

Bianca Aimi Okada



**Efeitos de Parâmetros de Impressão e Recozimento nas
Propriedades Mecânicas e Reológicas do PLA produzido por
FDM**

São Paulo
2025

BIANCA AIMI OKADA

**Efeitos de Parâmetros de Impressão e Recozimento nas Propriedades
Mecânicas e Reológicas do PLA produzido por FDM**

Versão Original

Trabalho final de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais, da Escola de Politécnica da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Patrícia Schmid Calvão

São Paulo
2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Versão final revisada pela orientadora

Patrícia S.C.

Prof.^a Dr.^a Patrícia Schmid Calvão

Catálogo-na-publicação

Okada, Bianca

Efeitos de Parâmetros de Impressão e Recozimento nas Propriedades Mecânicas e Reológicas do PLA produzido por FDM. / B. Okada – São Paulo, 2024 89p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Modelagem por fusão e deposição (FDM) 2. Ácido Polilático (PLA) 3. Recozimento 4. Adesão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Cleide Regina Lima Okada e Nilton Kazuyuki Okada, por todo o amor, carinho e apoio em todos os momentos da minha formação. Vocês são a minha inspiração.

Aos meus irmãos, Beatriz Nanami Okada e Victor Keisuke Okada, por sempre serem meus companheiros de risada e descontração quando mais preciso.

Ao meu namorado, Antonio Simões, que sempre acreditou em mim e esteve ao meu lado tanto nos momentos mais felizes, quanto nos mais difíceis.

À todo o time de Handebol Feminino da POLI USP, que me acolheu e me fez sentir pertencente a universidade antes mesmo de completar minha matrícula. Além de me ensinar que os valores do esporte vão muito além do que é feito dentro de quadra.

À Prof. Dr^a Patrícia Schmid Calvão pela confiança, paciência e dedicação.

À todo o Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da EPUSP, pela infraestrutura, apoio e acolhimento durante todo o curso.

RESUMO

A manufatura aditiva, especialmente a modelagem por fusão e deposição (FDM), tem ganhado destaque por sua capacidade de fabricar peças com geometria complexa de forma rápida e econômica. Dentro os polímeros usados para esse fim, o Poli(ácido 2-hidroxiopropanóico) (PLA) tem se consolidado como um dos materiais mais utilizados, devido à sua origem renovável, biodegradabilidade e boa processabilidade. No entanto, o PLA apresenta limitações como baixa resistência ao impacto, fragilidade e sensibilidade térmica, o que pode comprometer seu desempenho em aplicações funcionais. Este trabalho investigou os efeitos da velocidade (50 e 70 mm/s) e da temperatura de impressão/bico extrusor (200 e 220 °C), bem como das condições de recozimento de tempo e temperatura (2 e 4 h em 90 e 120 °C), sobre as propriedades mecânicas, morfológicas e viscoelásticas do PLA. Corpos de prova tipo V da norma ASTM D638 foram fabricados em diferentes condições e submetidos a ensaios de tração, flexão, caracterização dimensional, análise por lupa estereoscópica e reometria oscilatória (SAOS). Os resultados indicaram que velocidades menores favorecem maior integridade interlaminar, resultando em maior ductilidade, enquanto velocidades mais altas geram fraturas mais segmentadas. O recozimento apresentou os efeitos mais significativos, aumentando a rigidez do material e reduzindo sua ductilidade, especialmente nas condições mais severas. Nos ensaios de flexão, o tratamento térmico elevou o módulo de elasticidade e, em algumas condições, também aumentou a resistência. A análise dimensional mostrou maior contração em 120 °C, enquanto 90 °C preservou melhor a estabilidade geométrica. A caracterização morfológica por lupa estereoscópica confirmou a redução da definição entre rasters após recozimentos intensos. Na reometria SAOS, a velocidade de impressão não produziu alterações relevantes, enquanto o recozimento reduziu a viscosidade complexa e os módulos dinâmicos. A combinação entre parâmetros de impressão e recozimento permitem ajustar a rigidez, ductilidade e estabilidade dimensional do PLA. Velocidades menores favorecem maior integridade interlaminar, enquanto o recozimento aumenta a rigidez e a estabilidade térmica, embora com redução da capacidade de deformação.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Tratamento térmico; Reometria oscilatória (SAOS); Ácido Polilático (PLA); Propriedades viscoelásticas.

ABSTRACT

Additive manufacturing, particularly Fused Deposition Modeling (FDM), has gained prominence for its ability to produce complex geometries quickly and at low cost. Within this context, Poly(2-hydroxypropanoic acid) (PLA) has become one of the most widely used materials due to its renewable origin, biodegradability and good processability. However, PLA exhibits limitations such as low impact strength, brittleness and thermal sensitivity, which may compromise its performance in functional applications. This study investigated the effects of printing speed (50 and 70 mm/s), extrusion temperature (200 and 220 °C), and annealing conditions (2 and 4 h at 90 and 120 °C) on the mechanical, dimensional, morphological and viscoelastic properties of PLA. Type V ASTM D638 specimens were produced under different conditions and subjected to tensile and flexural tests, dimensional analysis, stereomicroscopy and small-amplitude oscillatory shear (SAOS) rheometry. The results showed that lower printing speeds improved interlayer integrity, leading to higher ductility, while higher speeds produced more segmented fracture patterns. Annealing produced the most pronounced effects, increasing stiffness and reducing ductility, particularly at 120 °C. Flexural testing confirmed these trends, and dimensional analysis revealed greater contraction at 120 °C. Stereomicroscopy indicated reduced raster definition after intense thermal treatment, while SAOS results showed that printing speed had no significant effect, whereas annealing reduced complex viscosity and dynamic moduli. These findings demonstrate that the combined adjustment of printing parameters and annealing conditions enables control over stiffness, ductility and dimensional stability, contributing to the optimization of PLA components for functional applications.

Keywords: Additive manufacturing; Heat treatment; Oscillatory rheometry (SAOS); Polylactic acid (PLA); Viscoelastic properties.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1- Representação das principais etapas do processo de MA ou impressão 3D. (VOLPATO, 2016)</i>	17
<i>Figura 2 - Processo simplificado de manufatura aditiva incluindo diferentes tipos de softwares usados na indústria</i>	18
<i>Figura 3 - Esquema do processo de FDM (HOTZA, 2009)</i>	22
<i>Figura 4 - Efeito da espessura de camada na superfície do material (SUNIYA & VERMA, 2023)</i>	25
<i>Figura 5 - Estruturas do PLA (RANAKOTI, et al., 2022)</i>	27
<i>Figura 6 - Rotas de síntese de PLA (HORBAN M.A., 2017)</i>	28
<i>Figura 7 - Espessura da camada e tamanho do bico (CHACÓN, CAMINERO, GARCÍA-PLAZA, & NÚÑEZ, 2017)</i>	32
<i>Figura 8- Padrões de Preenchimento (RAJAN, 2022)</i>	34
<i>Figura 9 - Ângulo do raster e outros parâmetros (RAJAN, 2022)</i>	35
<i>Figura 10 - Corpo de prova de tração do tipo 5 (Fonte: ASTM D638)</i>	38
<i>Figura 11- Impressora Creality Ender-3 V3 SE [manual da impressora]</i>	39
<i>Figura 12 - Corpos de prova posicionados no refratário com alumina tabular</i> .	40
<i>Figura 13 - Ensaio de flexão em três pontos</i>	43
<i>Figura 14 - Lupa estereoscópica Zeiss Stemi SV6, disponível no laboratório de metalurgia (PMT/EPUSP). Fonte: Autor (2025)</i>	46
<i>Figura 15 - Módulo de elasticidade e seus desvios para cada condição de impressão e recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	50
<i>Figura 16 - Tensão Máxima e seus desvios para cada condição de impressão e recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	50
<i>Figura 17- Alongamento Máximo e seus desvios para cada condição de impressão e recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	51
<i>Figura 18 - Resistência à flexão de três pontos para as amostras em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)</i>	59
<i>Figura 19- Módulo de elasticidade na flexão de três pontos para as amostras em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)</i>	59
<i>Figura 20- Viscosidade complexa para os diferentes parâmetros de impressão. Fonte: Autor (2025)</i>	75
<i>Figura 21- Módulo de perda para diferentes parâmetros de impressão. Fonte: Autor (2025)</i>	76
<i>Figura 22 - Módulo de armazenamento para os diferentes parâmetros de impressão. Fonte: Autor (2025)</i>	76
<i>Figura 23 - Viscosidade complexa das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	78
<i>Figura 24- Viscosidade complexa das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	79
<i>Figura 25- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	79
<i>Figura 26- Módulo de perda das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	80
<i>Figura 27- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	80

<i>Figura 28- Tangente de delta das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 29- Módulo de perda das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	<i>81</i>
<i>Figura 30- Tangente de delta das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 31- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V50T200). Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 32- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V70T200). Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 33- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V50T220). Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 34- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V70T220) . Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 35- Viscosidade complexa das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	<i>92</i>
<i>Figura 36- Viscosidade complexa das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	<i>92</i>
<i>Figura 37- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 38- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 39- Módulo de perda das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	<i>94</i>
<i>Figura 40- Módulo de perda das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)</i>	<i>94</i>
<i>Figura 41- Tangente de delta das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 42- Tangente de delta das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025).....</i>	<i>95</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de impressão aplicados no recozimento	41
Tabela 2- Resultados e desvios do ensaio de tração.....	49
Tabela 3 - Análise de Variância (ANOVA) do impacto da velocidade de impressão em 200 e 220 °C. Fonte: Autor (2025).....	52
Tabela 4- Análise de Variância (ANOVA) do impacto da temperatura de impressão. Fonte: Autor (2025)	53
Tabela 5 - Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V50T200. Fonte: Autor (2025).....	55
Tabela 6 - Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V50T220. Fonte: Autor (2025).....	55
Tabela 7 - Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V70T200. Fonte: Autor (2025).....	56
Tabela 8- Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V70T220. Fonte: Autor (2025).....	56
Tabela 9 - Resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos. Fonte: Autor (2025).....	58
Tabela 10 - Resultado da ANOVA analisando a relevância da velocidade nas duas temperaturas de impressão. Fonte: Autor (2025).....	60
Tabela 11- Resultado da ANOVA analisando a relevância da temperatura de impressão. Fonte: Autor (2025)	61
Tabela 12 - Resultado da ANOVA analisando o recozimento. Fonte: Autor (2025).....	62
Tabela 13 - Medição das amostras do ensaio de tração. Fonte: Autor (2025)..	64
Tabela 14 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (sem tratamento), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) . Fonte: Autor (2025).....	67
Tabela 15 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 90°C por 2 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) . Fonte: Autor (2025).....	68
Tabela 16 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 90°C por 4 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) . Fonte: Autor (2025).....	69
Tabela 17 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 120°C por 2 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) . Fonte: Autor (2025).....	70
Tabela 18 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 120°C por 4 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) . Fonte: Autor (2025).....	71
Tabela 19 - Resultados da viscosidade no cisalhamento zero e condições do crossover para cada amostra. Fonte: Autor (2025).....	75

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Objetivos do Trabalho.....	15
3. Revisão bibliográfica.....	16
3.1. Manufatura aditiva	16
3.2. Modelagem por fusão e deposição	22
3.3. Ácido polilático (PLA).....	25
3.4. Influência dos parâmetros de deposição em FDM para PLA.....	32
3.4.1. Espessura da camada	32
3.4.2. Padrão e densidade de preenchimento.....	33
3.4.3. Ângulo do raster	35
3.4.4. Temperatura de extrusão	36
3.5. Recozimento	37
4. Materiais e Métodos	38
4.1. Material	38
4.2. Impressão	38
4.3. Recozimento	40
4.4. Ensaio mecânicos.....	42
4.5. Caracterização dimensional	44
4.6. Análise das superfícies de fratura por lupa estereoscópica.....	45
4.7. Ensaio de cisalhamentos oscilatório de pequenas amplitudes (SAOS)	46
5. Resultados e Discussões	48
5.1. Ensaio mecânicos.....	48
5.1.1. Tração.....	48
5.1.1.1. Efeito da velocidade.....	52
5.1.1.2. Efeito da temperatura de impressão	53
5.1.1.3. Efeito do recozimento	55
5.1.2. Flexão.....	57
5.1.2.1. Efeito da velocidade.....	59
5.1.2.2. Efeito da temperatura de impressão	60
5.1.2.3. Efeito do recozimento	61
5.2. Caracterização dimensional	64
5.2.1. Efeito do recozimento	65

5.3.	Análise das superfícies de fratura por lupa estereoscópica.....	66
5.3.1.	Efeito da velocidade.....	71
5.3.2.	Efeito da temperatura de impressão	72
5.3.3.	Efeito do recozimento	73
5.4.	Cisalhamento oscilatório de pequenas amplitudes (SAOS)	74
5.4.1.	Efeito da velocidade.....	77
5.4.2.	Efeito do recozimento	78
6.	Conclusão	84
7.	Referências Bibliográficas	87

1. Introdução

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, consolidou-se como uma revolução tecnológica, alterando paradigmas na concepção, prototipagem e fabricação de objetos nos mais diversos setores industriais. A MA permite a construção de componentes tridimensionais a partir da deposição sucessiva de camadas de material, guiada por um modelo digital. Esta abordagem oferece vantagens notáveis, como a liberdade para criar geometrias complexas, a minimização do desperdício de matéria-prima e a viabilidade de produções customizadas e em pequena escala (VOLPATO, 2016).

Dentre as diversas tecnologias de MA, a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) destaca-se como a mais difundida e acessível, tanto no ambiente doméstico quanto no industrial. Seu sucesso é impulsionado pela simplicidade operacional e pelo baixo custo de equipamentos e materiais de maneira geral (MOHAMED, MASOOD, & BHOWMIK, 2015). Neste cenário, o poli(ácido láctico) (PLA) firmou-se como o polímero termoplástico mais utilizado na tecnologia FDM, graças à sua baixa temperatura de fusão, baixa contração no resfriamento e baixa emissão de odores durante a impressão (DE ALBUQUERQUE TL, 2021).

Apesar de sua vasta aplicação, a fabricação de peças funcionais em PLA por FDM enfrenta desafios significativos. As propriedades mecânicas dos componentes impressos são inerentemente anisotrópicas, ou seja, variam conforme a direção de medição, e frequentemente são inferiores às de peças fabricadas por métodos convencionais, como a moldagem por injeção. É amplamente reconhecido que essas propriedades são diretamente influenciadas pelos parâmetros de deposição, como a temperatura de extrusão, a velocidade de impressão, a espessura da camada e o ângulo do raster – que define a inclinação das linhas de preenchimento em relação ao eixo longitudinal da peça (CHACÓN, CAMINERO, GARCÍA-PLAZA, & NÚÑEZ, 2017).

Diversos estudos na literatura científica têm se concentrado na análise da influência desses parâmetros, buscando otimizar o desempenho mecânico das peças. Contudo, uma lacuna persiste no entendimento de como a influência de parâmetros de impressão e tratamento térmico da própria peça, podem afetar o

histórico térmico durante o processo de fabricação e, por conseguinte, a adesão intercamadas e as propriedades mecânicas finais. Variações na espessura podem alterar as taxas de resfriamento, influenciando o grau de cristalinidade do PLA e a qualidade da ligação entre os filamentos depositados (RASAL, JANORKAR, & HIRT, 2010).

Nesse contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre variáveis do processo de impressão, visando aprimorar a confiabilidade e o desempenho de componentes fabricados em PLA por FDM. Além disso, a compreensão de como tratamentos de pós-processamento (a exemplo do recozimento), influencia no comportamento mecânico das peças impressas, é fundamental para habilitar o uso desta tecnologia em aplicações mais exigentes, que vão além da prototipagem e alcançam o status de peças de uso final.

2. Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é investigar a influência de diferentes parâmetros de impressão e de recozimento térmico nas propriedades de peças de PLA produzidas por manufatura aditiva, utilizando a técnica de modelagem por fusão e deposição (FDM). São avaliados os efeitos da velocidade de impressão, da temperatura do bico extrusor e das condições de recozimento (tempo e temperatura) sobre as propriedades reológicas, o desempenho mecânico e a adesão entre camadas do material. Para isso, são fabricados corpos de prova tipo V (ASTM D638) nas diferentes condições experimentais, que são analisados por meio de ensaios de tração, microscopia óptica e reometria oscilatória de pequenas amplitudes (SAOS). Os resultados permitem correlacionar parâmetros de processo, microestrutura e desempenho mecânico, contribuindo para a compreensão dos mecanismos que controlam a integridade e o desempenho do PLA em aplicações funcionais.

3.Revisão bibliográfica

Este capítulo abordará os conceitos fundamentais da manufatura aditiva e suas distintas classificações. Será conferida especial atenção à técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), com a análise detalhada dos parâmetros de deposição que influenciam as propriedades do produto. Posteriormente, serão apresentados os conceitos essenciais referentes ao poli(ácido láctico) (PLA), incluindo o processo de recozimento e as características da adesão intercamadas em componentes fabricados via FDM.

3.1. Manufatura aditiva

Os processos de manufatura, podem ser caracterizados em diversos tipos diferentes, os principais sendo a manufatura aditiva, subtrativa e formativa. A manufatura formativa utiliza pressão ou calor para formar um objeto desejado através de um molde; a subtrativa, baseia-se na remoção do material de um bloco sólido para gerar a peça pretendida. Já a manufatura aditiva, conhecida como impressão 3D ou MA, foi popularizada no final da década de 1980 pelo seu novo processo de fabricação baseado na adição de material em sucessivas camadas (VOLPATO, 2016).

A construção de objetos físicos através de camadas não é uma novidade no mundo, podendo ser relacionada até as construções das pirâmides egípcias, com a sobreposição de blocos (VOLPATO, 2016). Segundo Beamna (1997) a origem da atual tecnologia da manufatura aditiva é ligada a partir da topografia e da fotoescultura. Na topografia, a primeira importante aplicação do método de construção por camadas ocorreu por volta de 1980, a partir da montagem de diversos discos de cera com contorno topográfico para mapas de relevo topográfico em três dimensões. Já a fotoescultura, desenvolvida no século XIX (BOGART, 1979), possuía o intuito de criar réplicas exatas de objetos; sua técnica era baseada em montar 24 câmeras ao redor do objeto que seria replicado, acioná-las simultaneamente e esculpir as 24 silhuetas das fotos adquiridas. Os dois processos relacionados ao longo dos anos foram trabalhados e desenvolvidos para assim interligar as atuais técnicas de manufatura aditiva.

A MA vem sendo cada vez mais usada pela sua versatilidade na construção de peças de diversos formatos e tamanhos. Para a construção dessas peças, são seguidas algumas etapas conforme apresentado na Figura 1.



Figura 1- Representação das principais etapas do processo de MA ou impressão 3D. (VOLPATO, 2016)

Inicialmente um modelo digital tridimensional é gerado em computador, utilizando um sistema CAD (*computer-aided design* ou modelo de design assistido por computador), como o Autodesk Fusion 360, SolidWorks ou Blender. Após a preparação do modelo, ele é exportado em um formato padrão como STL, normalmente representado em uma malha de triângulos. Posteriormente, é inserido em um software de fatiamento (*slicer*), como Cura, PrisaSlicer ou Simplify3D, que converte o modelo 3D em camadas horizontais e definem a estratégia e os parâmetros importantes de deposição do material, como a altura de camada, velocidade de impressão, temperatura de extrusão (bico) e de plataforma, preenchimento e necessidade ou não de suporte. A Figura 2 mostra os diferentes tipos de softwares que podem ser usados no processo.

Ao final da fabricação da peça, pode haver um pós-processamento como limpeza, acabamento por usinagem por remoção ou até mesmo etapas adicionais de processamento (VOLPATO, 2016).



Figura 2 - Processo simplificado de manufatura aditiva incluindo diferentes tipos de softwares usados na indústria

Um grande diferencial da manufatura aditiva é oferecer maior eficiência no uso de recursos além de permitir a criação de geometrias complexas que seriam inviáveis pelos métodos convencionais. Além disso, é possível ser utilizada em produções de pequena escala, ou em situações em que há necessidade de customização. As propriedades das peças obtidas por MA não são as mesmas daquelas processadas de forma tradicional pois são, em geral, anisotrópicos, ou seja, possuem características diferentes a depender das direções em que são medidas (TOFAIL, 2018).

Em geral, os processos de MA apresentam vantagens e limitações que podem ser sintetizadas nas listas a seguir (GIBSON I., 2015; VOLPATO, 2016; TOFAIL, 2018):

Vantagens

- Possibilita a construção de componentes em uma única etapa dentro de uma mesma máquina. Isso elimina ou reduz a necessidade de montagem, principalmente para peças que possuem formas complexas ou integração de funções. Embora algumas etapas de pós-processamento possam ser necessárias para acabamento ou reforço estrutural, o processo é mais direto e simplificado;
- A tecnologia permite que seja adicionado apenas a quantidade de material necessária para construir a peça, minimizando desperdícios. O consumo de energia também pode ser mais

eficiente pois a MA não envolve operações intensivas como corte ou fundição;

- Modificações podem ser feitas diretamente no arquivo digital e implementadas na fabricação sem necessidade de interromper todo o processo, permitindo mais liberdade para testar versões do produto;
- Viabiliza combinar diferentes materiais ou variar a densidade ao longo da peça, criando materiais com gradação funcional. Desenvolvendo assim, componentes com propriedades diferenciadas como resistência mecânica, flexibilidade ou porosidade ajustáveis.

Limitações

- A gama de materiais utilizáveis no processo ainda é restrita em comparação à manufatura convencional;
- Peças produzidas frequentemente apresentam propriedades mecânicas inferiores, como menor resistência ou durabilidade, especialmente no caso de polímeros;
- A manufatura aditiva é mais vantajosa para produção de peças únicas ou em baixa escala. Para grandes volumes, o custo por peça é significativamente mais alto em comparação com métodos tradicionais;
- O tempo necessário para fabricar uma peça por MA ainda é relativamente alto, o que limita sua viabilidade para produção em massa;
- As peças impressas algumas vezes exigem etapas de acabamento ou usinagem adicional para atingir padrões de qualidade e precisão desejados, aumentando custos e tempo;
- As dimensões das peças são limitadas ao volume da câmara de construção da impressora;
- Ainda existem desafios significativos para garantir reprodutibilidade e conformidade de qualidade em ambientes industriais, o que dificulta a adoção em setores regulados como aeroespacial e médico.

No Brasil, a normalização da manufatura aditiva é coordenada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da comissão de Estudo Especial de Manufatura Aditiva (ABNT/CEE-261). Essa comissão, criada em 2017, atua como espelho do comitê internacional ISO/TC 261 e é responsável por desenvolver normas que abrangem processos, cadeias de produção (hardware e software), contratos de fornecimento, parâmetros de qualidade, terminologia, requisitos e métodos de ensaio relacionados à MA.

Entre as principais normas brasileiras sobre manufatura aditiva, destacam-se:

- **ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018** – Estabelece a terminologia fundamental da manufatura aditiva, padronizando termos como "impressora 3D", "manufatura aditiva" e "sistema aditivo".
- **ABNT NBR ISO 17296-3:2019** – Define as principais características de qualidade das peças fabricadas por MA, especificando procedimentos de ensaio e recomendações para acordos de fornecimento.
- **ABNT NBR ISO/ASTM 52910:2018** – Fornece diretrizes para o design de peças em MA, abordando requisitos, recomendações e boas práticas para o desenvolvimento de produtos.
- **ABNT NBR ISO/ASTM 52901:2017** – Estabelece requisitos para peças adquiridas fabricadas por MA, visando garantir a qualidade e a conformidade dos produtos.
- **ABNT NBR 16627-5:2018** – Especifica orientações e requisitos para o projeto de implantes cirúrgicos fabricados por impressão 3D, assegurando a segurança e eficácia desses produtos.

Essas normas são fundamentais para garantir a qualidade, segurança e padronização dos processos e produtos de manufatura aditiva no Brasil, alinhando-se às práticas internacionais e promovendo o desenvolvimento tecnológico no setor.

O processo de manufatura aditiva engloba inúmeras tecnologias de características específicas e materiais próprios sendo os mais utilizados a modelagem por fusão e deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*),

sinterização seletiva a Laser, (SLS – *Selective Laser Sintering*) e estereolitografia (SLA) (GIBSON I., 2015).

Estereolitografia ou *Stereolithography* (SLA) é o processo de fotopolimerização mais antigo e conhecido devido a sua alta precisão, usada em aplicações que demandam detalhes finos e superfícies lisas. O método funciona ao expor camada por camada uma resina polimérica a radiação ultravioleta (UV), solidificando a resina e gerando então o objeto desejado. A sinterização seletiva a Laser é um dos processos mais conhecidos de PBF, *Powder bed fusion*, fusão entre partículas de pó, sejam poliméricas ou metálicas. Este processo, utiliza raios laser ou feixe de elétrons para sinterizar o pó no formato desejado, fazendo-o camada por camada (TOFAIL, 2018). As partículas que não são fundidas são facilmente retiradas do produto. Já a modelagem por fusão e deposição (*Fused Deposition Modeling - FDM*), é a tecnologia de impressão 3D mais utilizada mundialmente para a obtenção de peças de plástico e é a técnica que será utilizada para este trabalho de conclusão de curso. Detalhes sobre essa técnica serão apresentados no próximo item.

3.2. Modelagem por fusão e deposição

O processo de modelagem por fusão e deposição, conhecida pelo termo em inglês *Fused Deposition Modeling* (FDM), foi desenvolvido em 1988 e patenteada no início dos anos 1990 pela empresa Stratasys Inc. nos Estados Unidos. Pode ser encontrada com o nome de *Fused Filament Fabrication* (FFF), um termo genérico para descrever a tecnologia devida as limitações do registro. Em 2009, houve a queda da patente da sigla FDM, tornando-as de domínio público. Esse é um dos métodos de impressão 3D mais populares e acessíveis da atualidade (MOHAMED, MASOOD, & BHOWMIK, 2015).

O FDM é caracterizado pela fabricação de objetos camada por camada, a partir do amolecimento de um polímero termoplástico ou compósitos em forma de filamentos para impressão, como mostra a Figura 3. A alimentação do filamento é feita diretamente nas guias rotativas que direcionam o material ao bico extrusor aquecido pela resistência, para ser depositado em um caminho determinado pelo software de fatiamento e formar a estrutura desejada. Este bico se move nas direções X e Y, e a plataforma de construção (ou o cabeçote de alimentação) se move na direção Z (RAJAN, 2022).

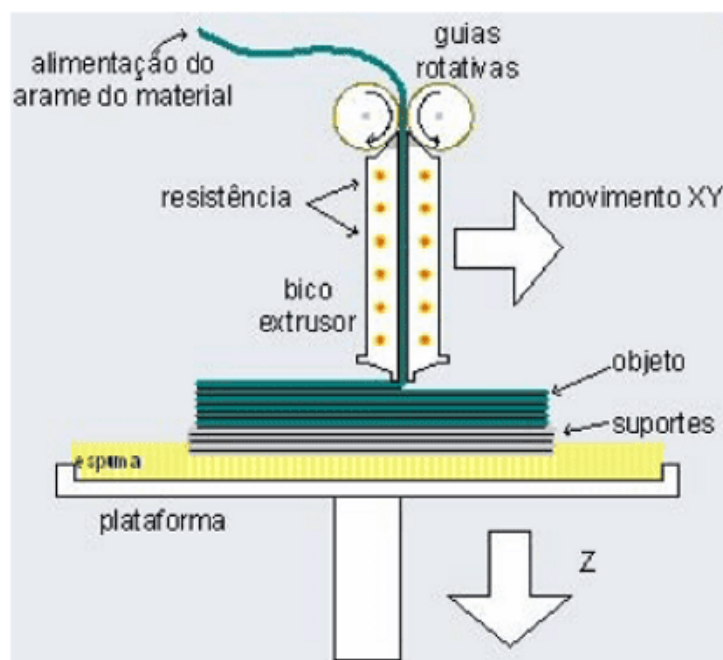


Figura 3 - Esquema do processo de FDM (HOTZA, 2009)

O comportamento de amostras impressas em FDM é fortemente dependente dos parâmetros escolhidos, os quais influenciam diretamente na aderência entre camadas e na homogeneidade estrutural. Caso a temperatura do bico seja alta, na faixa da temperatura de processamento do material, a fusão e adesão entre camadas é favorecida, melhorando a resistência mecânica da peça; temperaturas mais baixas podem resultar em baixa aderência e porosidade mais acentuada. Para velocidades maiores, o tempo de resfriamento tende a reduzir entre as camadas, promovendo uma adesão superior, entretanto também varia conforme a temperatura, podendo ser mais adequada uma velocidade mais lenta em temperaturas mais baixas. Já alturas da camada menores aumentam a adesão entre camadas, uma vez que permitem melhor distribuição de calor e união entre linhas adjacentes; alturas maiores reduzem a resolução da peça e podem comprometer a resistência estrutural (WICKRAMASINGHE, DO, & TRAN, 2020). Estes e outros parâmetros serão discutidos posteriormente, com foco no material utilizado no presente trabalho.

Uma das vantagens mais significativas da FDM é o custo relativamente baixo, tanto para a aquisição de equipamentos, especialmente os modelos de entrada, quanto para os materiais de consumo na forma de filamentos (GIBSON I., 2015). Essa acessibilidade tornou a tecnologia disponível para um vasto espectro de usuários, desde entusiastas e educadores até pequenas empresas e laboratórios de prototipagem. Os sistemas FDM, particularmente os de baixo custo, são geralmente projetados para serem fáceis de operar e manter, com interfaces de software intuitivas e procedimentos de calibração simplificados, o que reduz a curva de aprendizado e a necessidade de operadores altamente especializados para muitas aplicações. A FDM também é compatível com uma ampla e crescente gama de polímeros termoplásticos, incluindo materiais de *commodity* (Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Ácido Polilático (PLA)), polímeros de engenharia (Nylon, Policarbonato (PC) , Polietileno Tereftalato Glicol (PETG)) e materiais de alto desempenho (Polieterimida (ULTEM), Polieter-éter-cetona (PEEK), Polifenilsulfona (PPSF)), além de filamentos com propriedades específicas como flexibilidade, reforço com fibras, biocompatibilidade e resistência térmica ou química (RAJAN, 2022). Embora as

propriedades mecânicas sejam anisotrópicas, as peças fabricadas por FDM, especialmente com materiais de engenharia e parâmetros otimizados, podem apresentar boa resistência mecânica, suficiente para protótipos funcionais robustos e, em alguns casos, para aplicações de uso final. O princípio fundamental de extrusão de material aquecido é conceitualmente mais simples em comparação com outras tecnologias de manufatura aditiva, e muitos dos termoplásticos utilizados são quimicamente estáveis, não requerendo etapas de pós-cura extensivas além da remoção de suportes e tratamentos opcionais (VOLPATO, 2016).

Por outro lado, a FDM enfrenta desafios e limitações intrínsecas. A velocidade de construção é inerentemente um processo de deposição ponto a ponto, resultando em tempos de construção geralmente mais longos em comparação com tecnologias que processam uma camada inteira simultaneamente. A precisão dimensional e o acabamento superficial são limitados pela espessura da camada, diâmetro do bico e precisão do sistema de movimentação, com o "efeito escada" sendo uma característica comum em superfícies curvas e inclinadas como a da Figura 4 (MOHAMED, MASOOD, & BHOWMIK, 2015). Uma limitação crucial é a anisotropia das propriedades mecânicas: a adesão entre as camadas (direção Z) é tipicamente mais fraca do que a resistência do material ao longo dos filamentos no plano X-Y, tornando a peça suscetível à delaminação sob tensões na direção Z. As peças FDM são também propensas a defeitos como vazios internos (porosidade), tensões residuais que podem causar empenamento (*warping*), comprometendo a integridade estrutural. A necessidade de estruturas de suporte para geometrias com balanços acentuados adiciona uma etapa de pós-processamento e pode afetar o acabamento superficial. Embora a variedade de termoplásticos para FDM esteja em expansão, ela ainda é mais restrita em comparação com a vasta seleção de materiais processáveis por métodos de fabricação tradicionais (SUNIYA & VERMA, 2023).

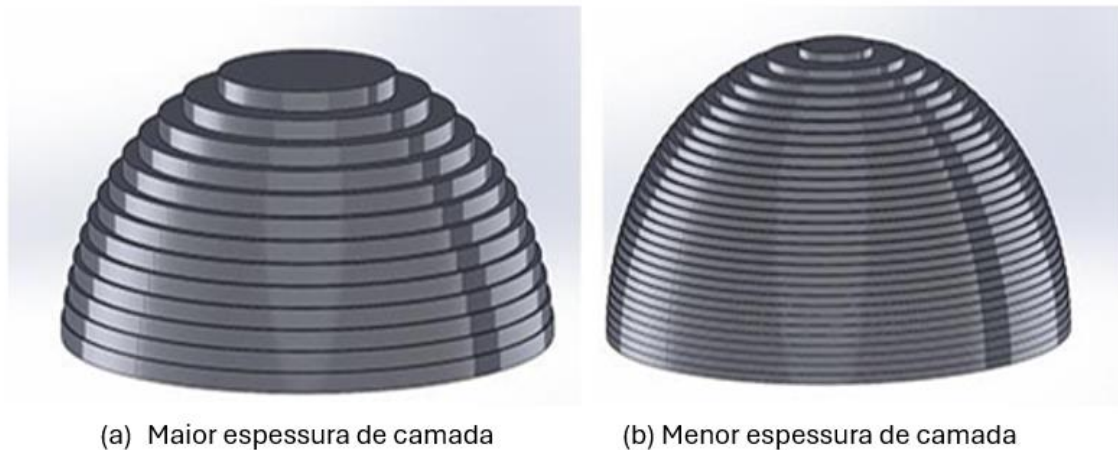


Figura 4 - Efeito da espessura de camada na superfície do material (SUNIYA & VERMA, 2023)

Enquanto os sistemas FDM continuam a fomentar a inovação, a transição efetiva da FDM para a manufatura direta em larga escala de peças de alto desempenho e com requisitos rigorosos depende criticamente da superação dessas limitações. Esta superação exige avanços coordenados em múltiplas frentes. No campo dos materiais, é necessário desenvolver novos polímeros e compósitos reforçados para garantir maior resistência. Em hardware, as inovações devem incluir sistemas de múltiplos bicos, melhor controle de temperatura e mecanismos de movimentação mais rápidos e precisos para acelerar o processo e melhorar a qualidade da adesão. Já em software, o progresso depende de algoritmos de otimização mais sofisticados e ferramentas de simulação para prever e evitar defeitos. A combinação desses avanços é essencial para que a FDM se torne competitiva com os métodos de fabricação tradicionais, explorando seu potencial máximo de flexibilidade e customização em massa (MOHAMED, MASOOD, & BHOWMIK, 2015).

3.3. Ácido polilático (PLA)

O PLA é um polímero da família dos termoplásticos, compostável, reciclável e biodegradável. Usualmente é produzido a partir de fontes

renováveis, como o milho, trigo ou cana de açúcar. Esta origem biológica pode reduzir a dependência de matérias-primas petroquímicas, e também confere o material uma pegada de carbono de produção significativamente menor, uma vez que as plantas utilizadas como matéria-prima sequestram dióxido de carbono da atmosfera durante seu crescimento (RANAKOTI, et al., 2022).

A base para a síntese do PLA é o ácido láctico (quimicamente conhecido como ácido 2-hidroxiopropanóico), uma molécula orgânica simples que serve como o monômero fundamental do polímero (DE ALBUQUERQUE TL, 2021). Embora o ácido láctico possa ser produzido sinteticamente a partir de derivados de petróleo, esta rota tipicamente resulta em uma mistura racêmica, ou seja, uma mistura equitativa dos seus dois isômeros, o que é indesejável para muitas aplicações de alto desempenho (HAMAD, 2017). Conseqüentemente, a rota industrial dominante para a produção de ácido láctico é a fermentação de carboidratos, como a glicose do amido de milho ou a sacarose da cana-de-açúcar (DE ALBUQUERQUE TL, 2021; RANAKOTI, et al., 2022). Neste processo, cepas específicas de bactérias, frequentemente do gênero *Lactobacillus*, são cuidadosamente selecionadas ou geneticamente modificadas para converter açúcares em ácido láctico com alta eficiência e, mais importante, com alta pureza óptica (HAMAD, 2017; RASAL, JANORKAR, & HIRT, 2010).

A característica química mais definidora do ácido láctico é a presença de um centro de carbono quiral, o que significa que a molécula existe em duas formas que são imagens especulares não sobreponíveis uma da outra, conhecidas como estereoisômeros ou enantiômeros: o L-ácido láctico (L-LA) e o D-ácido láctico (D-LA) como mostra a Figura 5 (DE ALBUQUERQUE TL, 2021). Esta distinção é o fator mais crítico que determina a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades do polímero PLA resultante (M.S. SINGHVI, 2019).

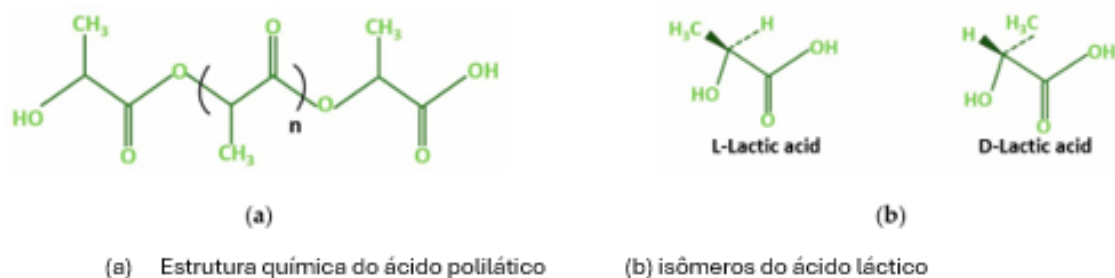


Figura 5 - Estruturas do PLA (RANAKOTI, et al., 2022)

Quando o ácido láctico utilizado na polimerização possui alta pureza óptica, tipicamente com mais de 90% de L-LA, o polímero resultante é o Poli(L-ácido láctico) (PLLA) (M.S. SINGHVI, 2019). A alta regularidade estereoquímica das cadeias de PLLA permite que elas se organizem de forma compacta em estruturas tridimensionais ordenadas, conhecidas como lamelas cristalinas. Este processo resulta em um polímero semicristalino, que possui tanto regiões cristalinas ordenadas quanto regiões amorfas desordenadas (FARAH S., 2016).

Em contrapartida, quando se polimeriza uma mistura racêmica de ácido láctico (com 50% de L-LA e 50% de D-LA) ou misturas com baixa pureza óptica, o resultado é o Poli(D,L-ácido láctico) (PDLLA). A presença aleatória e desordenada de unidades L e D ao longo da cadeia polimérica impede fisicamente que as cadeias se empacotem de forma eficiente. Como resultado, o PDLLA é um polímero totalmente amorfo, desprovido de qualquer estrutura cristalina e conseqüentemente com propriedades mecânicas inferiores (M.S. SINGHVI, 2019; PRETULA J., 2016).

Para que o PLA seja funcional na maioria de suas aplicações, é essencial que ele possua uma elevada massa molar. Uma massa molar alta garante que as cadeias poliméricas sejam longas o suficiente para se entrelaçarem, conferindo ao material a coesão e resistência mecânica necessárias (GARLOTTA, 2001). O principal desafio na síntese do PLA é, portanto, alcançar essa alta massa molar de forma controlada. A pureza do monômero é crítica, pois impurezas como a água podem limitar a massa molar final (SCHAPPO et al., 2010; LOPES et al., 2014).

Pode-se citar duas vias tecnológicas principais da polimerização do ácido láctico: a polimerização por condensação direta e a polimerização por abertura de anel de lactídeo, evidenciadas na Figura 6 (PRETULA J., 2016). Outros processos de policondensação, como polimerização por desidratação azeotrópica, são capazes de atingir uma alta massa molar, entretanto essas técnicas ainda são vistas como economicamente inviáveis para a produção industrial (FARAH S., 2016).

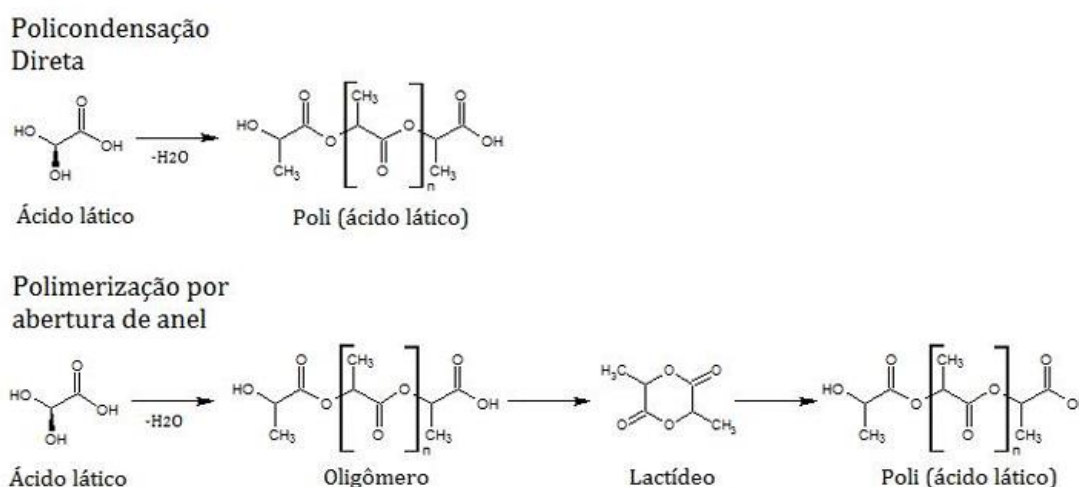


Figura 6 - Rotas de síntese de PLA (HORBAN M.A., 2017)

A condensação direta envolve a reação entre grupos hidroxila e carboxila presentes nas moléculas de ácido láctico, liberando água como subproduto. Essa reação é realizada sob condições de alto vácuo ou atmosfera inerte e temperatura elevada. Catalisadores metálicos, como zinco metálico (Zn), são frequentemente usados para acelerar a reação e aumentar o peso molecular do polímero resultante (PLA). Entretanto, a presença de água como subproduto pode limitar o crescimento da cadeia polimérica, dificultando a obtenção de altos pesos moleculares. Este método é mais simples e econômico, sendo apropriado quando não se exige alta cristalinidade ou resistência mecânica excepcional do PLA (RANAKOTI, et al., 2022).

No processo de polimerização por abertura de anel do lactídeo, o ácido láctico é primeiramente convertido em um dímero cíclico conhecido como lactídeo,

por meio de uma reação de desidratação. Em seguida, o lactídeo sofre uma reação de abertura de anel (ROP – *Ring Opening Polymerization*), catalisada por compostos metálicos como estanho octoato ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$), produzindo o PLA com alto peso molecular e maior controle sobre a estrutura do polímero. Esta rota permite a síntese de PLA com propriedades mecânicas superiores, maior pureza e biodegradabilidade controlada. Apesar de mais cara e complexa, a polimerização por abertura de anel é a mais utilizada na indústria para aplicações que exigem materiais com boa performance, como embalagens, dispositivos médicos e filamentos para impressão 3D (GARLOTTA, 2001; RANAKOTI, et al., 2022).

A compreensão das propriedades do PLA exige uma análise de sua morfologia. Os polímeros raramente são completamente cristalinos ou completamente amorfos; muitos, incluindo o PLA, são semicristalinos. Isso significa que sua estrutura sólida consiste em regiões altamente ordenadas, chamadas de cristalitos, dispersas dentro de uma matriz desordenada, conhecida como fase amorfa. A proporção entre essas duas fases, o grau de cristalinidade (X_c), é um dos fatores mais importantes que ditam as propriedades finais do material (CANEVAROLO, 2006).

Conforme apresentado anteriormente, a capacidade do PLA de cristalizar é governada por sua estereoquímica. O PLA, com sua cadeia altamente regular, tem a capacidade de se organizar para formar um polímero semicristalino, que exibe propriedades mecânicas e térmicas superiores (GARLOTTA, 2001).

O grau de cristalinidade real de um polímero também é fortemente influenciado pela massa molar e, de forma mais significativa, pela história termomecânica do material. Moléculas de PLA com menor massa molar possuem maior mobilidade, o que lhes permite cristalizar mais facilmente, resultando em um maior grau de cristalinidade (NETTO J.M.J., 2023). Por outro lado, cadeias muito longas se emaranham, o que pode dificultar a cristalização.

A história termomecânica é o fator de processamento mais poderoso para controlar a morfologia. Se o resfriamento a partir do estado fundido for muito rápido, as cadeias poliméricas são "congeladas" em seu estado desordenado, resultando em uma peça predominantemente amorfa. Em contraste, se o

resfriamento for lento, ou se a peça for submetida a um tratamento térmico secundário chamado recozimento (*annealing*) — mantendo a peça a uma temperatura entre sua transição vítrea (T_g) e sua fusão (T_m) —, as cadeias ganham a energia e o tempo necessários para formar uma estrutura altamente cristalina (RANAKOTI, et al., 2022).

As propriedades macroscópicas do Ácido Polilático (PLA) são uma consequência direta de sua estrutura química e da morfologia resultante, o que define seu desempenho e, conseqüentemente, seu vasto campo de aplicações e suas limitações inerentes. No que tange às suas propriedades mecânicas, o PLA é reconhecido por sua elevada rigidez e resistência, com um Módulo de Young entre 2,7 e 4,2 GPa e uma resistência à tração entre 50 e 70 MPa, valores comparáveis aos de polímeros como poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET) (RANAKOTI, et al., 2022). Contudo, sua principal desvantagem mecânica é a fragilidade inerente, com um alongamento na ruptura muito baixo, geralmente inferior a 10%. Do ponto de vista térmico, o comportamento do PLA é dominado por duas transições principais: a temperatura de transição vítrea (T_g), que ocorre em torno de 60–65 °C, e a temperatura de fusão (T_m), presente apenas em graus semicristalinos, na faixa de 150–180 °C (GARLOTTA, 2001). A T_g acima da temperatura de operação ambiente é a raiz tanto da sua natureza vítrea e frágil quanto da sua limitada estabilidade térmica, uma vez que o material apresenta perda de rigidez e deformação estrutural ao ultrapassar o limiar de 60 °C. Essa combinação de propriedades confere ao PLA uma excelente processabilidade, notadamente para a modelagem por fusão e deposição (FDM), no qual sua baixa temperatura de fusão e baixa contração térmica minimizam o empenamento e facilitam a impressão de peças complexas com boa adesão entre camadas e segurança operacional (HAMAD, 2017).

A versatilidade do PLA, decorrente de seu conjunto único de propriedades, permite sua aplicação em uma gama ampla de mercados, desde produtos de consumo de baixo custo até dispositivos médicos de alto valor agregado (HAMAD, 2017). No segmento de grande volume, onde a rigidez e a transparência são valorizadas, o PLA encontra seu maior uso em embalagens para alimentos de curta vida de prateleira, como recipientes, copos e talheres descartáveis. Adicionalmente, o material é extrudado para produzir fibras para

aplicações têxteis e domina o mercado de impressão 3D de mesa para prototipagem e modelos conceituais. No campo de aplicações de alto valor agregado, as propriedades de biocompatibilidade e biorreabsorção são exploradas ao máximo, permitindo seu uso em dispositivos ortopédicos bioreabsorvíveis, como parafusos e placas, que eliminam a necessidade de uma segunda cirurgia para remoção. Similarmente, as suturas cirúrgicas reabsorvíveis e os *scaffolds* para engenharia de tecidos e liberação controlada de fármacos representam algumas de suas aplicações médicas mais bem-sucedidas e sofisticadas (CHACÓN, CAMINERO, GARCÍA-PLAZA, & NÚÑEZ, 2017; FARAH S., 2016; HAMAD, 2017; RASAL, JANORKAR, & HIRT, 2010).

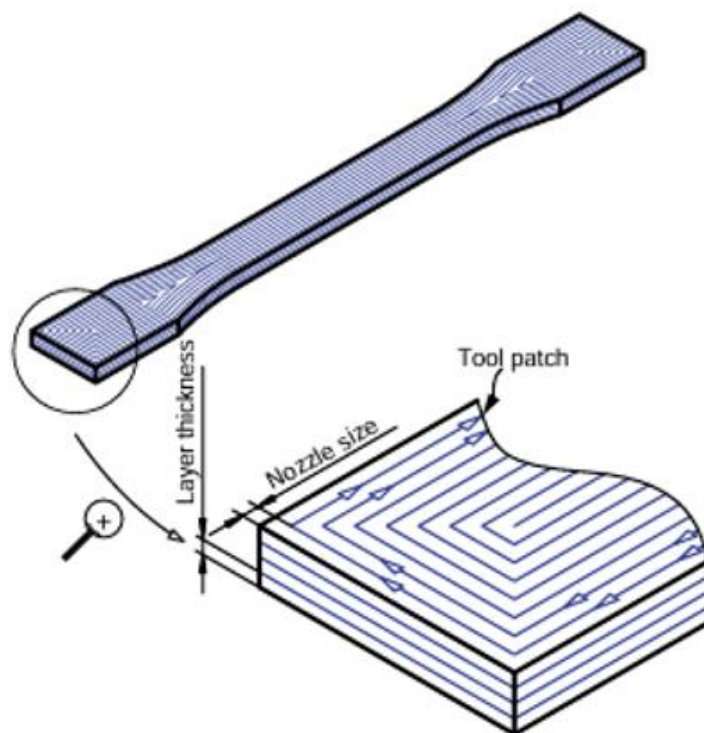
Para superar as limitações do PLA e expandir o seu leque de aplicações, os engenheiros de materiais empregam uma variedade de estratégias de modificação. A abordagem mais comum para aumentar a tenacidade é a mistura de polímeros, que consiste em combinar o PLA com polímeros flexíveis e tenazes, como o Poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT), a Poli(ϵ -caprolactona) (PCL) ou Poliuretanos Termoplásticos (TPU), que atuam dissipando a energia de impacto (DE ALBUQUERQUE TL, 2021). Outra técnica é a plastificação, onde moléculas de baixo peso molecular, como citratos ou polietilenoglicol (PEG), especialmente para aplicações como filmes flexíveis. De forma mais fundamental, a copolimerização permite a modificação química da própria cadeia do PLA pela introdução de comônômeros flexíveis, como a ϵ -caprolactona, resultando em um material com maior flexibilidade intrínseca. Para melhorar a rigidez e a resistência térmica, o PLA é reforçado com cargas para criar materiais compósitos. A adição de fibras de reforço, como fibras naturais (cânhamo, linho, juta) para aplicações sustentáveis e de baixo peso na indústria automotiva, ou fibras sintéticas (vidro, carbono) para um desempenho mecânico superior, é uma prática comum. Além disso, agentes de nucleação como talco e argila são utilizados para acelerar a cristalização, o que melhora a rigidez e a estabilidade a temperaturas elevadas. Tratamentos físicos como o recozimento também podem ser aplicados para melhorar significativamente as propriedades de tenacidade, tração e impacto do polímero (RASAL, JANORKAR, & HIRT, 2010). O estudo do recozimento será a estratégia utilizada nesse projeto e, por isso, ele será melhor detalhado em um item subsequente.

3.4. Influência dos parâmetros de deposição em FDM para PLA

Para que as peças de PLA fabricadas por FDM atinjam um desempenho mecânico e dimensional confiável para aplicações funcionais, é importante compreender como os parâmetros de deposição influenciam diretamente suas propriedades finais. A otimização desses parâmetros é um processo complexo e multifatorial, onde cada ajuste pode resultar em um delicado equilíbrio entre resistência, acabamento superficial, precisão e tempo de fabricação. A seguir serão apresentados alguns desses parâmetros e sua influência nos resultados da deposição em FDM.

3.4.1. Espessura da camada

Esse é um dos parâmetros mais fundamentais, definindo a resolução vertical da peça, e refere-se a espessura da camada depositada pelo bico de



Espessura da camada (*Layer thickness*); Tamanho do bico (*Nozzle size*); Percurso da ferramenta (*Tool patch*)

Figura 7 - Espessura da camada e tamanho do bico (CHACÓN, CAMINERO, GARCÍA-PLAZA, & NÚÑEZ, 2017)

extrusão. O valor deste parâmetro está diretamente relacionada ao diâmetro do bico de extrusão e o material utilizado (MOHAMED, MASOOD, & BHOWMIK, 2015), conforme mostra a Figura 7. Camadas mais finas (por exemplo, 0,1 mm ou menos) resultam em um acabamento superficial mais liso e com maior fidelidade aos detalhes, pois minimizam o "efeito escada" (*stair-stepping*) em superfícies curvas ou inclinadas. Por outro lado, a utilização de camadas mais finas aumenta o número total de camadas necessárias, elevando significativamente o tempo de fabricação (VOLPATO, 2016). Para o PLA, estudos indicam que a diminuição da espessura da camada pode também melhorar a resistência à tração, possivelmente devido a uma melhor fusão e adesão entre as camadas mais delgadas (WICKRAMASINGHE, DO, & TRAN, 2020).

3.4.2. Padrão e densidade de preenchimento

O preenchimento define a estrutura interna da peça e tem um impacto direto em sua resistência, peso e consumo de material. A densidade de preenchimento, expressa em porcentagem, determina a quantidade de material no interior da peça. Uma densidade maior geralmente resulta em peças mais fortes e rígidas, mas ao custo de um maior tempo de impressão e consumo de filamento (VOLPATO, 2016).

O padrão de preenchimento (por exemplo, retilíneo, colmeia e concêntrico como mostra Figura 8) também influencia a forma como as cargas são distribuídas. Padrões como o “retangular”, onde os filamentos se cruzam, podem distribuir a resistência de forma mais uniforme em comparação com padrões unidirecionais (GIBSON I., 2015). A escolha do padrão e da densidade deve, portanto, ser uma decisão de engenharia baseada nos requisitos específicos da aplicação, otimizando a relação entre desempenho mecânico e eficiência de produção.

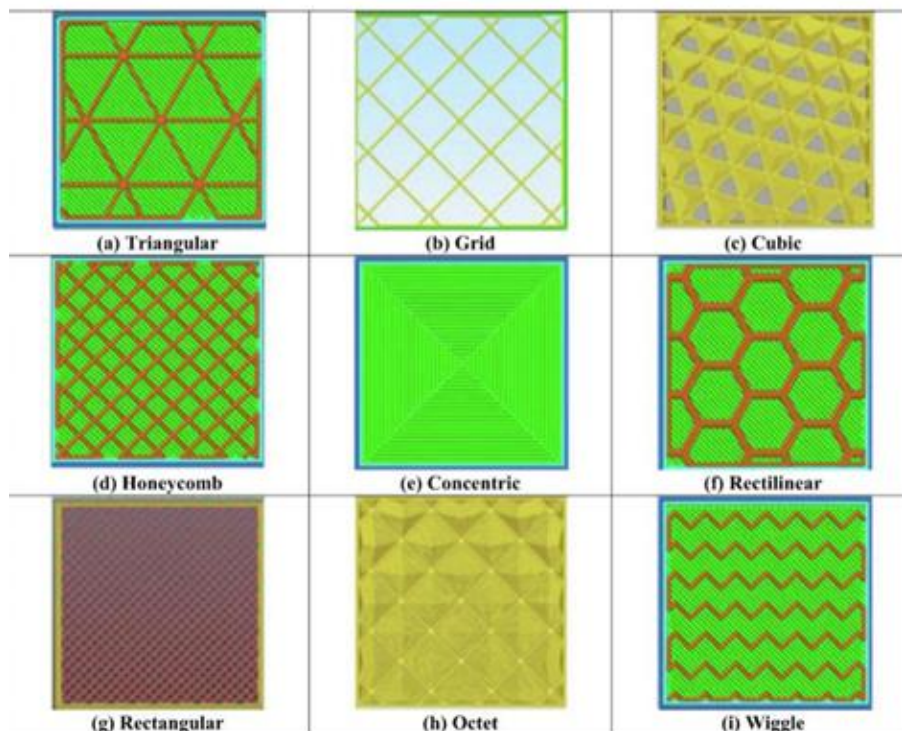


Figura 8- Padrões de Preenchimento (RAJAN, 2022)

3.4.3. Ângulo do raster

O ângulo do raster (Figura 9), que define a direção de deposição dos filamentos de preenchimento em cada camada, é um dos fatores mais críticos que influenciam as propriedades mecânicas de peças de PLA, sendo o principal contribuinte para a anisotropia. Wickramasinghe, Do e Tran (2020) apontam que, para o PLA, o ângulo do raster é o fator mais significativo que afeta a resistência à tração.

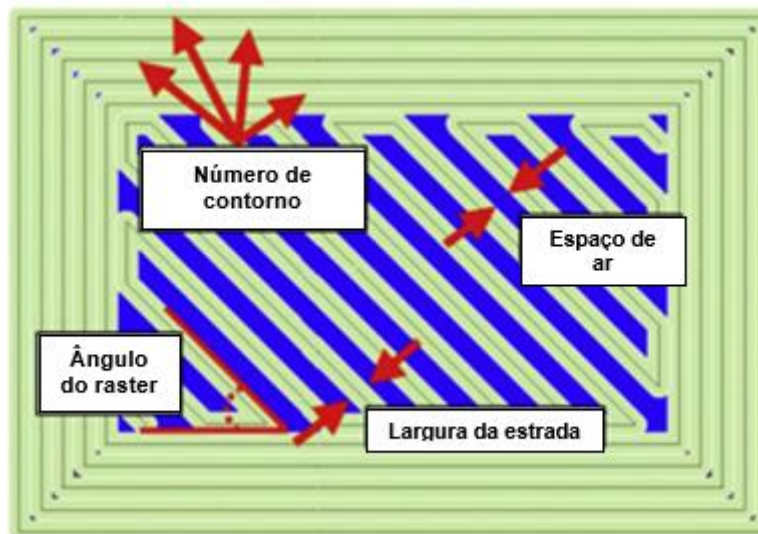


Figura 9 - Ângulo do raster e outros parâmetros (RAJAN, 2022)

Uma peça impressa com um ângulo de 0° , onde os filamentos estão alinhados com a direção da carga de tração, falhará devido à ruptura dos próprios filamentos. Em contraste, com um ângulo de 90° , a carga é aplicada perpendicularmente aos filamentos, e a falha ocorre devido à delaminação, ou seja, a quebra da adesão entre os cordões de material (WICKRAMASINGHE, DO, & TRAN, 2020). Para mitigar essa anisotropia no plano XY e obter propriedades mais homogêneas, uma prática comum é alternar o ângulo do raster entre camadas sucessivas, utilizando estratégias como $0^\circ/90^\circ$ ou $+45^\circ/-45^\circ$ (GIBSON I., 2015).

3.4.4. Temperatura de extrusão

A temperatura do bico extrusor é vital, pois controla a viscosidade do PLA a ser depositado e a qualidade da adesão entre os filamentos e entre as camadas. A faixa de temperatura de extrusão típica para o PLA situa-se entre 180 e 230 °C (WICKRAMASINGHE, DO, & TRAN, 2020). Se a temperatura for abaixo dessa faixa, o material pode não fundir adequadamente, resultando em subextrusão e uma fraca ligação interfacial, o que compromete severamente a resistência da peça. Se for muito alta, o PLA pode sofrer degradação térmica, perdendo suas propriedades mecânicas e resultando em um escoamento excessivo (*oozing*) que prejudica a precisão dimensional (GIBSON I., 2015). Uma temperatura de extrusão adequada é essencial para garantir que haja energia térmica suficiente para promover a difusão molecular e a fusão na interface entre a camada recém-depositada e a camada subjacente, um fenômeno crucial para a integridade estrutural da peça (VOLPATO, 2016).

3.4.5. Velocidade de impressão

A velocidade de impressão afeta diretamente o tempo de fabricação, mas também tem implicações na qualidade da peça. Velocidades excessivamente altas podem levar a uma série de problemas, como vibrações no equipamento que degradam o acabamento superficial e a precisão. Além disso, se a taxa de extrusão não for perfeitamente sincronizada com a velocidade de movimento do cabeçote, pode ocorrer subextrusão, resultando em peças com vazios, com má adesão entre camadas e pouco resistentes (GIBSON I., 2015). Portanto, a velocidade de impressão ideal é um equilíbrio que deve ser calibrado em conjunto com a temperatura e a vazão do material para garantir uma deposição consistente sem sacrificar a eficiência do processo.

3.4.6. Área transversal

O efeito da espessura da amostra e da área transversal tem impacto direto sobre a precisão dimensional, resistência mecânica e modo de falha das peças. Peças com maior espessura (ou área transversal maior na direção de tração)

tendem a apresentar melhor desempenho mecânico, com maior resistência à tração e alongamento na ruptura, além de menor variação nos resultados experimentais. Segundo Xu *et al.* (2021), isso ocorre porque peças mais espessas são menos afetadas por tensões residuais e variações térmicas durante a deposição em camadas (XU, FOSTERVOLD, & RAZAVI, 2021).

A fabricação de peças de PLA por FDM com propriedades otimizadas não depende de um único parâmetro, mas da complexa interdependência entre todos eles. Aumentar a velocidade de impressão pode exigir um aumento na temperatura para manter a fluidez do material, enquanto a busca por maior resistência mecânica pode levar à escolha de um ângulo de raster específico e uma maior densidade de preenchimento, impactando o tempo de produção. O domínio dessas relações permite que engenheiros e designers explorem o verdadeiro potencial do PLA, transformando-o de um simples material de prototipagem em uma solução viável para componentes funcionais e de uso final.

3.5. Recozimento

O recozimento é um tratamento térmico pós-processamento que consiste em aquecer e manter a peça impressa acima da temperatura de transição vítrea (T_g) e resfriá-la lentamente. Esse processo promove aumento da cristalinidade, redução de tensões internas e melhora da adesão intercamada, o que contribui para melhores propriedades mecânicas (KARTAL & KAPTAN, 2023).

Estudos relatam que o recozimento pode proporcionar aumentos significativos na resistência à tração, módulo de elasticidade, dureza e resistência à flexão. Kartal e Kaptan (2023) observaram ganhos de até 48 % na tensão de ruptura, 78 % no módulo de elasticidade, 28 % na dureza e 41 % na resistência à flexão para PLA impresso via FDM, especialmente a 85 °C por 90 minutos. Tratamentos a 100 °C por 4 horas conseguiram melhorar as propriedades de tração em até 80 % e também elevar a resistência ao calor (N. JAYANTH, 2021).

4. Materiais e Métodos

4.1. Material

O material utilizado nesse trabalho foi o filamento de PLA comercial incolor da marca 3D LAB, com 1,75 mm de diâmetro.

4.2. Impressão

A fabricação dos espécimes para os ensaios mecânicos de tração e flexão teve como etapa preliminar a modelagem tridimensional. Para os ensaios de tração, adotou-se o espécime tipo V, em conformidade com a norma ASTM D638, conforme ilustrado na Figura 10. Os espécimes destinados aos ensaios de flexão foram projetados com dimensões de 3 x 12,7 x 53 mm, em conformidade com a norma ASTM D790.

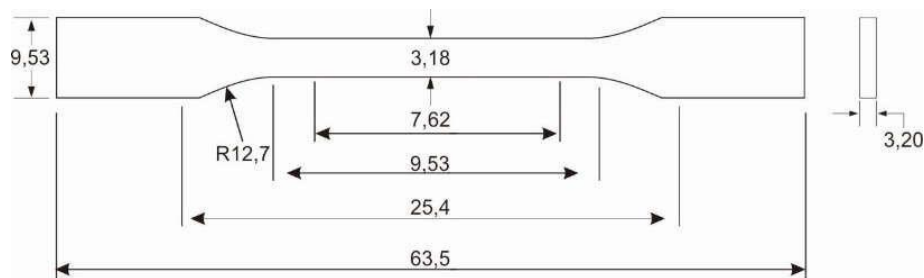


Figura 10 - Corpo de prova de tração do tipo 5 (Fonte: ASTM D638)

Os modelos geométricos foram desenvolvidos no software AutoCad online e exportados em formato .stl. Para a preparação dos arquivos de impressão, foi utilizado o software Ultimaker Cura, no qual realizou-se o fatiamento e a definição dos parâmetros de impressão. As especificações mantidas constantes em todas as impressões foram: infill tipo Grid com 100 % de densidade, espessura de parede de 1,2 mm (três paredes), ventoinha a 100 % da capacidade e plataforma de impressão a 60 °C. A simulação de impressão foi configurada para a fabricação sequencial das peças ("uma a uma"), em lotes de 10 amostras. Esta simulação estimou um tempo de impressão de 3 h 30 min a 50 mm/s e 4 h a 70 mm/s. O arquivo final foi salvo na extensão .gcode, compatível com a impressora

FDM. Os corpos de prova de flexão seguiram as mesmas condições, impressos em lotes de 10 unidades.

O equipamento FDM utilizado foi a impressora Creality Ender-3 V3 SE como mostra a Figura 11, que possui um volume máximo de impressão de 220 x 220 x 250 mm.



Figura 11- Impressora Creality Ender-3 V3 SE [manual da impressora]

A preparação para a impressão iniciou-se com a secagem do filamento em estufa a 50°C por pelo menos 12 horas. Este procedimento visou remover a umidade do material, prevenindo assim a formação de "teias" durante o processo, uma característica comum ao PLA.

Como procedimento preliminar à impressão, foi aplicado um spray adesivo à mesa de impressão para assegurar a aderência adequada das amostras e mitigar o descolamento, um desafio frequente na tecnologia FDM. Subsequentemente, realizou-se o nivelamento da impressora e, só então, o processo de impressão foi iniciado. Todas as amostras deste estudo foram fabricadas sob os mesmos parâmetros de impressão, variando-se apenas a velocidade (50 e 70 mm/s) e a temperatura do bico (200 °C e 220 °C). Concluída

a impressão, as amostras foram removidas da mesa, devidamente identificadas e armazenadas em sacos plásticos rotulados.

4.3. Recozimento

O tratamento térmico de recozimento foi conduzido em estufa nas temperaturas de 90 °C e 120 °C, com durações de 2 e 4 horas para cada patamar. Conforme reportado na literatura, o recozimento frequentemente induz o empenamento das peças. Para prevenir tal distorção, as amostras foram acondicionadas em um refratário contendo alumina tabular (CT300, adquirida da ACC Resources do Brasil Ltda.). O pó de alumina foi compactado manualmente, e os espécimes impressos foram posicionados entre duas camadas deste material, como ilustrado na Figura 12.

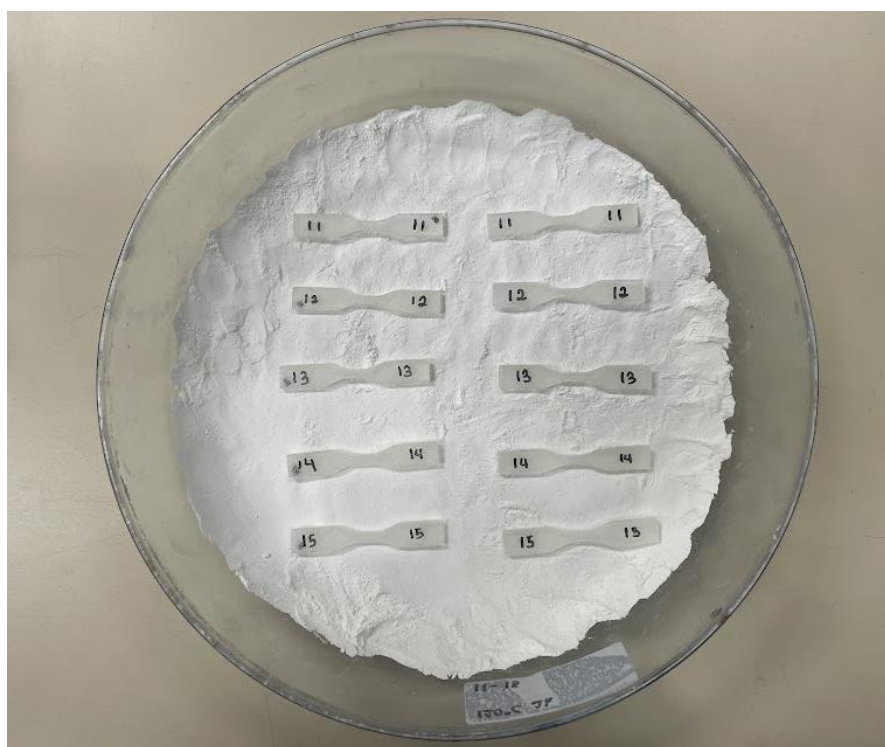


Figura 12 - Corpos de prova posicionados no refratário com alumina tabular

Os refratários contendo as amostras foram inseridos na estufa, previamente aquecida à temperatura de tratamento designada. Decorrido o tempo de

tratamento estipulado, os sistemas foram removidos do forno. Procedeu-se, então, ao resfriamento do refratário até a temperatura ambiente antes da extração das amostras da alumina. Subsequentemente, as amostras foram lavadas com água para a remoção completa do pó de alumina residual e secas em estufa a 50 °C por pelo menos duas horas.

Os parâmetros (tempo e temperatura) aplicados no recozimento estão detalhados na Tabela 1. A referida tabela também cataloga todas as amostras analisadas neste estudo, incluindo o código de identificação adotado para identificar as condições de impressão e tratamento térmico. Para fins de clareza, utilizou-se “V” para velocidade de impressão, “T” para temperatura de impressão (bico), “R” e “H” para temperatura e tempo de recozimento, respectivamente.

Tabela 1 - Parâmetros de impressão aplicados no recozimento

Temperatura (°C)	Tempo (h)	Velocidade de Impressão (mm/s)	Temperatura de impressão (°C)	Código de Identificação
-	-	50	200	V50T200
90	2	50	200	V50T200R90H2
90	4	50	200	V50T200R90H4
120	2	50	200	V50T200R120H2
120	4	50	200	V50T200R120H4
-	-	50	220	V50T220
90	2	50	220	V50T220R90H2
90	4	50	220	V50T220R90H4
120	2	50	220	V50T220R120H2
120	4	50	220	V50T220R120H4
-	-	70	200	V70T200
90	2	70	200	V70T200R90H2
90	4	70	200	V70T200R90H4
120	2	70	200	V70T200R120H2
120	4	70	200	V70T200R120H4
-	-	70	220	V70T220
90	2	70	220	V70T220R90H2
90	4	70	220	V70T220R90H4
120	2	70	220	V70T220R120H2
120	4	70	220	V70T220R120H4

4.4. Ensaio mecânicos

Para a caracterização das propriedades mecânicas dos corpos de prova — incluindo resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade e resistência à flexão — foram realizados ensaios de tração e de flexão em máquina universal de ensaios Kratos, equipada com célula de carga de 3000 kN, pertencente ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da EPUSP.

Os testes de tração foram conduzidos com pré-carga de 1 % para eliminação de folgas de montagem e velocidade de ensaio de 1 mm/min, utilizando-se cinco amostras por condição experimental.

No ensaio de tração, os cálculos de tensão de deformação seguiram as definições padrão, onde a tensão (σ) é a força (F) sobre a área (A) (Equação 1) e a deformação (ε) é a variação do comprimento (l) sobre o comprimento inicial ($l_0 = 7,62$ mm) (Equação 2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} \quad (2)$$

Como os ensaios foram realizados sem extensômetro, o deslocamento medido corresponde ao movimento do atuador da máquina, o que reduz a precisão em baixos níveis de deformação. Assim, conforme orienta a ASTM D638-22, procedeu-se ao tratamento da região inicial da curva tensão–deformação para remover o trecho de acomodação mecânica decorrente do assentamento das garras, folgas e rigidez do sistema. Essa região inicial não representa o comportamento elástico do material e, portanto, foi desconsiderada para o cálculo do módulo de elasticidade (E).

O módulo (E) foi então obtido por regressão linear da região elástica da curva, adotando-se apenas pontos com deformação superior a 1 %, intervalo no qual os efeitos do assentamento já não influenciam significativamente a resposta mecânica. A reta ajustada nessa região permitiu calcular E , conforme recomendado pela norma (Equação 3), garantindo maior confiabilidade aos valores obtidos.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

Durante a análise das curvas tensão–deformação, observou-se que uma das amostras (amostra 9 da condição V50T200R90H4) apresentou uma descontinuidade abrupta acompanhada de queda súbita de carga sem ruptura física do corpo de prova, seguida por recuperação artificial da tensão até valores incompatíveis com o comportamento esperado do material. Esse tipo de comportamento caracteriza falha do ensaio, causado pelo reajuste automático do sistema de fixação, e não representa o comportamento intrínseco do PLA impresso por FDM. Em conformidade com as recomendações das normas ASTM D638 e ASTM D790 para exclusão de resultados inconsistentes, essa amostra foi descartada do conjunto de dados e não foi incluída nas análises estatísticas e comparativas.

Os ensaios de flexão em três pontos (Figura 13) foram realizados na mesma máquina universal, substituindo-se as garras por dispositivo próprio para flexão. Utilizou-se um vão entre apoios (L) de 30 mm e velocidade de aplicação de carga de 1,3 mm/min, testando-se cinco amostras por condição. O teste prosseguiu até a ruptura ou deformação significativa da amostra.



Figura 13 - Ensaio de flexão em três pontos

Com base na norma ASTM D638-22, a tensão de flexão (σ_f) e a deformação (ε_f) foram calculadas segundo expressões empregadas para geometria retangular e ensaios em três pontos (Equações 4 e 5), em que L é o vão entre apoios, b a largura, d a altura da seção, F a força aplicada e D o deslocamento. O módulo de flexão foi obtido pela inclinação inicial da curva tensão–deformação na região linear, de forma análoga ao procedimento adotado no ensaio de tração.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_f = \frac{3Dd}{L^2} \quad (5)$$

Para quantificar a influência dos parâmetros de processamento — velocidade de impressão e recozimento — sobre as propriedades mecânicas obtidas, aplicou-se Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 0,05. A influência isolada de cada fator (velocidade de impressão de 50 mm/s e 70 mm/s e presença/ausência de recozimento) foi avaliada por ANOVA de fator único, enquanto a análise simultânea dos efeitos de temperatura e tempo de recozimento, incluindo suas interações, foi realizada por ANOVA de dois fatores com repetição. Esse tratamento estatístico permitiu determinar de forma objetiva quais parâmetros exercem impacto significativo no comportamento mecânico das amostras estudadas.

4.5. Caracterização dimensional

A observação do tamanho dos corpos de prova de PLA impressos por FDM, antes e após o recozimento, é fundamental para avaliar a precisão dimensional e os efeitos do tratamento térmico. Para isso, as dimensões dos corpos de prova — largura e espessura, utilizadas no cálculo da área da seção transversal — foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital de alta precisão, com resolução de 0,01 mm.

As medições foram realizadas em três diferentes posições ao longo do comprimento útil de cada corpo de prova, abrangendo a região central e as proximidades das extremidades. Em cada ponto, foram feitas três leituras

consecutivas, e a média aritmética dos valores obtidos foi considerada para representar cada dimensão. A área da seção transversal foi determinada pela multiplicação entre a largura e a espessura medidas em cada ponto.

Para avaliar os efeitos do recozimento sobre a geometria dos corpos de prova, calculou-se a variação percentual relativa da área por meio da seguinte equação (Equação 6):

$$\Delta A(\%) = \frac{A_{\text{pós}} - A_{\text{pré}}}{A_{\text{pré}}} \times 100 \quad (6)$$

4.6. Análise das superfícies de fratura por lupa estereoscópica

A caracterização morfológica das superfícies de fratura foi realizada utilizando-se os corpos de prova provenientes dos ensaios de tração, após a ruptura. A escolha dessas amostras permitiu observar diretamente os mecanismos de falha associados às condições de impressão e às etapas de recozimento aplicadas ao PLA.

As análises foram conduzidas por meio de uma lupa estereoscópica Zeiss Stemi SV6 (zoom = 0,8; ampliação aproximada de 8 x) (Figura 14), disponível no laboratório de metalurgia (PMT/EPUSP). Esse equipamento foi selecionado devido à sua maior profundidade de campo e à capacidade de fornecer visualização tridimensional da topografia, características especialmente adequadas para examinar superfícies de fratura com irregularidades e variações de relevo típicas de peças fabricadas por FDM.



Figura 14 - Lupa estereoscópica Zeiss Stemi SV6, disponível no laboratório de metalurgia (PMT/EPUSP). Fonte: Autor (2025)

Devido à natureza irregular das superfícies fraturadas e à presença de regiões com forte reflexão especular, foi conduzida uma triagem preliminar dos corpos de prova. Foram selecionadas preferencialmente as amostras que apresentavam superfícies de fratura com menor rugosidade global ou regiões relativamente planas, de modo a permitir a focalização adequada e minimizar perdas de contraste causadas por reflexões de luz.

Durante a captura das imagens, efetuaram-se ajustes de iluminação, incluindo a intensidade da luz, o ângulo de incidência e a posição da amostra em relação ao plano óptico. As imagens obtidas foram registradas e posteriormente utilizadas na discussão dos resultados, permitindo correlacionar padrões de fratura com os efeitos da velocidade de impressão e das condições de recozimento sobre a integridade estrutural das peças.

4.7. Ensaio de cisalhamentos oscilatório de pequenas amplitudes (SAOS)

Com o intuito de investigar a resposta viscoelástica das amostras, foram realizados ensaios de reometria oscilatória de pequena amplitude (SAOS - *Small Amplitude Oscillatory Shear*). O objetivo foi quantificar o módulo de

armazenamento (G'), o módulo de perda (G''), a viscosidade complexa (η^*) e o fator de amortecimento ($\tan \delta$).

Os ensaios foram conduzidos em um reômetro Anton Paar, na configuração de placas paralelas, localizado no Polymer Laboratory – PolLab, no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da EPUSP. As amostras utilizadas consistiram em seções não deformadas dos corpos de prova de tração. Todos os testes foram realizados isotermicamente a 190 °C.

O procedimento experimental iniciou-se com a determinação do regime viscoelástico linear (LVR). Para isso, varreduras de tensão foram realizadas em frequências constantes (300 rad/s e 0,1 rad/s), resultando na seleção de uma tensão de 30 Pa para garantir a linearidade da resposta. Em seguida, uma varredura de frequência (de 300 a 1 rad/s) foi executada sob essa tensão constante.

Para a análise dos dados, a viscosidade de cisalhamento zero (η_0) foi determinada através da extrapolação dos valores experimentais de viscosidade (obtidos em baixas taxas de cisalhamento) utilizando o modelo de Carreau (Equação 6).

$$y = y_{inf} + \frac{y_0 - y_{inf}}{(1 + (a \cdot x)^2)^p} \quad (6)$$

Onde:

- **y**: viscosidade dependente da taxa de cisalhamento
- **y₀**: viscosidade de cisalhamento zero
- **y_{inf}**: viscosidade em altas taxas de cisalhamento
- **a**: parâmetro relacionado ao tempo característico do material
- **p**: índice de comportamento de fluxo
- **x**: taxa de cisalhamento

Adicionalmente, o ponto de *crossover* ($G' = G''$) foi identificado a partir da varredura de frequência, marcando a transição entre os comportamentos elástico e viscoso. O tempo de reptação foi então calculado pela Equação 7, que corresponde ao inverso da frequência angular no ponto de *crossover*.

$$\tau_{rep} = \frac{1}{f_{cruz}} \quad (7)$$

5. Resultados e Discussões

5.1. Ensaaios mecânicos

5.1.1. Tração

Esta seção apresenta a avaliação dos efeitos da velocidade de impressão e do recozimento nas propriedades mecânicas de amostras de PLA produzidas por FDM. Os resultados incluem tensão máxima, alongamento na ruptura e módulo de elasticidade. A Tabela 2 reúne os valores médios e desvios-padrão obtidos para cada condição experimental, enquanto as Figuras 15, 16 e 17 ilustram a variação dessas propriedades. As curvas tensão–deformação representativas encontram-se no apêndice.

Tabela 2- Resultados e desvios do ensaio de tração

Amostras	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
V50T200	53,2 ± 3,2	44,7 ± 3,7	101,9 ± 5,5
V50T200R90H2	46,2 ± 4,5	29,3 ± 1,9	117,6 ± 14,4
V50T200R90H4	52,3 ± 4,0	29,5 ± 1,0	135,4 ± 14,2
V50T200R120H2	52,7 ± 1,2	42,0 ± 1,4	168,5 ± 9,1
V50T200R120H4	50,8 ± 1,5	40,5 ± 0,9	156,1 ± 34,9
V70T200	52,7 ± 1,8	43,5 ± 2,0	167,9 ± 5,9
V70T200R90H2	45,5 ± 1,0	46,1 ± 2,0	77,1 ± 2,4
V70T200R90H4	44,0 ± 2,8	41,5 ± 3,3	78,6 ± 7,3
V70T200R120H2	51,2 ± 3,4	40,9 ± 1,6	131,3 ± 42,3
V70T200R120H4	50,2 ± 5,9	41,3 ± 2,8	152,0 ± 44,4
V50T220	52,3 ± 2,6	44,4 ± 0,7	144,3 ± 40,2
V50T220R90H2	55,9 ± 3,3	46,6 ± 1,4	162,6 ± 4,5
V50T220R90H4	57,9 ± 3,1	44,5 ± 1,9	173,5 ± 9,5
V50T220R120H2	55,5 ± 3,5	42,3 ± 1,8	178,4 ± 6,0
V50T220R120H4	46,7 ± 2,4	38,7 ± 0,9	84,7 ± 4,2
V70T220	52,1 ± 1,8	45,9 ± 1,5	145,1 ± 38,8
V70T220R90H2	52,1 ± 0,7	44,0 ± 0,7	163,8 ± 7,9
V70T220R90H4	56,1 ± 3,9	43,9 ± 1,9	173,1 ± 5,2
V70T220R120H2	54,2 ± 3,0	43,0 ± 0,9	172,8 ± 10,8
V70T220R120H4	47,0 ± 2,9	39,7 ± 1,9	82,9 ± 5,01

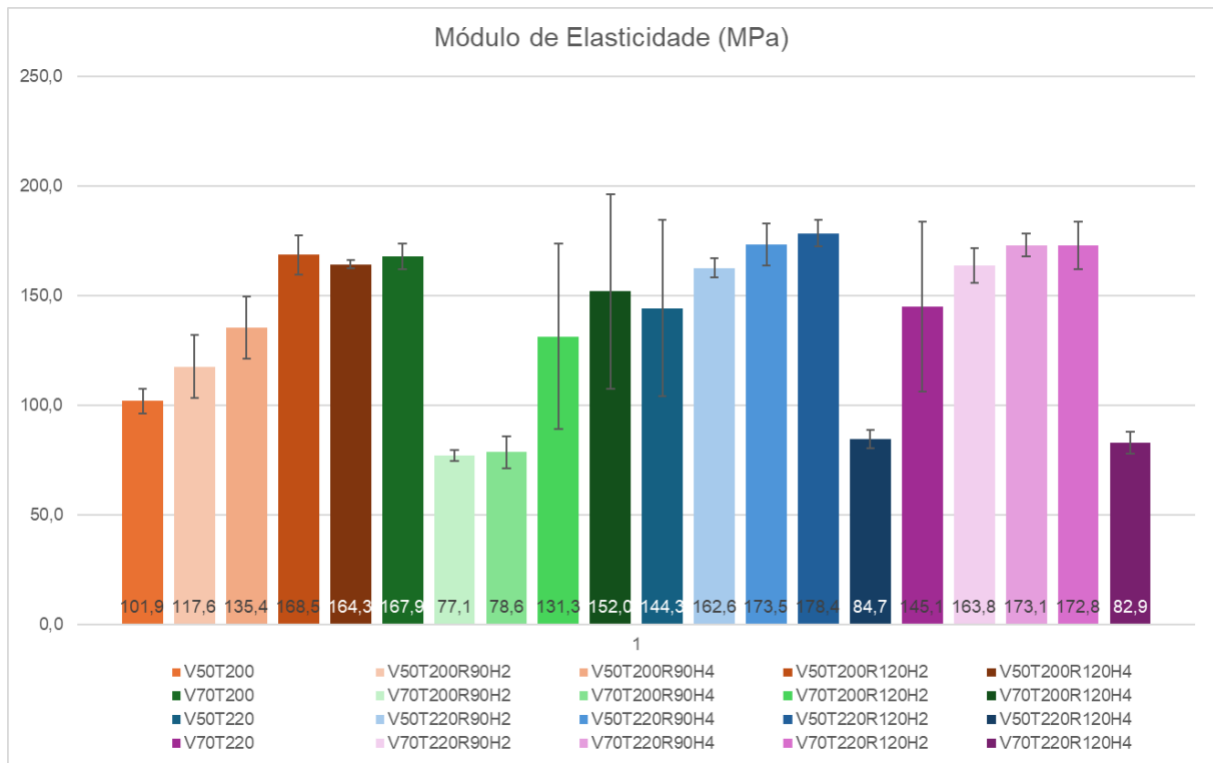


Figura 15 - Módulo de elasticidade e seus desvios para cada condição de impressão e recozimento. Fonte: Autor (2025)

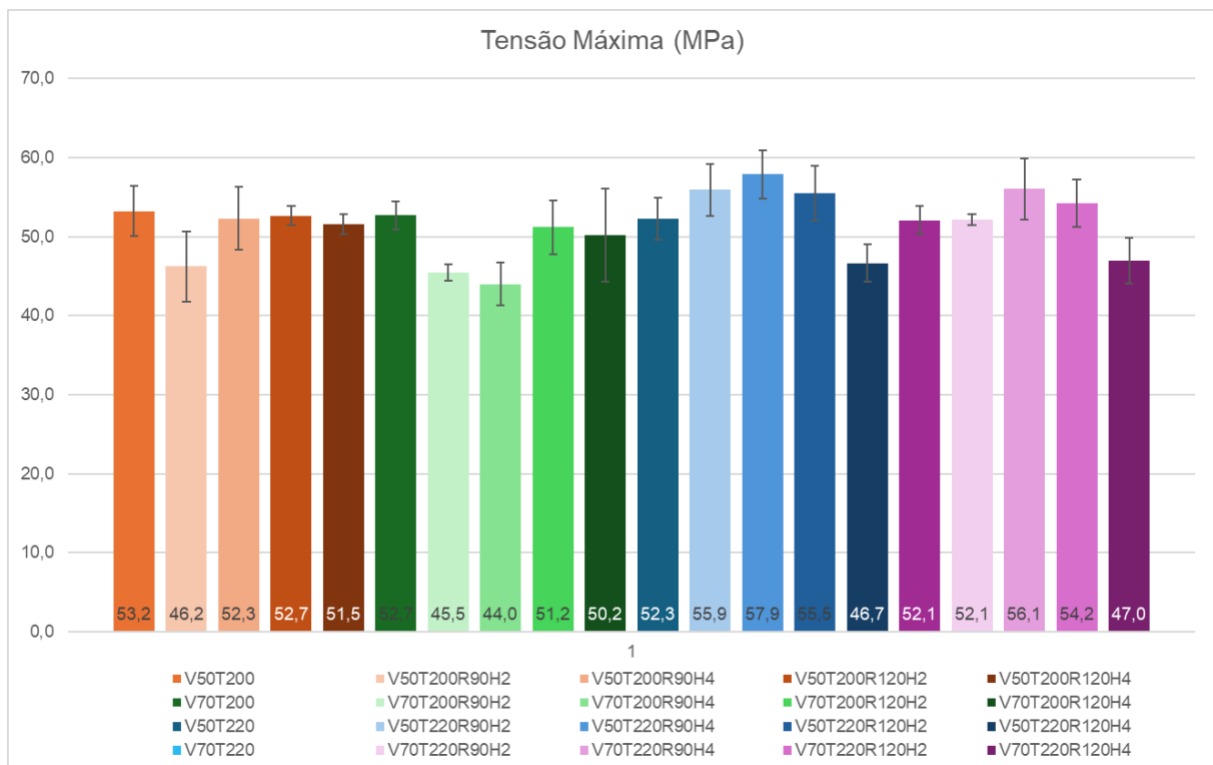


Figura 16 - Tensão Máxima e seus desvios para cada condição de impressão e recozimento. Fonte: Autor (2025)

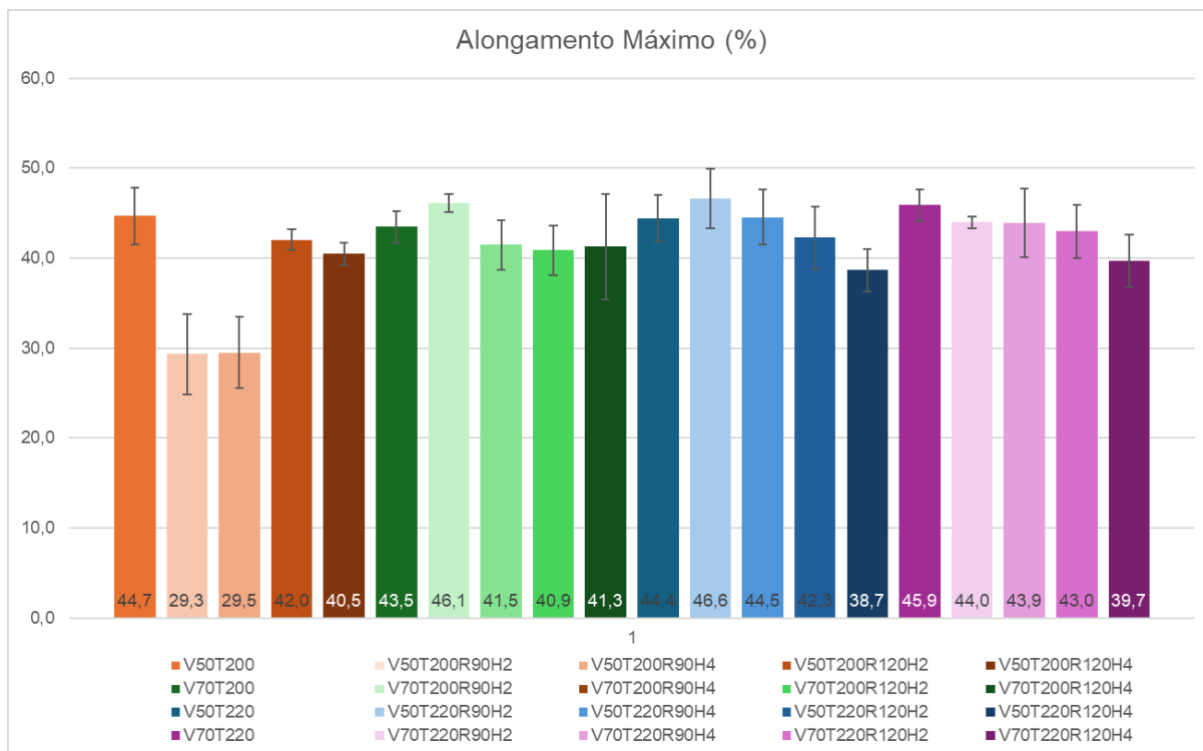


Figura 17- Alongamento Máximo e seus desvios para cada condição de impressão e recozimento. Fonte: Autor (2025)

De forma geral, a tensão máxima apresentou pouca variação entre as diferentes combinações de processo, situando-se predominantemente entre 48 e 58 MPa. A estabilidade desses valores sugere que a resistência última do material é pouco influenciada pelos parâmetros avaliados, sendo dominada pelo comportamento intrínseco do PLA fundido e pela integridade das regiões centrais dos filamentos.

O alongamento na ruptura, por outro lado, mostrou maior sensibilidade às condições térmicas e de processamento. Observou-se que algumas combinações apresentaram reduções expressivas da ductilidade, especialmente nas condições associadas a tratamentos de recozimento mais intensos. Em contraste, amostras impressas sem recozimento ou sob condições moderadas atingiram valores mais elevados de deformação, indicando maior eficiência na transferência de carga entre filamentos.

O módulo de elasticidade exibiu variações mais amplas, com valores que oscilaram entre aproximadamente 80 MPa e mais de 170 MPa. Essas diferenças refletem tanto o estado de união entre camadas quanto as alterações estruturais induzidas pelo recozimento, que serão detalhadas em subseções posteriores.

5.1.1.1.Efeito da velocidade

A análise do efeito da velocidade de impressão foi conduzida por meio de uma ANOVA bifatorial, com avaliação separada para os conjuntos de amostras impressos a 200 °C e 220 °C (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise de Variância (ANOVA) do impacto da velocidade de impressão em 200 e 220 °C. Fonte: Autor (2025)

T 220 °C		
Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Tensão máxima	0,9	Não
Alongamento	0,072	Não
Módulo de elasticidade	0,98	Não

Efeito da velocidade na Tração

T 200 °C		
Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Tensão máxima	0,75	Não
Alongamento	0,55	Não
Módulo de elasticidade	7,96E-08	Sim

Os resultados indicam que a velocidade não exerce influência significativa sobre a tensão máxima, com p-valores de 0,75 para 200 °C e 0,90 para 220 °C. Esse comportamento está alinhado à literatura, que aponta que a resistência última do PLA impresso tende a depender mais da qualidade da fusão intercamada e menos da taxa de deposição (AHN et al., 2002; SUN et al., 2008).

Para o alongamento na ruptura, a velocidade apresentou um papel mais relevante, especialmente a 200 °C, onde a tendência experimental confirma que a impressão a 50 mm/s favorece maior ductilidade quando comparada a 70 mm/s. Embora a ANOVA a 220 °C não tenha indicado significância estatística dentro do nível convencional, os resultados experimentais mostram tendência semelhante. Isso é consistente com estudos prévios (YANG et al., 2018; LAYEB et al., 2025), que demonstram que velocidades mais baixas favorecem maior

difusão molecular e fortalecem a adesão interlaminar. O módulo de elasticidade apresentou comportamento dependente da temperatura de impressão. A 200 °C, a ANOVA revelou que a velocidade influenciou significativamente o módulo ($p \approx 8 \times 10^{-8}$), com amostras impressas a 70 mm/s apresentando rigidez mais elevada. Já para 220 °C, essa influência não foi observada ($p \approx 0,98$), indicando que, nessa faixa de temperatura, o efeito do resfriamento e da fusão interfilamentos tende a ser menos sensível à variação da velocidade.

Essas observações reforçam que a velocidade de impressão afeta principalmente as propriedades associadas ao estado de união entre camadas, como alongamento e módulo (em algumas condições), enquanto propriedades associadas ao comportamento intrínseco do material, como a tensão máxima, permanecem praticamente independentes desse parâmetro. Essa tendência é amplamente reportada na literatura de FDM (SUN et al., 2008; TORRADO PÉREZ & ROBERSON, 2016; KULKARNI & GANESAN, 2020).

5.1.1.2. Efeito da temperatura de impressão

A influência da temperatura de impressão sobre as propriedades mecânicas foi avaliada por meio de uma Análise de Variância (ANOVA), considerando separadamente as velocidades de 50 mm/s e 70 mm/s. Os resultados consolidados encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Análise de Variância (ANOVA) do impacto da temperatura de impressão. Fonte: Autor (2025)

Efeito da temperatura na Tração		
V 50 mm/s		
Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Tensão máxima	0,67	Não
Alongamento	0,87	Não
Módulo de elasticidade	0,048	Sim
V 70mm/s		
Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Tensão máxima	0,60	Não
Alongamento	0,066	Não
Módulo de elasticidade	0,23	Não

A análise estatística indicou que a temperatura de impressão não produziu efeito significativo sobre a tensão máxima, independentemente da velocidade utilizada, uma vez que todos os p-valores permaneceram acima do limite de significância de 0,05. Esse comportamento está de acordo com estudos prévios (FARAH et al., 2016; WANG et al., 2017), que mostram que, dentro da faixa típica de processamento do PLA, alterações moderadas na temperatura tendem a impactar apenas marginalmente a resistência máxima, já que essa propriedade está fortemente associada à coesão interna do filamento extrudado e não tanto à temperatura no momento da deposição.

O módulo de elasticidade apresentou dependência estatisticamente significativa da temperatura apenas para 50 mm/s com um p-valor próximo ao limiar de significância ($p = 0,048$), sugerindo uma possível influência marginal. Entretanto, essa variação não se refletiu como tendência clara nos valores experimentais, razão pela qual não se pode atribuir à temperatura um efeito consistente sobre a rigidez do material.

O alongamento na ruptura apresentou comportamento distinto, embora também não significativo segundo a ANOVA. Para 50 mm/s, observou-se certa sensibilidade à temperatura, com pequenas variações na ductilidade entre 200 °C e 220 °C. Essa tendência é coerente com o entendimento físico do processo, uma vez que, em velocidades mais baixas, o bico permanece mais tempo próximo à camada recém-depositada, promovendo menor taxa de resfriamento e garantindo maior tempo acima da temperatura de transição vítrea. Isso favorece a difusão molecular e a consolidação interlaminar, como discutido por Ahn et al. (2002) e Sun et al. (2008).

Para 70 mm/s, essa sensibilidade desaparece: a taxa de resfriamento é maior, a solidificação ocorre mais rapidamente e a temperatura de impressão deixa de influenciar de forma significativa a mobilidade segmentar na interface entre filamentos. Assim, o alongamento torna-se essencialmente independente da temperatura, comportamento compatível com o observado experimentalmente e com resultados reportados por Yang et al. (2018) e Kulkarni e Ganesan (2020).

A temperatura de impressão não se mostrou um fator determinante para as propriedades mecânicas avaliadas. Seu efeito é limitado e condicionado à cinética do processo: ela pode influenciar discretamente o alongamento apenas em velocidades mais baixas, nas quais existe tempo suficiente para a difusão interlaminar. Em velocidades elevadas, a rápida perda térmica neutraliza essa influência, tornando o resfriamento da camada o fator predominante. Dessa forma, a temperatura de impressão desempenha papel secundário quando comparada à velocidade de deposição e ao tratamento de recozimento, que se mostraram variáveis mais relevantes para o desempenho mecânico do PLA.

5.1.1.3. Efeito do recozimento

O efeito do recozimento nas propriedades mecânicas foi avaliado por meio de uma ANOVA multifatorial, considerando simultaneamente temperatura de recozimento, tempo de tratamento e a interação entre esses fatores. As Tabelas 5 a 8 apresentam os valores de p obtidos para cada combinação de velocidade e temperatura de impressão, permitindo identificar em quais condições o recozimento exerce influência estatisticamente significativa sobre as propriedades de tração.

Tabela 5 - Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V50T200. Fonte: Autor (2025)

Efeito do recozimento na Tração V50T200			
Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Tensão máxima	0,058	0,093	0,019
Alongamento	1,53E-12	0,27	0,19
Módulo de elasticidade	0,0013	0,78	0,12

Tabela 6 - Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V50T220. Fonte: Autor (2025)

Efeito do recozimento na Tração V50T220			
Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Tensão máxima	0,0007	0,024	0,0013
Alongamento	1,49E-06	0,00084	0,29
Módulo de elasticidade	8,91E-10	1,38E-10	4,086E-12

Tabela 7 - Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V70T200. Fonte: Autor (2025)

Efeito do recozimento na Tração V70T200			
Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Tensão máxima	0,002	0,47	0,96
Alongamento	0,03	0,08	0,04
Módulo de elasticidade	0,0003	0,4	0,5

Tabela 8- Efeito do Recozimento no ensaio de Tração V70T220. Fonte: Autor (2025)

Efeito do recozimento na Tração V70T220			
Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Tensão máxima	0,02	0,2	0,0005
Alongamento	0,001	0,02	0,03
Módulo de elasticidade	2,2E-09	2,4E-09	1,1E-10

Os resultados indicam que a tensão máxima é sensível ao recozimento, embora de forma distinta entre os diferentes grupos. Para amostras impressas a 200 °C, apenas a interação entre temperatura e tempo apresentou significância estatística ($p = 0,019$), sugerindo que combinações específicas desses fatores são responsáveis por alterações na tensão máxima. Já nas amostras impressas a 220 °C verificou-se que a temperatura, o tempo e a interação entre ambos influenciaram significativamente essa propriedade, o que demonstra maior susceptibilidade dessas amostras às modificações térmicas impostas pelo tratamento.

O alongamento na ruptura foi uma das propriedades mais afetadas. Nas amostras impressas a 200 °C, apenas a temperatura de recozimento apresentou efeito significativo, ao passo que o tempo e a interação não demonstraram influência estatística relevante. Em contraste, nas amostras impressas a 220 °C, especialmente na velocidade de 70 mm/s, tanto a temperatura quanto o tempo exerceram influência significativa sobre a ductilidade, refletindo a maior sensibilidade dessa propriedade a tratamentos térmicos mais severos.

O módulo de elasticidade também apresentou forte dependência do recozimento, particularmente nas amostras produzidas a 220 °C. Em todas as combinações que envolveram essa temperatura de impressão, verificaram-se efeitos altamente significativos da temperatura, do tempo e da interação ($p \ll 0,05$), evidenciando aumentos sistemáticos da rigidez com o avanço do tratamento térmico. Nas amostras impressas a 200 °C, apenas a temperatura apresentou significância estatística, enquanto o tempo e a interação permaneceram sem efeito relevante.

A comparação entre os conjuntos de dados revela um padrão consistente: amostras impressas a 200 °C apresentam menor sensibilidade ao recozimento, enquanto aquelas produzidas a 220 °C respondem de maneira mais intensa e mais complexa às variações de temperatura e tempo. Esse comportamento sugere que amostras fabricadas a 220 °C possuem maior energia interna inicial, favorecendo rearranjos estruturais mais extensos durante o recozimento. Assim, o tempo de tratamento passa a exercer um papel cinético relevante, visto que tempos mais longos tendem a intensificar as transformações induzidas pela exposição térmica. Tal tendência é compatível com estudos que associam transformações morfológicas e relaxações térmicas mais pronunciadas a estados de maior mobilidade inicial das cadeias poliméricas (FARAH et al., 2016; WANG et al., 2017).

Em conjunto, os resultados demonstram que o recozimento é mais eficaz, e também mais complexo, em amostras impressas a 220 °C, nas quais a combinação entre temperatura e tempo permite ajustar de maneira mais precisa as propriedades mecânicas finais. Para amostras impressas a 200 °C, a temperatura de tratamento térmico constitui o principal fator ativo, exercendo influência moderada sobre a rigidez e sobre a ductilidade.

5.1.2. Flexão

Os resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos são apresentados na Tabela 10 abaixo, a partir de médias e desvios da resistência à flexão (tensão máxima) e módulo de elasticidade. Os gráficos da Figura 18 e 19 apresentam o

módulo de elasticidade e resistência de flexão em cada parâmetro estudado neste trabalho.

Tabela 9 - Resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos. Fonte: Autor (2025)

Amostra	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade em flexão (MPa)
V50T200	5,3 ± 0,3	137,4 ± 8,2
V50T200R90H2	5,8 ± 0,5	157,7 ± 10,4
V50T200R90H4	5,6 ± 0,2	156,4 ± 9
V50T200R120H2	5,7 ± 0,7	168,3 ± 16,3
V50T200R120H4	5,1 ± 0,5	168,9 ± 7,2
V70T200	5,1 ± 0,2	167,6 ± 4,7
V70T200R90H2	5,1 ± 0,2	146,6 ± 6,7
V70T200R90H4	4,9 ± 0,2	152,5 ± 12,6
V70T200R120H2	4,9 ± 0,1	149,4 ± 4,1
V70T200R120H4	5,0 ± 0,3	163,1 ± 11,5
V50T220	6,2 ± 0,4	172,6 ± 10,5
V50T220R90H2	6,3 ± 0,7	176,8 ± 8,5
V50T220R90H4	6,1 ± 0,6	186,9 ± 13,7
V50T220R120H2	6,1 ± 0,7	211,6 ± 11,6
V50T220R120H4	5,7 ± 0,5	209 ± 12,7
V70T220	5,7 ± 0,4	177,04 ± 5
V70T220R90H2	6,8 ± 0,2	199,6 ± 12,4
V70T220R90H4	6,7 ± 0,4	207,7 ± 11,8
V70T220R120H2	6,6 ± 0,4	211,9 ± 5,7
V70T220R120H4	5,5 ± 0,4	204,7 ± 11,9

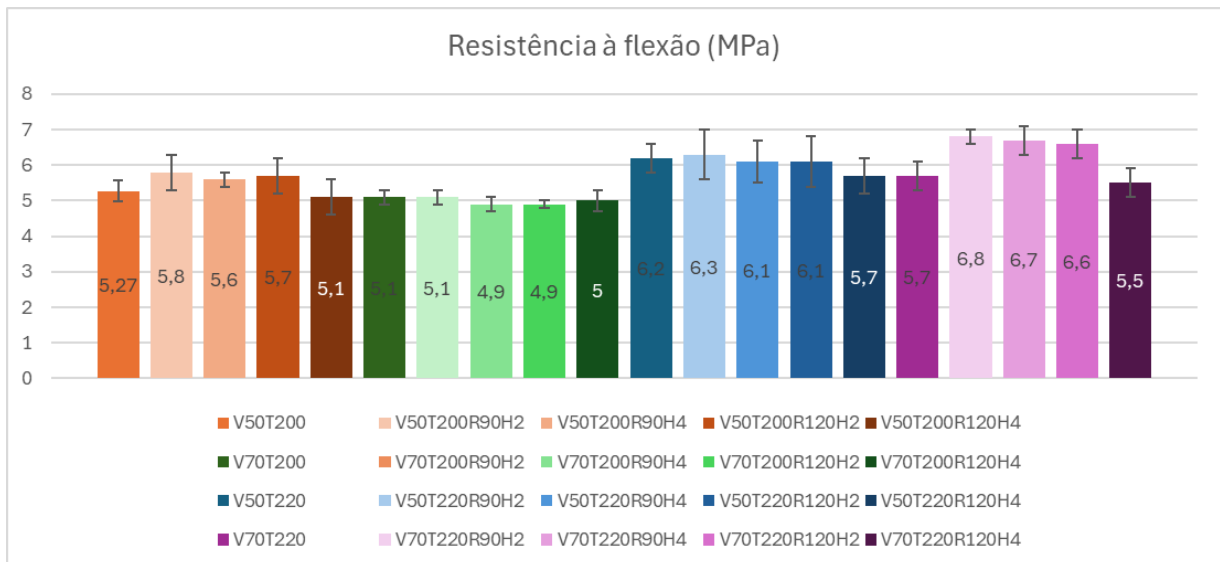


Figura 18 - Resistência à flexão de três pontos para as amostras em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)

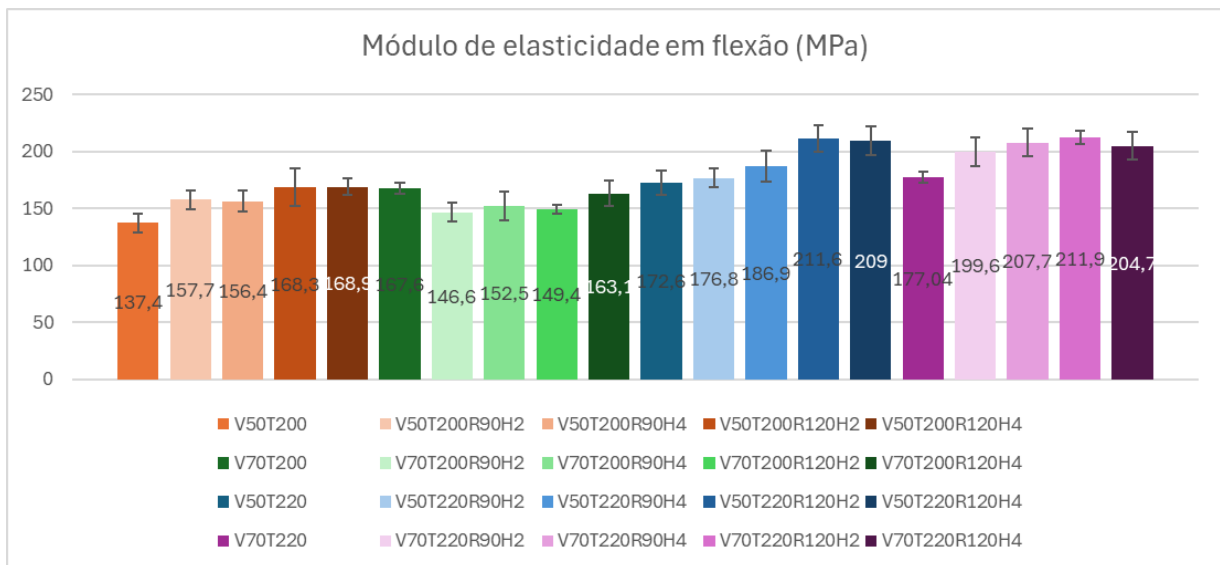


Figura 19- Módulo de elasticidade na flexão de três pontos para as amostras em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)

5.1.2.1. Efeito da velocidade

Para analisar os dados de flexão em três pontos e quantificar o nível de relevância da velocidade de impressão sobre as propriedades, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), cujos resultados estão detalhados na Tabela 10. A análise revelou que a influência da velocidade de impressão sobre as propriedades de flexão é dependente da temperatura de processamento.

A velocidade de impressão não causou influência estatisticamente significativa sobre a resistência à flexão nas duas temperaturas analisadas (200 e 220 °C) dado que os p-valores foram superiores a 0,05. Para as amostras impressas a 200 °C, a velocidade de impressão demonstrou ser um fator crítico e estatisticamente significativo ($p \approx 9.60E-05$) para o Módulo de Elasticidade em flexão. Em contraste, para as amostras impressas a 220 °C, a velocidade não exerceu influência significativa sobre o Módulo de Elasticidade ($p \approx 0.40$)

Tabela 10 - Resultado da ANOVA analisando a relevância da velocidade nas duas temperaturas de impressão. Fonte: Autor (2025)

Efeito da velocidade na Flexão		
T 200 °C		
Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Resistência	0,2	Não
Módulo de elasticidade	9,6E-05	Sim

T 220 °C		
Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Resistência	0,1	Não
Módulo de elasticidade	3,8E-01	Não

5.1.2.2. Efeito da temperatura de impressão

A análise estatística do efeito da temperatura de impressão na flexão de três pontos, por meio da Análise de Variância (ANOVA) na tabela 11, demonstrou que este é um fator crítico e robusto que influencia as propriedades mecânicas do material.

Tabela 11- Resultado da ANOVA analisando a relevância da temperatura de impressão. Fonte: Autor (2025)

Efeito da temperatura na Flexão

V 50 mm/s

Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Resistência	0,004	Sim
Módulo de elasticidade	0,0004	Sim

V 70 mm/s

Parâmetro	p-valor	Fator crítico
Resistência	0,008	Sim
Módulo de elasticidade	0,01	Sim

Ao contrário do que foi observado em algumas propriedades de tração, onde o efeito da temperatura era condicional à velocidade, na flexão, a temperatura de impressão exerceu influência significativa sobre a Resistência à Flexão e o Módulo de Elasticidade em ambas as velocidades analisadas (50 e 70 mm/s). Os p-valores consistentemente baixos confirmam que a variação de temperatura é um fator determinante para o comportamento do material sob carregamento flexional.

Este resultado sugere que a energia térmica fornecida pela temperatura de impressão é essencial para promover a adesão interfacial e a consolidação da massa da amostra, que são características cruciais para suportar as tensões de compressão e tração que ocorrem durante o ensaio de flexão. O módulo e a resistência dependem fortemente da integridade da junta entre as camadas, e a temperatura se mostra o fator mais eficaz na otimização dessa integridade, independentemente da taxa com que o material é depositado.

5.1.2.3.Efeito do recozimento

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) multifatorial para o ensaio de flexão com objetivo de analisar o efeito do recozimento são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado da ANOVA analisando o recozimento. Fonte: Autor (2025)

Efeito do recozimento na Flexão V50T200

Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Resistência	0,19	0,08	0,36
Módulo de elasticidade	0,04	0,95	0,85

Efeito do recozimento na Flexão V70T200

Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Resistência	0,48	0,51	0,39
Módulo de elasticidade	0,13	0,03	0,36

Efeito do recozimento na Flexão V50T220

Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Resistência	0,26	0,27	0,70
Módulo de elasticidade	0,0001	0,49	0,25

Efeito do recozimento na Flexão V70T220

Parâmetro	p-valor temperatura	p-valor tempo	p-valor interação
Resistência	0,001	0,002	0,004
Módulo de elasticidade	0,25	0,77	0,09

Os resultados revelam que o efeito do recozimento sobre as propriedades de flexão do PLA é fortemente dependente da condição inicial da amostra — especialmente da temperatura e da velocidade de impressão — bem como da propriedade mecânica analisada.

Nas amostras impressas na menor temperatura (200 °C), observou-se que o recozimento apresentou influência limitada. A resistência à flexão não foi significativamente afetada por nenhum dos fatores avaliados (temperatura, tempo ou interação), independentemente da velocidade de impressão. Entretanto, o módulo de elasticidade mostrou-se mais sensível: na condição V50T200, o efeito da temperatura de recozimento foi significativo ($p \approx 0,04$), enquanto na condição V70T200 o tempo de recozimento foi o fator determinante

($p \approx 0,03$). Esse comportamento indica que, partindo de um estado de menor energia inicial, o recozimento modifica a rigidez do material de forma distinta conforme o regime cinético estabelecido no processo de impressão, de modo que ora a temperatura é o principal fator limitante, ora o tempo de exposição térmica.

Em contraste, as amostras impressas na maior temperatura (220 °C) exibiram respostas mais complexas, especialmente para a condição V70T220. Nessa situação, a resistência à flexão foi fortemente influenciada pelos três efeitos: temperatura de recozimento ($p \approx 0,001$), tempo ($p \approx 0,002$) e pela interação entre ambos ($p \approx 0,004$). A presença de interação significativa evidencia que o efeito do tempo depende da temperatura aplicada — e vice-versa — sugerindo que o estado inicial de maior energia associado à impressão a 220 °C e alta velocidade gera uma microestrutura suscetível aos rearranjos promovidos pelo tratamento térmico. Essa interpretação está alinhada com estudos que demonstram que o aumento da temperatura e da taxa de deposição tende a gerar regiões de maior orientação molecular e tensões residuais, as quais respondem de forma mais intensa ao recozimento (KARTAL e KAPTAN 2023; TORRADO PÉREZ e ROBERSON 2016).

Por outro lado, o módulo de elasticidade não apresentou variações estatisticamente significativas em V70T220, indicando que, nessa condição, o recozimento afeta mais fortemente os mecanismos associados à falha e à resistência do que aqueles relacionados à rigidez. Tal distinção já foi reportada em estudos que mostram que a resistência à flexão está mais associada à integridade intercamadas e ao alívio de tensões, enquanto o módulo tende a depender principalmente da cristalinidade global (von WINDHEIM et al., 2021; CADÊTE et al., 2025).

De maneira geral, os resultados confirmam que o recozimento não atua de forma homogênea em todas as condições, mas sim responde a uma combinação entre o histórico térmico da impressão e os parâmetros do tratamento térmico subsequente, afetando especialmente a rigidez e, em situações específicas, a resistência à flexão.

5.2. Caracterização dimensional

A Tabela 13 apresenta o resultado da análise dimensional das amostras antes e após o tratamento térmico de recozimento.

Tabela 13 - Medição das amostras do ensaio de tração. Fonte: Autor (2025)

	ANTES	DEPOIS	
	Área (mm)	Área (mm)	Diferença (%)
V50T200	106,1	-	-
V50T200R90H2	109,2	105,7	-3,2
V50T200R90H4	107,7	104,7	-2,8
V50T200R120H2	107,0	104,8	-2,0
V50T200R120H4	105,6	104,0	-1,6
V70T200	106,9	-	-
V70T200R90H2	110,0	108,6	-1,2
V70T200R90H4	107,9	106,5	-1,3
V70T200R120H2	106,3	104,3	-1,8
V70T200R120H4	105,7	103,7	-1,8
V50T220	103,0	-	-
V50T220R90H2	100,7	102,2	1,5
V50T220R90H4	103,1	102,7	-0,4
V50T220R120H2	103,5	102,2	-1,3
V50T220R120H4	103,0	101,6	-1,3
V70T220	101,9	-	-
V70T220R90H2	102,4	101,9	-0,5
V70T220R90H4	103,4	100,9	-2,4
V70T220R120H2	103,5	101,3	-2,1
V70T220R120H4	101,3	100,1	-1,2

De modo geral, observa-se que a maior parte das amostras apresentou redução de área, com variações típicas entre $-0,4\%$ e $-3,2\%$, dependendo da combinação entre velocidade, temperatura de impressão e parâmetros do recozimento. Apenas uma condição (V50T220R90H2) apresentou um pequeno aumento de área ($+1,5\%$), possivelmente relacionado a rearranjos locais não uniformes, fenômeno já observado em estudos sobre estabilidade dimensional de peças de PLA recozidas (KARTAL e KAPTAN 2023; TORRADO PÉREZ e ROBERSON 2016).

5.2.1. Efeito do recozimento

Os resultados indicam que o recozimento gerou alterações dimensionais perceptíveis, principalmente na forma de contração da área da seção transversal. Esse comportamento é típico de polímeros semicristalinos processados por FDM, cuja estrutura ainda contém tensões residuais e regiões amorfas instáveis após a impressão. Durante o aquecimento, as cadeias poliméricas tendem a se reorganizar em direção a um estado de menor energia livre, resultando em compactação e redução volumétrica (WANG et al., 2017; LIAO et al., 2019; CADÊTE et al., 2025).

Ao comparar as condições experimentais, nota-se que a magnitude da contração varia conforme a combinação de impressão e recozimento. As amostras impressas a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ mostraram reduções mais acentuadas (até $-3,2\%$), principalmente sob recozimento a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 2 h, sugerindo maior acúmulo de tensões internas devido ao menor aporte térmico durante a deposição — tendência discutida em estudos que relatam a forte influência da temperatura de impressão na estabilização microestrutural do PLA (CHACÓN et al., 2017; LIPAROTI et al., 2021; RAJAN et al., 2022).

Em contraste, peças impressas a $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ exibiram reduções menores e mais uniformes, indicando que parte do relaxamento já ocorre durante a impressão em temperaturas mais elevadas, reduzindo a quantidade de tensões disponíveis para liberação durante o recozimento. Quanto aos parâmetros do tratamento térmico, observou-se que maiores temperaturas ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) e tempos prolongados (4 h) tendem a gerar retrações mais estáveis, coerentes com a literatura que

descreve a influência do recozimento no aumento do grau de cristalinidade e consequente densificação do PLA (TORRADO PÉREZ; ROBERSON, 2016; KARTAL; KAPTAN, 2023; MAIA, 2025).

Em termos microestruturais, a redução de área é atribuída principalmente a dois mecanismos: o relaxamento de tensões internas, viabilizado pela maior mobilidade das cadeias em temperaturas próximas ou superiores à T_g ; e ao aumento da cristalinidade, que gera fase sólida mais densa e volumetricamente mais compactada.

5.3. Análise das superfícies de fratura por lupa estereoscópica

As superfícies de fratura dos corpos de prova provenientes dos ensaios de tração foram analisadas por meio de lupa estereoscópica Zeiss Stemi SV6 (zoom = 0,8; ampliação aproximada de 8 x), com o objetivo de observar diferenças morfológicas associadas aos parâmetros de impressão e às condições de recozimento. As Tabelas 14 a 18 apresentam as imagens obtidas para cada condição experimental, organizadas segundo a velocidade de impressão, a temperatura de extrusão e o tratamento térmico aplicado.

A Tabela 14 reúne as superfícies de fratura das amostras sem recozimento, permitindo a comparação direta entre as velocidades de 50 e 70 mm/s para ambas as temperaturas de impressão (200 °C e 220 °C). As Tabelas 15 e 16 apresentam, respectivamente, as amostras recozidas a 90 °C por 2 h e por 4 h. As Tabelas 17 e 18 reúnem as imagens obtidas após o recozimento a 120 °C, também nos tempos de 2 h e 4 h. Todas as imagens foram adquiridas no mesmo arranjo experimental, mantendo condições constantes de iluminação e posicionamento.

Tabela 14 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (sem tratamento), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; $\approx 8x$) . *Fonte: Autor (2025)*

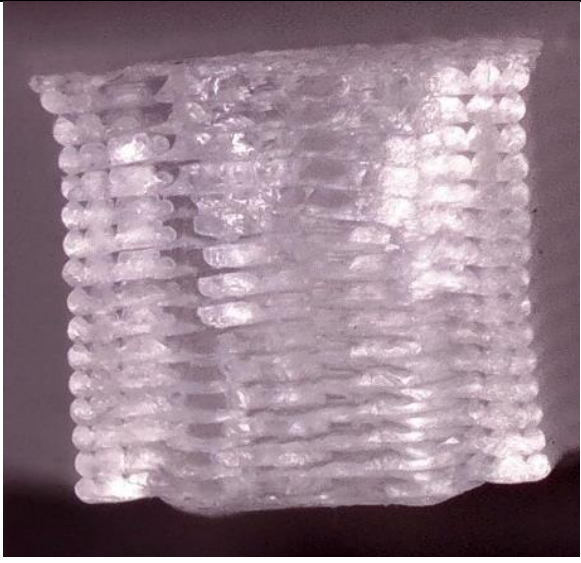
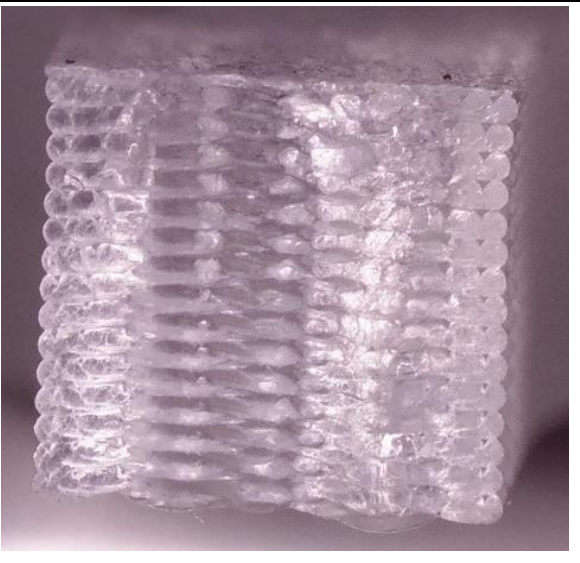
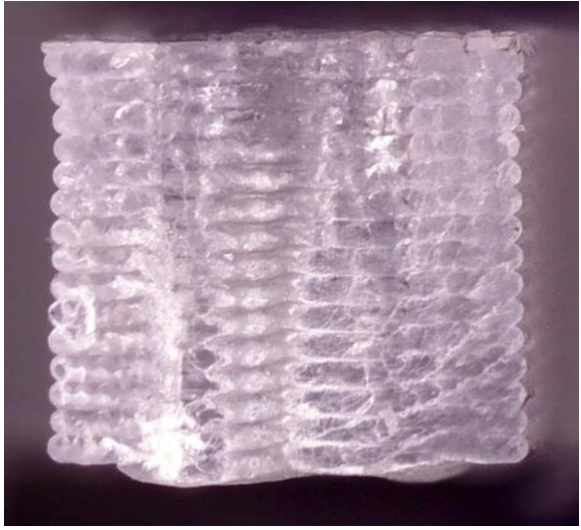
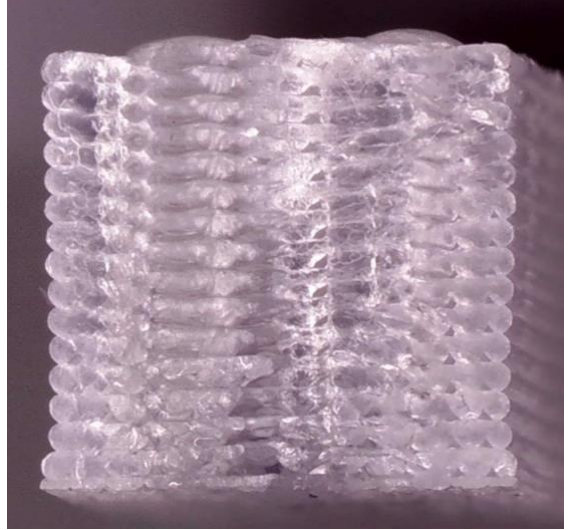
	V 50 mm/s	V 70 mm/s
200 °C		
220 °C		

Tabela 15 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 90°C por 2 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) .
Fonte: Autor (2025)

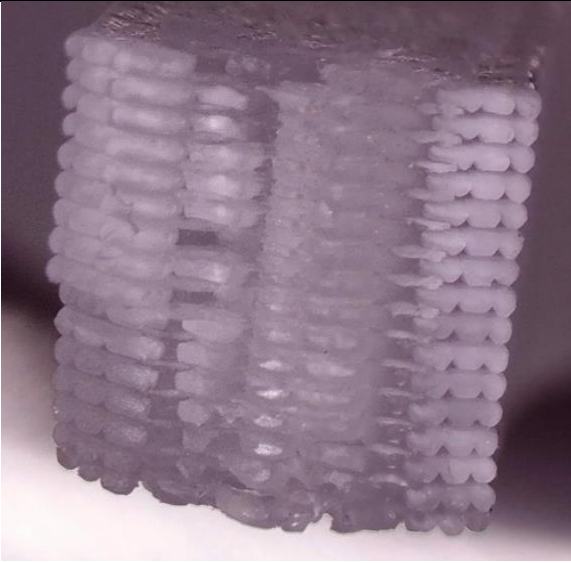
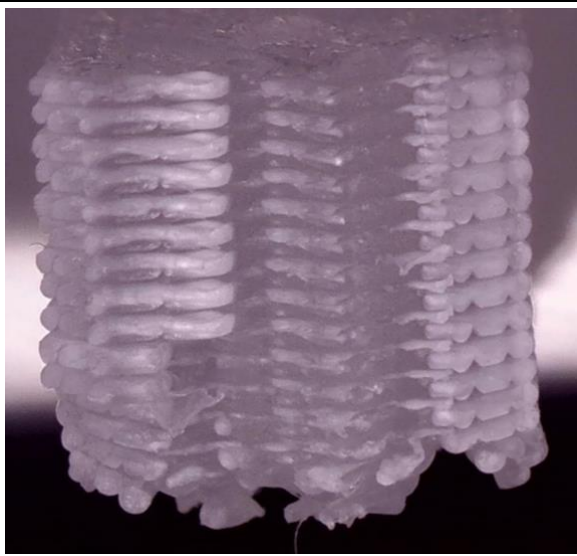
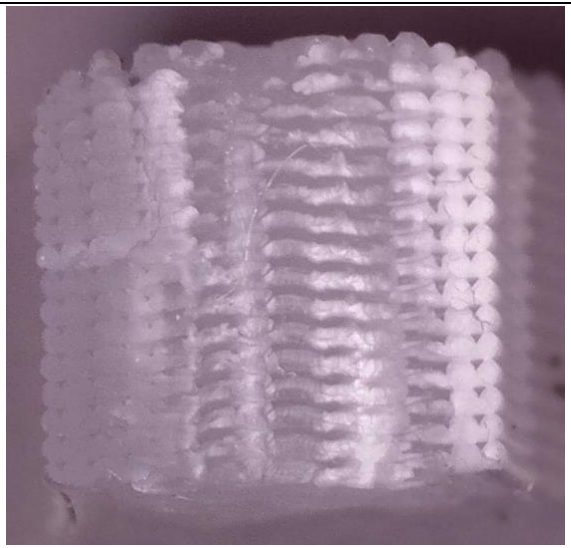
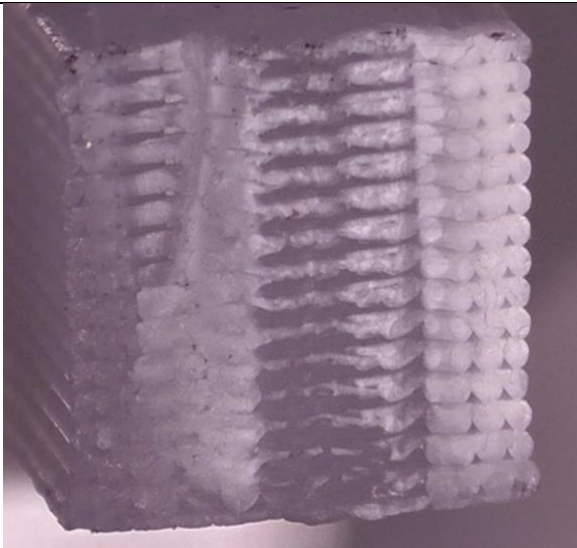
	V 50 mm/s	V 70 mm/s
200 °C		
220 °C		

Tabela 16 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 90°C por 4 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) .
Fonte: Autor (2025)

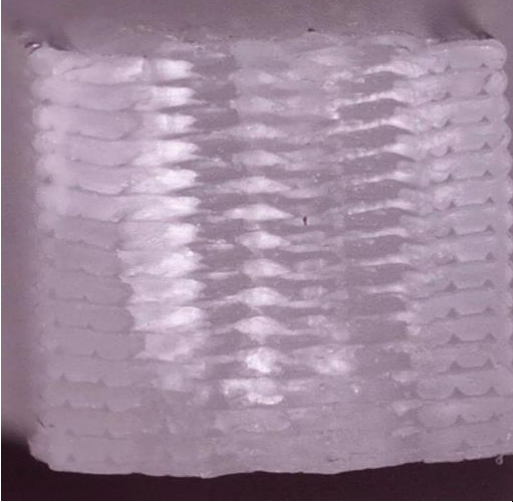
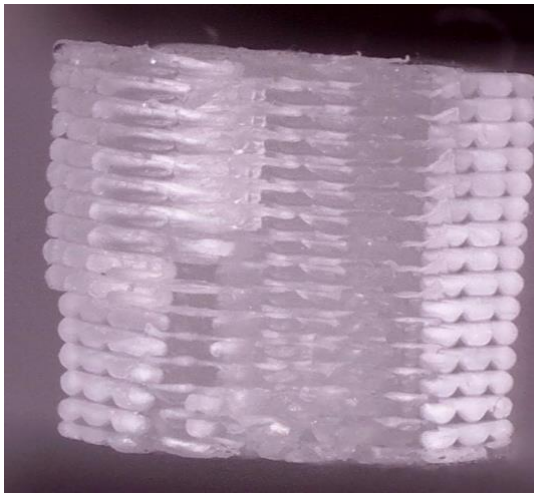
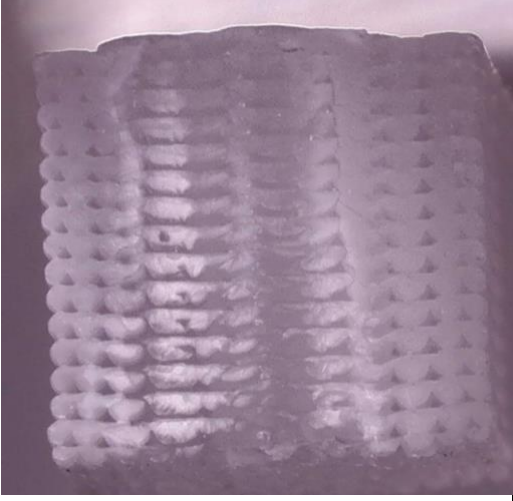
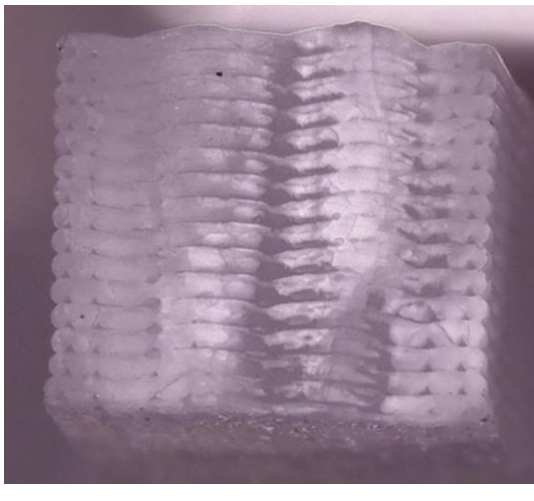
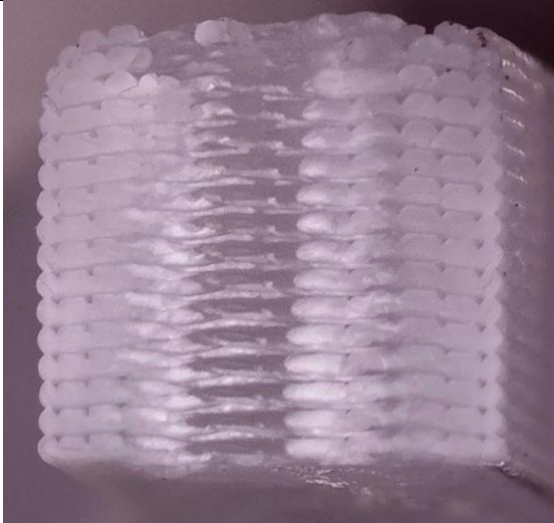
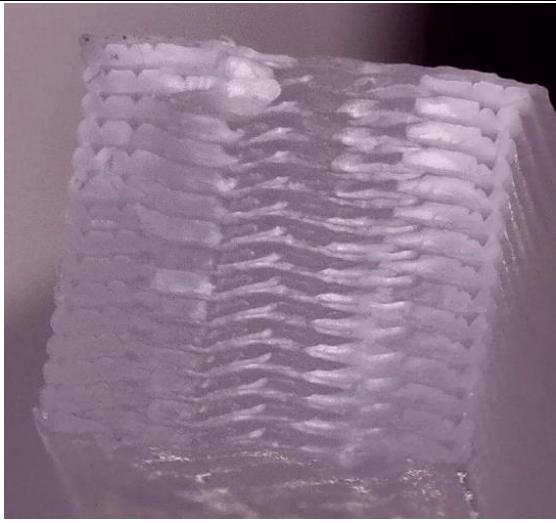
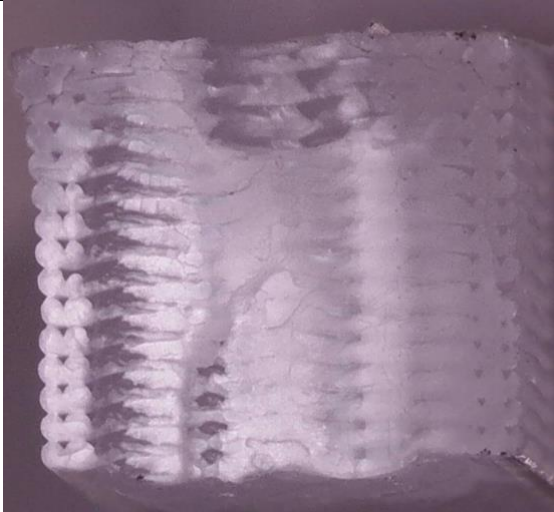
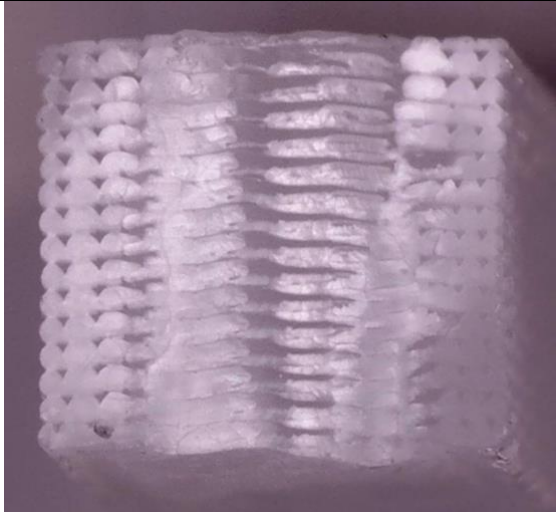
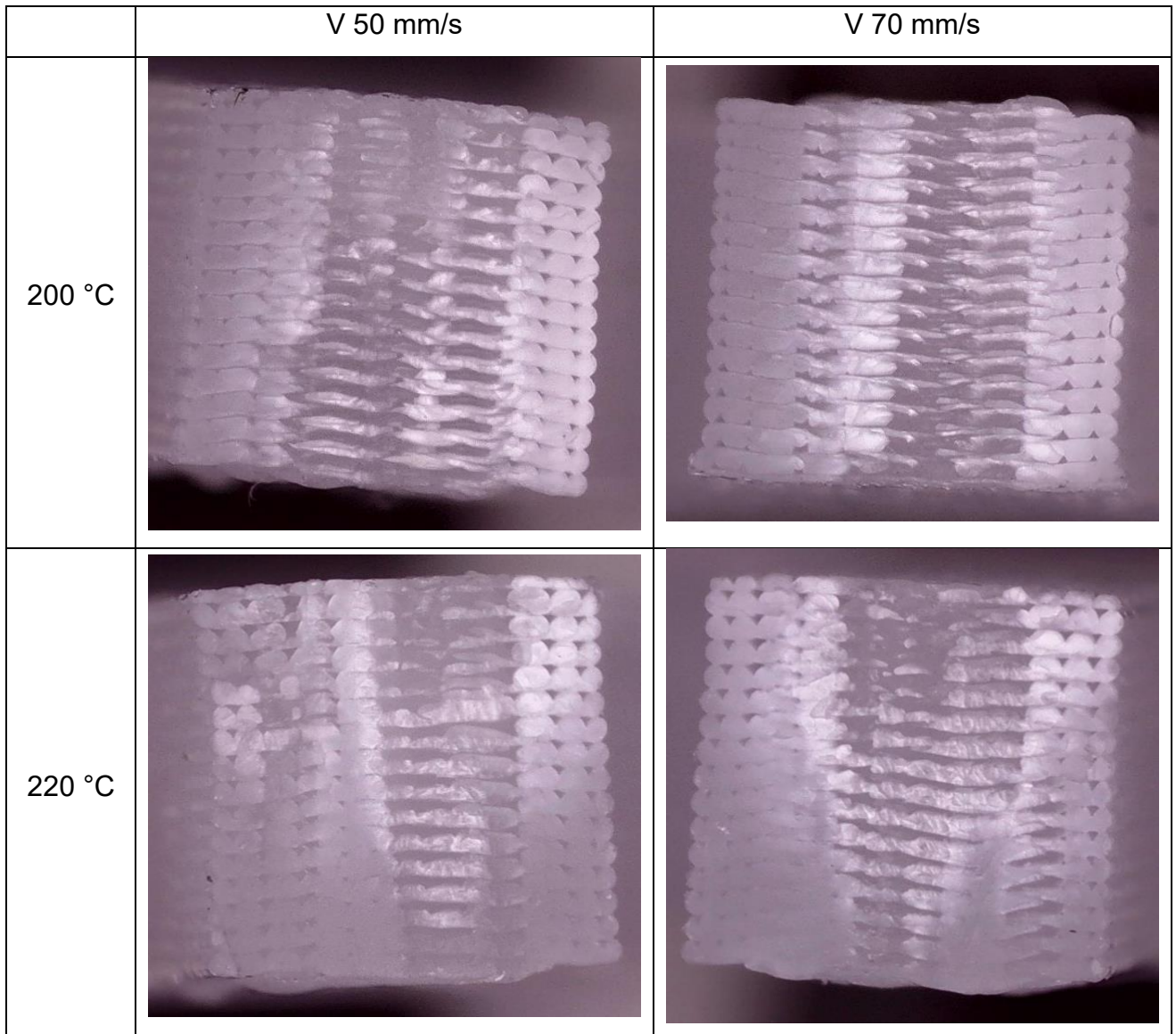
	V 50 mm/s	V 70 mm/s
200 °C		
220 °C		

Tabela 17 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 120°C por 2 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) .
Fonte: Autor (2025)

	V 50 mm/s	V 70 mm/s
200 °C		
220 °C		

*Tabela 18 - Superfícies de fratura dos corpos de prova de tração (recozimento em 120°C por 4 horas), observada em lupa estereoscópica (zoom = 0,8; ≈ 8x) .
Fonte: Autor (2025)*



5.3.1. Efeito da velocidade

A comparação entre as amostras impressas a 50 mm/s e 70 mm/s, mostrada inicialmente na Tabela 14 (amostras sem recozimento), evidencia que a velocidade de impressão exerce influência direta sobre a aparência da superfície de fratura. Nas amostras impressas a 50 mm/s, observa-se uma camadas mais compactas, com linhas de deposição visualmente mais próximas e menor separação entre rasters. Já as amostras impressas a 70 mm/s

apresentam maior espaçamento visível entre as camadas, além de descontinuidades mais marcadas nas interfaces interlaminares.

Esse padrão se mantém em todas as demais condições analisadas (Tabelas 15 a 18), independente da temperatura de extrusão e do recozimento. Assim, a velocidade de impressão constitui o fator mais claramente distinguível pela análise morfológica, associando menores velocidades a fraturas mais coesas e maiores velocidades a superfícies mais segmentadas. Esses resultados são coerentes com o comportamento mecânico observado, no qual amostras impressas a 50 mm/s apresentaram maior ductilidade e melhor qualidade de adesão entre filamentos.

5.3.2. Efeito da temperatura de impressão

Nas amostras sem recozimento (Tabela 14), nota-se que aquelas impressas a 220 °C tendem a apresentar rasters ligeiramente mais definidos e com menor variação local no espaçamento entre camadas, quando comparadas às impressas a 200 °C. Essa diferença, porém, é discreta e não se manifesta de forma suficientemente marcada para caracterizar um padrão independente da velocidade de impressão.

Em condições de recozimento, o efeito da temperatura de impressão permanece pouco pronunciado. Nas Tabelas 15 e 16 (90 °C), as amostras de 200 °C e 220 °C exibem morfologias semelhantes. Apenas nas condições de recozimento mais severas (Tabelas 17 e 18), observa-se uma leve diminuição da definição das camadas nas amostras impressas a 220 °C, sugerindo que essas peças apresentam maior predisposição a pequenas alterações visuais quando submetidas ao aquecimento. Ainda assim, essas diferenças permanecem mais sutis do que aquelas relacionadas à velocidade de impressão.

A temperatura de impressão exerce influência limitada na morfologia da fratura, sendo menos determinante visualmente do que a velocidade ou o recozimento.

5.3.3. Efeito do recozimento

O recozimento é o parâmetro que produz as alterações mais progressivas e consistentes nas imagens da fratura, especialmente quando analisado em ordem crescente de severidade térmica.

O recozimento a 90 °C, tanto por 2 h quanto por 4 h (Tabelas 15 e 16), não produz mudanças visuais expressivas em relação às amostras sem tratamento. As superfícies continuam apresentando definição clara das linhas de deposição e a morfologia permanece semelhante em todas as combinações de velocidade e temperatura de impressão. Isso confirma que pequenas elevações de temperatura acima da T_g do PLA não são suficientes para modificar perceptivelmente a aparência da fratura.

Alterações mais evidentes surgem no recozimento a 120 °C por 2 h. As amostras passam a apresentar leve suavização das bordas das linhas de deposição e redução do contraste entre camadas, particularmente naquelas impressas a 200 °C. Apesar disso, ainda é possível identificar individualmente os rasters.

A condição mais severa, 120 °C por 4 h, promove as mudanças morfológicas mais pronunciadas. As superfícies tornam-se mais uniformes, com menor distinção entre camadas e fraturas visualmente mais compactadas. Esse efeito ocorre em todas as condições de impressão, embora as amostras impressas a 70 mm/s continuem revelando maior espaçamento entre rasters do que aquelas impressas a 50 mm/s.

Assim, o recozimento a 120 °C por 4 h se destaca como a condição capaz de promover alterações visuais claras na estrutura observada, enquanto tratamentos mais brandos mantêm a morfologia praticamente inalterada.

As alterações observadas nas imagens ampliadas correspondem a modificações morfológicas superficiais decorrentes do relaxamento térmico e da reorganização dos filamentos durante o recozimento. No entanto, tais

observações não constituem evidência direta de cristalização, uma vez que o grau de cristalinidade do PLA só pode ser determinado com técnicas específicas, como DSC ou difração de raios X.

5.4. Cisalhamento oscilatório de pequenas amplitudes (SAOS)

Os ensaios de SAOS permitiram obter as curvas de viscosidade complexa, bem como os módulos dinâmicos de armazenamento (G') e de perda (G''), apresentadas nas Figuras 20 a 22. A Tabela 19 reúne os valores de viscosidade em cisalhamento zero (η_0), frequência de crossover, módulo associado ao crossover e tempo de reptação (τ_{rep}) para cada amostra. Esses resultados são utilizados, nesta seção, para avaliar a influência da velocidade de impressão no comportamento reológico do PLA e, em seção posterior, para discutir os efeitos do recozimento.

Tabela 19 - Resultados da viscosidade no cisalhamento zero e condições do crossover para cada amostra. Fonte: Autor (2025)

Amostra	η^0 (Pa.s)	Módulo (Pa)	Crossover Freq (rad/s)	τ_{rep}
V50T200	1.736,4	-	-	-
V50T200R90H2	1.690,6	92 847	187,69	0,0053
V50T200R90H4	1.562,3	-	-	-
V50T200R120H2	1.529,9	-	-	-
V50T200R120H4	1.136,7	-	-	-
V70T200	1.551,2	124 460	291,43	0,0034
V70T200R90H2	1.606,5	118 350	265,31	0,0038
V70T200R90H4	1.653,2	85 432	181,05	0,0055
V70T200R120H2	1.412,0	90 142	211,95	0,0047
V70T200R120H4	893,8	-	-	-
V50T220	1.417,9	-	-	-
V50T220R90H2	1.511,9	-	-	-
V50T220R90H4	1.526,6	-	-	-
V50T220R120H2	1.106,3	-	-	-
V50T220R120H4	693,6	-	-	-
V70T220	1.540,7	-	-	-
V70T220R90H2	1.598,5	-	-	-
V70T220R90H4	1.725,0	121 690	265,25	0,0038
V70T220R120H2	1.495,8	-	-	-
V70T220R120H4	1.215,5	-	216,57	0,0046

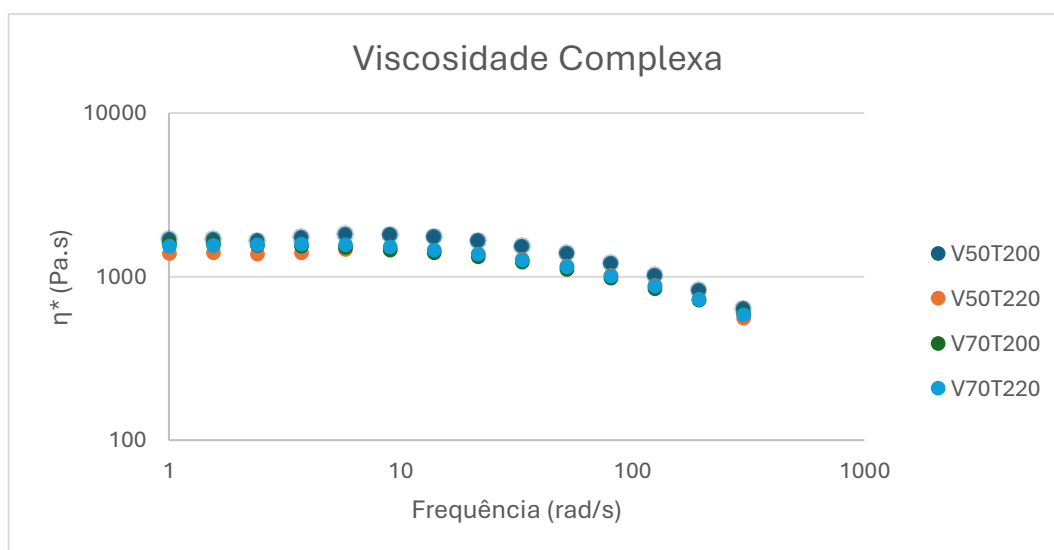


Figura 20- Viscosidade complexa para os diferentes parâmetros de impressão. Fonte: Autor (2025)

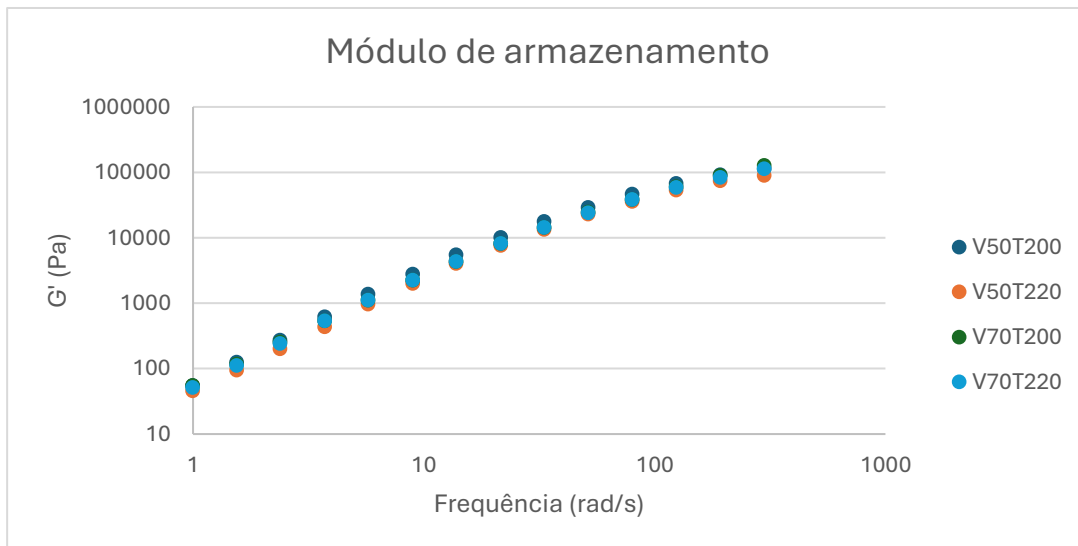


Figura 22 - Módulo de armazenamento para os diferentes parâmetros de impressão. Fonte: Autor (2025)

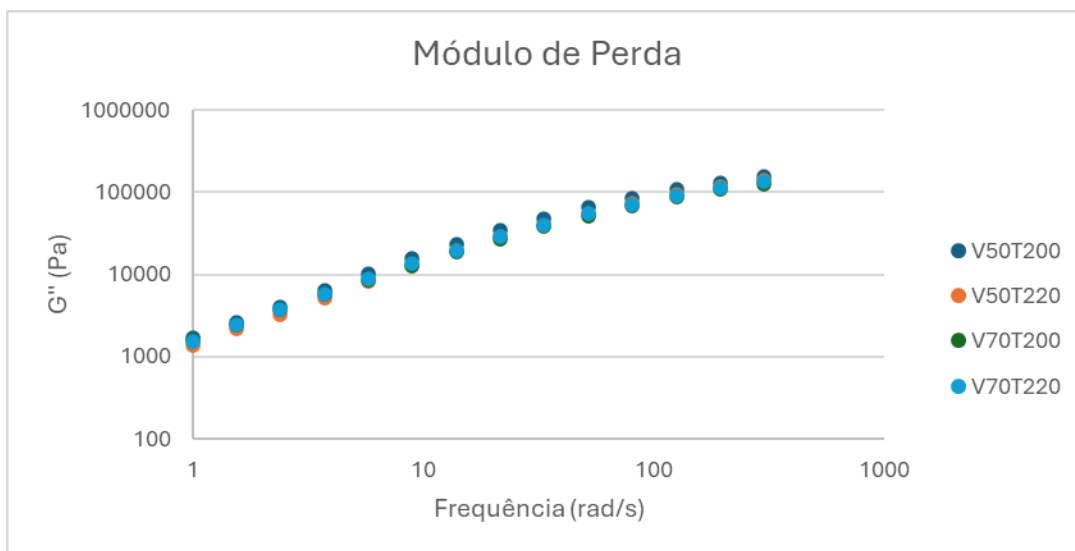


Figura 21- Módulo de perda para diferentes parâmetros de impressão. Fonte: Autor (2025)

5.4.1. Efeito da velocidade

A análise dos resultados demonstra que a velocidade de impressão (50 e 70 mm/s) não produziu alterações significativas na resposta viscoelástica do PLA, o que é confirmado pela observação das curvas de viscosidade complexa e dos módulos G' e G'' . As curvas apresentaram perfis semelhantes, com sobreposição quase completa entre as diferentes condições estudadas, sem indicar tendência sistemática associada ao aumento da velocidade.

De forma coerente com esses resultados, os valores de viscosidade em cisalhamento zero (η_0) também não apresentaram variações consistentes entre 50 e 70 mm/s, sugerindo que a densidade de entrelaçamentos e a mobilidade segmentar da matriz polimérica não foram significativamente afetadas pelo parâmetro de impressão. Esses achados são compatíveis com estudos que mostram que o PLA apresenta estabilidade reológica relativamente robusta frente a variações moderadas de parâmetros de deposição, desde que a temperatura de impressão esteja dentro da faixa adequada (CHACÓN et al., 2017; RAJAN et al., 2022).

Entre as amostras nas quais foi possível determinar o ponto de crossover ($G' = G''$), também não foi observada uma tendência clara de variação da frequência ou do módulo associado ao crossover com o aumento da velocidade. Em alguns casos, os valores obtidos para amostras impressas a 70 mm/s foram inclusive iguais ou ligeiramente superiores aos de 50 mm/s, o que reforça que as diferenças identificadas são mais atribuídas a variações estruturais intrínsecas da manufatura aditiva do que ao parâmetro velocidade propriamente dito.

Os ensaios confirmam que a velocidade de impressão não impacta significativamente as propriedades reológicas do PLA, tanto no que se refere à viscosidade complexa quanto ao comportamento elástico e viscoso dinâmico. Esses resultados reforçam que, nas condições analisadas, o PLA apresenta comportamento reológico estável frente a variações moderadas de velocidade.

5.4.2. Efeito do recozimento

Para investigar a influência do recozimento sobre o comportamento reológico do material, foram analisadas as curvas de viscosidade complexa (η^*), dos módulos de armazenamento (G') e de perda (G''), bem como o fator de amortecimento ($\tan \delta$). Esses resultados são apresentados nas Figuras 23 a 30, os demais resultados encontram-se no apêndice.

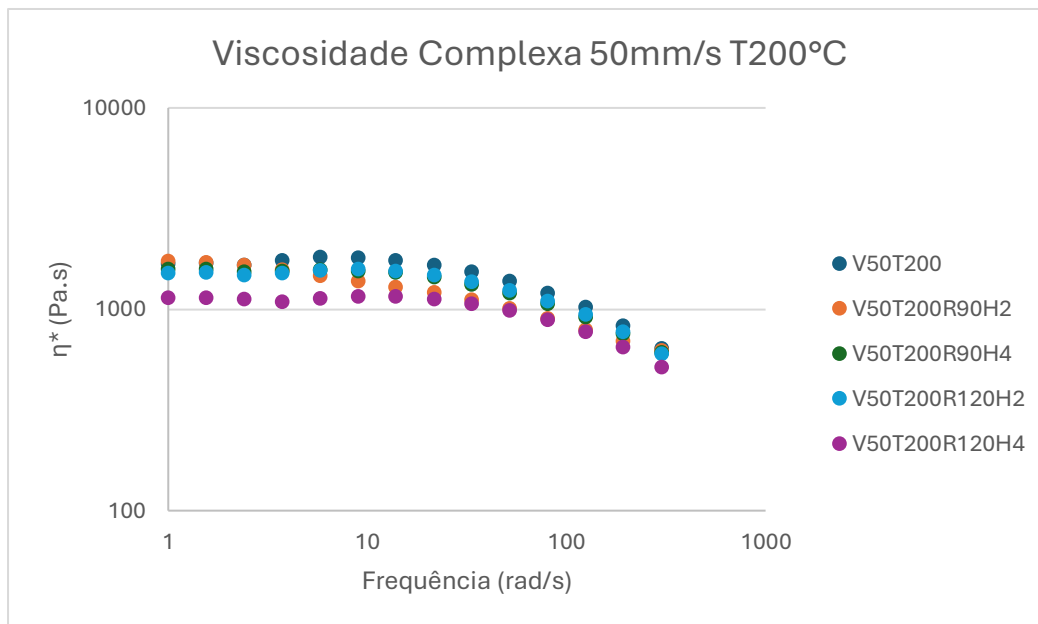


Figura 23 - Viscosidade complexa das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

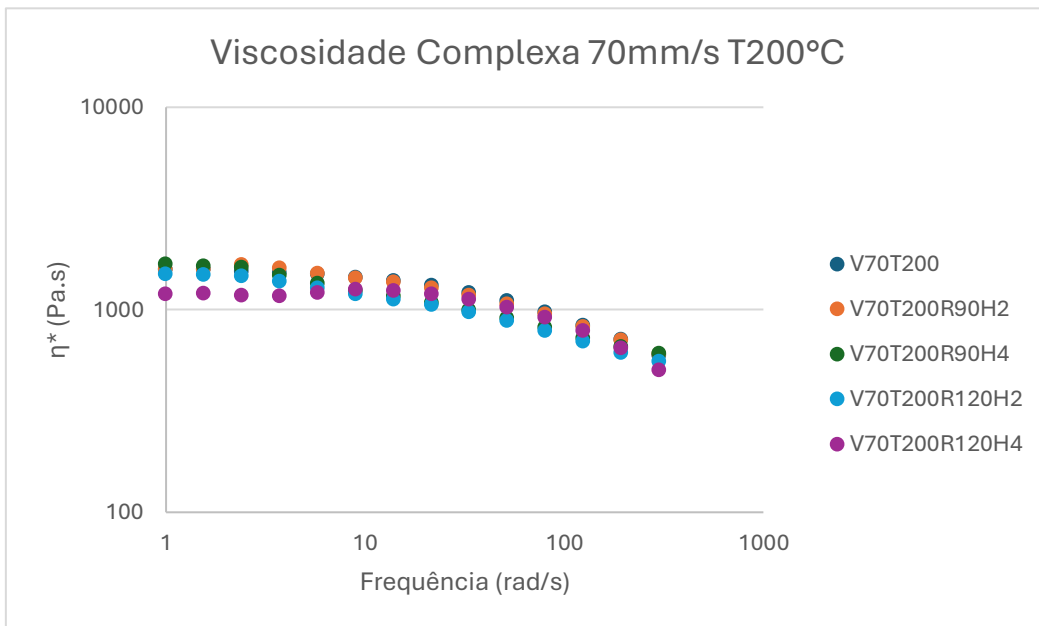


Figura 24- Viscosidade complexa das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

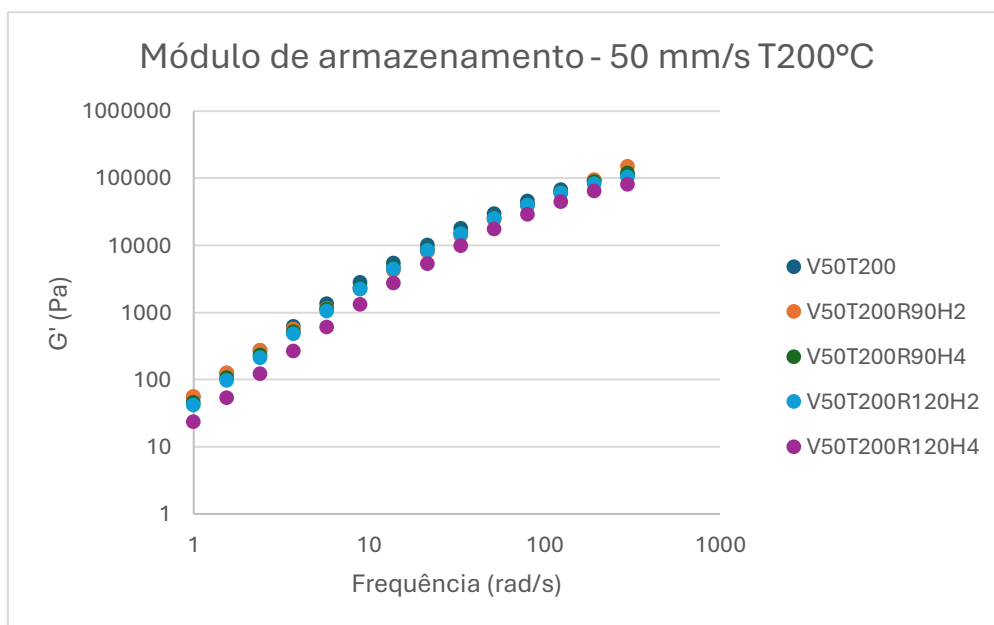


Figura 25- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

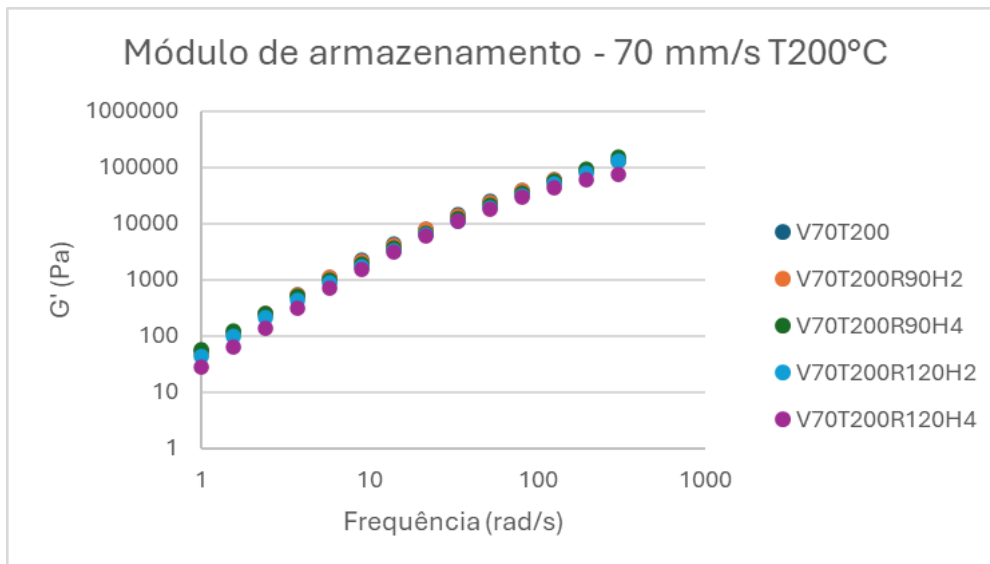


Figura 27- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

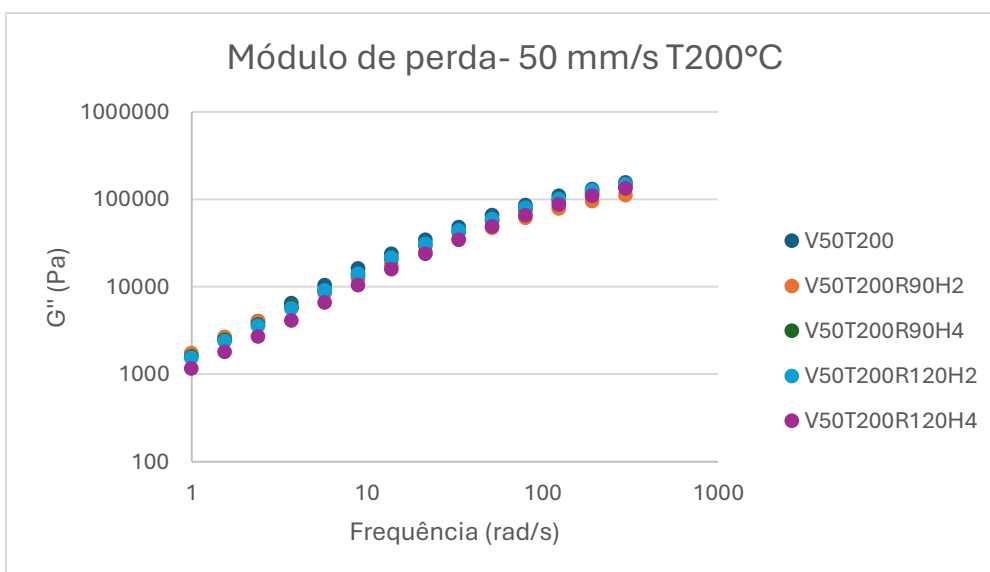


Figura 26- Módulo de perda das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

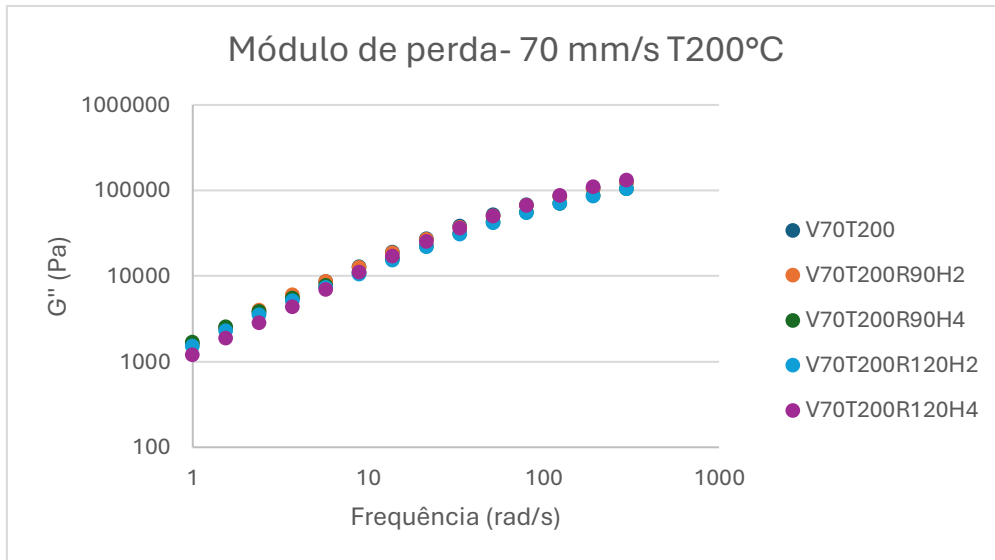


Figura 29- Módulo de perda das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

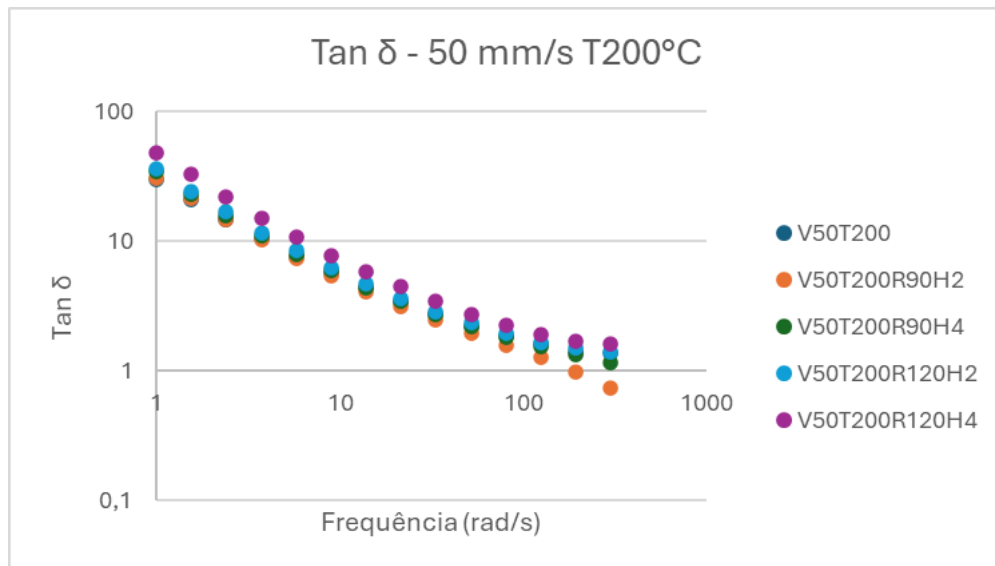


Figura 28- Tangente de delta das amostras impressas a 50 mm/s T200°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)

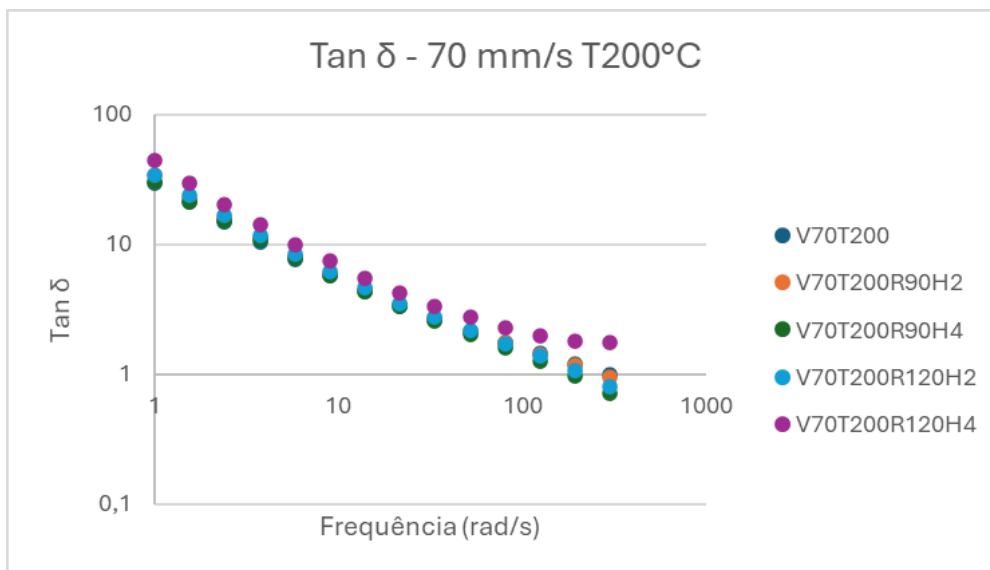


Figura 30- Tangente de delta das amostras impressas a 70 mm/s T200°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)

Os resultados referentes à viscosidade complexa evidenciam que todas as condições apresentam o mesmo comportamento característico de polímeros lineares sob deformação oscilatória de pequenas amplitudes, com diminuição gradual de η^* à medida que a frequência aumenta. Apesar dessa similaridade global, observa-se uma tendência clara relacionada ao recozimento: as amostras submetidas aos tratamentos mais intensos (principalmente R120H4 e R120H2) apresentam valores de η^* ligeiramente inferiores aos das amostras sem recozimento, enquanto as condições intermediárias (R90H2 e R90H4) mostram comportamento entre esses extremos. Essa mesma tendência é confirmada pelos valores de viscosidade em cisalhamento zero (η_0), indicando que tempo e temperatura de recozimento contribuem para a redução da viscosidade do fundido. Tais efeitos estão associados à relaxação de tensões residuais, à redução da orientação molecular e à diminuição da densidade de entrelaçamentos efetivos, fenômenos que podem ocorrer em temperaturas próximas à transição vítrea (GARLOTTA, 2001; FARAH S. 2016; RANAKOTI, et al. 2022).

No que se refere ao módulo de armazenamento (G'), verifica-se que o recozimento não resulta em aumento da rigidez do fundido, como poderia ocorrer no estado sólido, mas sim em pequenas reduções em praticamente toda a faixa

de frequência nas amostras tratadas a 120 °C. Esse comportamento decorre do fato de que o ensaio SAOS é realizado no estado fundido, no qual não há contribuição da fase cristalina. Dessa forma, G' depende essencialmente da rede de entrelaçamentos, que pode ser suavizada após a relaxação térmica prolongada. Assim, a redução observada em G' é compatível com alterações estruturais leves provocadas pelo recozimento, refletindo mudanças na mobilidade cooperativa das cadeias poliméricas no fundido.

O módulo de perda (G'') acompanha o mesmo comportamento de G' , apresentando reduções discretas após o recozimento, especialmente nas condições de maior severidade (R120H4 e R120H2). Como G'' está relacionado à dissipação viscosa, sua diminuição indica redução da capacidade de relaxação segmentar, coerente com a reorganização molecular e a diminuição de entrelaçamentos promovidos pelo tratamento térmico. A consistência entre as tendências de G' , G'' e η^* reforça a interpretação de que o recozimento afeta predominantemente a estrutura do fundido por meio da diminuição de tensões internas e do rearranjo da rede física de entrelaçamentos.

A análise do fator de amortecimento ($\tan \delta$) indica que algumas amostras recozidas apresentam reduções pontuais nos valores de $\tan \delta$ quando comparadas às amostras não tratadas. Essas reduções ocorrem apenas em faixas específicas de frequência, não se configurando como um comportamento uniforme ou sistemático ao longo de toda a região analisada. Dessa forma, o recozimento provoca apenas ajustes sutis e localizados no balanço entre as componentes elástica e viscosa do fundido, sem modificar de maneira significativa a natureza global da resposta viscoelástica do material.

Em relação ao ponto de crossover entre G' e G'' ($G' = G''$), observa-se que várias amostras apresentam a indicação “No crossover found”, ou seja, o cruzamento não foi registrado dentro da janela experimental. A ausência desse ponto indica que o material permaneceu predominantemente elástico ou predominantemente viscoso em toda a faixa de frequências ensaiada, resultado que também pode estar associado à presença de heterogeneidades estruturais geradas pela impressão FDM, como poros, falhas interlaminares e diferenças de orientação. Esse comportamento já foi relatado para amostras de PLA impressas

por manufatura aditiva em estudos como os de Wang et al., 2017 e TORRADO PÉREZ e ROBERSON, 2016.

Os resultados demonstram que o recozimento modifica o comportamento reológico do PLA no estado fundido de maneira moderada, sem alterar a natureza da resposta viscoelástica, mas produzindo alterações coerentes e sistemáticas. Observa-se diminuição da viscosidade complexa, da viscosidade em cisalhamento zero, dos módulos dinâmicos G' e G'' e, de forma menos pronunciada, do fator de amortecimento. Essas mudanças estão associadas a processos de relaxação de tensões internas, redução da orientação e reorganização da rede de entrelaçamentos, efeitos que se tornam mais evidentes com o aumento do tempo e da temperatura de recozimento.

6. Conclusão

Este trabalho avaliou a influência da velocidade e da temperatura de impressão, bem como das condições de recozimento, nas propriedades mecânicas, morfológicas, dimensionais e reológicas do PLA produzido por FDM. Os resultados demonstraram que cada um desses fatores atua de forma distinta e, em muitos casos, interdependente, permitindo modular o desempenho final do material conforme a aplicação desejada.

A velocidade de impressão se mostrou um parâmetro relevante principalmente para as propriedades mecânicas. As amostras produzidas a 50 mm/s apresentaram maior ductilidade e integridade interlaminar, evidenciadas por tensões máximas superiores e superfícies de fratura menos segmentadas. Em contrapartida, a velocidade de 70 mm/s resultou em maior fragmentação das fraturas, coerente com uma menor coesão entre filamentos. No entanto, sua influência nos ensaios reológicos foi mínima, indicando que a velocidade afeta majoritariamente a adesão entre camadas, e não a microestrutura intrínseca do material.

A temperatura de impressão, por sua vez, apresentou efeitos sistemáticos, embora menos pronunciados que os de velocidade e recozimento. A elevação da temperatura de extrusão de 200 °C para 220 °C favoreceu o escoamento e a fusão entre filamentos, refletindo-se em alterações pontuais nos módulos mecânicos e na homogeneidade estrutural, efeitos compatíveis com maior difusão térmica durante a deposição.

O recozimento foi, de todos os fatores investigados, o que causou as alterações mais significativas. Tratamentos a 90 °C preservaram a estabilidade geométrica das amostras e promoveram uma reorganização estrutural moderada associada ao aumento de rigidez sem comprometer drasticamente a ductilidade. Por outro lado, as condições mais severas — especialmente 120 °C por 4 horas — resultaram em expressivo aumento do módulo de elasticidade, redução da deformação na ruptura e maior reorganização estrutural induzida pelo tratamento térmico, evidenciada pela contração dimensional e pela perda de definição entre rasters observadas nas análises morfológicas. Os resultados de SAOS confirmam esse comportamento, evidenciando queda da viscosidade complexa e dos módulos dinâmicos conforme o tratamento térmico intensifica a reorganização molecular.

Em termos comparativos, o recozimento a 90 °C, especialmente na condição de 2 horas, apresentou o melhor compromisso entre aumento de rigidez, preservação da ductilidade e estabilidade dimensional. Essa condição permitiu melhorias mecânicas moderadas sem os efeitos deletérios observados em tratamentos mais intensos, configurando-se como a alternativa mais equilibrada para aplicações funcionais do PLA impresso por FDM.

Com base no conjunto dos resultados, pode-se concluir que a combinação de velocidade de impressão de 50 mm/s, temperatura de impressão de 200 °C e recozimento a 90 °C por 2 horas representa a condição mais adequada dentre as avaliadas neste estudo, por proporcionar um desempenho mecânico equilibrado aliado à estabilidade geométrica do material.

De forma geral, os resultados mostram que a combinação entre os parâmetros de impressão e as condições de recozimento permite ajustar

finamente o balanço entre rigidez, ductilidade e estabilidade dimensional. Velocidades menores favorecem melhor adesão interlaminar; temperaturas mais altas podem contribuir para maior homogeneidade estrutural; e o recozimento direciona a microestrutura para estados mais cristalinos e rígidos, com inevitável redução da capacidade de deformação. Assim, o PLA impresso por FDM pode ser customizado para aplicações que demandam maior resistência estrutural, estabilidade térmica ou comportamento viscoelástico específico.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de análises térmicas por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), com o objetivo de quantificar o grau de cristalinidade do PLA nas diferentes condições de impressão e recozimento, permitindo uma correlação direta entre microestrutura e propriedades mecânicas. Ensaio de Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) também poderiam fornecer informações adicionais sobre o comportamento viscoelástico do material em função da temperatura e da frequência.

Além disso, investigações envolvendo outras condições de recozimento, com variação mais refinada de temperatura e tempo, bem como a avaliação de ciclos térmicos distintos, podem contribuir para a identificação de parâmetros ainda mais otimizados. Estudos sobre resistência ao impacto, fadiga e envelhecimento térmico também são recomendados para ampliar a compreensão do desempenho do PLA impresso por FDM em aplicações de longo prazo.

7. Referências Bibliográficas

- AHN, S. H. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018. *Manufatura aditiva — Princípios gerais — Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D638-22. *Standard test method for tensile properties of plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D790-17. *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- BEAMAN, J. J. *Solid freeform fabrication: a new direction in manufacturing*. London: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- BOGART, M. *In art the ends don't always justify means*. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1979.
- CADETE, M. G. Influence of 3D-printing deposition parameters on crystallinity and morphing properties of PLA-based materials. *Progress in Additive Manufacturing*, [s. l.], v. 10, p. 127–137, 2025.
- CANEVAROLO, S. V. *Ciência dos polímeros*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- CHACÓN, J. M. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, [s. l.], v. 124, p. 143–157, 2017.
- DE ALBUQUERQUE, T. L. M. J. Polylactic acid production from biotechnological routes: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, [s. l.], 2021.
- CASTRO-AGUIRRE, E. et al. Poly(lactic acid): mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, [s. l.], v. 107, p. 333–366, 2016.
- FARAH, S.; DOS SANTOS, D. G. Physical and mechanical properties of PLA and their functions in biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, [s. l.], 2016.
- FRUNZAVARDE, D. et al. The influence of the printing temperature and the filament color on the dimensional accuracy, tensile strength, and friction performance of FFF-printed PLA specimens. *Polymers*, [s. l.], v. 14, p. 1978, 2022.
- GARLOTTA, D. A literature review of poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, [s. l.], v. 9, p. 63–84, 2001.

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

HAMAD, K. Rheology and morphology study of immiscible linear low-density polyethylene/poly(lactic acid) blends. *Advances in Chemical Engineering and Science*, [s. l.], 2017.

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

JAYANTH, N. et al. Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, [s. l.], 2021.

KARTAL, F.; KAPTAN, A. Effects of annealing temperature and duration on mechanical properties of PLA plastics produced by 3D printing. *European Mechanical Science*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 152–159, 2023.

KULKARNI, S.; GANESAN, S. Effect of heat treatment on the properties of 3D-printed PLA. *Journal of Materials Research*, [s. l.], v. 35, p. 110–122, 2020.

LAYEB, N. B. Improving the strength properties of PLA acetabular liners by optimizing FDM 3D printing: Taguchi approach and finite element analysis validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s. l.], 2025.

LIAO, Y. et al. Effect of porosity and crystallinity on 3D printed PLA properties. *Polymers*, [s. l.], v. 11, p. 1487, 2019.

LIPAROTI, S. et al. Fused filament deposition of PLA: the role of interlayer adhesion in the mechanical performances. *Polymers*, [s. l.], v. 13, p. 399, 2021.

MAIA, F. D. 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) — Universidade Federal do Ceará, Russas, 2025.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advanced Manufacturing*, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 42–53, 2015.

NETTO, J. M. J. Caracterização de filamentos de PLA usados em impressão 3D por extrusão. *Plásticos Industriais*, [s. l.], 2023.

PEREIRA, R. et al. Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, [s. l.], v. 24, p. 198–202, 2014.

PRETULA, J. et al. Polylactides: methods of synthesis and characterization. *Advanced Drug Delivery Reviews*, [s. l.], 2016.

- RAJAN, K. et al. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s. l.], v. 120, p. 1531–1570, 2022.
- RANAKOTI, L. et al. Critical review on polylactic acid: properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. *Materials*, [s. l.], 2022.
- RASAL, R. M.; JANORKAR, A. V.; HIRT, D. E. Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 338–356, 2010.
- SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.
- SUNIYA, N. K.; VERMA, A. K. A review on optimization of process parameters of fused deposition modeling. *Research on Engineering Structures & Materials*, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 631–659, 2023. Disponível em: <http://www.jresm.org/archive/resm2022.520ma0909.html>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- TOFAIL, S. A. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018.
- TORRADO PÉREZ, A.; ROBERSON, D. A. Effects of thermal annealing on the mechanical properties of 3D-printed polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, [s. l.], v. 133, p. 43706, 2016.
- VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2016.
- VON WINDHEIM, N. et al. The influence of porosity, crystallinity and interlayer adhesion on the tensile strength of 3D printed polylactic acid (PLA). *Rapid Prototyping Journal*, [s. l.], v. 27, n. 7, p. 1327–1336, 2021.
- WANG, L. et al. Crystallization behavior of PLA under thermal treatment. *Polymer Testing*, [s. l.], v. 60, p. 79–85, 2017.
- WICKRAMASINGHE, S.; DO, T.; TRAN, P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: a review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, [s. l.], 2020.
- XU, Z.; FOSTERVOLD, R.; RAZAVI, S. M. Thickness effect on the mechanical behavior of PLA specimens fabricated via fused deposition modeling. *Procedia Structural Integrity*, [s. l.], 2021.
- YANG, C. et al. Effect of printing parameters on interlayer adhesion strength of PLA in FDM. *Materials & Design*, [s. l.], v. 160, p. 108–118, 2018.
- YU, L.; DEAN, K.; LI, L. Polymer blends and composites from PLA. *Progress in Polymer Science*, [s. l.], v. 33, p. 116–134, 2019.

APÊNDICE

Curvas de tração provenientes do ensaio de tração de acordo com os respectivos parâmetros de velocidade e temperatura de impressão:

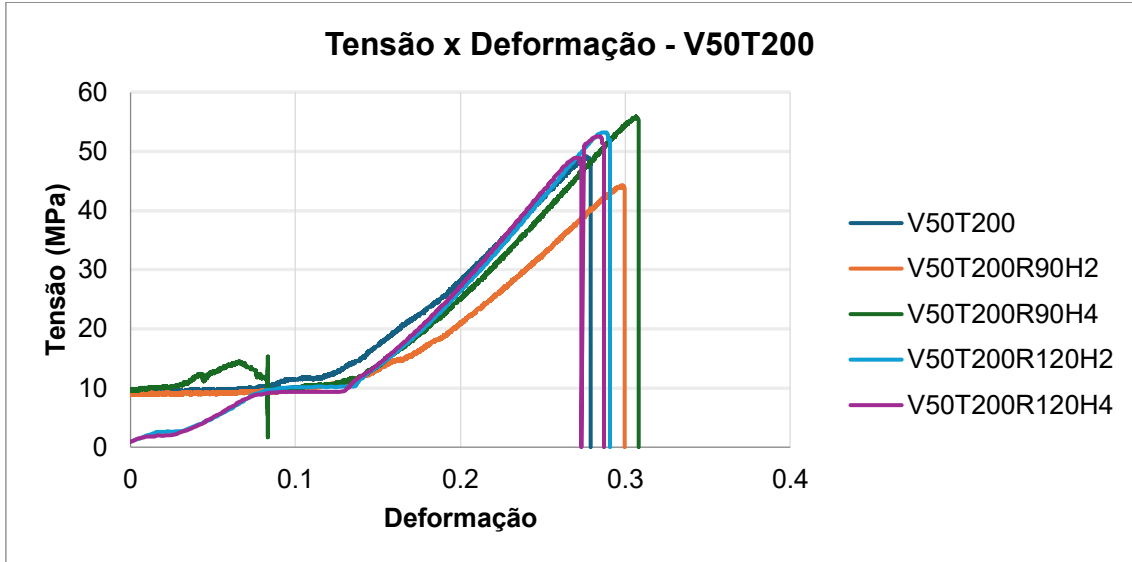


Figura 31- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V50T200). Fonte: Autor (2025)

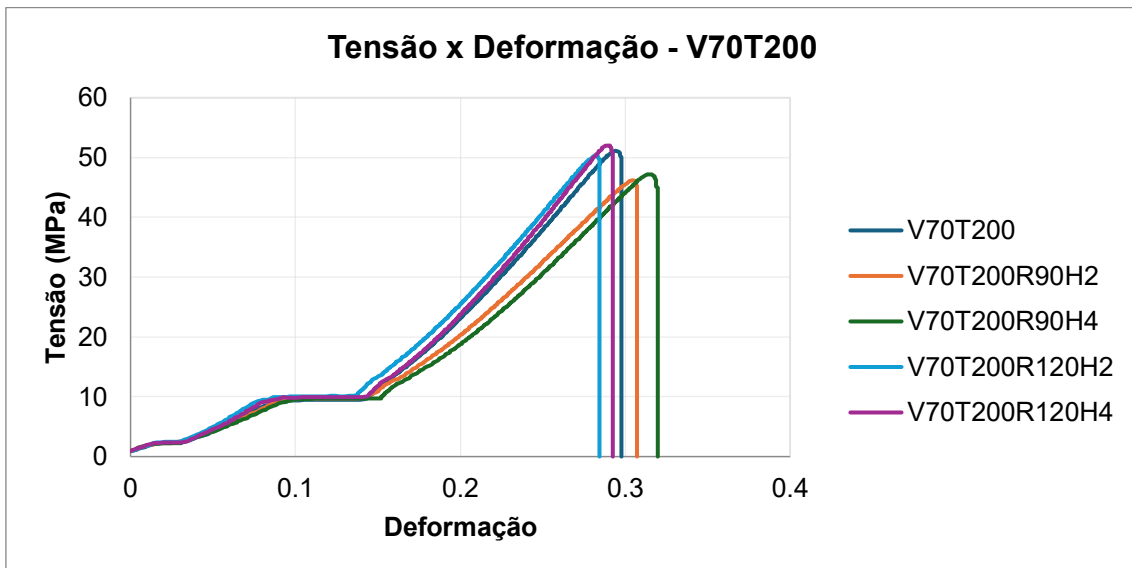


Figura 32- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V70T200). Fonte: Autor (2025)

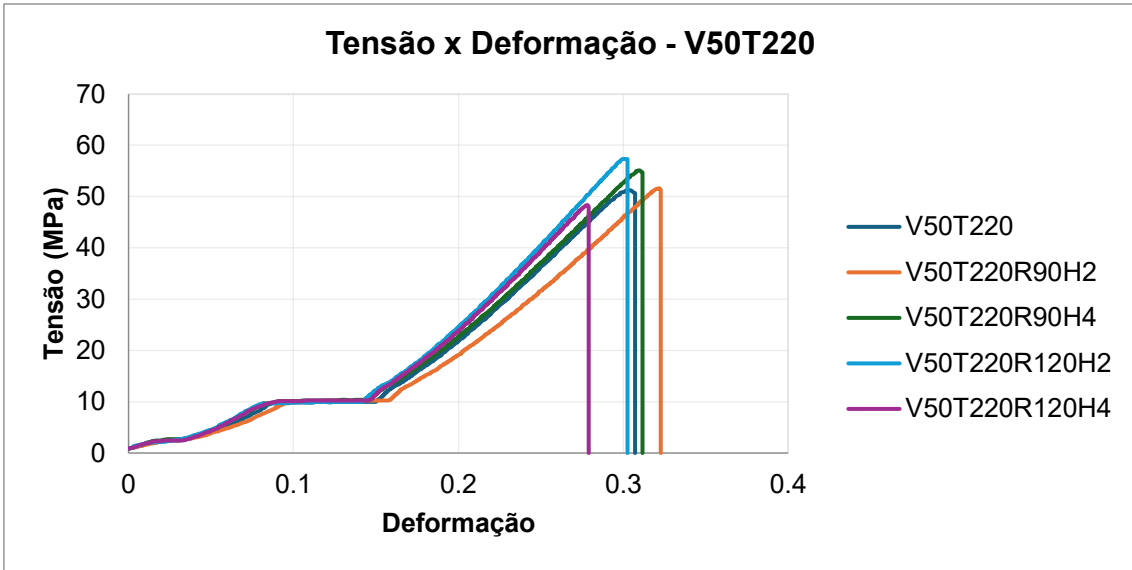


Figura 33- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V50T220). Fonte: Autor (2025)

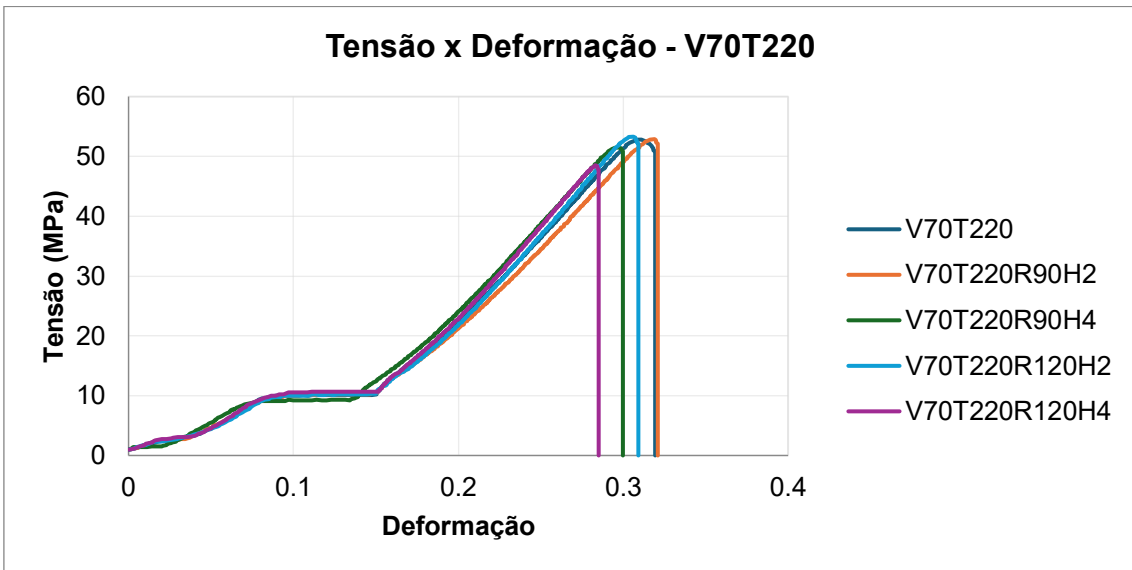


Figura 34- Curvas de tensão x deformação para cada condição de recozimento (V70T220) . Fonte: Autor (2025)

Resultados do ensaio SAOS complementares aos já apresentados no corpo de texto:

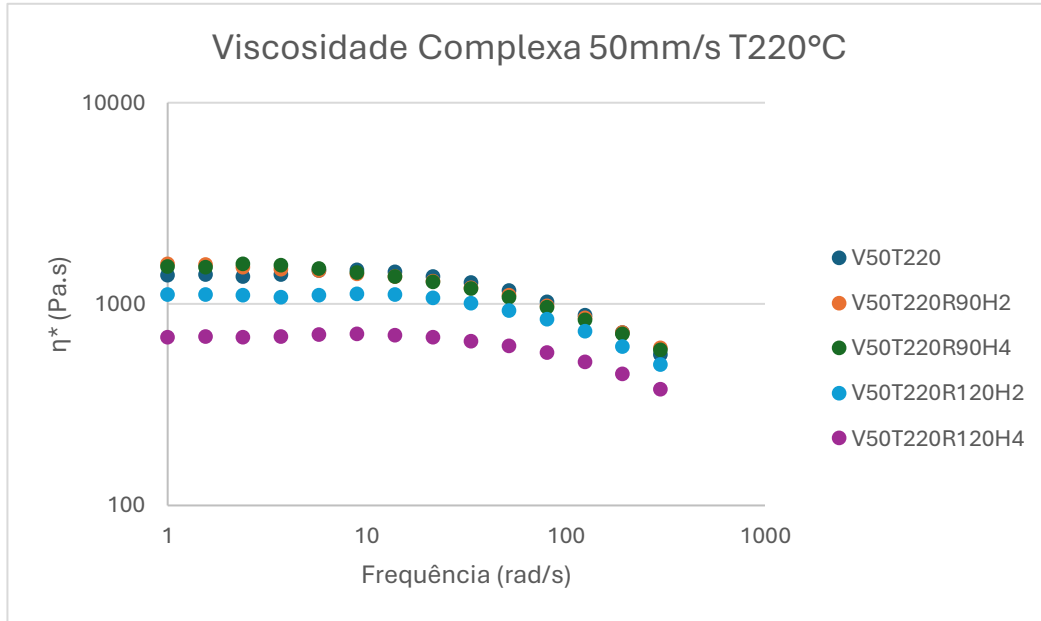


Figura 35- Viscosidade complexa das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

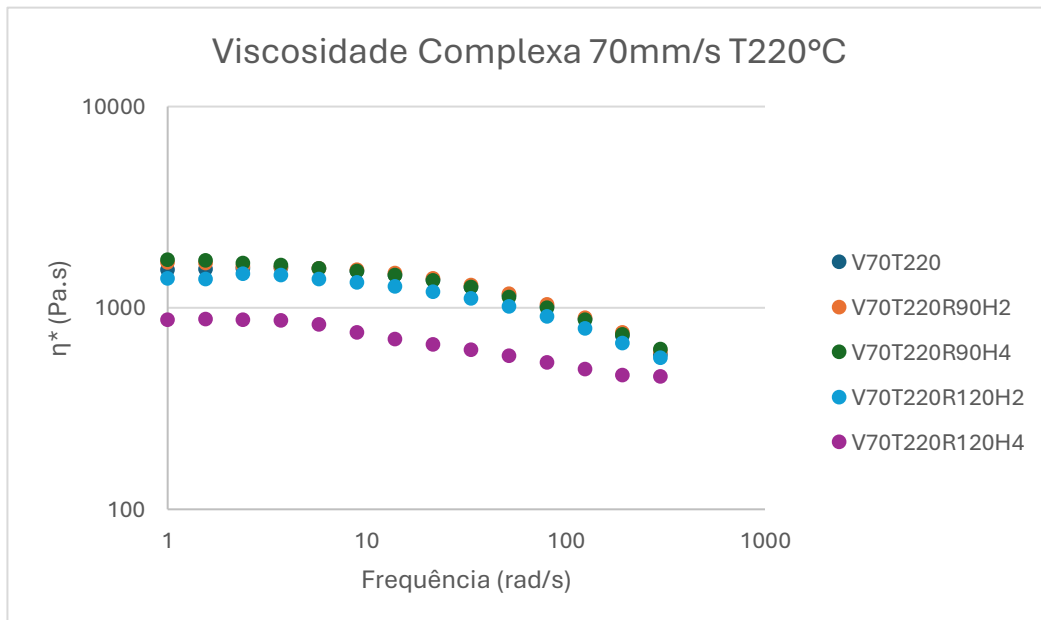


Figura 36- Viscosidade complexa das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

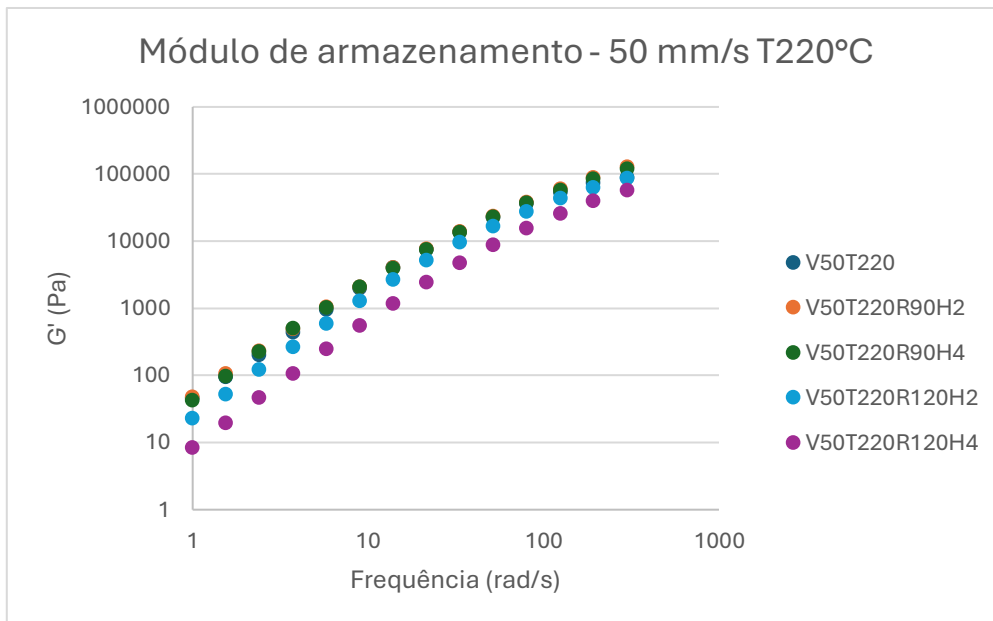


Figura 38- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

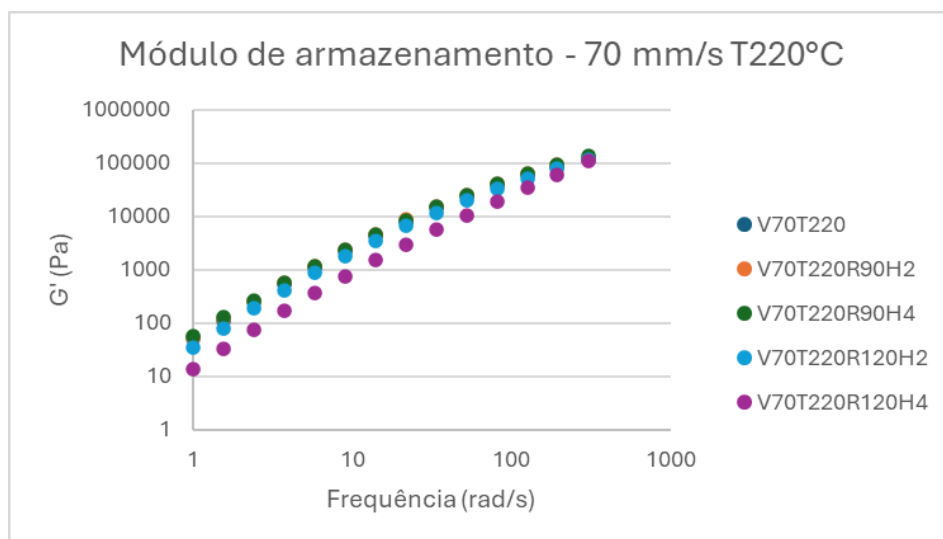


Figura 37- Módulo de armazenamento das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

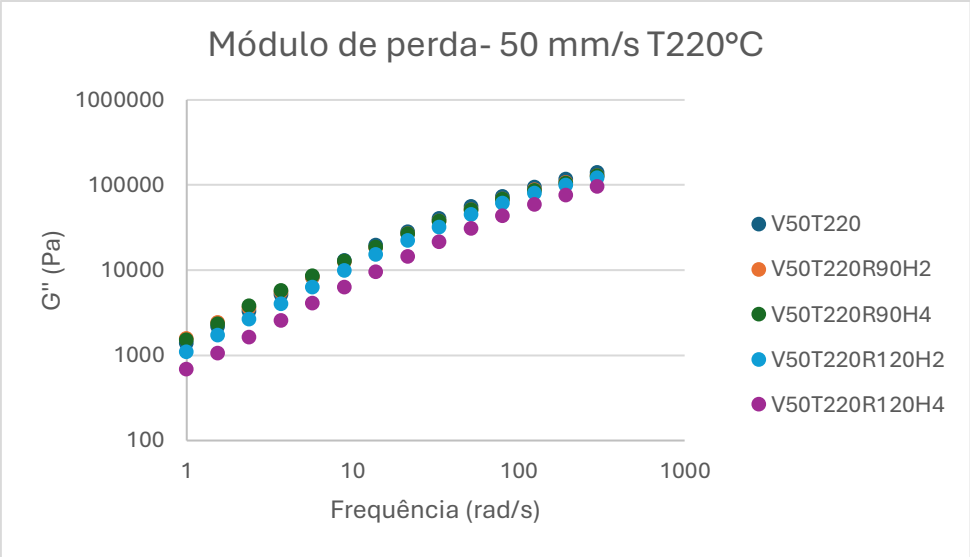


Figura 40- Módulo de perda das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

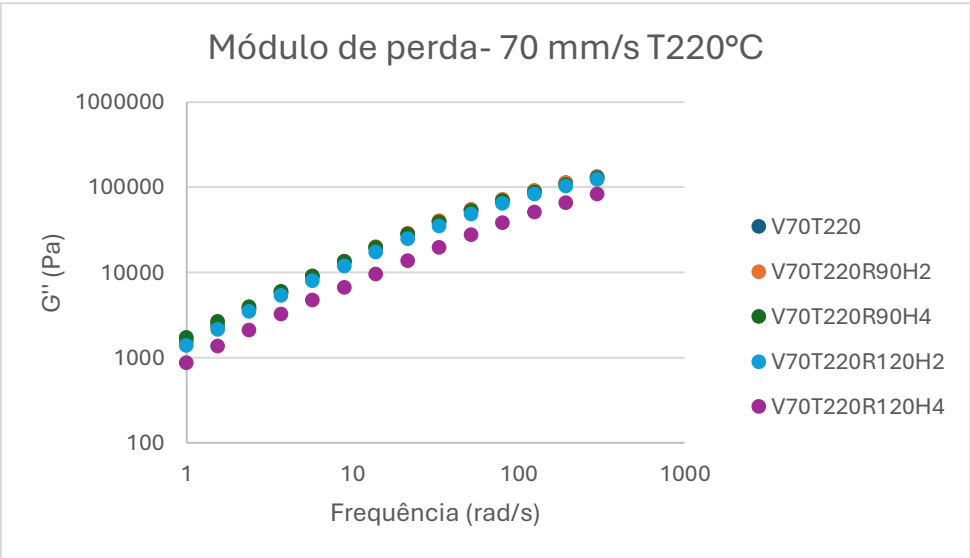


Figura 39- Módulo de perda das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições de recozimento. Fonte: Autor (2025)

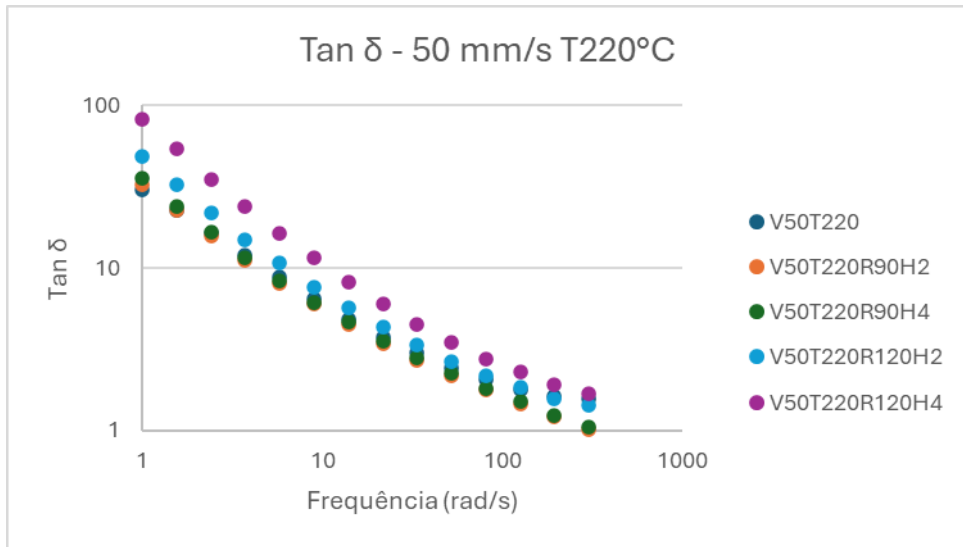


Figura 41- Tangente de delta das amostras impressas a 50 mm/s T220°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)

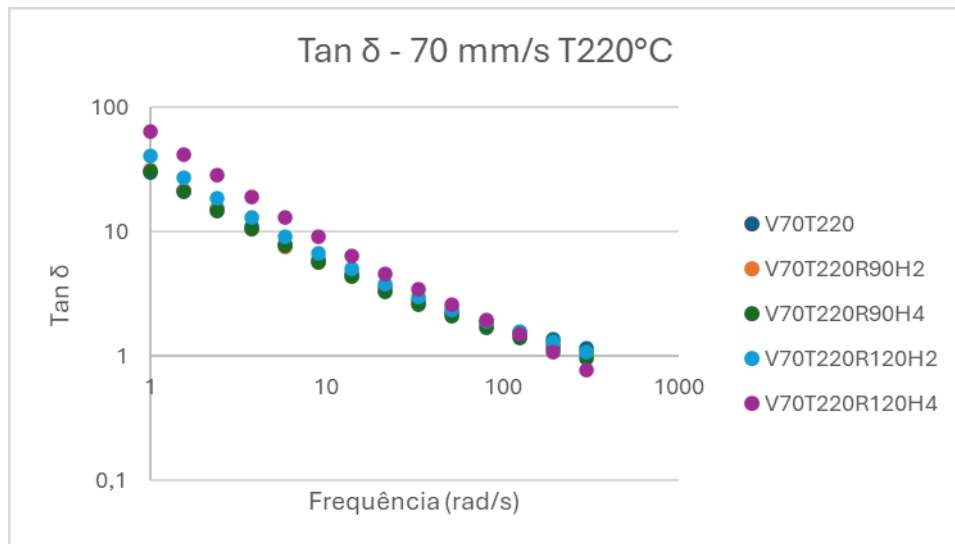


Figura 42- Tangente de delta das amostras impressas a 70 mm/s T220°C em diferentes condições. Fonte: Autor (2025)