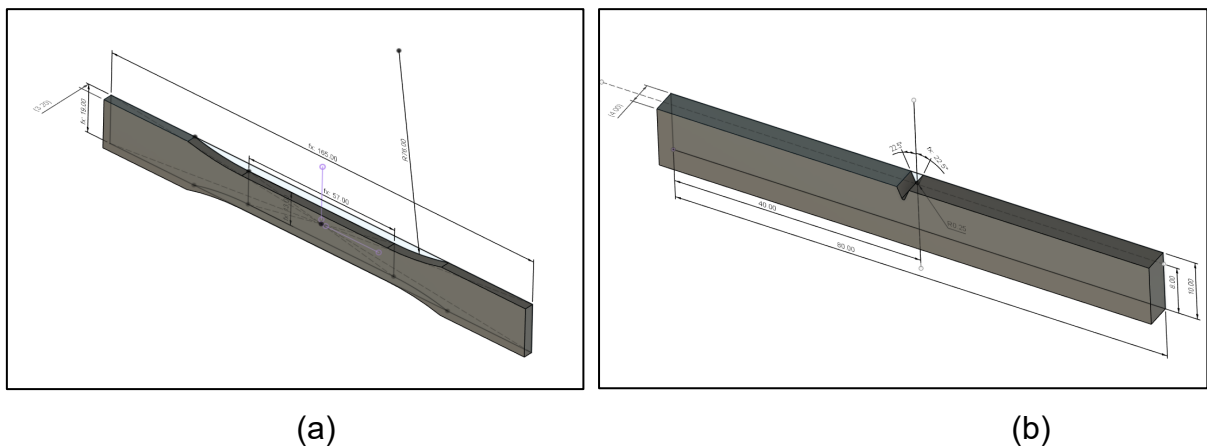


Fonte: Próprio Autor (2025).

4.2. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A modelagem dos corpos de prova foi realizada no software CAD Fusion da AutoDesk, seguindo as dimensões padronizadas estabelecidas pelas normas American Society For Testing And Materials. ASTM (2014) - Figura 23 (a) e International Organization For Standardization – ISO (2010) - Figura 23 (b).

Figura 23 - Corpos de Prova em 3D.



Fonte: Próprio Autor (2025).

A fabricação foi conduzida por meio de manufatura aditiva, utilizando a tecnologia FDM em uma impressora Ender 3 S1 Pro (Creality), ilustrada na Figura 24

em operação durante a produção dos corpos de prova, equipada com bico de latão aquecido e mesa com controle térmico.

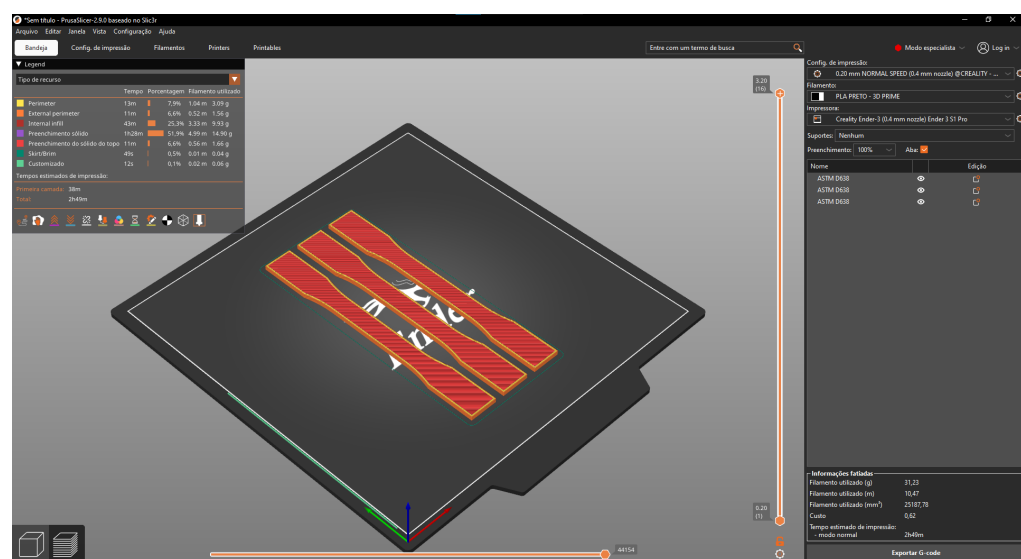
Figura 24 - Impressora Ender 3 S1 Pro em funcionamento.



Fonte: Próprio Autor (2025).

O software de fatiamento empregado foi o Prusa Slicer (versão 2.9.0) ilustrado na Figura 25, responsável pela conversão dos arquivos no formato STL (*Standard Triangle Language*) em código G-Code compatível com a impressora.

Figura 25 - Software de Fatiamento PrusaSlicer.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Os parâmetros de impressão foram mantidos constantes para todos os grupos experimentais, conforme especificado na Tabela 1. A orientação das camadas foi

padronizada em 45° e 135°, visando induzir uma anisotropia característica desse tipo de preenchimento, que influencia diretamente a distribuição de tensões e a propagação de trincas no interior da peça impressa. Não houve controle ativo da temperatura e umidade ambientais durante o processo de impressão, o que pode influenciar nas propriedades finais dos corpos de prova. Essa ausência de controle ambiental constitui uma limitação metodológica do estudo, uma vez que variações nas condições de temperatura e umidade podem afetar a adesão entre camadas, a taxa de resfriamento e, conseqüentemente, o comportamento mecânico e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Tabela 1 - Parâmetros de Impressão.

Parâmetros	Valor
Diâmetro do Bico	0,4 mm
Multiplicador de Extrusão	1
Largura de extrusão	0,4 mm
Altura da Camada	0,2 mm
Camadas de Perímetro	3
Velocidade de impressão	60 mm/s
Velocidade da primeira camada	10 mm/s
Temperatura da Extrusora	210°C
Temperatura da Mesa	60°C
Ventilação	100%
Padrão de Preenchimento	Retilíneo
Ângulo de Preenchimento	45° / 135°
Porcentagem de Preenchimento	100%

Fonte: Próprio Autor (2025).

Os parâmetros de impressão (Tabela 1) foram definidos com base em configurações amplamente utilizadas em processos de manufatura aditiva por FDM, considerando o equilíbrio entre qualidade superficial, precisão dimensional e tempo de fabricação. O diâmetro do bico de 0,4 mm é o mais comumente empregado em impressoras 3D FDM, por proporcionar boa resolução e uma taxa de deposição adequada para a maioria dos materiais termoplásticos. Dessa forma, a largura de extrusão foi mantida igual ao diâmetro do bico (0,4 mm), garantindo deposição uniforme e aderência adequada entre as camadas. O multiplicador de extrusão foi ajustado para 1, valor que assegura o fluxo correto de material, evitando tanto a subextrusão quanto o excesso de material.

A altura de camada de 0,2 mm representa um compromisso entre qualidade de acabamento e tempo de impressão, sendo considerada uma espessura padrão para obtenção de peças com boa definição sem aumento expressivo do tempo de fabricação. O uso de três camadas de perímetro visa aumentar a resistência mecânica das paredes externas e reduzir possíveis falhas interlaminares.

A velocidade de impressão de 60 mm/s é adequada para o material e o equipamento utilizados, proporcionando estabilidade dimensional sem comprometer a qualidade da deposição. Já a velocidade reduzida da primeira camada (10 mm/s) tem como objetivo aumentar a adesão inicial do material à mesa, evitando descolamentos e deformações durante a impressão.

A temperatura da extrusora (210 °C) foi definida conforme as recomendações do fabricante do filamento, garantindo uma boa fusão e adesão entre camadas. A temperatura da mesa aquecida (60 °C) contribui para a manutenção da aderência da primeira camada e para o controle das tensões térmicas, minimizando o risco de empenamento (*warping*).

A ventilação em 100% foi adotada para promover o resfriamento rápido do material depositado, favorecendo a estabilidade dimensional e reduzindo deformações em regiões de geometria complexa. O padrão de preenchimento retilíneo foi selecionado por oferecer um bom balanço entre resistência e tempo de impressão, além de simplificar o trajeto de deposição. O ângulo de preenchimento alternado em 45°/135° garante uma distribuição mais uniforme das tensões internas, resultando em maior isotropia mecânica da peça. Por fim, a porcentagem de preenchimento de 100% foi empregada com o intuito de eliminar vazios internos e obter corpos de prova totalmente densos, condição essencial para a comparação precisa das propriedades mecânicas entre os diferentes materiais e tratamentos.

A Figura 26 apresenta um dos corpos de prova logo após a impressão, antes da realização do tratamento térmico.

Figura 26 - Corpo de prova impresso antes do tratamento térmico.



Fonte: Próprio Autor (2025).

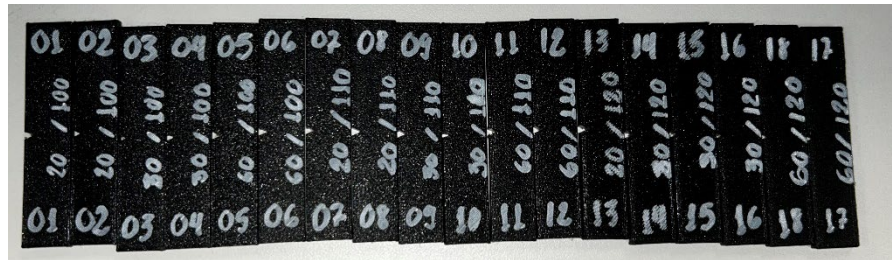
4.3. TRATAMENTO TÉRMICO

4.3.1. Objetivo e Procedimento

O tratamento térmico teve como finalidade promover a melhora das propriedades mecânicas e reduzir as tensões internas do PLA. Ainda que as propriedades térmicas também sejam favorecidas, conforme indicado pelo fabricante, tais aspectos não foram objeto de avaliação neste trabalho.

Realizou-se um pré-teste com corpos de prova do tipo ISO 179 (2010) (Figura 27), avaliando as temperaturas de 100°C, 110°C e 120°C, e tempos de exposição de 20, 30 e 60 minutos. Os critérios utilizados para definir as temperaturas escolhidas e o tempo de recozimento foi com base na literatura e nas recomendações do fabricante do material (3D Prime) que recomenda temperaturas de 80°C à 130°C de 10 à 30 minutos, também foi considerado outros fabricantes como a 3D Fila, além disso Pereira e Morales (2014) utilizaram 90°C e 90 minutos como parâmetros do tratamento térmico. Com base nos resultados observados no pré-teste, definiu-se a condição de 110°C por 60 minutos como a mais adequada.

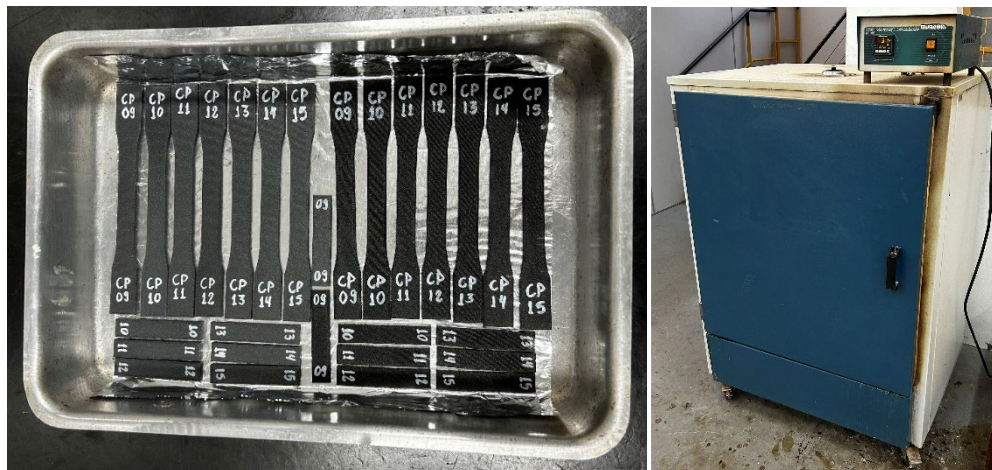
Figura 27 - Copos de prova do pré-teste após tratamento.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Os corpos de prova foram dispostos sobre superfície plana e introduzidos em estufa com controle térmico, como ilustrado na Figura 28. Ao final do tempo estipulado, o resfriamento ocorreu naturalmente até temperatura ambiente (aproximadamente 21°C).

Figura 28 - Corpos de prova em tratamento térmico na estufa.



Fonte: Próprio Autor (2025).

A cristalização induzida termicamente promove uma reorganização das cadeias poliméricas, favorecendo o aumento da densidade de empacotamento molecular e, conseqüentemente, a rigidez e estabilidade térmica do material. Este processo é especialmente relevante para aplicações em que se exige maior resistência a esforços mecânicos contínuos ou intermitentes em temperatura elevada.

4.3.2. Análise dimensional

Com o objetivo de identificar possíveis variações geométricas induzidas pelo tratamento térmico, foram realizadas medições dimensionais antes e após o procedimento.

As alterações dimensionais são relevantes, uma vez que indicam possíveis deformações térmicas ou retrações decorrentes do relaxamento de tensões internas. Tais variações podem comprometer a tolerância dimensional de componentes utilizados em aplicações industriais (Issametova *et al.*, 2024).

4.4. ENSAIOS MECÂNICOS

A avaliação das propriedades mecânicas dos materiais foi realizada por meio de ensaios de tração e impacto do tipo Izod, conforme as normas ASTM D638 (2014) e ISO 179 (2010), respectivamente.

Os ensaios de tração foram realizados em máquina universal de ensaios da marca EMIC, conforme ilustra a Figura 29. Foram testados cinco corpos de prova por grupo experimental, conforme estipula a norma ASTM D638 (2014). A velocidade de ensaio foi ajustada de acordo com o tipo de corpo de prova (tipo I), sendo fixada em 5 mm/min. As condições de temperatura ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa ($50 \pm 5\%$) também foram mantidas conforme os critérios normativos. O módulo de elasticidade foi determinado utilizando-se o método da tangente, apropriado para polímeros, cuja curva tensão-deformação exibe comportamento não linear.

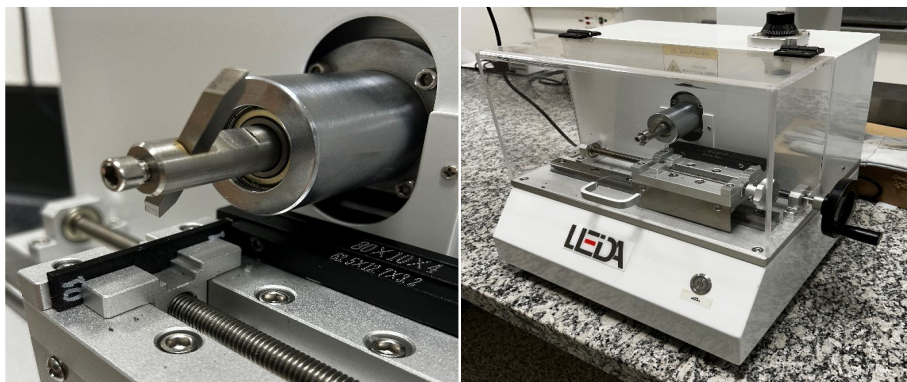
Figura 29 - Ensaio de tração em execução na máquina EMIC.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Para o ensaio de impacto os corpos de prova foram previamente entalhados com o auxílio de entalhadeira adequada, respeitando as especificações da norma ISO 179 (2010), conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Processo de entalhe dos corpos de prova.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Os ensaios de impacto foram realizados em máquina do tipo pêndulo, representada na Figura 31, a qual permite o registro da energia absorvida no momento da fratura. Esta medida foi utilizada como indicador da tenacidade do material,

Figura 32 - Microscópio Óptico utilizado na análise.



Fonte: Próprio Autor (2025).

4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o software Minitab. Inicialmente, os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Ryan-Joiner, devido à sua semelhança com o teste de Shapiro-Wilk, com o objetivo de verificar se as amostras seguiam distribuição normal.

Confirmada a normalidade dos dados, foram aplicados testes t pareados para comparar os valores obtidos antes e depois do tratamento térmico, considerando que as medições foram feitas sobre os mesmos corpos de prova em diferentes condições.

Os dados referentes aos ensaios de tração e impacto foram analisados por meio da Análise de Variância (ANOVA), adequado para comparações entre grupos independentes. Em seguida, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey para identificar quais grupos apresentavam diferenças estatisticamente significativas.

Os resultados são apresentados por meio de letras associadas a cada grupo: grupos que compartilham a mesma letra não diferem estatisticamente entre si, enquanto grupos com letras diferentes apresentam diferenças significativas.

Adotou-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Quando o valor de p (p-valor) foi inferior a esse limite, a hipótese nula (H_0) – que pressupõe igualdade entre as médias – foi rejeitada, sendo aceita a hipótese alternativa (H_a), que indica diferença estatisticamente significativa entre as condições comparadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA ESTABILIDADE DIMENSIONAL

5.1.1. Corpos de prova de tração

A Tabela 2 apresenta os resultados das medições dimensionais dos corpos de prova de tração de PLA HT e PLA CF antes e após o tratamento térmico, os dados integrais estão contidos no Apêndice 1.

Tabela 2 - Média dimensional dos corpos de prova ensaio de tração.

TIPO	Tratamento	Wc (mm)	T (mm)	Área (mm ²)
PLA HT	SEM	13,21	3,46	45,75
PLA HT	COM	13,16	3,28	43,13
Variação		0,05	0,19	2,62
Coefficiente de Variação (%)		1,28	-12,50	-11,06
PLA CF	SEM	13,09	3,34	43,77
PLA CF	COM	12,92	3,76	48,61
Variação		0,17	-0,42	-4,84
Coefficiente de Variação (%)		0,38	5,37	5,73

Fonte: Próprio Autor (2025).

Para os corpos de prova de PLA CF, a dimensão Wc apresentou uma redução média de 0,05 mm após o tratamento térmico, passando de 13,21 mm para 13,16 mm. O teste t com nível de significância de 5% pareado indicou que essa diferença é estatisticamente significativa (p-valor = 0,004).

A dimensão T também apresentou redução, com uma média que passou de 3,46 mm (sem tratamento) para 3,28 mm (com tratamento), com diferença média de 0,18 mm e p-valor de 0,001, indicando significância estatística.

Esses resultados mostram que o tratamento térmico provocou alterações significativas nas propriedades físicas do PLA CF, levando a uma redução nas variáveis analisadas.

Nos corpos de prova fabricados com PLA HT, a dimensão Wc apresentou uma redução média de 0,16 mm após o tratamento térmico, passando de 13,09 mm para

12,92 mm. O teste t com nível de significância de 5% pareado revelou uma diferença significativa, com valor de $p = 0,000$.

Por outro lado, a dimensão T apresentou aumento após o tratamento térmico, saindo de 3,34 mm para 3,76 mm, com diferença média de 0,42 mm. Essa diferença também foi estatisticamente significativa (p -valor = 0,000).

Esses dados indicam que o tratamento térmico afetou o PLA HT de maneira distinta em relação ao PLA CF. Enquanto ambos os materiais apresentaram redução em W_c , a dimensão T aumentou de forma significativa apenas no PLA HT.

5.1.2. Corpos de prova de impacto

A Tabela 3 apresenta os resultados das medições dimensionais dos corpos de prova de impacto de PLA HT e PLA CF antes e após o tratamento térmico, os dados integrais estão contidos no Apêndice 2.

Tabela 3 - Média dimensional dos corpos de prova ensaio de Impacto.

TIPO	Tratamento	h (mm)	b (mm)	l (mm)	Volume (mm ³)
PLA HT	SEM	4,02	10,03	80,01	3226,05
PLA HT	COM	4,26	10,19	79,49	3450,61
Variação		0,24	0,16	-0,52	224,56
Coefficiente de Variação (%)		6,0	1,6	-0,6	6,96
PLA CF	SEM	4,19	10,26	80,16	3446,03
PLA CF	COM	4,17	9,90	78,90	3257,23
Variação		-0,02	-0,36	-1,26	-188,80
Coefficiente de Variação (%)		-0,5	-3,5	-1,6	-5,48

Fonte: Próprio Autor (2025).

Para os corpos de prova de PLA HT, a dimensão b apresentou um aumento médio de 0,16 mm após o tratamento térmico, passando de 10,03 mm para 10,19 mm. Essa diferença foi considerada estatisticamente significativa, com intervalo de confiança de 95% entre -0,2743 e -0,2237, e p -valor igual a 0,000.

A dimensão “h”, por sua vez, teve um aumento mais expressivo, com média passando de 4,02 mm (sem tratamento) para 4,26 mm (com tratamento), resultando

em um acréscimo médio de 0,24 mm, também com significância estatística (p-valor = 0,000).

A dimensão “l” apresentou uma redução média de 0,52 mm, passando de 80,01 mm para 79,49 mm após o tratamento térmico. O teste t com nível de significância de 5% pareado indicou que em todas as dimensões as diferenças foram estatisticamente significativas.

Nos corpos de prova fabricados com PLA CF, a dimensão h apresentou uma leve redução, de 0,02 mm, passando de 4,19 mm para 4,17 mm após o tratamento térmico. Por outro lado, a dimensão “b” apresentou uma redução média mais expressiva, de 0,36 mm, passando de 10,26 mm para 9,90 mm após o tratamento térmico. A dimensão l teve uma contração ainda mais significativa, passando de 80,16 mm para 78,90 mm, resultando em uma redução média de 1,26 mm. O teste t com nível de significância de 5% pareado indicou que em todos os casos as diferenças foram estatisticamente significativas.

A comparação entre os dois materiais revela que o PLA HT apresentou variações dimensionais menores quando comparado ao PLA CF, embora ambas as alterações tenham sido significativas. Isso sugere que o PLA CF, com a presença de fibras de carbono, é mais suscetível a deformações térmicas, principalmente na contração quanto na expansão, indicando um comportamento mais instável sob tratamento térmico.

5.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DAS AMOSTRAS

A Tabela 4 apresenta os resultados do ensaio de tração para os materiais testados: PLA HT e PLA CF (com e sem o tratamento térmico) , os dados na íntegra estão no Apêndice 3.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração.

Material	Tratamento	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
PLA HT	SEM	31,55	3,37	10,7
PLA HT	COM	18,42	3,41	18,5
PLA CF	SEM	23,03	3,79	16,4
PLA CF	COM	31,37	2,74	8,7

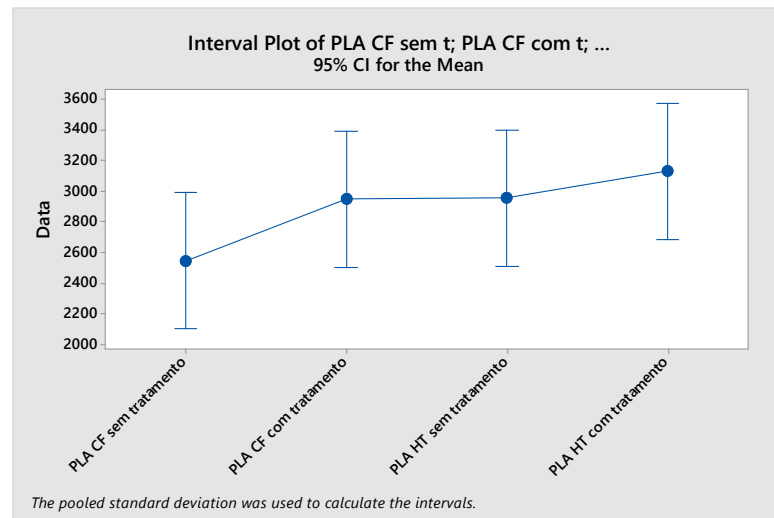
Fonte: Próprio Autor (2025).

Para os corpos de prova de PLA CF, observou-se um aumento numérico expressivo após o tratamento térmico. A força máxima aplicada ($F_{m\acute{a}x.}$) média passou de 23,03 MPa para 31,37 MPa, enquanto o módulo de elasticidade aumentou de 2.545,35 MPa para 2.946,31 MPa. Esses resultados indicam que o tratamento térmico teve efeito positivo sobre a rigidez e a resistência do material.

Em contraste, os corpos de prova de PLA HT apresentaram redução em $F_{m\acute{a}x.}$ após o tratamento, com a média passando de 31,55 MPa para 18,42 MPa, apesar de um leve aumento no módulo de elasticidade, de 2.955,44 MPa para 3.129,19 MPa. Esse comportamento sugere que, embora o material tenha se tornado mais rígido, sua resistência à tração foi comprometida com o tratamento térmico.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com os quatro grupos experimentais a fim de verificar se havia diferenças significativas entre os valores do módulo de elasticidade. O resultado obtido foi um p-valor de 0,281, indicando que não houve diferença estatisticamente entre os grupos, conforme Figura 34.

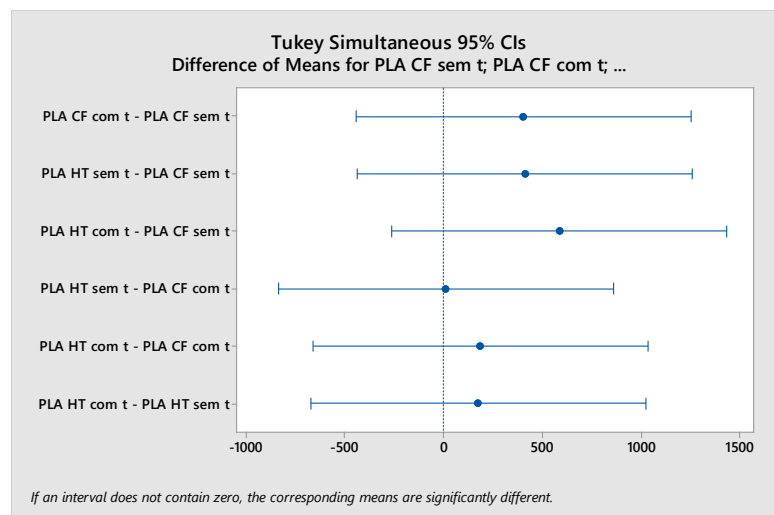
Figura 33 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos 4 grupos experimentais.



Fonte: Próprio Autor (2025).

O teste de comparações múltiplas de Tukey confirmou esse resultado, agrupando todos os grupos sob a mesma letra ("A"), o que indica ausência de diferenças estatísticas entre as médias. Ainda que os valores numéricos apresentem variações entre os grupos, especialmente com aparente aumento após o tratamento térmico, essas diferenças não foram estatisticamente significativas dentro do intervalo de confiança adotado, conforme Figura 35.

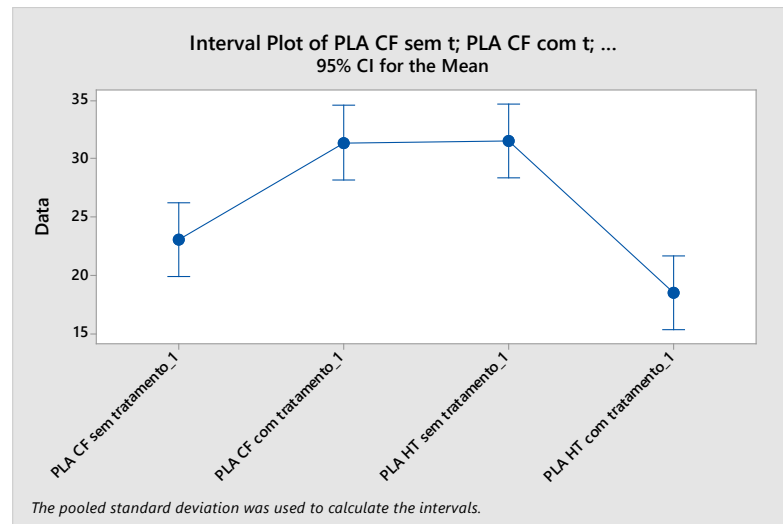
Figura 34 - Teste de Tukey para o módulo de elasticidade dos quatro grupos experimentais.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Já para os valores de $F_{\text{máx}}$, o resultado da ANOVA apresentou um p-valor igual a 0,000, indicando rejeição da hipótese nula (Figura 36). Portanto, constatou-se que ao menos um dos grupos apresenta resistência estatisticamente diferente dos demais.

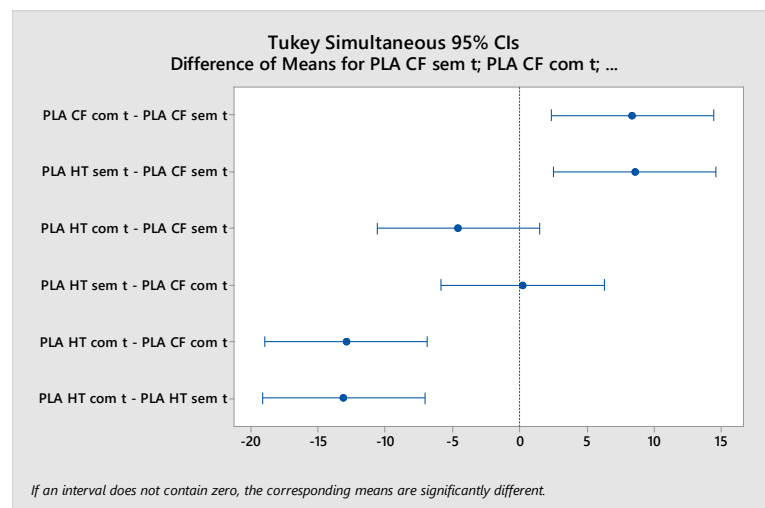
Figura 35 - Análise de variância da resistência dos 4 grupos experimentais.



Fonte: Próprio Autor (2025).

O teste de comparações múltiplas de Tukey permitiu identificar onde essas diferenças ocorreram (Figura 37). Os grupos PLA HT sem tratamento e PLA CF com tratamento apresentaram os maiores valores médios de $F_{\text{máx}}$. (31,55 MPa e 31,37 MPa, respectivamente), sendo agrupados sob a mesma letra ("A"). Já os grupos PLA CF sem tratamento (23,03 MPa) e PLA HT com tratamento (18,42 MPa) apresentaram médias significativamente inferiores, sendo agrupados na letra "B".

Figura 36 - Teste de Tukey para a resistência dos quatro grupos experimentais.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Esses resultados indicam que, embora o tratamento térmico tenha melhorado a resistência do PLA CF, ele reduziu significativamente a resistência do PLA HT. Por outro lado, o PLA HT sem tratamento térmico e o PLA CF com tratamento térmico apresentaram desempenhos similares, estatisticamente indistintos entre si, mas superiores aos demais.

Portanto, os testes estatísticos confirmam que a resistência máxima dos materiais é fortemente influenciada tanto pela composição quanto pela aplicação do tratamento térmico, sendo o comportamento dependente do tipo de PLA utilizado.

5.3. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO

A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de impacto para os materiais testados: PLA HT e PLA CF (com e sem o tratamento térmico), os dados na íntegra estão no Apêndice 4.

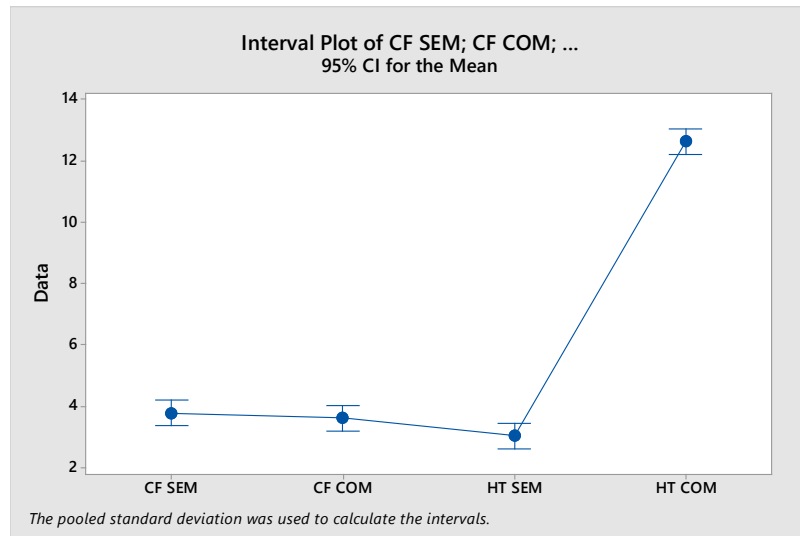
Tabela 5 - Resultados do ensaio de impacto.

Material	Tratamento	Resistência Média (kJ/m²)	Desvio Padrão (kJ/m²)	Coeficiente de Variação (%)
PLA HT	SEM	3,01	0,34	11,3
PLA HT	COM	12,65	1,23	9,7
PLA CF	SEM	3,77	0,22	5,9
PLA CF	COM	3,60	0,08	2,2

Fonte: Próprio Autor (2025).

Do ponto de vista estatístico, a ANOVA revelou diferenças significativas entre os quatro grupos avaliados (p -valor = 0,0000), indicando que ao menos um deles apresenta comportamento distinto em relação aos demais. A Figura 38 apresenta os resultados das comparações múltiplas.

Figura 37 - Resultado da análise de variância dos grupos.

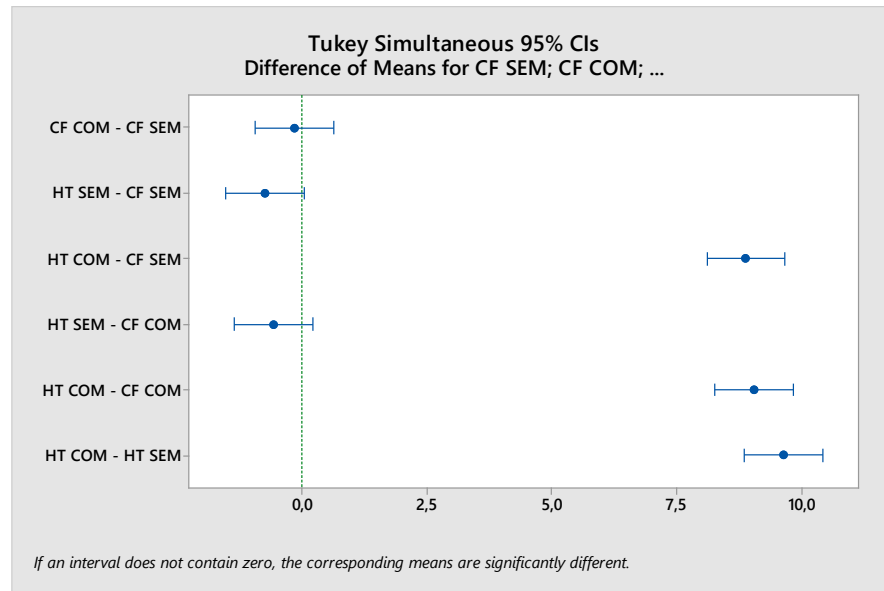


Fonte: Próprio Autor (2025).

As comparações múltiplas realizadas por meio do teste de Tukey revelaram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos com e sem tratamento térmico, conforme Figura 39. O grupo PLA HT com tratamento térmico apresentou a maior média de resistência ao impacto ($12,65 \text{ kJ/m}^2$), sendo estatisticamente superior aos demais e formando um agrupamento distinto (grupo A). Por outro lado, os grupos PLA CF sem tratamento térmico ($3,77 \text{ kJ/m}^2$), PLA CF com tratamento térmico ($3,60 \text{ kJ/m}^2$) e PLA HT sem tratamento térmico ($3,01 \text{ kJ/m}^2$) foram agrupados juntos (grupo B), indicando que não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si.

Esses resultados demonstram que o tratamento térmico foi altamente eficaz em melhorar a resistência ao impacto do PLA HT, enquanto não produziu efeitos relevantes no comportamento mecânico do PLA CF. Isso sugere que a presença de fibras de carbono no PLA CF pode conferir maior estabilidade estrutural ao material, reduzindo a influência de variações térmicas nas suas propriedades mecânicas.

Figura 38 - Resultado da comparação múltipla.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Os resultados dos ensaios de impacto demonstraram que o tratamento térmico influenciou de maneira distinta o desempenho mecânico dos materiais analisados. O PLA HT apresentou um ganho expressivo na resistência ao impacto após o tratamento térmico, com um aumento substancial nos seus valores e uma performance significativamente superior em comparação aos demais grupos. Esse comportamento indica que o tratamento promoveu uma capacidade maior de absorção de energia.

5.4. AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA

A análise conjunta das micrografias das superfícies de fratura e dos resultados experimentais obtidos nos ensaios mecânicos de impacto e tração evidencia que o efeito do tratamento térmico depende fortemente do tipo de PLA analisado e da condição de solicitação. É importante ressaltar que a microscopia óptica traz limitações a análise visto sua precisão.

A Figura 39 apresenta uma imagem representativa da fratura do PLA CF observada em microscopia óptica onde é possível verificar as fibras de carbono espalhadas na matriz de PLA.

Figura 39 - Imagem microscópica de fratura no PLA CF.

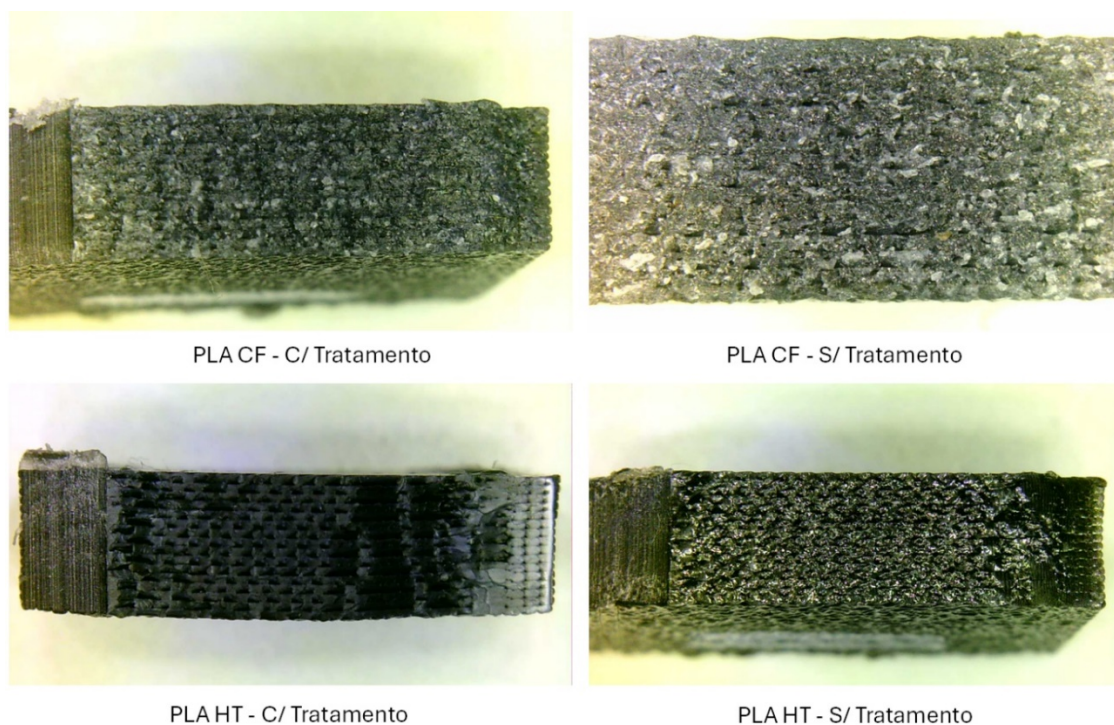


Fonte: Próprio Autor (2025).

Observações qualitativas permitiram identificar regiões com boa adesão entre a matriz e a fibra, além da presença de vazios e descontinuidades que podem indicar pontos críticos de falha. Essa abordagem complementa os dados mecânicos, oferecendo subsídios para correlacionar desempenho estrutural com aspectos microestruturais, permitindo, assim, uma compreensão mais abrangente do comportamento dos compósitos PLA reforçados.

No ensaio de impacto, os resultados demonstraram que o PLA HT com tratamento térmico apresentou um ganho expressivo na resistência, alcançando valores médios de 12,65 kJ/m², em contraste com apenas 3,01 kJ/m² para o mesmo material sem tratamento. Essa diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$) e pode ser atribuída ao aumento da cristalinidade induzido pelo tratamento, o qual favorece maior homogeneidade estrutural e coesão Interlaminar. Esse comportamento foi corroborado pelas micrografias (Figura 40), nas quais o PLA HT tratado exibiu fraturas mais regulares e com menor presença de falhas Inter laminares, sugerindo maior capacidade de dissipação de energia. De acordo com Callister (2020), a cristalização em polímeros semicristalinos pode reduzir a mobilidade molecular, mas, em determinadas condições, aumenta a tenacidade ao proporcionar um caminho mais uniforme para a propagação de trincas.

Figura 40 - Vista microscópica da fratura do Ensaio de Impacto.



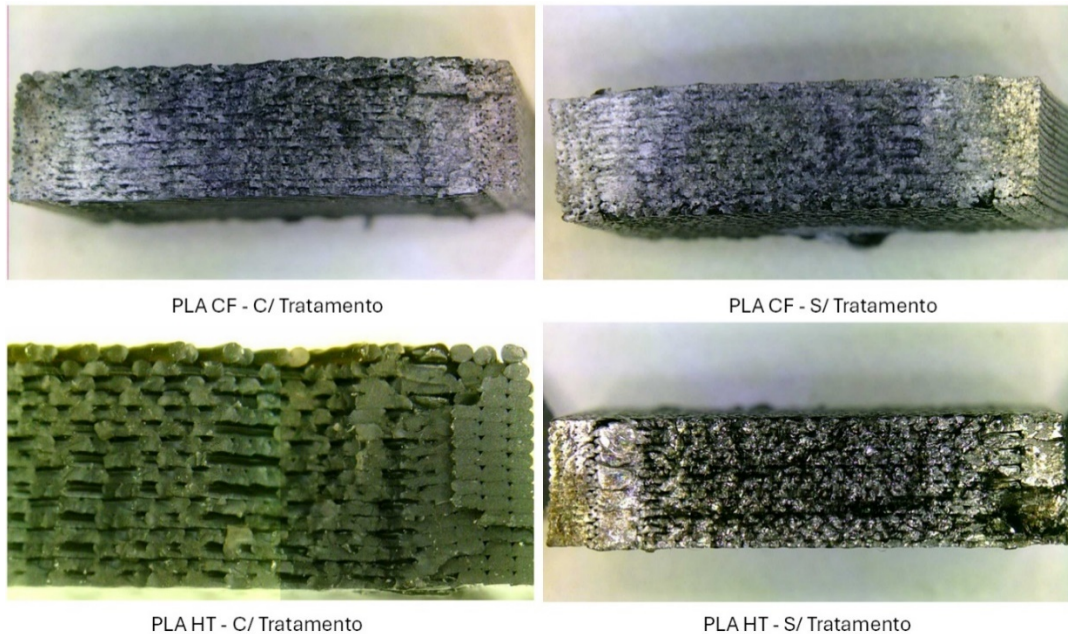
Fonte: Próprio Autor (2025).

Por outro lado, o PLA HT sem tratamento apresentou fraturas com maior irregularidade e presença de vazios interlaminares, aspecto que está associado à sua baixa capacidade de absorção de energia. Já o PLA CF, tanto com quanto sem tratamento térmico, não apresentou diferenças significativas nos resultados de impacto ($3,77 \text{ kJ/m}^2$ sem tratamento e $3,60 \text{ kJ/m}^2$ com tratamento). Essa estabilidade sugere que a presença das fibras de carbono já confere ao material um reforço estrutural suficiente para limitar a influência do tratamento térmico, comportamento descrito também por Beber (2020), ao destacar que fibras de alto módulo tendem a controlar a propagação de trincas e reduzir a influência da matriz polimérica em solicitações dinâmicas.

Nos ensaios de tração, verificou-se um comportamento distinto. O PLA CF tratado apresentou incremento considerável na resistência máxima ($31,37 \text{ MPa}$) em comparação ao material sem tratamento ($23,03 \text{ MPa}$). As micrografias (Figura 41) evidenciam que esse ganho está associado a uma melhor coesão entre camadas e menor presença de porosidade, fatores que contribuem para a elevação da resistência. Esses resultados estão em consonância com estudos de Gibson, Rosen e Stucker (2015), que ressaltam a importância da adesão Interlaminar na

determinação das propriedades mecânicas de peças impressas por manufatura aditiva.

Figura 41 - Vista microscópica da fratura do Ensaio de Tração.



Fonte: Próprio Autor (2025).

Em contrapartida, o PLA HT tratado apresentou redução significativa da resistência à tração, passando de 31,55 MPa (sem tratamento) para apenas 18,42 MPa (com tratamento), conforme Tabela 4. Apesar de as micrografias indicarem uma fratura aparentemente mais homogênea após o tratamento, a cristalização excessiva gerada levou a um aumento da rigidez, refletido em um módulo de elasticidade superior, mas também a uma redução da tenacidade, tornando o material mais suscetível à fratura frágil. Esse fenômeno já havia sido descrito por Turner, Strong e Gold (2014), que observaram que o excesso de cristalinidade pode comprometer o desempenho de polímeros semicristalinos sob carregamentos estáticos.

Assim, os resultados obtidos demonstram que o tratamento térmico exerce efeitos opostos dependendo da composição do material e do tipo de solicitação:

- No PLA HT, promoveu ganhos significativos na resistência ao impacto, mas reduziu de forma acentuada a resistência à tração.
- No PLA CF, aumentou a resistência à tração, mas não gerou impacto relevante no ensaio de impacto.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o tratamento térmico exerceu impacto sobre as propriedades mecânicas e dimensionais dos materiais PLA CF e PLA HT.

O PLA CF apresentou aumento de aproximadamente 36,21% na resistência à tração após o tratamento térmico (de 23,03 MPa para 31,37 MPa), evidenciando que o recozimento pode atuar em associação com as fibras de carbono, resultando em uma estrutura mais rígida e resistente. Esse comportamento indica potencial para aplicações que demandam elevado desempenho mecânico e estabilidade estrutural, como componentes de fixação, suportes estruturais, gabaritos de montagem e peças técnicas sujeitas a esforços de tração.

Por outro lado, o PLA HT apresentou redução de cerca de 41,62% na resistência à tração (de 31,55 MPa para 18,42 MPa), acompanhada de aumento relevante de 283% na resistência ao impacto (de 3,30 kJ/m² para 12,65 kJ/m²). Esse comportamento sugere que o tratamento térmico promoveu modificações estruturais que aumentaram a flexibilidade e a capacidade de dissipação de energia sob impacto, possivelmente associadas à reorganização das cadeias poliméricas e à influência dos aditivos presentes em sua formulação. Dessa forma, o PLA HT tratado apresenta potencial para aplicações que exigem maior tenacidade e absorção de energia, como carcaças, protetores, revestimentos ou componentes sujeitos a choques e vibrações.

Do ponto de vista dimensional, observou-se que ambos os materiais sofreram alterações após o tratamento térmico, mas de formas distintas. O PLA HT apresentou aumento nas dimensões de largura (b) e espessura (h) e redução no comprimento (l), indicando tendência de aglomeração do material. Já o PLA CF apresentou reduções em todas as dimensões, especialmente no comprimento e na largura, sugerindo maior suscetibilidade a deformações térmicas. Esses resultados estão diretamente relacionados ao objetivo específico de avaliar a estabilidade dimensional dos materiais.

Entre as limitações metodológicas do presente estudo, destaca-se a ausência de controle ativo da temperatura e umidade ambientais durante a impressão 3D, que pode ter influenciado as propriedades finais dos corpos de prova. Além disso, a utilização exclusiva de microscopia óptica e a adoção de uma única condição de temperatura e tempo de tratamento térmico restringem a abrangência das conclusões.

Se houvesse a oportunidade de variar o tempo e a temperatura de recozimento, acredita-se que os resultados poderiam apresentar comportamentos mais amplos. Temperaturas mais elevadas ou tempos mais longos poderiam intensificar a cristalinidade e a rigidez dos materiais, elevando a resistência à tração, porém com risco de deformações dimensionais acentuadas. Já condições mais brandas poderiam preservar melhor a estabilidade dimensional, mas com menor efeito sobre as propriedades mecânicas. A análise desses parâmetros permitiria identificar um ponto ótimo de equilíbrio entre resistência, tenacidade e estabilidade dimensional.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e ensaios de cristalinidade Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) ou Difração de Raios-X (DRX), a fim de aprofundar a compreensão das modificações estruturais induzidas pelo tratamento térmico. Também seria pertinente explorar diferentes temperaturas e tempos de recozimento, visando otimizar o desempenho mecânico e dimensional dos compósitos de PLA.

A escolha entre os dois materiais pode depender, portanto, das exigências específicas da aplicação privilegiando o PLA CF quando a resistência estrutural for o fator predominante, e o PLA HT quando a absorção de impacto e a flexibilidade forem mais relevantes.

REFERÊNCIAS

3DFILA. **Filamento PLA de Alta Temperatura HT**. 2023. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <https://blog.3dfila.com.br/filamento-pla-de-alta-temperatura-ht/>. Acesso em: 25 maio 2025.

3DLAB. **Conheça os tipos de impressão 3D e os seus benefícios!**. Blog 3DLAB. 25 set. 2018. Betim, MG. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/?srsltid=AfmBOopWWXVUBCd3oJNyM0PhrVdBL-SGsBp18V2xWvslr-K6Q9QHurjy>. Acesso em: 25 maio 2025.

3DLAB. **Dicas para imprimir com filamento flexível**. 2024. Betim, MG. Disponível em: https://3dlab.com.br/como-imprimir-com-filamento-flexivel/?srsltid=AfmBOopgjYQjuHpwmGtqf_KXS6yki4etmm9BuB15KVb6Qo56QEjI2aLj. Acesso em: 25 maio 2025.

3DPRIME. **PLA Premium HT Impact High Speed**. 2025. São Caetano do Sul – SP. Disponível em: <https://3dprime.com.br/produto/pla-premium-ht-impact-preto/>. Acesso em: 25 maio 2025.

ABREU, J. T. F. de. **Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/103416/2/186784.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. 1. ed. Barueri: Manole Ltda, 2007.

ALCAIDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro. **Revista Ciências Exatas**, v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018.

ALL3DP. **Os melhores filamentos para impressora 3D**. 2023. Disponível em: <https://all3dp.com/pt/1/filamento-impressora-3d-comparacao-melhor-tipo/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ALZHRANI, M. **Modification of recycled poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D-printing applications**. 2017. Thesis (Master of Applied Science in Chemical Engineering) – University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440R-96**: state-of-the-art report on fiber reinforced plastic (frp) reinforcement for concrete structures. Farmington Hills, MI: ACI Committee 440, 68 p. 1996. Disponível em: https://www.academia.edu/download/37278580/440r_96.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-638**: standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

AURAS, R. *et al.* **An overview of polylactides as packaging materials**. Macromolecular bioscience, v. 4, n. 9, p. 835–864, 2004.

AUTODESK. **Fusion**. Versão v.2.0.21538. [S. l.], 23 fev. 2025. Disponível em: <https://www.autodesk.com/br/products/fusion-360/overview>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BAMBU LAB. **Printed Model Warping**: Causes and Solutions. Bambu Lab Wiki, [S. l.], p. 1, 19 maio 2025. Disponível em: <https://wiki.bambulab.com/en/knowledge-sharing/printed-model-warping>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BATES-GREEN, K.; HOWIE, T. **Materials for 3D printing by fused deposition**. **Technical education in additive manufacturing and materials**, p. 1-21, 2017.

BCN3D. **How to Prevent Infill Marks on the Surface of your Pieces**. [S. l.], 11 jun. 2025. Disponível em: <https://support.bcn3d.com/knowledge/avoid-infill-marks>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. 1999. 108p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1999.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 288p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2003.

BIRON, M. **Thermoplastics and thermoplastic composites**. 2nd ed. London: Elsevier, 2013.

BORDES, P.; POLLET, E.; AVÉROUS, L. **Nano-biocomposites: biodegradable polyester/nanoclay systems**. Progress in Polymer Science, v. 34, n. 2, p. 125–155, 2009.

BRASILIA FAB LAB. GUIA: **A tecnologia de impressão 3D**. Medium, [S. l.], p. 1, 11 jun. 2025. Disponível em: <https://medium.com/bsbfablab/guia-a-tecnologia-de-impress%C3%A3o-3d-2d8b6b8cb5e5>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BRITO, G. F. *et al.* **Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 6, p. 127-139, 05 jan. 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Abordagem Integrada**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010.

CARNEIRO, L. R. R.; BARBAR, G. D. **Influência da temperatura da mesa de impressão 3D na dureza e dimensões geométricas de amostras em ABS.** In: Congresso da ABCM, 2019, Ilhéus. Anais [...]. Itabuna: ABCM, 2019.

CAROLINO, A. S. **Estimativa do percentual de cristalinidade de polímeros semicristalinos derivados da anilina através dos padrões de difração de raios X.** Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CASTRO-AGUIRRE, E. *et al.* **Poly (lactic acid): mass production, processing, industrial applications, and end of life.** Advanced Drug Delivery Reviews, v. 107, p. 333–366, 2016.

CHRISTIYAN, K. G. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. **A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 114, p. 012109, 2016.

CHUNG, D. D. L. **Composite materials: science and applications.** 2nd ed. UK: Springer, 2010.

COJOCARU V. *et al.* **The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication - A Review.** Polymers. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/5/886>. Acesso em: 25 maio 2025.

CRUMP, S. S. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects.** U.S. Patent 5,121,329A, 1992. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US5121329/en>. Acesso em: 25 maio 2025.

DAVE, H.; PATEL, V. **Process parameters and optimization in FFF printing.** Materials Today: Proceedings, 2021.

DOMINGUES, B. **Novos materiais compósitos desenvolvidos por meio da simulação molecular com BIOVIA Materials Studio**. EDC Tecnologia, [S. l.], p. 1, 26 out. 2020. Disponível em: <https://edctecnologia.com.br/novos-materiais-compositos-desenvolvidos-por-meio-da-simulacao-molecular-com-biovia-materials-studio/>. Acesso em: 9 jun. 2025.

ENGIPRINTERS. **O que é e como funciona a impressão 3D FDM?**. Blog - EngiPrinters. 21 ago. 2019. Disponível em: . Acesso em: 25 maio 2025.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. **Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications** — a comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 107, p. 367–392, 2016.

FERNANDES, J. F. M. **Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA**. 2016. 113 f. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2016.

FIGUEIREDO, M. **Por que a altura da camada de impressão 3D é importante?** *Manufatura Digital*, 2021. Disponível em: <https://www.manufaturadigital.com/altura-da-camada-impressao-3d/>. Acesso em: 05 nov. 2024.

FOCKE, W. W. *et al.* Mechanical properties of ternary blends of ABS+HIPS+PETG. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 48, n. 8, p. 814–820, jul. 2009. DOI: 10.1080/03602550902994862. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03602550902994862>. Acesso em: 05 nov. 2024.

GARLOTTA, D. A literature review of poly(lactic acid). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 9, n. 2, p. 63–84, 2001.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015.

GRASSO, M. *et al.* Effect of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens. **Rapid Prototyping Journal**, v. 24, n. 8, p. 1337–1346, 2018. DOI: 10.1108/RPJ-04-2017-0055. Disponível em: <https://www.emerald.com/rpj/article-abstract/24/8/1337/367278/Effect-of-temperature-on-the-mechanical-properties?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 05 nov. 2024.

HAGE JÚNIOR, E.; PESSAN, L. A.; BASSANI, A. Propriedades mecânicas de blendas de Nylon-6/Acrilonitrila-EPDM-Estireno (AES) compatibilizadas com copolímero acrílico reativo (MMAMA). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, 2002. DOI: 10.1590/S0104-14282002000200009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/LkwTCQpNXvpvk7MgHMwb43J/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2025.

HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ASTM 52900**: additive manufacturing: general principles: fundamentals and vocabular. Geneva: ISO, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 179-1**: Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Noninstrumented impact test. Geneva: ISO, 2010.

IVO, A. P. J. **Impressão 3D FFF de compósitos PLA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia), Universidade Federal de Itajubá, 2023.

ISSAMETOVA, M. *et al.* Determination of residual stresses in 3D-printed polymer parts. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 14, art. 2067, 2024. DOI: 10.3390/polym16142067. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/14/2067>. Acesso em: 30 set. 2025.

JAMSHIDIAN, M. *et al.* Poly-lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 5, p. 552–571, 2010. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>. Acesso em: 30 set. 2025.

KAMER, M. S. *et al.* Effect of printing speed on FDM 3D-printed PLA samples produced using different two printers. **International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry**, v. 6, n. 3, p. 438–448, 2022. DOI: 10.46519/ij3dptdi.1088805. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2313733>. Acesso em: 12 nov. 2025.

KUMAR, M. S. *et al.* Achieving effective interlayer bonding of PLA parts during the material extrusion process with enhanced mechanical properties. **Scientific Reports**, v. 13, art. n. 6800, 26 abr. 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-33510-7. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-33510-7>. Acesso em: 12 nov. 2025.

KARSLI, N. G.; AYTAC, A. Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 51, p. 270–275, 2013. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.03.023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681300125X>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KRONR. **Display Tray for Infill Pattern and Infill Density**. Thingiverse, [S. l.], 30 ago. 2016, Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:1742515>. Acesso em: 9 jun. 2025.

KRÜTZMANN, M. H. **Comportamento numérico e vida em fadiga de elastômeros clorados em função da temperatura**; 2015; Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

KARAD, A. S.; SONAWANAY, P. D.; NAIK, M.; THAKUR, D. G. **Experimental study of effect of infill density on tensile and flexural strength of 3D printed parts**.

Journal of Engineering and Applied Science (JEAS), v. 70, art. 104, 01 Sept. 2023. DOI: 10.1186/s44147-023-00273-x. Disponível em: <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-023-00273-x>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LANZOTTI, A. *et al.* The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 5, p. 604–617, 2015. DOI: 10.1108/RPJ-09-2014-0135. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>. Acesso em: 25 maio 2025.

LAPORTA, T. **Casas impressas em 3D evoluem e entram no radar de construtoras no Brasil.** Infomoney, 07 jun. 2024. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/business/casas-impressas-em-3d-evoluem-e-entram-no-radar-de-construtoras-no-brasil/>. Acesso em: 25 maio 2025.

LOCKER, A. **PETG Filament:** The Best Choice for Strong and Flexible 3D Prints. ALL3DP, 2017. Disponível em: <https://all3dp.com/1/petg-filament-3d-printing/>. Acesso em: 25 maio 2025.

MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** São Paulo: PINI, 2002.

MAGALHÃES, B. H. F. **Comparação entre as técnicas difração de raios-X e DSC na obtenção do grau de cristalinidade do PP e do PEAD.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado – Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MAIA, F. D. F. **Efeitos do tratamento térmico de recozimento na resistência à tração e no alongamento de peças de PLA e PLA HT fabricadas por impressão 3D.** 2025. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Campus de Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2025.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Artliber, 2005.

MANUFACTURING GUIDE. **Laminated Object Manufacturing, LOM**. Kungsgata, Suécia, [2025]. Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>. Acesso em: 25 maio 2025.

MAQSOOD, N.; RIMAŠAUSKAS, M. Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling, **Composites Part C: Open Access**, 2021. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100112. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100112>. Acesso em: 25 maio 2025.

MARTINS, J. F. de R. **Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento mecânico de peças fabricadas por FDM usando o compósito PLA-fibra de carbono**. 2021. 165 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Curitiba, 2021.

MARTINS, R. F. *et al.* Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymeric Materials — PLA and PETG — For Biomechanical Applications. **Polymers**, v. 16, n. 13, art. 1868, 2024. DOI: 10.3390/polym16131868. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16131868>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MARTINS, S. O. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas de polímeros de impressão 3D e de plásticos de engenharia utilizados em indústrias**. 2018. 11 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural Do Semiárido - UFERSA, Mossoró – Rio Grande do Norte, 2018.

MATTERHACKERS. **How to Succeed When Printing With PETG Filament**. **MatterHackers**, 2017. Disponível em: <https://www.matterhackers.com/news/how-to-succeed-when-printing-with-petg-filament>. Acesso em: 25 maio 2025.

MEHRAEIN, H. **Impact of process parameters on mechanical properties of 3D printed polycaprolactone parts**. 2018. 68 p. Thesis (Master of Science) – Wichita State University, 2018.

MEDEIROS, M. M. *et al.* Influência da densidade de preenchimento e do número de perímetros nas propriedades mecânicas de peças fabricadas em PLA a partir de impressão 3D. **Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada**, IFBA, Salvador, v. 10, p. 7, 20 dez. 2020. Disponível em: <https://revistas.icesp.br/index.php/REBEFA/article/download/1478/1080>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MICHELL, R. M. *et al.* Confinement effects on polymer crystallization: from droplets to alumina nanopores. **Polymer**, v. 54, p. 1728–1763, 2013.

MINITAB. **Minitab Statistical Software**. Versão 22.2.2. [S. l.], 19 fev. 2025. Disponível em: <https://www.minitab.com/pt-br/support/downloads/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

MOHAMED, A. O.; MASOOD, S.H.; BHOWMIK, J.L. **Optimization of fused deposition modeling process parameters**: a review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.* 3, 42–53 (2015). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-014-0097-7#citeas>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MOREIRA, R. M. D. **Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, Portugal, 2016.

NING, F. *et al.* **Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling**: effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, v. 49, n. 18, p. 2199–2209, 2015.

OLIVEIRA, B. C. **Filamentos compósitos** – Um novo conceito em materiais de alta performance para impressão 3D. 2021. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/filamentos-compositos-um-novo-conceito-em-materiaisde-alta-performance-para-impressao-3d/>. Acesso em: 18 out. 2021.

PANDŽIĆ, A.; HODŽIĆ, D.; KADRIĆ, E. Experimental investigation on influence of infill density on tensile mechanical properties of different FDM 3D printed materials. **TEM Journal**, v. 10, n. 3, p. 1195-1201, Aug. 2021. DOI: 10.18421/TEM103-25. Disponível em:

https://www.temjournal.com/content/103/TEMJournalAugust2021_1195_1201.pdf.

Acesso em: 16 nov. 2025.

PEREIRA, R. B.; MORALES, A. R. Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 2, p. 198–202, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.042>. Acesso em: 9 jun. 2025.

PETERSSON, L.; KVIEN, I.; OKSMAN, K. Structure and thermal properties of poly (lactic acid)/cellulose whiskers nanocomposite materials. **Composites Science and Technology**, v. 67, n. 11–12, p. 2535–2544, 2007. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.12.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.12.012>. Acesso em: 9 jun. 2025.

PETRAT, T. *et al.* Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct energy deposition. **Procedia Manufacturing**, v 36, pp. 256–266. 2019. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.08.033. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.08.033>. Acesso em: 9 jun. 2025.

PRUSA. **Prusa Slicer**. Versão 2.9.0. [s./], 20 dez. 2024. Disponível em: <https://prusaslicer.net/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

RIVERA-LÓPEZ, F. *et al.* Effects of nozzle temperature on mechanical properties of polylactic acid specimens fabricated by fused deposition modeling. **Polymers**, v. 16, n. 13, art. 1867, 2024. DOI: 10.3390/polym16131867. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16131867>. Acesso em: 16 nov. 2025.

RAQUEZ, J. M. *et al.* Polylactide (PLA)-based nanocomposites. **Progress in Polymer Science**, v. 38, n. 10–11, p. 1504–1542, 2013. DOI:

10.1016/j.progpolymsci.2013.05.014. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.014>. Acesso em: 9 jun. 2025.

RASHID A., Koç M. **Fused Filament Fabrication Process**: A Review of Numerical Simulation Techniques. *Polymers*. 2021; 13(20):3534. DOI: 10.3390/polym13203534. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/20/3534>. Acesso em: 9 jun. 2025.

REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D printing handbook**: technologies, design and applications. 3D Hubs. Amsterdam, Netherlands, 2017.

REN, J. **Biodegradable poly (lactic acid): synthesis, modification, processing and applications**. Springer Science & Business Media, Tsinghus University Press, Beijing, 2011.

RODA, D. **Poliuretano (PU) e Poliuretano Termoplástico (TPU)**. Tudo Sobre Plásticos, 2014. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/pu.asp>. Acesso em: 25 maio 2025.

SALMI, M. Additive Manufacturing Processes in Medical Applications. **Materials**, v. 14, n. 1, p. 191, 2021. DOI: 10.3390/ma14010191. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/1/191>. Acesso em: 25 maio 2025.

SENATOV, F. *et al.* Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 57, p. 139–148, 2016. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2015.11.036. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.036>. Acesso em: 25 maio 2025.

SHOFNER, M. L. *et al.* Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 89, n. 11, p. 3081–3090, 2003. DOI: 10.1002/app.12496. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.12496>. Acesso em: 25 maio 2025.

SILVA, D. N. *et al.* A Tridimensionalidade da superfície vestível e a impressão 3D: processos, estratégias e experimentações. 2020. 156 p. Tese (Doutorado em Design) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Bauru, em cotutela com Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa (FA.Ulisboa). Bauru, 2020.

SILVA, A. et al. A new approach to temperature control in the extrusion-based additive manufacturing of polymers. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 65, p. 80-96, 2021. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.096. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612521001882> . Acesso em: 17 nov. 2025.

SILVA, M. F. **Estudo de métodos de aumento das propriedades mecânicas de polímeros usados em manufatura aditiva**, 2021. 69 f. Projeto final (Bacharelado – Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2021.

SILVESTRE, A. L.; FERREIRA, F. **Como aumentar a velocidade de impressão 3D?** 3D Cure, 2024. Disponível em: <https://3dcure.com.br/saiba-como-imprimir-mais-rapido-em-impressoras-de-resina/>. Acesso em: 23 out. 2024.

SOUSA, J. G. Q. **Efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de peças impressas com filamento ABS**. 2022. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado – Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2022.

SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008. DOI: 10.1108/13552540810862028. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>. Acesso em: 25 maio 2025.

TAYLOR, G. **Materials in Construction. 2. ed. London:** Longman Scientific & Technical, 1994. DOI: 10.4324/9781315839158. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781315839158>. Acesso em: 25 maio 2025.

TECHTUDO. **Descubra como surgiu a impressora 3D.** 2024. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2014/04/descubra-como-surgiu-impressora-3d.ghml>. Acesso em: 25 maio 2025.

TEKINALP, H. L. *et al.* Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. **Composites Science and Technology**, v. 105, p. 144–150, 2014. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>. Acesso em: 25 maio 2025.

TORRES, J. *et al.* Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives. **The Journal of The Minerals (JOM)**, v. 67, n. 5, p. 1183–1193, 2015. DOI: 10.1007/s11837-015-1367-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1367-y>. Acesso em: 25 maio 2025.

TOUCHET, T. J.; COSGRIFF-HERNANDEZ, E. M. Hierarchal structure–property relationships of segmented polyurethanes. **Advances in polyurethane biomaterials.** Woodhead Publishing, 2016. p. 3–22. DOI: 10.1016/B978-0-08-100614-6.00001-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100614-6.00001-9>. Acesso em: 25 maio 2025.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012 Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>. Acesso em: 25 maio 2025.

VANTUIL, R. *et al.* **Properties of biobased packaging materials. Biobased packaging materials for the food industry: status and perspectives.** KVL, Frederiksberg, 2000.

VINK, E. T.; DAVIES, S. Life cycle inventory and impact assessment data for 2014 Ingeo™ polylactide production. **Industrial Biotechnology**, v. 11, n. 3, p. 167–180, 2015. DOI: 10.1089/ind.2015.0003. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0003>. Acesso em: 25 maio 2025.

VOLPATO, N. **Manual técnico de impressão 3D: guia de orientação prática**. São Paulo: EdUFSCar, 2017.

VOLPATO, N. **Impressão 3D: tecnologias, aplicações e materiais**. São Paulo: Blucher, 2021.

WANG, X. *et al.* Study on the effect of dispersion phase morphology on porous structure of poly (lactic acid)/poly (ethylene terephthalate glycol-modified) blending foams. **Polymer**, v. 54, n. 21, p. 5839–5851, out. 2013. DOI: 10.1016/j.polymer.2013.08.050. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.08.050>. Acesso em: 25 maio 2025.

WANG, X. *et al.* 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. **Composites Part B: Engineering**, v. 110, , Pages 442-458, 1 February 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034 Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>. Acesso em: 25 maio 2025.

WISHBOX. **Impressão 3D com Filamento Nylon**: Tudo o que você precisa saber. Wishbox, 22 abr. 2021. Disponível em: Acesso em: 25 maio 2025.

ZAWADZKI, P. *et al.* Tribological properties of fused deposition modeling-printed polylactic acid and pla-cf: extrusion temperature and internal structure. **Journal of tribology**, [s.l.], 2025. DOI: 10.1115/1.4068991. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4068991>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ZEYNIVANDNEJAD, M.; MORETTI, M.; CONTRERAS, Y. F. Mechanical, physical, and degradation properties of 3D-printed polymer parts: effect of process parameters. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 101, p. 234–244, 2023. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.03.014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523005820>. Acesso em: 17 nov. 2025.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Medições dos copos de prova ensaio de Tração.

		Sem Tratamento		Com Tratamento	
ID	TIPO	Wc (mm)	T (mm)	Wc (mm)	T (mm)
CP09	PLA CF	13,18	3,49	13,13	3,26
CP11	PLA CF	13,22	3,41	13,19	3,28
CP12	PLA CF	13,22	3,52	13,14	3,28
CP13	PLA CF	13,26	3,46	13,21	3,30
CP14	PLA CF	13,19	3,43	13,15	3,26
Média		13,21	3,46	13,16	3,28
CP07	PLA HT	13,14	3,33	12,96	3,78
CP08	PLA HT	13,08	3,29	12,90	3,73
CP10	PLA HT	13,09	3,40	12,90	3,77
CP11	PLA HT	13,06	3,32	12,90	3,75
CP12	PLA HT	13,07	3,38	12,94	3,78
Média		13,09	3,34	12,92	3,76

Fonte: Próprio Autor (2025).

Apêndice 2 - Medições dos copos de prova ensaio de Impacto.

Sem Tratamento					Com Tratamento		
ID	TIPO	h (mm)	b (mm)	l (mm)	h (mm)	b (mm)	l (mm)
201	PLA HT	4,02	10,04	80	4,21	10,19	79,45
202	PLA HT	4,01	10,04	79,98	4,24	10,20	79,47
203	PLA HT	4,02	10,03	79,99	4,24	10,16	79,39
204	PLA HT	4,02	10,02	80,01	4,23	10,17	79,45
205	PLA HT	4,01	10,05	80,02	4,26	10,15	79,46
206	PLA HT	4,03	10,04	80,04	4,31	10,21	79,53
207	PLA HT	3,97	10,04	79,99	4,27	10,21	79,53
208	PLA HT	4,02	10,02	80,02	4,30	10,21	79,55
209	PLA HT	4,03	10,03	80,02	4,29	10,16	79,55
210	PLA HT	4,02	10,02	79,98	4,29	10,28	79,48
Média		4,02	10,03	80,01	4,26	10,19	79,49
201	PLA CF	4,15	10,26	80,19	4,21	9,87	78,92
202	PLA CF	4,18	10,25	80,17	4,18	9,93	78,87
203	PLA CF	4,19	10,22	80,12	4,14	9,88	78,89
204	PLA CF	4,17	10,23	80,15	4,21	9,89	78,9
205	PLA CF	4,20	10,24	80,17	4,19	9,95	78,84
206	PLA CF	4,21	10,27	80,16	4,20	9,89	78,95
207	PLA CF	4,17	10,28	80,16	4,14	9,88	78,91
208	PLA CF	4,22	10,27	80,2	4,14	9,89	78,89
209	PLA CF	4,18	10,27	80,16	4,16	9,88	78,91
210	PLA CF	4,23	10,28	80,15	4,14	9,89	78,89
Média		4,19	10,26	80,16	4,17	9,90	78,90

Fonte: Próprio Autor (2025).

Apêndice 3 - Resultados do ensaio de tração por corpo de prova.

ID	TIPO	TRATAMENTO	FORÇA (N)	Mód Elas (MPa)	Fmax (MPa)
CP02	PLA CF	SEM	1.140,02	2.554,72	24,77
CP04	PLA CF	SEM	1.192,52	2.546,13	25,78
CP05	PLA CF	SEM	1.200,02	2.580,51	26,50
CP06	PLA CF	SEM	828,77	2.309,21	17,80
CP07	PLA CF	SEM	911,27	2.736,18	20,32
Média			1.054,52	2.545,35	23,03
CP09	PLA CF	COM	1.323,77	2.882,84	30,93
CP11	PLA CF	COM	1.387,53	3.204,23	32,07
CP12	PLA CF	COM	1.158,77	2.713,51	26,89
CP13	PLA CF	COM	1.477,53	2.957,02	33,89
CP14	PLA CF	COM	1.417,53	2.973,94	33,07
Média			1353,03	2.946,31	31,37
CP01	PLA HT	SEM	1.413,78	3.102,83	32,46
CP02	PLA HT	SEM	1.357,53	3.141,72	31,64
CP04	PLA HT	SEM	1.342,53	2.813,15	30,43
CP05	PLA HT	SEM	1.200,02	2.742,80	26,96
CP06	PLA HT	SEM	1.590,03	2.976,72	36,26
Média			1.380,78	2.955,44	31,55
CP07	PLA HT	COM	1.020,02	4.012,92	20,82
CP08	PLA HT	COM	982,52	2.764,84	20,42
CP10	PLA HT	COM	1.035,02	4.108,37	21,28
CP11	PLA HT	COM	663,76	2.089,23	13,72
CP12	PLA HT	COM	776,26	2.670,60	15,87
Média			895,52	3.129,19	18,42

Fonte: Próprio Autor (2025).

Apêndice 4 - Resultados do ensaio de impacto por corpo de prova.

ID	TIPO	TRATAMENTO	KJ/m ²
CP101	PLA CF	SEM	3,536
CP102	PLA CF	SEM	3,744
CP103	PLA CF	SEM	3,702
CP104	PLA CF	SEM	4,357
CP105	PLA CF	SEM	3,705
CP106	PLA CF	SEM	3,810
CP107	PLA CF	SEM	3,631
CP108	PLA CF	SEM	3,699
CP109	PLA CF	SEM	3,673
CP110	PLA CF	SEM	3,798
Média			3,765
CP201	PLA CF	COM	3,560
CP202	PLA CF	COM	3,718
CP203	PLA CF	COM	3,626
CP204	PLA CF	COM	3,608
CP205	PLA CF	COM	3,641
CP206	PLA CF	COM	3,712
CP207	PLA CF	COM	3,513
CP208	PLA CF	COM	3,576
CP209	PLA CF	COM	3,470
CP210	PLA CF	COM	3,555
Média			3,008
CP101	PLA HT	SEM	3,358
CP102	PLA HT	SEM	2,880
CP103	PLA HT	SEM	2,705
CP104	PLA HT	SEM	3,579
CP105	PLA HT	SEM	3,050
CP106	PLA HT	SEM	3,174
CP107	PLA HT	SEM	2,839
CP108	PLA HT	SEM	2,634
CP109	PLA HT	SEM	3,301
CP110	PLA HT	SEM	2,556
Média			3,303
CP201	PLA HT	COM	13,825
CP202	PLA HT	COM	10,996

CP203	PLA HT	COM	13,184
CP204	PLA HT	COM	12,421
CP205	PLA HT	COM	14,916
CP206	PLA HT	COM	13,185
CP207	PLA HT	COM	12,349
CP208	PLA HT	COM	12,661
CP209	PLA HT	COM	12,109
CP210	PLA HT	COM	10,809
Média			12,646

Fonte: Próprio Autor (2025).