

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MILENA YUKIMI IASUNAGA

**Influência da velocidade de impressão, temperatura de bico e do recozimento
nas propriedades de peças de PLA obtidas pelo processo FDM**

São Paulo

2025

MILENA YUKIMI IASUNAGA

**Influência da velocidade de impressão, temperatura de bico e do recozimento
nas propriedades de peças de PLA obtidas pelo processo FDM**

Versão Original

Trabalho final do curso de Engenharia de
Materiais, da Escola de Politécnica da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheira de Materiais

Orientador: Prof. 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

Catlogação-na-publicação

lasunaga, Milena

Influência da velocidade de impressão, temperatura de bico e do recozimento nas propriedades de peças de PLA obtidas pelo processo FDM / M. lasunaga -- São Paulo, 2025.

79 p.

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

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

DEDICATÓRIA

Dedico meu TCC à minha família, especialmente a meus pais e irmãos, e a todos que me acompanharam e contribuíram na minha jornada até aqui.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso só foi possível graças ao apoio, incentivo e compreensão de muitas pessoas ao longo dessa jornada.

Agradeço primeiramente à minha família, pela compreensão, paciência e suporte em todos os momentos. Aos meus pais, por me fornecerem as bases necessárias para que eu pudesse chegar até aqui. Aos meus irmãos, por me fornecerem apoio nas horas mais cruciais.

Ao meu companheiro, Gabriel Akio Mori dos Santos pelo apoio e auxílio, não apenas tecnicamente, além da grande motivação que me moveu adiante.

Expresso minha gratidão à minha orientadora, Professora Patrícia Schmid Calvão, pela disponibilidade e pelos ensinamentos compartilhados durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores Hélio Wiebeck e Flávia Letícia Freitas por aceitarem fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

Agradeço a todos os funcionários do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, em especial a Lívio, Wilson, Rubens, Regina, Joana e Alice, que tornaram a jornada mais leve e fácil.

Aos colegas e amigos que, de alguma forma, contribuíram com ideias, discussões, e apoio nos momentos mais desafiadores

Estendo meus agradecimentos à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e aos professores e técnicos de laboratório do curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, por toda a formação sólida e inspiradora que recebi ao longo desses anos.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória. Cada gesto de apoio e incentivo foi fundamental para que este trabalho se tornasse realidade.

RESUMO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação baseado na deposição sucessiva de camadas a partir de modelos digitais. Entre suas técnicas, destaca-se a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), amplamente utilizada devido ao seu baixo custo e facilidade de uso. O políácido láctico (PLA) surge como bom candidato à utilização, uma vez que é biodegradável, além de possuir características ideais para a aplicação na técnica em questão. No entanto, peças produzidas por FDM apresentam propriedades mecânicas inferiores às obtidas por métodos convencionais, especialmente devido à má adesão entre camadas e tensões internas resultantes do resfriamento rápido. Nesse contexto, o recozimento surge como uma estratégia de pós-processamento para aumentar a cristalinidade do PLA e, conseqüentemente, melhorar suas propriedades mecânicas e estabilidade térmica. Este trabalho buscou investigar a influência da velocidade de impressão (50 e 70 mm/s), temperatura de bico (200 e 220°C), secagem pré-recozimento e de diferentes condições de recozimento (tempo e temperatura) nas propriedades mecânicas e reológicas de corpos de prova de PLA obtidos por FDM, além de uma avaliação qualitativa da superfície de fratura. O estudo observou que a velocidade não teve grande influência em nenhuma das 3 propriedades mecânicas analisadas. A variação da temperatura de bico teve influência estatística nas 3 propriedades, mais significativamente na tensão máxima, sendo ela menor para temperaturas mais baixas. A secagem influenciou apenas no alongamento máximo. O recozimento impactou na tensão máxima e alongamento, sendo a temperatura o fator mais influente sobre os resultados. Para as propriedades reológicas, a variação de velocidade não apresentou influência, enquanto a de temperatura de bico influenciou fortemente. A secagem possibilitou analisar a ocorrência de hidrólise das cadeias devido ao grande impacto na viscosidade, sendo maior para amostras secas. O recozimento também se apresentou influente sobre as propriedades reológicas, devido ao impacto na estabilidade molecular das cadeias. As análises fratógráficas corroboram com as observações realizadas anteriormente.

Palavras-chave: FDM. PLA. Parâmetros de impressão. Recozimento. Superfície de fratura.

ABSTRACT

Additive manufacturing, also known as 3D printing, is a fabrication process based on the successive deposition of layers from digital models. Among its techniques, Fused Deposition Modeling (FDM) stands out due to its low cost and ease of use. Polylactic acid (PLA) emerges as a suitable candidate for this application, as it is biodegradable and presents ideal characteristics for use in FDM. However, parts produced by FDM typically exhibit inferior mechanical properties compared to those obtained through conventional methods, mainly due to poor interlayer adhesion and internal stresses caused by rapid cooling. In this context, annealing appears as a post-processing strategy to increase the crystallinity of PLA, thereby improving its mechanical properties and thermal stability. This work aimed to investigate the influence of printing speed (50 and 70 mm/s), nozzle temperature (200°C and 220°C), pre-annealing drying, and different annealing conditions (time and temperature) on the mechanical and rheological properties of PLA specimens produced by FDM, using ANOVA analyses, as well as a qualitative evaluation of fracture surfaces. The study observed that printing speed did not have a significant influence on any of the three mechanical properties analyzed. The variation in nozzle temperature had a statistical influence on all three properties, most notably on the maximum stress, which was lower at lower temperatures. Drying affected only the maximum elongation. Annealing influenced both the maximum stress and elongation, with temperature being the most influential factor overall. For the rheological properties, the variation in printing speed showed no influence, while the nozzle temperature had a strong effect. Drying allowed the analysis of chain hydrolysis, as evidenced by its significant impact on viscosity, which was higher for dried samples. Annealing also proved to be influential on the rheological properties due to its effect on the molecular stability of the chains. Fractographic analyses corroborated the observations made previously.

Palavras-chave: FDM. PLA. Printing parameters. Annealing. Fracture surface.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as propriedades mecânicas do PLA (96% de pureza) com outros termoplásticos	29
Tabela 2: Parâmetros de impressão.....	39
Tabela 3: Diferentes parâmetros de impressão e recozimento utilizados, e a codificação das amostras.....	40
Tabela 4: Variação dimensional da seção transversal das amostras	47
Tabela 5: Resultados dos ensaios de tração	48
Tabela 6: Resultados ANOVA para análise da influência da velocidade de impressão a 220°C	50
Tabela 7: Resultados ANOVA para análise da influência da temperatura de bico a 70 mm/s	51
Tabela 8: Resultados ANOVA para análise da influência da secagem em amostras impressas a 70 mm/s, temperatura de bico 200° e recozimento de 4 horas a 120°C	52
Tabela 9: Resultados ANOVA para análise da influência do recozimento a 50 mm/s e temperatura de bico 220°C	53
Tabela 10: Resultados ANOVA para análise da influência do recozimento a 70 mm/s e temperatura de bico 220°C	53
Tabela 11: Resultados ANOVA para análise da influência do tempo e temperatura de recozimento a 50 mm/s e temperatura de bico 220°C.....	54
Tabela 12: Resultados ANOVA para análise da influência do tempo e temperatura de recozimento a 70 mm/s e temperatura de bico 220°C.....	54
Tabela 13: Resultados de algumas propriedades reológicas no ensaio SAOS.....	57
Tabela 14: Estereoscopia das superfícies de fratura das amostras impressas a 220°C em diferentes velocidades e condições de recozimento	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de fabricação por Manufatura Aditiva	18
Figura 2: Comparação de custo de produção por peça baseado na sua complexidade de diferentes métodos de manufatura	19
Figura 3: Comparação de custo dos diferentes métodos de fabricação	20
Figura 4: Exemplo de utilização da tecnologia de AM na medicina	21
Figura 5: Esquema geral do modo de funcionamento de uma máquina FDM.....	23
Figura 6: Importantes parâmetros do processo FDM	24
Figura 7: Altura de camada.....	24
Figura 8: Orientações de impressão da peça por FDM	25
Figura 9: Alguns padrões de preenchimento em FDM	25
Figura 10: Padrão de preenchimento zigzag.....	26
Figura 11: Enantiômeros do LA	26
Figura 12: Caminhos para a produção de PLA	27
Figura 13: Estágios de adesão intercamada	34
Figura 14: Corpo de prova de tração Tipo 1.....	39
Figura 15: Máquina de impressão em funcionamento	41
Figura 16: Compactação das amostras em alumina para recozimento	42
Figura 17: Realização do ensaio de tração	43
Figura 18: Corte realizado para análise de fractografia.....	46
Figura 19: Tensão máxima em MPa e seus desvios por condição de trabalho.....	49
Figura 20: Alongamento máximo em % e seus desvios por condição de trabalho ...	49
Figura 21: Módulo de elasticidade em MPa e seus desvios por condição de trabalho	49
Figura 22: Viscosidade complexa para amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°	58
Figura 23: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°	58
Figura 24: Módulo de perda para amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°	58
Figura 25: Viscosidade complexa para amostras impressas a 70 mm/s a 200 e 220°C	59
Figura 26: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 70 mm/s a 200 e 220°C	59

Figura 27: Módulo de perda para amostras impressas a 70 mm/s a 200 e 220°C....	60
Figura 28: Viscosidade complexa para amostras impressas a 70 mm/s e a 200°C, recozidas, com e sem secagem	61
Figura 29: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 70 mm/s e a 200°C, recozidas, com e sem secagem	61
Figura 30: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 70 mm/s e a 200°C, recozidas, com e sem secagem	61
Figura 31: Viscosidade complexa das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	62
Figura 32: Módulo de armazenamento das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	63
Figura 33: Módulo de perda das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	63
Figura 34: Tangente de delta das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	63
Figura 35: Viscosidade complexa das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	64
Figura 36: Módulo de armazenamento das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	64
Figura 37: Módulo de perda das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	64
Figura 38: Tangente de delta das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento	65
Figura 39: Estereoscopias da superfície de fratura a) V50T220; b) V70T220	67
Figura 40: Estereoscopias da superfície de fratura a) V70T200; b) V70T220	68
Figura 41: Fotografias das amostras fraturadas a) V70T200; b) V70T220	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	MANUFATURA.....	16
3.2	MANUFATURA ADITIVA	17
3.2.1	Obtenção de Peças por MA.....	17
3.2.2	Vantagens e Limitações.....	18
3.2.3	Aplicações	20
3.2.4	Técnicas de MA.....	21
3.3	MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM).....	22
3.3.1	Definições	22
3.3.2	Parâmetros do processo	24
3.4	PLA	26
3.4.1	Síntese.....	26
3.4.2	Propriedades e aplicações.....	28
3.5	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO EM FDM PARA PLA	31
3.6	REOLOGIA DO PLA	33
3.7	ADESÃO INTERCAMADAS.....	34
3.8	RECOZIMENTO DO PLA	36
4	METODOLOGIA	39
4.1	MATERIAL E PROCESSAMENTO	39
4.2	MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES	41
4.3	SECAGEM.....	41
4.4	RECOZIMENTO	42
4.5	ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO.....	42

4.6	ENSAIO DE CISALHAMENTO OSCILATÓRIO DE PEQUENAS AMPLITUDES (SAOS)	45
4.7	FRATOLOGRAFIA	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	VARIAÇÃO DIMENSIONAL	47
5.2	ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	48
5.2.1	Efeito da velocidade	50
5.2.2	Efeito da temperatura	51
5.2.3	Efeito da secagem	52
5.2.4	Efeito do recozimento	53
5.3	CISALHAMENTO OSCILATÓRIO DE PEQUENAS AMPLITUDES (SAOS)	56
5.3.1	Efeito da velocidade	57
5.3.2	Efeito da temperatura	59
5.3.3	Efeito da secagem	60
5.3.4	Efeito do recozimento	62
5.4	FRATOLOGRAFIA	67
5.4.1	Efeito da velocidade	67
5.4.2	Efeito da temperatura	67
5.4.3	Efeito do recozimento	69
6	CONCLUSÃO	71
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, representa uma das maiores transformações na tecnologia de fabricação de produtos. Diferente dos processos tradicionais, como a manufatura subtrativa ou formativa, a impressão 3D constrói peças pela adição sucessiva de camadas a partir de modelos digitais tridimensionais (VOLPATO, 2018). As tecnologias modernas surgiram nos anos 1980, com a estereolitografia (SLA) e, em seguida outros processos como o processo Fused Deposition Modeling (FDM) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; RAJAN et al., 2022). Desde então, a manufatura aditiva tem sido amplamente utilizada devido à sua capacidade de produzir geometrias complexas, prototipar rapidamente e reduzir desperdícios (CONNER et al., 2014; VOLPATO, 2018). Entre as técnicas disponíveis, a extrusão de material (MEX), em especial o FDM, tornou-se uma das mais populares devido ao baixo custo e à facilidade de operação (MWEMA; AKINLABI, 2020).

No processo FDM, um filamento termoplástico é extrudado por um bico aquecido e depositado camada a camada; neste caso, parâmetros como temperatura de bico, velocidade de impressão e altura de camada influenciam a qualidade final da peça (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015; RAJAN et al., 2022). Mesmo com controle fino dos parâmetros, peças produzidas por FDM costumam apresentar anisotropia e propriedades inferiores às obtidas por processos convencionais, sobretudo pela limitação da adesão intercamada e tensões internas decorrentes do resfriamento rápido (COOGAN; KAZMER, 2020; GAO et al., 2021). Por isso, a escolha do material é fundamental.

Entre os polímeros mais utilizados no FDM está o poli(ácido láctico) (PLA), um biopolímero semicristalino de origem renovável, com boas propriedades mecânicas, biodegradabilidade e baixa temperatura de fusão, explicando sua ampla aplicação em setores diversos, como embalagens e dispositivos biomédicos (AURAS et al., 2010; FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016; REN, 2010). No entanto, o PLA apresenta fragilidade, baixa tenacidade e sensibilidade térmica, limitações que se tornam mais evidentes quando associado à anisotropia do processo FDM (GAJJAR et al., 2025; RASAL; JANORKAR; HIRT, 2009). Assim, o comportamento reológico do material e as condições de impressão determinam diretamente a adesão intercamada e consequentemente o desempenho mecânico final da peça.

Para minimizar o impacto dessas limitações, o recozimento tem sido muito estudado como estratégia de pós-processamento. Esse tratamento consiste em aquecer o PLA a temperaturas entre a de transição vítrea e a de fusão, promovendo reorganização molecular, aumento da cristalinidade e alívio de tensões internas (BUTT; BHASKAR, 2020). Estudos mostram melhorias na resistência à tração, na dureza e na estabilidade térmica, especialmente com tratamentos realizados entre 70 °C e 120 °C, dependendo das condições de tempo e resfriamento (GHASEMKHANI et al., 2024; KAHYA et al., 2025).

Apesar dos avanços, os efeitos combinados de velocidade de impressão, temperatura de bico, secagem, tempo e temperatura de recozimento, bem como seus impactos na reologia, adesão intercamada e comportamento mecânico, ainda constituem um campo interessante de pesquisa. Entender essas interações é essencial para otimizar o desempenho de peças de PLA fabricadas por FDM.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo investigar a influência da velocidade de impressão, temperatura de bico, e das condições de secagem e recozimento (tempo e temperatura) nas propriedades de amostras de PLA obtidas por manufatura aditiva, com foco na melhoria da adesão entre camadas e no desempenho mecânico. Para isso, foi utilizada a técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), variando a velocidade de impressão e temperatura de bico. O recozimento foi realizado em um leito de alumina em diferentes condições de tempo e temperatura. Também foi testada a secagem das amostras e da alumina para um lote de material. A caracterização das amostras foi realizada com ensaio de tração, testes reológicos de reometria rotacional e fractografias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico abordará conceitos sobre a manufatura aditiva e suas técnicas, com detalhamento sobre a modelagem por fusão e deposição (FDM) e seus parâmetros de deposição. Além disso, serão descritos conceitos sobre o poli (ácido ático), incluindo a influência da variação de alguns parâmetros de impressão em seu desempenho mecânico.

3.1 MANUFATURA

A manufatura é o conjunto de processos utilizados para transformar matérias-primas em produtos, desempenhando um importante papel no avanço tecnológico e socioeconômico. Desde as primeiras ferramentas produzidas manualmente até as fábricas mecanizadas da Primeira Revolução Industrial, o processo de fabricação tem evoluído continuamente. A mecanização, iniciada no século XVIII com o uso de máquinas a vapor, revolucionou a produção ao permitir maior escala e padronização (KALPAKJIAN; SCHMID, 2001). A evolução seguiu com a introdução da linha de montagem no início do século XX e, mais recentemente, com a incorporação de automação e sistemas computacionais, aspectos da Terceira Revolução Industrial (GROOVER, 2013).

Dentro da manufatura, é possível categorizar os processos em diferentes tipos sendo todos baseados na moldagem da matéria-prima. A manufatura subtrativa, por exemplo, consiste na remoção de material de um bloco sólido para formar a peça desejada, sendo comum em torneamento e fresamento. Já a manufatura por conformação transforma o material por meio de deformação plástica, utilizando processos como injeção, forjamento, laminação, extrusão, entre outros. Outro exemplo importante é a manufatura por união, que envolve a junção de materiais, como na soldagem, brasagem e colagem, sendo amplamente usada na montagem de estruturas e componentes (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017; VOLPATO, 2018). Esses métodos tradicionais continuam predominantes na indústria, especialmente quando se busca alta produtividade, repetibilidade e resistência mecânica.

Contudo, com o desenvolvimento da tecnologia e necessidade de maior customização com rápida produção, a manufatura aditiva surgiu como solução.

3.2 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA), também amplamente conhecida como impressão 3D, representa uma transformação significativa nas formas tradicionais de fabricação. Diferentemente dos processos convencionais baseados na remoção, conformação e junção de material, a manufatura aditiva se baseia na construção de peças por meio da adição sucessiva de camadas de material a partir de modelos digitais tridimensionais (VOLPATO, 2018). Esse princípio simples está na base de uma transformação profunda em setores industriais diversos, relacionados à Indústria 4.0.

Historicamente, a ideia de construir objetos por camadas remonta a práticas antigas, como a sobreposição de blocos nas pirâmides egípcias. Contudo, os primeiros registros técnicos mais próximos do que conhecemos hoje em dia datam do final do século XIX, com métodos de construção por curvas de nível em topografia e técnicas de fotoescultura (VOLPATO, 2018). Já as tecnologias modernas de manufatura aditiva começaram a se consolidar na década de 1980, com o desenvolvimento da estereolitografia (SLA) e, posteriormente, de outras técnicas como *Fused Deposition Modeling* (FDM) e *Selective Laser Sintering* (SLS) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Com a evolução da tecnologia, a manufatura aditiva deixou de ser um conceito de laboratório para se tornar uma ferramenta prática e confiável. Ao longo das últimas décadas, notou-se uma rápida expansão nas capacidades dos equipamentos, na diversidade de materiais disponíveis e na precisão dos processos, permitindo a aplicação em peças finais funcionais e não apenas em protótipos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

3.2.1 Obtenção de Peças por MA

A obtenção de peças por manufatura aditiva envolve uma sequência bem definida de etapas, que começam no ambiente virtual e resulta na produção física do objeto. Todo o processo é orientado por dados digitais, sendo altamente automatizado e centrado na lógica de adição de camadas, com a mínima intervenção manual.

O processo inicia com a modelagem tridimensional da peça em software CAD (*Computer-Aided Design*), no qual o projetista deve criar a geometria do objeto a ser produzido, cujo arquivo deverá ser exportado em formato compatível com os sistemas

de MA, como o STL (*STereoLithography*). A conversão do formato é necessária para representar a peça com malhas de triângulos, deixando o desenho adequado para as próximas etapas (VOLPATO, 2018).

Em um software de fatiamento, o arquivo no formato STL é processado para gerar a sequência de camadas bidimensionais (2D) que compõem o modelo tridimensional, gerando um código G (G-code). Esse código contém as instruções detalhadas para a impressora 3D, incluindo parâmetros como temperatura, velocidade de extrusão, altura de camada e padrão de preenchimento (CANO-VICENT et al., 2021; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; MWEMA; AKINLABI, 2020; VOLPATO, 2018).

Assim que todas as etapas descritas acima forem concluídas, inicia-se a fabricação da peça pela impressora 3D, seguida da remoção e pós processamento necessários para alguns produtos (exemplo: limpeza, recozimento, usinagem etc.) para garantir a melhora de propriedades funcionais, estéticas e dimensionais (VOLPATO, 2018).

Todas as etapas apresentadas anteriormente são exemplificadas na Figura 1, com o exemplo de fabricação de uma xícara por manufatura aditiva (MA).

Figura 1: Exemplo de fabricação por Manufatura Aditiva



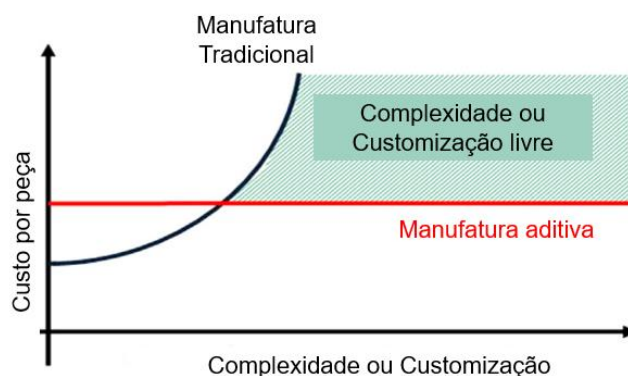
(GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015) Adaptado

3.2.2 Vantagens e Limitações

A manufatura aditiva (MA) tem ganhado destaque devido às vantagens que apresenta em relação aos métodos tradicionais de manufatura. Entre as diversas vantagens que a MA possui, tem-se a capacidade de fabricação de peças complexas

que normalmente seriam inviáveis ou extremamente difíceis de produzir pelos outros métodos de produção, devido à tecnologia de adição por camadas. Atrelado a isso, há um ponto de equilíbrio de customização no qual o custo por peça fabricada por MA é menor do que por métodos tradicionais, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Comparação de custo de produção por peça baseado na sua complexidade de diferentes métodos de manufatura



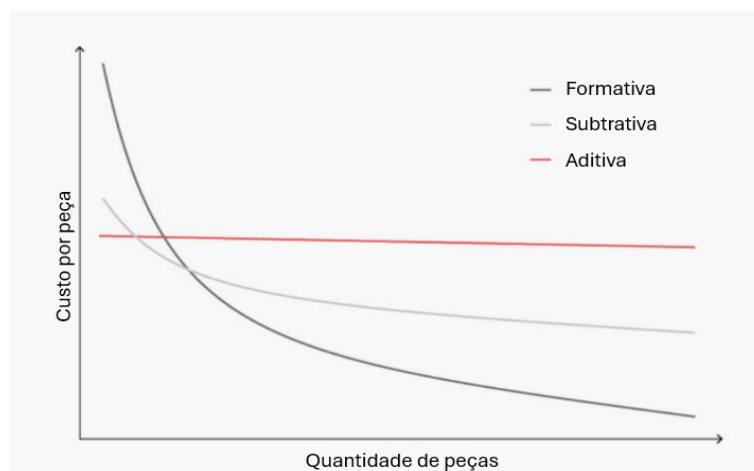
((CONNER et al., 2014) Adaptado

Além disso, a capacidade de rápido desenvolvimento de produtos em pouca quantidade é um ganho para a indústria, principalmente na fase de prototipagem. O aspecto ambiental relacionado à manufatura aditiva é muito importante pois essa tecnologia permite menor desperdício de matéria prima e melhor utilização da energia disponível, levando a uma menor necessidade de material (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; VOLPATO, 2018). Adicionalmente, devido à utilização de apenas uma máquina, os produtos de manufatura aditiva, independentemente da complexidade, não têm grandes mudanças nas etapas de produção, possibilitando uma estimativa de tempo para a fabricação das peças finais (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Contudo, apesar da MA apresentar diversas vantagens quando comparada a processos tradicionais, são encontradas também limitações nessa tecnologia. Entre elas, ainda há uma pequena gama de materiais que são aplicáveis a esse tipo de processo e os que são, em geral, não performam tão bem quanto em processos convencionais. Relacionado a isso, temos uma grande limitação no que diz respeito à anisotropia das propriedades do produto final, devido à diferentes velocidades de resfriamento entre regiões da peça. Adicionalmente, a manufatura aditiva

normalmente só é vantajosa quando utilizada em pequena escala, uma vez que, se utilizada para porte industrial, o custo seria muito elevado (VOLPATO, 2018). Comparando os métodos de fabricação, quando a produção é feita em larga escala, o custo por peça fica menor utilizando a manufatura formativa (injeção), como ilustrado na Figura 3 (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017).

Figura 3: Comparação de custo dos diferentes métodos de fabricação



(REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017) Adaptado

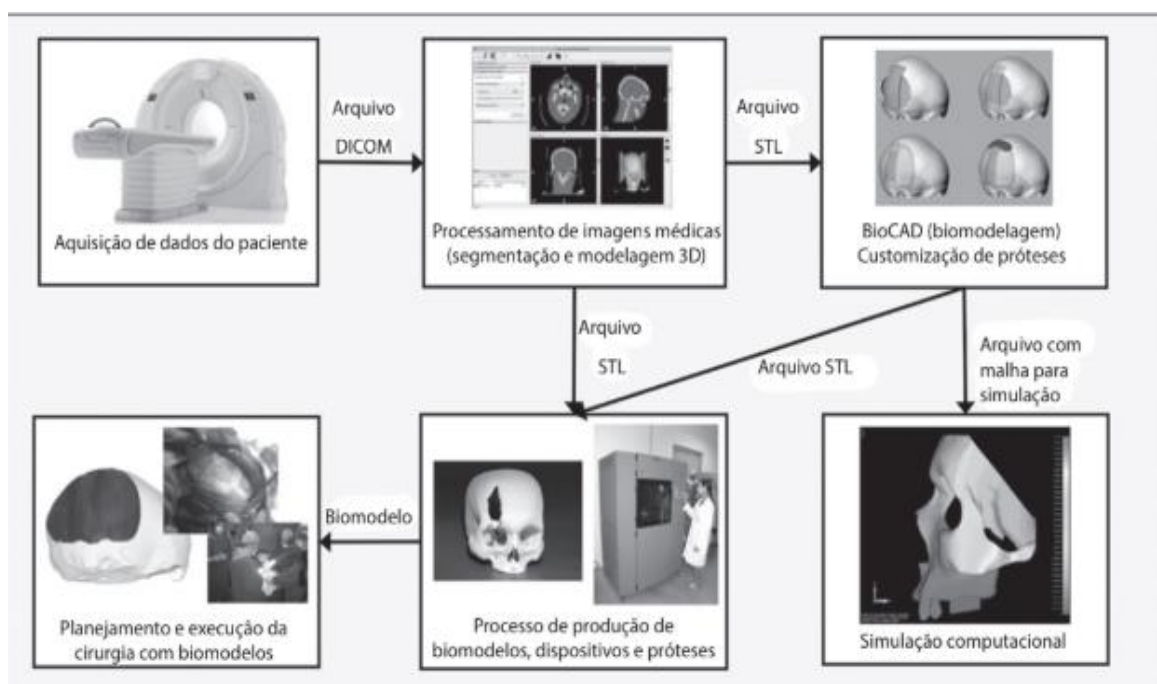
3.2.3 Aplicações

No processo de produção de um produto, a prototipagem rápida tem como intuito a fabricação ágil de modelos físicos para validação de forma, encaixe e conceito em etapas iniciais do desenvolvimento. A manufatura aditiva se mostrou muito útil nessa fase do processo em diversos setores no qual a agilidade de decisões e a correção de projetos é essencial. Contudo, com o desenvolvimento da tecnologia, necessidade de customização e agilidade na produção, as aplicações da manufatura aditiva deixaram de ser direcionadas apenas à prototipagem e passaram a ser utilizadas em diversos campos de trabalho como na área da saúde e aplicação aeroespacial (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; VOLPATO, 2018).

No campo aeroespacial, a MA é comumente utilizada para a produção de componentes devido à sua capacidade de atender os principais requisitos para essa indústria: peças de geometria complexa, de baixo peso e produzidas em poucas etapas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; VOLPATO, 2018). RADHIKA et al., 2024 aborda diversos exemplos de aplicação da manufatura aditiva em componentes aeroespaciais, explicitando a crescente importância da tecnologia para a evolução dessa indústria.

Outro importante setor que se beneficia da manufatura aditiva é o setor da saúde, especificamente o campo da medicina e odontologia. Como evidencia a Figura 4, a tecnologia da MA permite a obtenção de modelos de estruturas ósseas fiéis à realidade para auxiliar no planejamento de cirurgias, servindo como referência confiável durante a operação (VOLPATO, 2018). Além disso, a tecnologia de MA permite a fabricação de próteses e implantes dentários, devido sua capacidade de customização (LAKKALA et al., 2023).

Figura 4: Exemplo de utilização da tecnologia de AM na medicina



(VOLPATO, 2018)

Outras importantes aplicações dessa tecnologia ocorrem na arquitetura e urbanismo e tecnologia assistivas (VOLPATO, 2018).

3.2.4 Técnicas de MA

As técnicas de manufatura aditiva são classificadas em 7 tipos diferentes, de acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2021.

- A. Jateamento de aglutinante (BJT - Binder Jetting): processo no qual um agente aglutinante é depositado para unir as partículas de pó.
- B. Deposição de energia direcionada (DED - Directed Energy Deposition): processo no qual a energia térmica é utilizada para unir materiais metálicos por fusão.

- C. Extrusão de material (MEX - Material Extrusion): processo no qual o material é seletivamente depositado através de um bico. A tecnologia de Moldagem por Fusão e Deposição (FDM - *Fused Deposition Modeling*) é baseada na MEX.
- D. Jateamento de material (MJT - Material Jetting): processo no qual ocorre a deposição de gotas pequenas de material.
- E. Fusão de leito em pó (PBF - Power Bed Fusion): processo no qual a energia térmica funde regiões de um leito de pó.
- F. Laminação em folha (SHL - Sheet Lamination): processo no qual folhas de materiais cortados são unidos para formar partes.
- G. Fotopolimerização em cuba (VPP - Vat Photopolymerization): processo no qual um fotopolímero líquido é curado por luz (UV ou laser) em uma cuba

No presente trabalho, será utilizada a técnica de FDM (Extrusão de material (MEX - Material Extrusion) que será mais bem explorada na próxima sessão.

3.3 MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

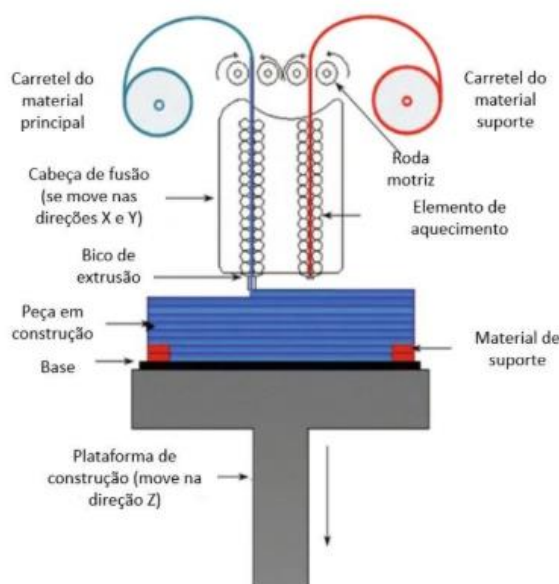
3.3.1 Definições

O processo de Fused Deposition Modeling (FDM), também conhecido como Fused Filament Fabrication (FFF), é uma das técnicas mais amplamente utilizadas na manufatura aditiva e foi patenteada por Scott Crump, no ano de 1988, seguida da criação da Stratasys Inc. em 1989 (RAJAN et al., 2022). Seu princípio básico consiste na deposição camada a camada de um material termoplástico fundido, que é extrudado por um bico aquecido, solidificando-se imediatamente após a deposição para formar a peça tridimensional conforme o modelo digital previamente definido (MWEMA; AKINLABI, 2020).

O material a ser fundido, comumente está na forma de filamento. Durante a impressão, o filamento polimérico é alimentado por um sistema de tração até o extrusor, onde é aquecido até atingir sua temperatura de fusão. O material fundido é então extrudado por um bico (nozzle), cuja posição é controlada com precisão para seguir o caminho definido no arquivo G-code. A extrusão ocorre sobre uma base (ou mesa de impressão), que pode ser aquecida para minimizar tensões térmicas e

deformações durante a solidificação do material (CANO-VICENT et al., 2021). Além disso, há casos em que outro material é utilizado para produzir as partes de suporte antes do produto principal, como mostra a Figura 5, representando o esquema geral do modo de funcionamento de uma máquina de FDM (RAJAN et al., 2022).

Figura 5: Esquema geral do modo de funcionamento de uma máquina FDM



(MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015) Adaptado

A extrusão é feita camada por camada, com o bico da impressora se movendo nos eixos X e Y para formar a geometria bidimensional de cada camada. Após a conclusão de uma camada, o cabeçote com o bico ou a base se movimenta ao longo do eixo Z para iniciar a próxima camada e esse processo se repete até que o objeto completo seja construído (CANO-VICENT et al., 2021).

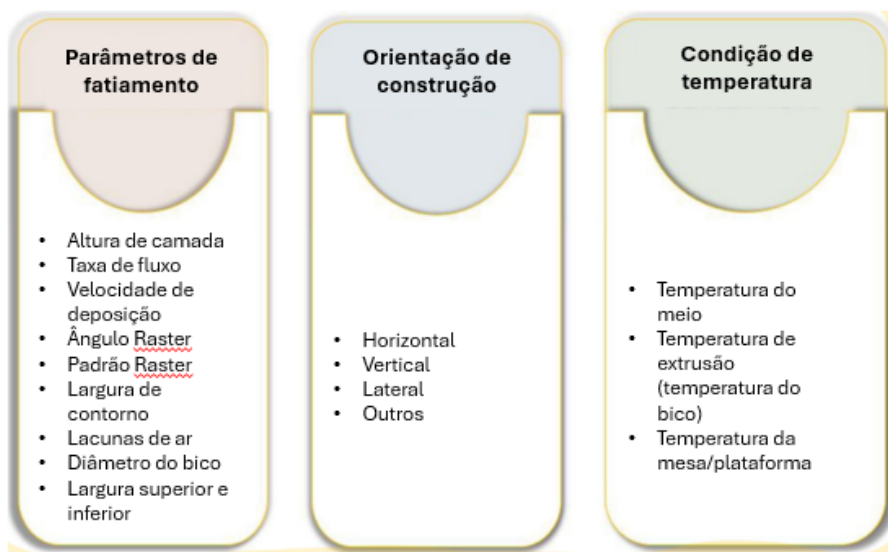
Algumas impressoras possuem uma câmara fechada com aquecimento, que tem como objetivo controlar melhor a temperatura do ambiente em que o produto é formado, a fim de melhorar o controle de adesão das camadas formadas e aliviar as tensões geradas devido ao rápido resfriamento de cada camada (VOLPATO, 2018).

Diversos parâmetros de impressão podem influenciar a qualidade da peça produzida por FDM, os quais estão detalhados na próxima seção.

3.3.2 Parâmetros do processo

Os principais parâmetros que influenciam o processo de fabricação de peças por FDM podem ser divididos em 3 categorias diferentes, sendo elas parâmetros de fatiamento, orientação de construção e condição de temperatura, apresentadas na Figura 6 (RAJAN et al., 2022).

Figura 6: Importantes parâmetros do processo FDM

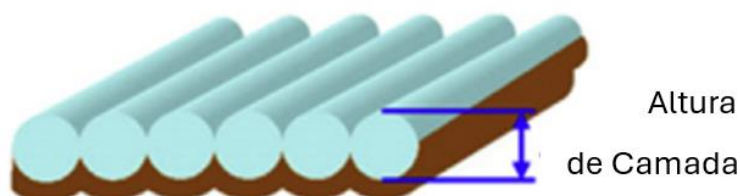


(RAJAN et al., 2022) Adaptado

Os principais parâmetros de controle do processo são:

- Altura de camada: representa a espessura, no eixo vertical, do material depositado na mesa pelo bico da extrusora, como ilustra a Figura 7.

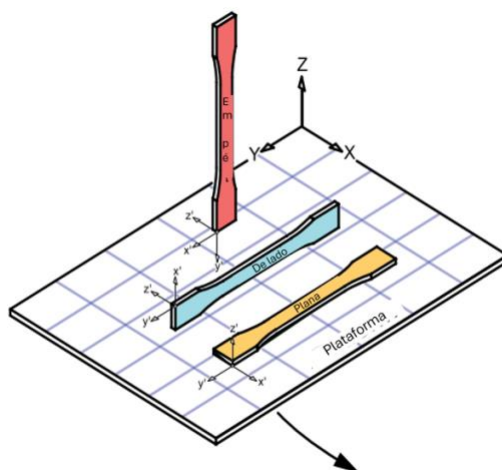
Figura 7: Altura de camada



(MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015) Adaptado

- b) Velocidade de impressão: consiste na velocidade com a qual o bico da extrusora se movimenta durante o processo e determina o tempo necessário para fabricar a peça.
- c) Temperatura de bico: deve para permitir a fusão ou amolecimento do material que vai ser extrudado no processo, mantendo uma viscosidade adequada para permitir a construção da peça com a mínima deformação.
- d) Temperatura da mesa: é essencial para melhorar o resfriamento desigual da peça, diminuindo seus efeitos (tensões residuais).
- e) Orientação de impressão: é a posição em que a amostra é impressa na plataforma, existindo 3 orientações diferentes: X, Y ou Z, como mostrado na Figura 8, além de suas variações.

Figura 8: Orientações de impressão da peça por FDM



(CHACÓN et al., 2017) Adaptado

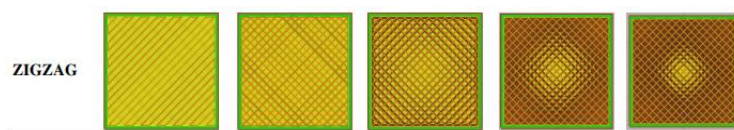
- f) Padrão de preenchimento: existem diversos padrões de preenchimento para o processo de FDM como ilustram as Figuras 9 e 10.

Figura 9: Alguns padrões de preenchimento em FDM



(BAKHTIARI; AAMIR; TOLOUEI-RAD, 2023) Adaptado

Figura 10: Padrão de preenchimento zigzag



(NASSER et al., 2024)

No presente trabalho será variado apenas o parâmetro de velocidade de impressão e a temperatura de bico.

A influência desses parâmetros nas propriedades do PLA, que será objeto de estudo deste trabalho, será aprofundada nas próximas sessões.

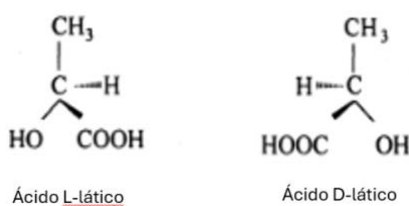
3.4 PLA

O Poli(ácido láctico) (PLA) é um biopolímero produzido a partir de fontes renováveis, como milho e cana de açúcar. Trata-se de um termoplástico, biodegradável, com boas propriedades mecânicas que ganhou muito espaço nas indústrias, como alternativa para os polímeros convencionais. Suas aplicações variam desde a área médica até a têxtil, se destacando também na manufatura aditiva no processo FDM (AURAS et al., 2010; BASTIOLI, 2005; HABITZREUTER et al., 2022).

3.4.1 Síntese

A produção do ácido polilático (PLA) tem como monômero o ácido láctico (LA), obtido por síntese química ou fermentação de carboidratos. O LA possui 2 enantiômeros opticamente ativos, como ilustra a Figura 11, sendo eles o ácido L-lático e D-lático, cuja proporção define a cristalinidade e as propriedades do PLA. Além disso, quando produzido a partir de fontes vegetais, a maior parte do ácido láctico obtido é o L-lático (LLA) (AURAS et al., 2010; REN, 2010).

Figura 11: Enantiômeros do LA

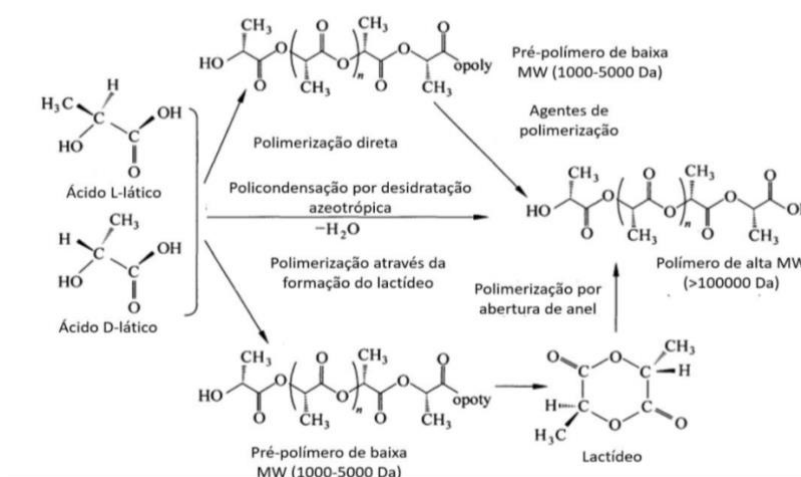


(REN, 2010) Adaptado

Na síntese química, o acetaldeído reage com cianeto de hidrogênio formando lactonitrilo, posteriormente hidrolisado em ácido lático. Embora eficiente, esse processo gera mistura racêmica, inadequada para aplicações que requerem alta pureza óptica (REN, 2010). Já a fermentação microbiana é o método mais empregado para obtenção seletiva de isômeros, pois utiliza cepas bacterianas específicas em ambiente anaeróbico, garantindo alta pureza e rendimento (REN, 2010).

Os principais caminhos de produção de PLA a partir do LA são: policondensação direta a partir do ácido lático e abertura do anel do lactídeo, como apresentado na Figura 12 (AURAS et al., 2010).

Figura 12: Caminhos para a produção de PLA



(REN, 2010) Adaptado

A rota de policondensação direta do ácido lático ocorre em três etapas: condensação inicial, oligomerização e policondensação por fusão. Na primeira, o ácido lático reage sob vácuo e temperatura moderada, liberando água, cuja remoção é essencial para evitar hidrólise. Em seguida, formam-se pré-polímeros de baixo peso molecular, cuja uniformidade depende do catalisador e das condições de reação. Por fim, na etapa de fusão, o material é submetido a temperaturas e vácuo mais elevados para aumentar o peso molecular, exigindo reatores com alta eficiência de remoção de água, como os de disco rotativo (AURAS et al., 2010). Embora viabilize a produção de PLA, a policondensação direta apresenta limitações como alta sensibilidade à umidade, longos tempos de reação e obtenção de polímeros de baixo peso molecular, mesmo com catalisadores. Por isso, o material resultante tem uso restrito a aplicações que não exigem alta resistência mecânica, como filmes, embalagens descartáveis e produtos de curta vida útil (AURAS et al., 2010; REN, 2010).

Já a rota por abertura de anel do lactídeo é a mais utilizada para produzir PLA de alto peso molecular. Nela, o ácido oligolático é convertido em lactídeo (L-, D- ou meso-) por degradação térmica e purificação, seguido da polimerização por abertura de anel, catalisada por compostos metálicos, orgânicos ou enzimáticos. Essa rota permite maior controle sobre a massa molar e a estereoquímica, influenciando propriedades como rigidez, transparência, biodegradabilidade e resistência térmica (REN, 2010; XIAO et al., 2012).

Caso a síntese do PLA seja realizada através do isômero L, é gerado um produto parcialmente cristalino, com 40% a 75% de cristalinidade, com uma temperatura de fusão de aproximadamente 180°C. Contudo, à medida que a pureza óptica diminui, ou seja, conforme diminui o percentual de isômero L utilizado na produção do PLA e aumenta o percentual do *meso*-lactídeo, o grau de cristalinidade e a temperatura de fusão decrescem, sendo considerado amorfo quando possui menos de 87,5% de pureza óptica (BASTIOLI, 2005; HAGEN, 2012).

3.4.2 Propriedades e aplicações

O poli(ácido láctico) é um dos biopolímeros mais promissores para substituir polímeros derivados do petróleo, principalmente em virtude de sua origem renovável, biodegradabilidade, compostabilidade e boa processabilidade térmica. Esse material tem ganhado grande destaque em áreas como embalagens, têxteis e aplicações biomédicas (REN, 2010). A Tabela 1 traz uma comparação entre as propriedades do PLA a de outros polímeros termoplásticos comumente utilizados nas indústrias, explicitando a semelhança das propriedades mecânicas, motivo pelo qual pode ser um bom substituto para os polímeros convencionais. Em geral, dentre as propriedades apresentadas, o PLA e o Poliestireno possuem as maiores semelhanças, apesar de o primeiro apresentar valores levemente superiores (BASTIOLI, 2005).

Tabela 1: Comparação entre as propriedades mecânicas do PLA (96% de pureza) com outros termoplásticos

Polímero	Módulo de elasticidade em tração (MPa)	Resistência ao Impacto Izod (J/m)	Módulo de elasticidade em flexão (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
PLA	3834	24,6	3689	4
Poliestireno	3400	27,8	3303	2
iPP	1400	80,1	1503	400
Polietileno de alta densidade	1000	128,16	800	600

(BASTIOLI, 2005) Adaptado

Uma das principais vantagens do PLA é sua boa processabilidade térmica, com temperatura de fusão entre 150 e 180 °C, o que permite sua moldagem por injeção, extrusão, sopro e termoformagem, utilizando infraestrutura industrial já existente. Esse aspecto reduz a necessidade de grandes investimentos em novos equipamentos e facilita sua integração na cadeia produtiva. Além disso, o PLA demanda de 25 a 55% menos energia para ser produzido em comparação a polímeros convencionais, como o polietileno (PE) ou o politereftalato de etileno (PET) (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2009; REN, 2010).

Outro destaque é sua biocompatibilidade, sendo amplamente utilizado em aplicações médicas, como suturas, implantes e sistemas de liberação controlada de fármacos. Quando implantado, o PLA se degrada por hidrólise em ácido lático em temperatura e umidade elevada, um metabólito natural que pode ser assimilado pelo organismo e excretado sem efeitos tóxicos (REN, 2010). Isso, somado à sua origem renovável, faz com que o PLA seja aprovado por agências reguladoras como a *Food and Drug Administration* (FDA) para contato com tecidos e fluidos biológicos.

Contudo, o PLA possui limitações significativas. A principal é sua baixa tenacidade e alto grau de fragilidade, com alongação na ruptura inferior a 10%, o que compromete seu desempenho em aplicações que demandam resistência ao impacto ou deformação plástica (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2009; REN, 2010). Essa característica é resultado de sua estrutura cristalina e rigidez da cadeia principal, que dificulta a dissipação de energia mecânica. Além disso, o PLA possui um intervalo de

processamento estreito, com baixa estabilidade térmica e resistência ao calor limitada, o que o torna suscetível à degradação durante a moldagem ou recozimento (REN, 2010).

Outro desafio relevante é sua taxa de degradação lenta em condições ambientais normais. Embora seja considerado biodegradável, o PLA depende de condições específicas (microorganismos, pH, temperatura) para se degradar completamente. Fatores como a espessura da peça, a cristalinidade, massa e distribuição de massa molecular, morfologia e taxa de difusão de água no PLA também influenciam na taxa de biodegradação. Em certas situações, sua degradação pode levar anos, sendo esse comportamento devido à sua relativa hidrofobicidade, expressa por um ângulo de contato com água de cerca de 80° , e ao alto grau de cristalinidade que dificulta a penetração da água no polímero (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2009; REN, 2010). No entanto, o PLA tem se mostrado especialmente promissor para aplicações de vida útil curta, como embalagens e utensílios descartáveis, podendo ser adequadamente descartado em composteiras industriais, onde as condições de processamento de resíduos são adequadas para a sua degradação.

Do ponto de vista químico, o PLA apresenta poucos grupos funcionais reativos, o que limita sua modificação direta. Ainda assim, diversas estratégias têm sido desenvolvidas para superar essas limitações, como a copolimerização com outros monômeros, a adição de plastificantes e o uso de modificadores de impacto, além de tratamentos de superfície com plasma ou injeção de grupos hidrofílicos (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2009). Uma outra solução para o PLA ter suas propriedades mecânicas melhoradas é por meio da obtenção de blendas e compósitos, tornando-se adequado para aplicações que exijam mais resistência, sensibilidade térmica e melhor flexibilidade, como em setores de construção civil, automotivo e eletrônico (ILYAS et al., 2021; TRIVEDI; GUPTA; SINGH, 2023).

Para o PLA ter suas propriedades térmicas e mecânicas melhoradas, é muito importante o entendimento do controle da cristalinidade do PLA, uma vez que ela determina a mobilidade das cadeias, conferindo boas ou más propriedades. A cristalinidade é influenciada pelo tipo de ácido láctico presente (L-LA, D-LA ou *meso*-LA), sendo o PLLA e PDLA (PLA derivado do L-LA) semicristalino e sua mistura, amorfa (REN, 2010). Além desse fator, longos tempos de retenção na temperatura de

cristalização a frio, a taxa de resfriamento lenta e presença de aditivos nucleantes para promover a nucleação e crescimento dos cristais favorece a cristalização do PLA (YU et al., 2021).

3.5 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO EM FDM PARA PLA

Os parâmetros de impressão têm grande impacto na qualidade e propriedades mecânicas dos produtos obtidos por impressão 3D por FDM, de modo que ajustes na altura de camada, velocidade de impressão, temperatura do bico, orientação de construção, entre outros parâmetros, influenciam, por exemplo, na resistência e durabilidade das peças. A influência de alguns dos parâmetros de impressão reportados na literatura são descritos a seguir.

A. Altura de camada

A altura de camada tem influência tanto nas propriedades mecânicas do material quanto no tempo e quantidade de camadas necessárias para a impressão da peça, como estudado por ABEYKOON; SRI-AMPHORN; FERNANDO, 2020. Em relação às propriedades mecânicas, AFSHARI et al., 2024 avaliaram que, para o PLA impresso nas condições por ele definidas, dentre as 3 diferentes espessuras de camada (0,1, 0,2 e 0,3 mm), os corpos de prova fabricados com 0,2mm apresentou melhores resultados mecânicos, no que diz respeito à resistência a flexão e energia de impacto. Além disso, STOJKOVIĆ et al., 2023 e FRUNZEVERDE et al., 2023 chegaram à conclusão de que quanto maior a espessura da camada, menor é a resistência à tração da peça. Adicionalmente, NYABADZA et al., 2024 avaliaram que, entre as alturas de camadas estudadas (0,1, 0,2 e 0,3 mm), a peça produzida com a espessura média apresentou menor rigidez. Em relação a deformação máxima nos ensaios de flexão e tração, ou seja, a fratura, CHACÓN et al., 2017 estudaram que ela aumenta à medida que a altura da camada aumenta.

B. Velocidade de impressão

ABEYKOON; SRI-AMPHORN; FERNANDO, 2020 avaliaram que entre as velocidades 70 e 110 mm/s, o Módulo de Young se apresentou com maior valor a 90 mm/s. Isso provavelmente se deve ao fato de que acima dessa velocidade, a fusão do filamento pode ser influenciada causando baixa adesão intercamadas e, por consequência, menor resistência. Já ANSARI; KAMIL, 2021 concluíram que a

resistência à tração de amostras impressas a 50 mm/s é melhor do que as impressas a 40 mm/s, com a hipótese de que a ligação interfacial das camadas na velocidade maior é mais rápida. Apesar da velocidade de impressão influenciar nas propriedades mecânicas, CHACÓN et al., 2017 e ALAFAGHANI et al., 2017 concluíram que possui menor significância que a espessura de camada.

C. Temperatura do bico

RIVERA-LÓPEZ et al., 2024 investigaram o efeito da temperatura de bico na resistência mecânica de amostras impressas em PLA e concluiu que, entre as temperaturas de 180 e 260 °C, a resistência à tração e o módulo de elasticidade foram otimizados na faixa de 220 a 240 °C. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, com temperaturas mais baixas, o fluxo do material é piorado, resultando em menor aderência intercamadas e em propriedades mecânicas inferiores. Além disso, verificou-se que em temperaturas maiores que 200°C não houve grande variação na elongação na ruptura. Já MAGULURI; SURESH; RAO, 2023 concluíram que a temperatura de extrusão tem impacto significativo nas propriedades mecânicas, com melhor desempenho observado em temperaturas de 220 °C. Esses resultados sugerem que, ao se elevar a temperatura de extrusão, a fusão intercamadas melhora, o que gera um aumento na resistência do material. No entanto, ANSARI; KAMIL, 2021 alertam que temperaturas excessivamente altas podem comprometer a qualidade da peça devido ao excesso de material depositado, o que prejudica a adesão intercamadas e diminui a resistência.

D. Orientação de construção

A orientação de impressão de peças de PLA por FDM tem grande impacto nas suas propriedades mecânicas devido à anisotropia. Estudos de CHACÓN et al., 2017 e LOKESH et al., 2022 mostram que as orientações de lado e plana, ilustradas na Figura 8, oferecem melhor resistência máxima à tração, flexão e rigidez, pois as camadas são depositadas de forma que favorecem a adesão entre elas. Por outro lado, a orientação em pé resulta em menor desempenho mecânico devido à fraca adesão entre as camadas, especialmente quando a carga é aplicada na direção perpendicular às camadas. MEGERSA et al., 2024 confirmam que a orientação plana proporciona os melhores resultados de resistência à tração.

3.6 REOLOGIA DO PLA

A reologia de polímeros é a ciência que estuda o escoamento e a deformação de materiais poliméricos, em especial no estado fundido, buscando relacionar a estrutura molecular, como peso molecular, distribuição, taticidade e grau de ramificação, com o comportamento mecânico durante o processamento. Por meio de propriedades como viscosidade, módulo de armazenamento e de perda, a reologia permite compreender como as cadeias poliméricas se movimentam, se entrelaçam e relaxam sob esforços externos, sendo essencial para prever o desempenho de polímeros em técnicas de conformação, como extrusão, moldagem e impressão 3D, além de servir como ferramenta sensível de caracterização estrutural (ACIERNO; PATTI, 2023; FERRY, 1980).

As propriedades reológicas, como módulo de armazenamento (G'), de perda (G''), fator de amortecimento ($\tan(\delta)$) e viscosidade em cisalhamento zero (η_0), explicam o peso molecular das cadeias poliméricas, já que são altamente sensíveis à essa característica, podendo ser estudado a partir de resultados de ensaios de cisalhamento oscilatório de pequena amplitude (SAOS). Polímeros com maior massa molar apresentam redes de entrelaçamento mais densas e tempos de relaxação mais longos, o que se reflete em valores mais elevados de G' , em um comportamento mais elástico (redução de $\tan \delta$) e em η_0 significativamente maior seguindo a clássica dependência entre viscosidade no cisalhamento zero (η_0) e massa molecular (M_w), $\eta_0 \propto M_w^{3.4}$ para polímeros lineares acima do peso molecular crítico. Em contrapartida, reduções no peso molecular deslocam o comportamento reológico para uma resposta mais viscosa, caracterizada por aumento relativo de G'' em relação a G' , elevação de $\tan \delta$ e queda expressiva de η_0 (FERRY, 1980; MACOSKO, 1994; MÜNSTEDT, 2021).

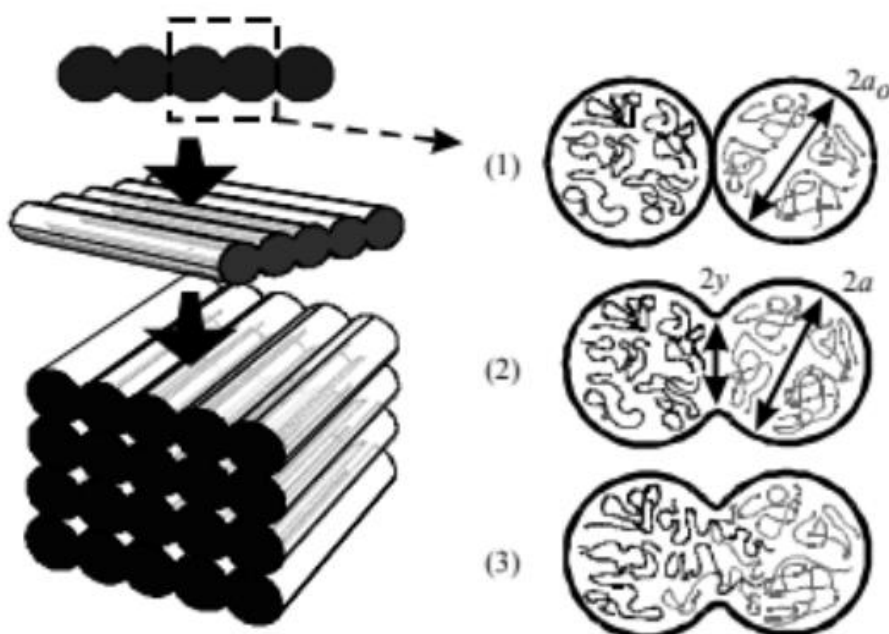
Na impressão 3D por FDM, o comportamento reológico do PLA é determinante em três etapas: (i) a extrusão pelo bico, que demanda viscosidade suficientemente baixa para o fluxo contínuo; (ii) a deposição na mesa, na qual o material deve apresentar comportamento pseudoplástico (*shear thinning*) para evitar instabilidades; e (iii) o estágio pós-deposição, no qual a mobilidade das cadeias na interface entre camadas permite a difusão e entrelaçamento molecular, essenciais para a adesão intercamada (ARRIGO; FRACHE, 2022; DAS et al., 2021).

A relação entre reologia e adesão intercamada explica a anisotropia das peças impressas em PLA, cujas propriedades mecânicas dependem da qualidade da junção intercamadas. Quando a viscosidade é adequada e o tempo de reptação das cadeias permite maior difusão molecular, há melhora significativa na adesão intercamada e consequentemente na resistência e no módulo do material. Caso contrário, forma-se uma interface frágil com menor transferência de carga (THUMSORN et al., 2022).

3.7 ADESÃO INTERCAMADAS

A adesão intercamada é um dos principais fatores que determinam o desempenho mecânico de peças produzidas por FDM com PLA. Seu processo possui três estágios: (i) contato superficial entre os filamentos depositados, (ii) crescimento do “pescoço” (*neck growth*), devido à tensão superficial, e (iii) difusão e reentrelaçamento das cadeias poliméricas através da região de interface das camadas, como ilustrado na Figura 13. A qualidade dessa ligação é limitada pelo rápido resfriamento após a extrusão, que restringe o tempo disponível para mobilidade molecular acima da T_g , resultando em interfaces mais frágeis e em propriedades anisotrópicas, com menor resistência na direção z (COOGAN; KAZMER, 2020; GAO et al., 2021).

Figura 13: Estágios de adesão intercamada



(SUN et al., 2008)

Os parâmetros de impressão exercem papel fundamental nesse processo. A temperatura de bico é um dos fatores mais relevantes: valores mais elevados promovem maior molhabilidade, reduzem a formação de vazios e aumentam a difusão polimérica, o que resulta em melhor adesão intercamada. PANG et al., 2024 observaram como o aumento da temperatura de bico, de 180° para 260°C, impactou nas propriedades das amostras. Houve uma redução de vazios de 86%, demonstrando melhor adesão intercamadas, o que explica o aumento de 40% na resistência à tração, além de a 220°C as amostras terem apresentado melhor precisão dimensional.

A espessura de camada é também um fator de influência direta, uma vez que camadas mais finas aumentam a área de contato entre filamentos, reduzindo a presença de vazios. GAJJAR et al., 2025 relataram que a redução da espessura de camada (de 0,4 para 0,2 mm) pode elevar em até 12% a resistência à tração devido à maior qualidade de fusão entre camadas. Estudaram também a influência da velocidade de impressão e concluíram que houve uma elevação de 7% na resistência de 60 para 40 mm/s, pois velocidades muito altas reduzem o tempo de contato e a transferência de calor, dificultando a difusão adequada das cadeias e enfraquecendo a adesão.

Além disso, estratégias de controle térmico, como o aquecimento auxiliar durante a deposição, mostraram resultados significativos. YU et al., 2021 demonstraram que o uso de aquecimento *in situ* aumentou a resistência à tração do PLA de 38,4 para 63,6 MPa, além de reduzir a anisotropia mecânica de 0,51 para 0,22. Essas conclusões reforçam que prolongar o tempo em que a interface permanece acima da T_g é essencial para favorecer a difusão molecular e, consequentemente, a adesão intercamada.

A adesão intercamada possui diversas maneiras de ser estudada, incluindo a teoria de reptação, de de Gennes, que é relacionada com o grau de adesão do material. A reptação é um modelo de difusão que prevê o comportamento das cadeias poliméricas, como se estivessem aprisionadas em tubos, com movimentações restritas devido ao entrelaçamento com cadeias vizinhas. A reptação, possibilita o estudo sobre o tempo que as cadeias levam para se livrarem do entrelaçamento e relaxarem completamente (DE GENNES, 1971).

Para o cálculo do tempo de reptação, GRINDY et al., 2015 aplicaram a Equação 1, que utiliza a frequência angular referente ao ponto de crossover (f_{cruz}), no qual o módulo de armazenamento se iguala ao módulo de perda, do ensaio de Cisalhamento Oscilatório de Pequenas Amplitudes (SAOS), como segue abaixo.

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

GIUSTI; LUCCHETTA, 2014^a abordam como a relação entre o tempo que o material permanece acima da temperatura da transição vítrea (t_{Tg}) e o tempo de reptação (τ_{rep}) definem a difusão molecular (D) e, por consequência, a adesão intercamada, podendo ser escrita como a Equação 2. Fica evidente que, para um mesmo valor de t_{Tg} quanto menor o tempo de reptação, maior a difusão e a adesão intercamada, melhorando as propriedades mecânicas do material.

$$D = \left(\frac{t_{Tg}}{\tau_{rep}} \right)^{1/4} \quad (2)$$

No campo da impressão 3D, o tempo em que o filamento permanece acima da temperatura de transição vítrea (T_g) é influenciado por alguns fatores, como velocidade de impressão e temperatura de bico, devido ao resfriamento que o material sofre ao ser depositado. Maiores velocidades e menores temperaturas resultam em um resfriamento mais rápido.

3.8 RECOZIMENTO DO PLA

O recozimento é um tratamento térmico capaz de modificar significativamente as propriedades de diferentes materiais, especialmente polímeros e metais, por meio do aumento da cristalinidade e da melhoria na difusão molecular. Em polímeros semicristalinos, como o PLA, esse processo reduz tensões internas, melhora a adesão entre camadas e aumenta a resistência mecânica, já que a reorganização das cadeias promove estruturas cristalinas mais estáveis (BUTT; BHASKAR, 2020). Estudos mostram que, dependendo da temperatura e do tempo aplicados, as propriedades mecânicas, estabilidades térmica e dimensional podem ser melhoradas, reduzindo defeitos típicos da manufatura aditiva e aumentar a vida útil das peças (GHASEMKHANI et al., 2024; KAHYA et al., 2025; KARTAL; KAPTAN, 2023). Assim, o recozimento é considerado uma técnica de pós-processamento de ótimo custo-

benefício para aprimorar o desempenho de materiais em diversas aplicações industriais.

MAIA, 2025 estudou a influência da temperatura (70°, 100° e 130° C) e tempo de recozimento (10, 20 e 30 minutos) nas propriedades mecânicas do PLA e observou que as temperaturas mais elevadas melhoraram a resistência à tração e diminuíram o alongamento, apesar de tempos excessivos possivelmente terem reduzido os ganhos devido à degradação do material. Nas 3 temperaturas houve ganhos expressivos no limite de resistência à tração (LTR) em tempos baixos de tratamento, mas em tempos mais longos, a LTR diminuiu, indicando tendência de degradação do material.

O estudo de BUTT; BHASKAR, 2020 mostrou que o recozimento modificou de forma significativa as propriedades do PLA, principalmente devido ao aumento da cristalinidade. As amostras foram recozidas entre 70 a 90 °C por 1 hora com resfriamento lento em forno, apresentando ganhos de resistência à tração e dureza (com valores cerca de 48 HRL para o PLA recozido, contra os baixos valores no material não tratado), além de reduzir as tensões internas e vazios entre camadas. Próximo a 90°C foi observado melhor desempenho, com aumento na carga de ruptura (em até 21%) e melhora na transmissão ultrassônica, indicando estrutura mais homogênea e estável. Já a 70°C houve melhora com menor intensidade, enquanto em tempos e temperaturas maiores poderiam ter sido causadas deformações dimensionais e degradação de material.

O impacto do recozimento nas propriedades mecânicas foi também investigado por KAHYA et al., 2025 , concluindo que as condições ótimas foram identificadas a 90 C e 120 minutos o PLA, apresentando melhor cristalização (índice de 23,84% contra 9,79% no PLA sem recozimento) e melhor equilíbrio entre resistência mecânica e integridade estrutural. Concluiu também que a temperatura é o parâmetro mais determinante quando comparado com o tempo.

Outro estudo realizado foi o de LLUCH-CEREZO et al., 2021, no qual, além das condições de recozimento, foi estudada a influência da utilização de um molde de pó de alumina nas dimensões das amostras de PLA. Estas foram depositadas entre duas camadas de 1 centímetro de alumina seca, com tamanho de grão de aproximadamente 150 micrômetros, seguido de realização de pressão para evitar

deformação por fluência e para compactação da cerâmica. Para o PLA, concluiu-se que a utilização da alumina em pó no recozimento é uma forma eficaz de evitar a deformação da amostra, melhorando em até aproximadamente 60% a precisão dimensional, quando comparado ao recozimento sem o molde cerâmico.

O PLA é extremamente sensível à presença de água, podendo sofrer degradação hidrolítica, que é acentuada e acelerada pela alta temperatura, por exemplo no recozimento, impactando nas propriedades mecânicas e reológicas do material, devendo-se atentar à presença de umidade nas amostras que passarão por um tratamento térmico a altas temperaturas (AURAS et al., 2010). Tendo isso em vista, uma solução que pode ser aplicada é a secagem pré-recozimento que retira a umidade residual retida na amostra antes de passar pelo tratamento térmico, minimizando a possibilidade de rompimento das cadeias poliméricas.

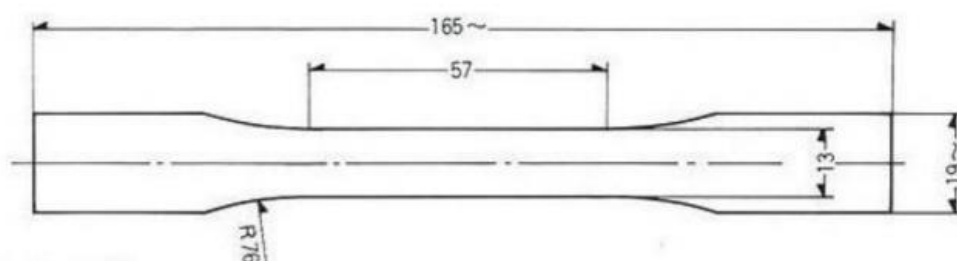
4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAL E PROCESSAMENTO

No presente trabalho, o material de estudo foi um filamento incolor de PLA comercial da 3D LAB, com diâmetro de 1,75 mm.

Para o ensaio de tração, as amostras foram impressas no modelo de corpo de prova Tipo I, segundo a norma ASTM D638 como representado na Figura 14. O modelo foi desenhado em AutoCad online, salvo no formato .stl e utilizado no software Ultimaker Cura para realização do fatiamento, definição dos parâmetros de impressão, como apresentados na Tabela 2, e simulação de impressão. A Tabela 3 apresenta as condições de impressão e recozimento das amostras, sendo que “V” e “T” iniciais representam, respectivamente, velocidade de impressão e temperatura de bico e “H” e “T” finais representam, respectivamente, tempo e temperatura de recozimento. Para as amostras que passaram pelo processo de secagem, “S” foi utilizado em sua sigla.

Figura 14: Corpo de prova de tração Tipo 1



(ASTM D638)

Tabela 2: Parâmetros de impressão

Preenchimento	100%
Modo de preenchimento	Zigzag
Temperatura de impressão (bico)	200 e 220°C
Temperatura da mesa	60°C
Espessura de parede	1,2 mm
Quantidade de paredes	3
Altura de camada	0,2 mm
Velocidades	70 e 50 mm/s

Fonte: autor (2025)

Tabela 3: Diferentes parâmetros de impressão e recozimento utilizados, e a codificação das amostras

Sigla da condição	Tempo de recozimento (h)	Temperatura de recozimento (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)	Temperatura debico (°C)
V70T200	-	-	70	200
V70T200_S_H4T120	4	120	70	200
V70T200_H4T120	4	120	70	200
V70T220	-	-	70	220
V70T220_H2T90	2	90	70	220
V70T220_H4T90	4	90	70	220
V70T220_H2T120	2	120	70	220
V70T220_H4T120	4	120	70	220
V50T220	-	-	50	220
V50T220_H2T90	2	90	50	220
V50T220_H4T90	4	90	50	220
V50T220_H2T120	2	120	50	220
V50T220_H4T120	4	120	50	220

Fonte: autor (2025)

Após a realização do fatiamento, foi simulada a impressão das amostras, sendo realizadas no modo “*one at a time*”, com 6 corpos de prova por vez, utilizando 63 gramas. Para a impressão na velocidade de 70 mm/s foram necessárias 6 horas e na impressão de 50 mm/s, 7h50min. Após a simulação, foi salvo um arquivo no formato .gcode que é compatível com a impressora utilizada.

A máquina de impressão 3D FDM utilizada foi o modelo Creality Ender-3 V3 SE, com as dimensões máximas de impressão de 220x220x250 mm, como apresentado na Figura 15.

Figura 15: Máquina de impressão em funcionamento



Fonte: autor (2025)

Para imprimir os corpos de prova, o filamento de PLA foi colocado para secar na secadora da Filament Dry Box 2.0, da marca Creality, a 50°C por no mínimo 7 horas antes do início do processo. Antes de iniciar a impressão, foi aplicado um spray adesivo sobre a plataforma, a fim de evitar descolamento das amostras, e realizado o nivelamento da impressora. Em seguida, o filamento foi extrudado pelo cabeçote de impressão e pré-aquecido nas temperaturas definidas (200° e 220°C), iniciando-se as impressões com os parâmetros estabelecidos anteriormente. Após a obtenção dos corpos de prova, estes foram retirados da mesa de impressão, enumerados e armazenados em sacos plásticos zip-lock identificados.

4.2 MEDIÇÃO DAS DIMENSÕES

Foi utilizado um paquímetro digital para medir as dimensões das amostras, sendo essas a largura e espessura da seção útil do corpo de prova. Essas medições foram realizadas para analisar o efeito dos parâmetros de impressão e de recozimento na precisão dimensional.

4.3 SECAGEM

Para a realização do recozimento, as amostras impressas a 70 mm/s e com temperatura de bico de 200°C, foram submetidas à secagem por 1 dia a 50°C antes do recozimento. Além disso, a alumina que foi utilizada para o processo também foi secada por 1 dia a 120°C. As demais amostras não foram submetidas ao processo de secagem.

4.4 RECOZIMENTO

O procedimento de recozimento se iniciou com a disposição das amostras em um refratário entre duas camadas de alumina tabular, que foram compactadas manualmente, como ilustra a Figura 16. O recozimento foi realizado em estufa, pré-aquecida na temperatura necessária, a 90 e 120°, durante 2 ou 4 horas.

Figura 16: Compactação das amostras em alumina para recozimento



Fonte: autor (2025)

Após o recozimento, os refratários foram retirados da estufa e resfriados naturalmente até a temperatura ambiente para que as amostras fossem removidas da alumina, lavadas com água e secadas em estufa a 50 °C.

4.5 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Para a análise do comportamento mecânico das amostras em relação a resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade, foram realizados ensaios de tração na máquina de teste universal Kratos, disponível no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, seguindo a norma ASTM D638 – 22. Os ensaios foram realizados com célula de carga de 500kgf, pré-carga de 2% e velocidade de 1 mm/min.

Para a realização do ensaio o equipamento foi montado como ilustrado na Figura e foram utilizadas 5 amostras de cada condição.

Figura 17: Realização do ensaio de tração



Fonte: autor (2025)

Para o cálculo da tensão e deformação, foram utilizadas, respectivamente, as equações 3 e 4:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

σ : tensão

F: força exercida, obtida no ensaio

A: área da seção transversal da amostra

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

ε : deformação

l: variação do comprimento útil do corpo de prova

l₀: comprimento útil inicial do corpo de prova (50 mm)

No ensaio de tração, há uma região da curva tensão-deformação que é constante horizontalmente, não representando as propriedades do PLA, mas sim a acomodação da amostra na garra e, provavelmente, da própria máquina, citada em Test Method Tensile Properties of Plastics 2022. Para realizar a análise dos resultados e obter as propriedades mecânicas, os dados foram tratados, conforme sugerido pela ASTM D638 - 22 com o objetivo de desconsiderar a região anteriormente citada, subtraindo o valor da deformação e da tensão até esta região constante de todos os dados seguintes.

Para o cálculo do módulo de elasticidade (E), foi identificado o valor da tensão a uma deformação de 0,3% e utilizada a Equação 5 abaixo.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Análises ANOVA foram realizadas para estudar a influência dos parâmetros nas propriedades mecânicas do material, na qual se $p < 0,05$, a significância do fator correspondente é determinada. A influência da velocidade de impressão, da temperatura de bico e do recozimento foram estudadas por ANOVA de fator único, sendo que no último foram comparadas as diferentes condições de recozimento com a referência (sem tratamento térmico) em ambas as temperaturas, separadamente. Para análise da influência da velocidade e da temperatura, foram escolhidas as amostras sem recozimento para serem estudadas, sendo, no primeiro caso, selecionadas as amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°C e, no segundo caso, fabricadas a 70 mm/s a 200 e 220°C.

Para analisar a influência do tempo e da temperatura do recozimento, foram realizadas análises ANOVA de fator duplo com repetição para 50 e 70 mm/s, com temperatura de bico de 220°C, separadamente, permitindo compreender o efeito desses dois fatores em diferentes velocidades.

Ademais, realizou-se análise ANOVA para verificar a influência da secagem pré-recozimento nas propriedades mecânicas das amostras, utilizando os resultados das amostras impressas a 70 mm/s e 200°C.

4.6 ENSAIO DE CISALHAMENTO OSCILATÓRIO DE PEQUENAS AMPLITUDES (SAOS)

Para estudar como as propriedades reológicas das amostras, como módulo de armazenamento (G'), de perda (G''), viscosidade complexa (η^*), viscosidade no cisalhamento zero (η_0) e fator de amortecimento ($\tan(\delta)$), são influenciados pelas condições de impressão e recozimento, foi realizado o ensaio de cisalhamento oscilatório de pequenas amplitudes (SAOS) no regime viscoelástico linear com utilização de placas paralelas, no reômetro Anton Paar do Laboratório de Polímero PolLab do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da Escola Politécnica.

Para a realização deste ensaio, foram retiradas pequenas amostras dos corpos de prova, da região não tracionada, e submetidas ao ensaio de SAOS a uma tensão de 30 Pa e varredura de frequências variando de 300 a 1 rad/s, a 190°C.

O cálculo da viscosidade de cisalhamento zero foi definida pelo modelo de Carreau, apresentado na Equação 6.

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

y: viscosidade em função da taxa de cisalhamento,

y_0 : 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.

Para o cálculo de $\tan(\delta)$ foi utilizada a Equação 7, que descreve o fator de amortecimento e, para o tempo de reptação, foi utilizada a Equação 1.

$$\tan(\delta) = \tan\left(\frac{G''}{G'}\right) \quad (7)$$

$\tan(\delta)$: fator de amortecimento

G'' : módulo de perda

G' : módulo de armazenamento

4.7 FRATOLOGRAFIA

Para a análise da microestrutura da superfície de fratura, as amostras nessa região foram quebradas com auxílio de um alicate, e dispostas em um porta amostra como ilustrado na Figura 18. As análises foram realizadas utilizando uma lupa estereoscópica no aumento de 6,5X, no Laboratório de Metalografia, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da EPUSP.

Figura 18: Corte realizado para análise de fratura



Fonte: autor (2025)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados e, para um melhor entendimento, as discussões serão abordadas com relação aos efeitos de velocidade, temperatura, padrão de preenchimento e recozimento.

5.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

A variação dimensional pôde ser avaliada a partir do valor da seção transversal da parte útil do corpo de prova, sendo os valores médios para cada condição apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Variação dimensional da seção transversal das amostras

Condição	Área inicial (mm ²)	Área final (mm ²)	Variação (%)
V70T200	44,06	-	-
V70T200_S_H4T120	44,76	42,48	-5,10%
V70T200_H4T120	44,24	42,22	-4,57%
V70T220	41,49	-	-
V70T220_H2T90	44,27	42,02	-5,09%
V70T220_H4T90	43,93	42,68	-2,84%
V70T220_H2T120	44,30	42,03	-5,13%
V70T220_H4T120	43,64	41,90	-3,98%
V50T220	42,09	-	-
V50T220_H2T90	44,17	42,74	-3,24%
V50T220_H4T90	43,20	41,95	-2,91%
V50T220_H2T120	43,13	42,15	-2,26%
V50T220_H4T120	43,99	42,26	-3,92%

É notável que o tratamento térmico impactou na dimensão dos corpos de prova, uma vez que as amostras tratadas termicamente apresentam dimensões menores do que as não tratadas. Além disso, é possível observar que, comparando as velocidades de impressão, as amostras impressas a 50 mm/s, em geral, apresentaram variação menor do que a 70 mm/s. Já em relação à temperatura de bico, as amostras impressas a 70 mm/s e 220°C tratadas termicamente por 4 horas a 120°C apresentaram variação menor do que as impressas a 200°C nas mesmas condições de recozimento. As observações realizadas provavelmente se devem ao fato de que em velocidades maiores e temperaturas de bico menores, as camadas tiveram menos tempo relaxarem tensão, resultando em mais tensão residual que são liberadas no recozimento, resultando em maior variação dimensional.

BUTT; BHASKAR, 2020 analisaram o efeito do recozimento sobre a precisão dimensional e concluíram que o tratamento térmico exerce influência nos 3 eixos, sendo que em maiores temperaturas (90°C), o eixo X e Y tendem a diminuir e o Z aumentar.

5.2 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Com o objetivo de estudar a influência da velocidade de impressão, temperatura de bico e condições de recozimento, foram analisadas suas significâncias sobre as propriedades mecânicas obtidas por ensaio de tração.

A Tabela 5 apresenta as médias e desvios de tensão máxima, alongamento máximo e módulo de elasticidade obtidos durante o ensaio de tração para cada condição de processamento utilizada.

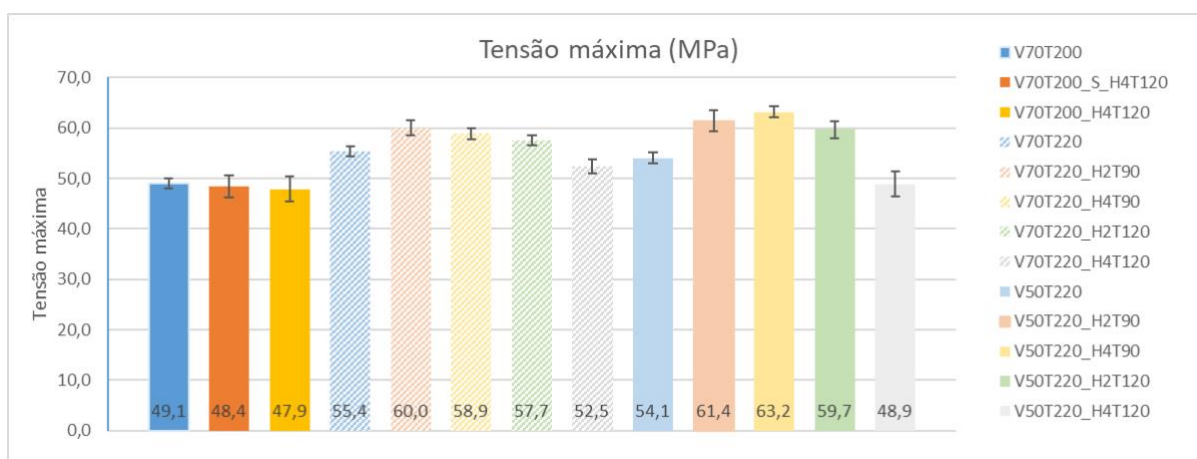
Tabela 5: Resultados dos ensaios de tração

Condição	Tensão máxima (Mpa)	Alongamento máximo (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
V70T200	49,1 ± 1,1	11,7% ± 0,4	234 ± 10
V70T200_S_H4T120	48,4 ± 2,1	11,3% ± 0,7	198 ± 27
V70T200_H4T120	47,9 ± 2,5	10,2% ± 0,6	236 ± 36
V70T220	55,4 ± 1,0	13,9% ± 0,7	268 ± 21
V70T220_H2T90	60,0 ± 1,5	13,8% ± 0,4	229 ± 33
V70T220_H4T90	58,9 ± 1,1	12,5% ± 0,5	253 ± 21
V70T220_H2T120	57,7 ± 1,0	11,5% ± 0,3	272 ± 20
V70T220_H4T120	52,5 ± 1,4	10,5% ± 0,4	236 ± 26
V50T220	54,1 ± 1,0	13,7% ± 0,7	268 ± 15
V50T220_H2T90	61,4 ± 2,1	12,9% ± 0,5	251 ± 31
V50T220_H4T90	63,2 ± 1,1	12,7% ± 0,5	241 ± 42
V50T220_H2T120	59,7 ± 1,8	12,0% ± 0,4	260 ± 22
V50T220_H4T120	48,9 ± 2,5	9,3% ± 0,4	254 ± 32

Fonte: autor (2025)

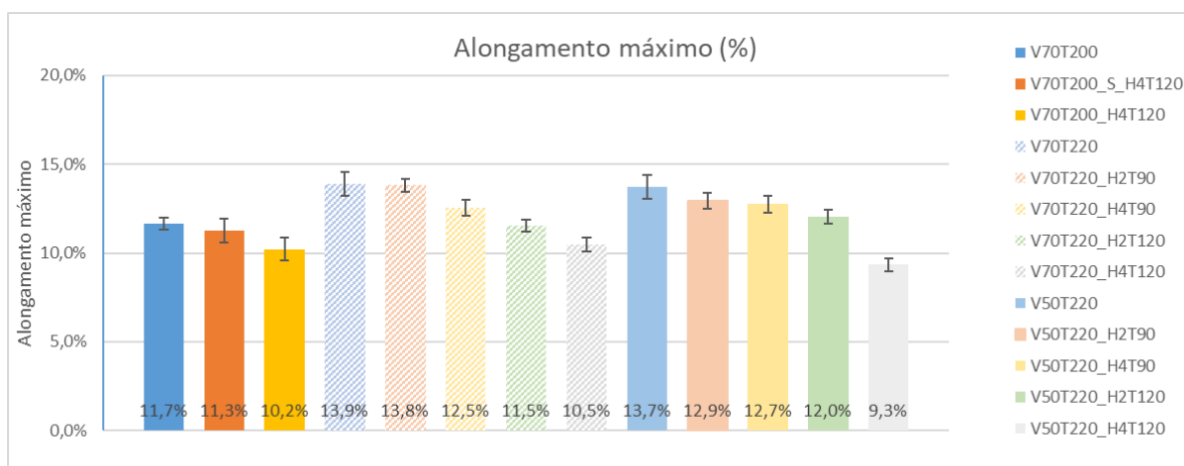
As Figuras 19 a 21 apresentam os resultados em formato de gráfico, respectivamente de tensão máxima, alongamento máximo e módulo de elasticidade.

Figura 19: Tensão máxima em MPa e seus desvios por condição de trabalho



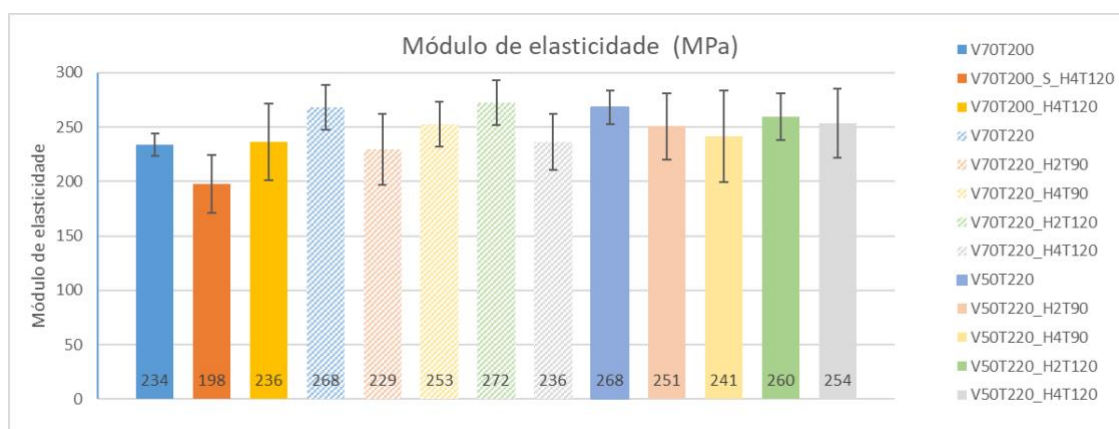
Fonte: autor (2025)

Figura 20: Alongamento máximo em % e seus desvios por condição de trabalho



Fonte: autor (2025)

Figura 21: Módulo de elasticidade em MPa e seus desvios por condição de trabalho



Fonte: autor (2025)

5.2.1 Efeito da velocidade

Para analisar o efeito da velocidade de impressão (50 e 70 mm/s) sobre as propriedades mecânicas, foi realizada uma análise estatística utilizando ANOVA de fator único, como segue na Tabela 6, utilizando amostras impressas com temperatura de bico de 220°C e não recozidas.

Tabela 6: Resultados ANOVA para análise da influência da velocidade de impressão a 220°C

Propriedade	p-valor	Significativo?
Tensão máxima	0,066	Não
Alongamento máximo	0,755	Não
Módulo de elasticidade	0,995	Não

Fonte: autor (2025)

A análise acima permitiu compreender que a variação da velocidade de impressão não influencia as propriedades mecânicas de tração. Isso significa que os valores das propriedades são similares, estatisticamente, entre as amostras analisadas dentro da relevância proposta de 0,05. Em dados brutos, o presente trabalho concluiu que a variação de velocidade de 50 mm/s para 70 mm/s não apresentou impacto significativo sobre as propriedades.

A influência da velocidade de impressão foi também estudada por CHACÓN et al., 2017 em 3 diferentes velocidades (20, 50 e 80 mm/s) e concluiu que, considerando a espessura de camada de 0,18mm e orientação de construção como plana, a resposta à resistência a tração em maiores velocidades foi inferior. Corroborando com o estudo anterior, KHOSRAVANI et al., 2022 também concluiu que o aumento da velocidade de impressão diminui a resistência à tração, além de diminuir também o módulo de elasticidade, estudando amostras impressas a 20 e 80 mm/s.

Em relação à análise ANOVA, EKŞİ; KARAKAYA, 2025 concluíram que, assim como no presente trabalho, a variação da velocidade de impressão não teve tanto impacto na tensão máxima.

Para investigar o efeito da velocidade de impressão no alongamento máximo, NAVEED; ANWAR, 2024 demonstraram que os valores se apresentaram maiores para menores velocidades, sendo em torno de 6,8% para 35 mm/s e 6,4% para 65 mm/s. Além disso, a análise ANOVA mostrou que o fator velocidade de impressão é significativo para a propriedade de tensão máxima das amostras estudadas.

Análises ANOVA foram realizadas por KECHAGIAS et al., 2023 para estudar a significância da velocidade de impressão sobre as propriedades mecânicas e concluiu que são altamente afetadas pela velocidade, apresentando significância de 17,1% para tensão máxima, 11,5% para módulo e 17,9% para alongamento máximo.

Os resultados obtidos no presente trabalho são compatíveis com alguns dados apresentados da literatura, uma vez que as propriedades mecânicas podem ter maior influência com a variação de outros parâmetros mais significativos, como, padrão e percentual de preenchimento, altura de camada e temperatura de bico, além de que a variação de apenas 20 mm/s possa não ter tido grande impacto nos resultados de propriedades mecânicas. Além disso, os valores de alongamento máximo e módulo de elasticidade obtidos no presente trabalho se apresentaram, respectivamente, maiores e menores do que a literatura. Isso se deve à não medição precisa das propriedades, uma vez que não foi utilizado extensômetro neste trabalho.

5.2.2 Efeito da temperatura

Para analisar o efeito da temperatura de bico (200° e 220° C) sobre as propriedades mecânicas, foi realizada uma análise estatística utilizando ANOVA de fator único, como segue na Tabela 7, utilizando amostras impressas a 70 mm/s e não recozidas.

Tabela 7: Resultados ANOVA para análise da influência da temperatura de bico a 70 mm/s

Propriedade	p-valor	Significativo?
Tensão máxima	0,00001	Sim
Alongamento máximo	0,0002	Sim
Módulo de elasticidade	0,01	Sim

Fonte: autor (2025)

Com base na análise apresentada acima, todas as propriedades mecânicas são influenciadas pela temperatura de bico utilizada no processo de impressão, uma vez que p-valor é menor do que a relevância proposta de 0,05. De acordo com a Tabela 5, as amostras impressas a 220°C e 70 mm/s apresentaram valores maiores do que as de 200°C para as três propriedades citadas acima, todas sem tratamento térmico.

Corroborando com os resultados apresentados acima, GAJJAR et al., 2025 também concluiu que, em temperaturas menores (200°C), a tensão máxima e módulo de elasticidade se apresentaram inferiores a temperaturas maiores (220°C).

Em relação ao alongamento máximo, AMBADE et al., 2025 estudou que o aumento de 200°C para 210°C melhora os valores obtidos, mas que a 220°C não há ganhos, podendo até piorar os resultados. Em contrapartida, BEHZADNASAB et al., 2020 observou que para temperaturas de bico mais altas (240°C) o alongamento máximo ainda teve valor superior que as demais temperaturas.

KECHAGIAS et al., 2023 realizou análises ANOVA sobre a influência da temperatura de bico nas propriedades mecânicas e observou que para tensão máxima, alongamento máximo e módulo de elasticidade, esse parâmetro era altamente significativo, com contribuições de, respectivamente, 25,2%, 8,2% e 23,2%.

Apesar de os resultados do presente trabalho estarem de acordo com as informações encontradas na literatura, a combinação dos diversos parâmetros de impressão pode variar as conclusões de cada trabalho, assim como visto por AMBADE et al., 2025 e BEHZADNASAB et al., 2020.

5.2.3 Efeito da secagem

Para analisar o efeito da secagem sobre as propriedades mecânicas, foi realizada uma análise ANOVA de fator único, comparando as amostras que foram submetidas à secagem antes do recozimento com as que não foram. A Tabela 8 apresenta os resultados da análise para amostras impressas a 70 mm/s, temperatura de bico de 200°C e recozimento de 4 horas a 120°C.

Tabela 8: Resultados ANOVA para análise da influência da secagem em amostras impressas a 70 mm/s, temperatura de bico 200° e recozimento de 4 horas a 120°C

Propriedade	p-valor	Significativo?
Tensão máxima	0,8	Não
Alongamento máximo	0,04	Sim
Módulo de elasticidade	0,09	Não

Fonte: autor (2025)

Com a análise ANOVA apresentada acima, é possível constatar que a secagem não influenciou a tensão máxima e módulo de elasticidade, apenas o alongamento máximo, apresentando valores superiores para as amostras que passaram por secagem.

5.2.4 Efeito do recozimento

Para analisar o efeito do recozimento sobre as propriedades mecânicas, foi realizada uma análise ANOVA de fator único, comparando as amostras de todas as condições de recozimento utilizadas, inclusive as sem tratamento térmico. As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados da análise para, respectivamente, velocidade 50 e 70 mm/s, ambas a temperatura de bico de 220°C.

Tabela 9: Resultados ANOVA para análise da influência do recozimento a 50 mm/s e temperatura de bico 220°C

Propriedade	p-valor	Significativo?
Tensão máxima	0,0000000002	Sim
Alongamento máximo	0,00000000004	Sim
Módulo de elasticidade	0,7	Não

Fonte: autor (2025)

Conforme a Tabela 9, a influência do recozimento sobre as propriedades mecânicas se apresentou significativa apenas para a tensão máxima e alongamento máximo, apresentando maior valores da tensão máxima para amostras impressas a 50 mm/s e 220°C recozidas por 4 horas a 120°C quando comparadas sem recozimento, e menor valor do alongamento máximo nas amostras recozidas por 2 horas a 120°C. A condição de recozimento por 4 horas a 120°C apresenta valores de tensão máxima e alongamento máximo inferiores às demais, indicando a ocorrência de degradação das cadeias poliméricas.

Tabela 10: Resultados ANOVA para análise da influência do recozimento a 70 mm/s e temperatura de bico 220°C

Propriedade	p-valor	Significativo?
Tensão máxima	0,00000002	Sim
Alongamento máximo	0,0000000003	Sim
Módulo de elasticidade	0,04	Sim

Fonte: autor (2025)

A análise ANOVA apresentada na Tabela 10, permite compreender que, para as três propriedades mecânicas medidas, o recozimento impactou significativamente essas propriedades. Para a tensão máxima, o recozimento por 2 horas a 120°C apresentou maior valor enquanto o tratamento de 4 horas a 120°C apresentou menor e inferior à condição sem tratamento. Para alongamento máximo, todas as condições apresentaram valores inferiores em relação ao sem tratamento, com recozimento a de 2 horas a 90°C apresentando os maiores entre todas as condições de tratamento.

Já para o módulo, o recozimento de 2 horas a 120°C apresentou maior valor, enquanto de 2 horas a 90°C apresentou menor.

Vale ressaltar também que, apesar de as três propriedades serem impactadas pelo processo de recozimento, a tensão máxima e alongamento máximo são as propriedades com maior evidência estatística de alteração, uma vez que apresentaram p-valores muito inferiores em relação ao do módulo de elasticidade.

Para analisar o efeito do tempo e temperatura de recozimento sobre as propriedades mecânicas, foi realizada uma análise estatística utilizando ANOVA de fator duplo para cada velocidade, como segue nas Tabela 11 e 12.

Tabela 11: Resultados ANOVA para análise da influência do tempo e temperatura de recozimento a 50 mm/s e temperatura de bico 220°C

Propriedade	Tempo	p-valor	
		Temperatura	t e T
Tensão máxima	0,00008	0,00000007	0,000002
Alongamento máximo	0,0000007	0,000000003	0,000004
Módulo de elasticidade	0,6	0,5	0,92

Fonte: autor (2025)

Analizando a Tabela 11, é notável que para tensão máxima e alongamento máximo, nas amostras impressas a velocidade de 50 mm/s, o tempo, a temperatura e a interação entre ambos exercem influência, enquanto para o módulo de elasticidade nenhum fator é significativo. Para as duas primeiras propriedades a temperatura de recozimento é o mais influente, com p-valor muito inferior aos demais.

Tabela 12: Resultados ANOVA para análise da influência do tempo e temperatura de recozimento a 70 mm/s e temperatura de bico 220°C

Propriedade	Tempo	p-valor	
		Temperatura	t e T
Tensão máxima	0,00003	0,0000006	0,002
Alongamento máximo	0,000005	0,000000001	0,6
Módulo de elasticidade	0,6	0,3	0,02

Fonte: autor (2025)

Com a análise apresentada na Tabela 12, é possível compreender que para, as amostras impressas a velocidade de 70 mm/s, a tensão máxima o tempo, temperatura e interação entre ambos são significantes e que a temperatura é a mais influente. Para alongamento máximo, o tempo e a temperatura individualmente exercem influência sobre a propriedade, mas a interação entre ambos é desprezível.

Para o módulo de elasticidade, apesar de individualmente o tempo e a temperatura serem desprezíveis, a interação de ambos é significativa.

Corroborando com os resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10, ZISOPOL; PORTOACĂ; RAMADAN, 2022 estudaram o efeito do recozimento e da porcentagem de preenchimento sobre as propriedades mecânicas e observaram que, para todos os preenchimentos testados, as amostras recozidas apresentaram maiores tensões máxima e menores alongamentos máximos do que as amostras sem tratamento térmico. Para as amostras com 100% de preenchimento, as amostras não recozidas apresentaram valor de 33,51 MPa para tensão máxima e 5,64% de alongamento máximo, enquanto para as tratadas termicamente foram, respectivamente, 43,91 MPa e 4,85%. Isso se deveu à reorganização das cadeias, aumentando a cristalinidade do material com o tratamento térmico e melhorando a adesão intercamadas. Vale ressaltar que os valores de alongamento máximo obtidos neste presente trabalho foram maiores do que os encontrados na literatura, que também variam bastante entre si.

O recozimento realizado por 4 horas a 120°C no presente trabalho resultou em valores de tensão máxima inferiores às demais, assim como concluiu LUNA et al., 2021 em seu trabalho, no qual as amostras recozidas a 100°C apresentaram valores menores do que nas outras condições de tratamento térmico. Os corpos de prova recozidos a 90°C apresentaram melhor desempenho do material para o módulo de elasticidade e maior valor de cristalinidade (61,5%), sendo ambos diminuídos com o aumento da temperatura de recozimento.

STOJKOVIĆ et al., 2023 também observaram que com tratamento térmico em 3 diferentes condições de altura de camada, tempo e temperatura, houve um aumento no valor do módulo de elasticidade quando comparado à sua referência. Para a condição de 0,1 mm de altura de camada, 90 minutos de recozimento a 100°C, obteve-se um aumento de 12,73% no valor do módulo de elasticidade.

Corroborando com os resultados apresentados nas Tabelas 11 e 12, KAHYA et al., 2025 concluiu que, com base em análises ANOVA, a temperatura de recozimento é mais significativa que o tempo, com uma contribuição de aproximadamente 82% na tensão máxima. Para o módulo de elasticidade, JANMANEE; RATCHAPAKDEE, 2025 observaram que, apesar de não ter sido

realizada análise ANOVA, a influência individual do tempo e temperatura de recozimento é menor do que a da interação entre ambos. Em relação ao alongamento máximo, não foram encontrados estudos que tivessem realizado análises ANOVA para investigar a significância das diferentes condições de tratamento térmico na propriedade.

É notável que a velocidade de impressão não influenciou no desempenho mecânico das amostras, diferentemente da temperatura de bico, que exerceu grande influência estatística, com a impressão a 220°C apresentando valores mais elevados para as três propriedades mecânicas analisadas, indicando melhor adesão intercamada. A secagem foi significativa apenas para o alongamento máximo, não influenciando as demais propriedades. O recozimento, de forma geral, exerceu influência estatísticas nos valores das três propriedades mecânicas, sendo a temperatura o fator com maior significância nas análises realizadas. Tratamentos térmicos realizados a altas temperaturas (120°C) apresentaram os valores mais baixos, sugerindo degradação das cadeias, que impacta negativamente na adesão intercamada.

5.3 CISALHAMENTO OSCILATÓRIO DE PEQUENAS AMPLITUDES (SAOS)

Ensaio SAOS permitiram análises das propriedades reológicas como viscosidade complexa (η^*), módulo de armazenamento (G'), de perda (G''), além de estudos sobre resultados do ponto de *crossover*, viscosidade no cisalhamento zero e tempo de reptação (τ_{rep}), apresentados na Tabela 13.

Os campos sinalizados com asterisco (*) indicam que não foi possível obter as propriedades a partir das análises reológicas da amostra. Já as sinalizações com “-” indicam que, para as amostras das respectivas condições, não houve *crossover* na faixa de frequência estudada.

Tabela 13: Resultados de algumas propriedades reológicas no ensaio SAOS

Condição	η_0 (Pa.s)	Módulo (Pa)	Crossover	
			Freq (rad/s)	τ_{rep}
V70T200	2004,0	98249	171,7	0,005823
V70T200_S_H4T120	1274,1	-	-	-
V70T200_H4T120	865,2	-	-	-
V70T220	1493,5	97762	214,7	0,004658
V70T220_H2T90	1686,9	112930	244,4	0,004091
V70T220_H4T90	1584,3	85832	186,0	0,005375
V70T220_H2T120	*	-	-	-
V70T220_H4T120	*	-	-	-
V50T220	1594,7	89769	189,0	0,005288
V50T220_H2T90	1559,1	85338	190,4	0,005253
V50T220_H4T90	1672,9	104380	218,3	0,00458
V50T220_H2T120	1371,0	-	-	-
V50T220_H4T120	731,7	-	-	-

Fonte: autor (2025)

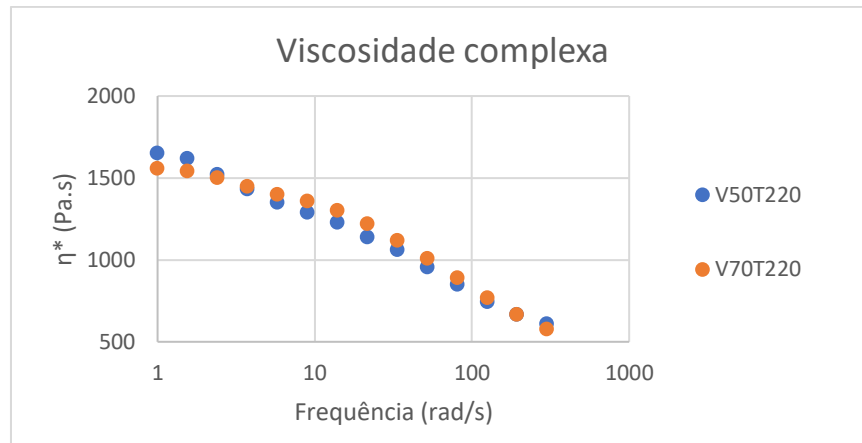
Pode ser visto que a ausência do crossover ocorreu apenas para as amostras recozidas a 120°C, independente do tempo de recozimento, sugerindo que o tratamento térmico mais severo pode ter promovido alguma alteração na estrutura molecular do PLA. Uma hipótese plausível é a redução da massa molar por hidrólise em presença de umidade residual durante o recozimento, o que diminuiria a densidade de entrelaçamentos e deslocaria o relaxamento terminal para fora da faixa de frequência analisada, impedindo o cruzamento entre G' e G'' . Essa interpretação é compatível com os resultados de tração, que mostraram redução de ductilidade nas mesmas condições, indicando que o recozimento a 120 °C pode ter afetado simultaneamente o comportamento viscoelástico no fundido e o desempenho mecânico das amostras.

Com base nos resultados obtidos, serão discutidos os efeitos que velocidade de impressão, temperatura de bico e recozimento têm sobre as propriedades reológicas.

5.3.1 Efeito da velocidade

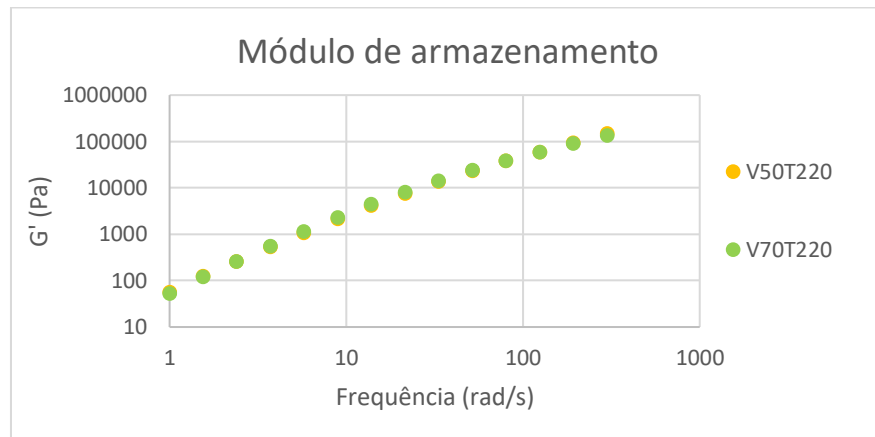
Para analisar a influência da velocidade de impressão sobre as propriedades reológicas, foram plotados gráficos de viscosidade complexa (η^*), módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G''), como segue nas Figuras 22 a 24, comparando os resultados das impressões a 220°C, 50 e 70 mm/s, sem tratamento térmico.

Figura 22: Viscosidade complexa para amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°



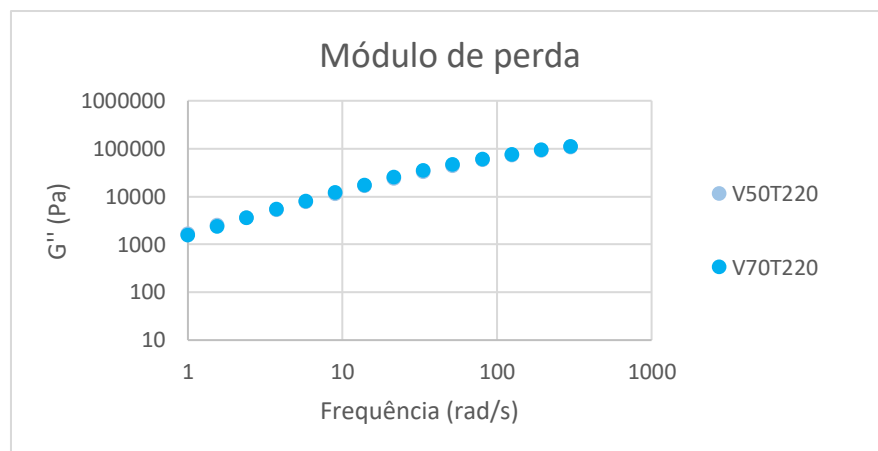
Fonte: autor (2025)

Figura 23: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°



Fonte: autor (2025)

Figura 24: Módulo de perda para amostras impressas a 50 e 70 mm/s a 220°



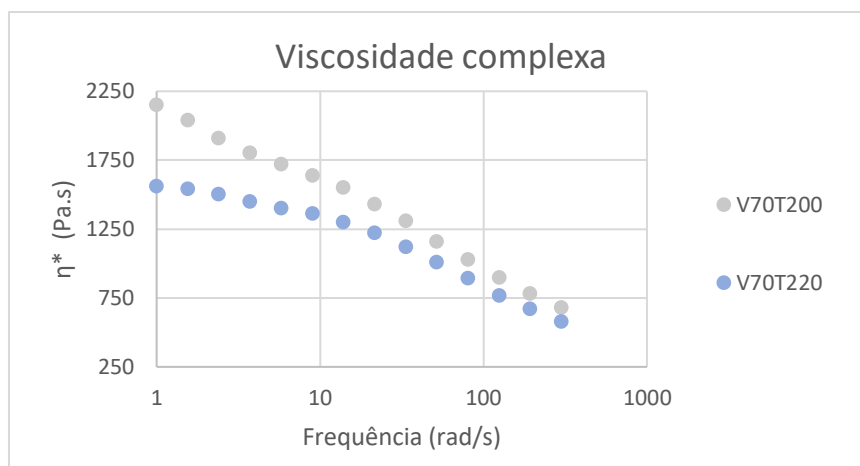
Fonte: autor (2025)

Analisando as Figuras 22 a 24, é notável que a variação da velocidade de impressão não teve influência significativa sobre as propriedades reológicas apresentadas, assim como para os dados apresentados na Tabela 13. Isso sugere que possivelmente a taxa de cisalhamento do PLA no bico extrusor da impressora para essas duas velocidades possivelmente não apresenta diferenças significativas. Esse estudo será realizado em projetos futuros.

5.3.2 Efeito da temperatura

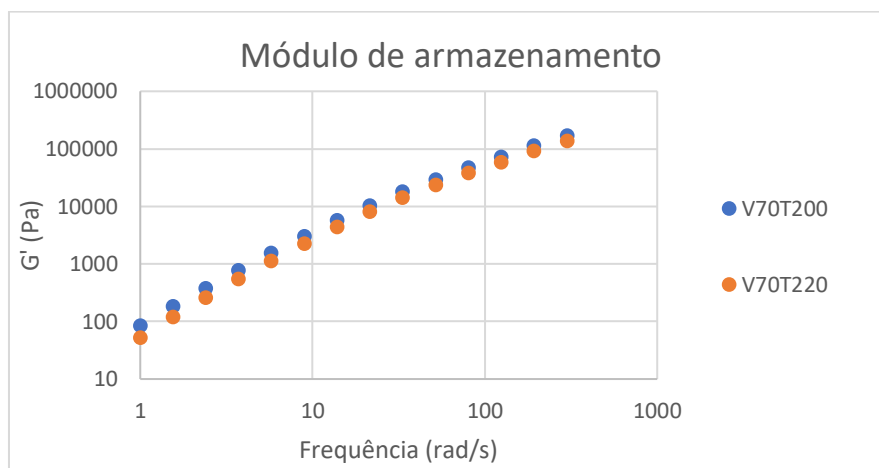
Para analisar a influência da temperatura de bico sobre as propriedades reológicas, foram plotados gráficos de viscosidade complexa (η^*), módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G''), como segue nas Figuras 25 a 27.

Figura 25: Viscosidade complexa para amostras impressas a 70 mm/s a 200 e 220°C



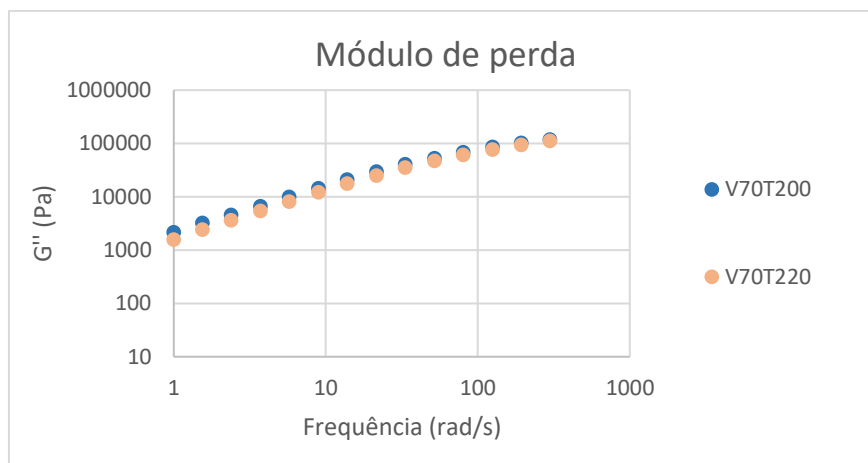
Fonte: autor (2025)

Figura 26: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 70 mm/s a 200 e 220°C



Fonte: autor (2025)

Figura 27: Módulo de perda para amostras impressas a 70 mm/s a 200 e 220°C



Fonte: autor (2025)

A análise das Figuras 25 a 27 mostram que a variação da temperatura do bico não resultou em alterações significativas nos módulos viscoelásticos, porém teve impacto evidente na viscosidade em baixas frequências. As amostras impressas a 200°C apresentaram viscosidade de cisalhamento zero (η_0) maior do que aquelas processadas a 220 °C, indicando menor degradação e, conseqüentemente, maior massa molar efetiva.

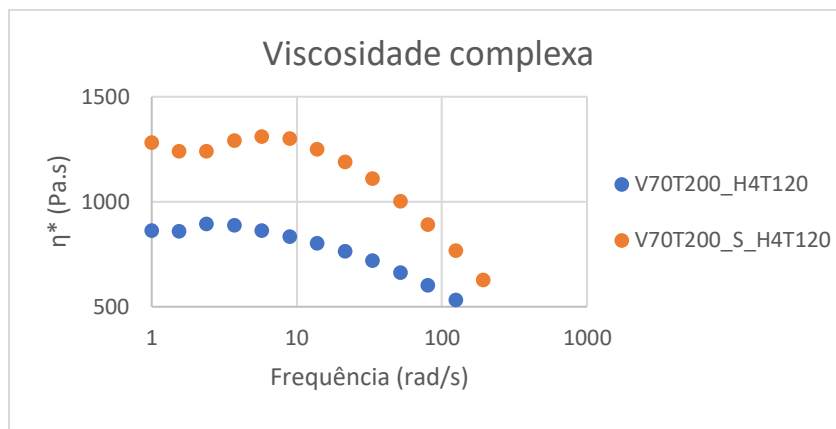
Os valores de módulo no ponto de crossover permaneceram praticamente constantes entre as duas condições, enquanto a frequência de crossover apresentou diferença relevante. A impressão a 70 mm/s e 200°C exibiu frequência mais elevada, sugerindo que as cadeias poliméricas relaxam mais rapidamente, o que é compatível com tempos de reptação menores e com a redução da viscosidade observada.

Esses resultados estão de acordo com o comportamento esperado para o PLA, material sensível a variações de temperatura de processamento. ELHATTAB; BHADURI; SIKDER, 2022 também relataram reduções na viscosidade complexa ao longo de toda a faixa de frequências para amostras impressas a temperaturas mais altas (220 °C), reforçando que o aumento da temperatura do bico acelera processos de degradação e diminui a resistência ao fluxo no estado fundido.

5.3.3 Efeito da secagem

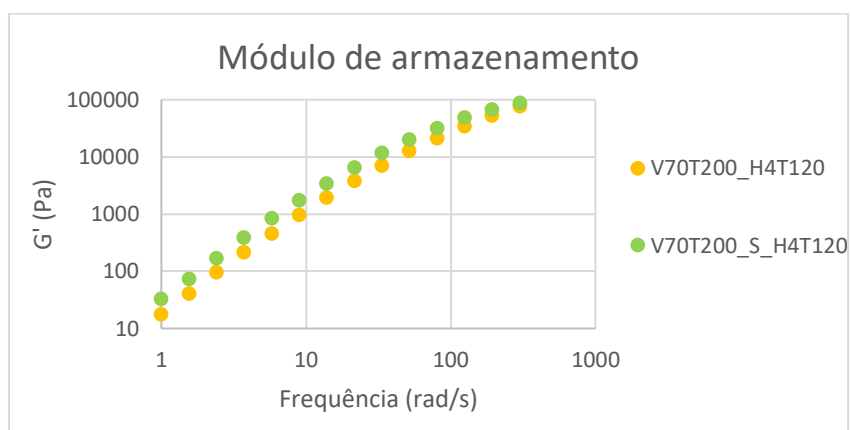
Para analisar a influência da secagem pré-recozimento sobre as propriedades reológicas, foram plotados gráficos de viscosidade complexa (η^*), módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G''), como segue nas Figuras 28 a 31.

Figura 28: Viscosidade complexa para amostras impressas a 70 mm/s e a 200°C, recozidas, com e sem secagem



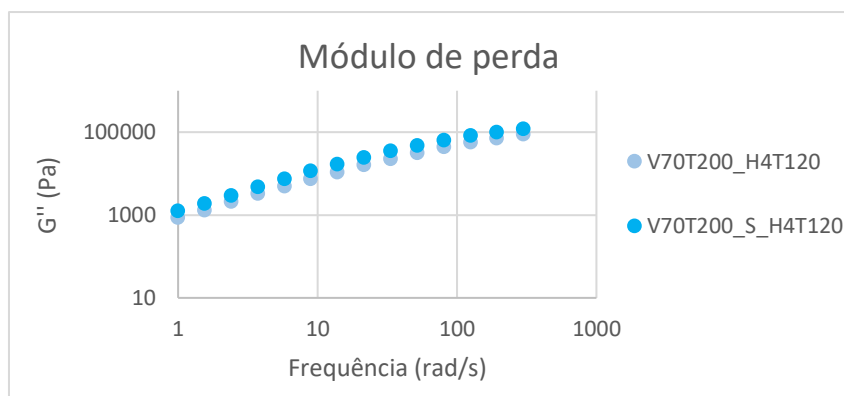
Fonte: autor (2025)

Figura 29: Módulo de armazenamento para amostras impressas a 70 mm/s e a 200°C, recozidas, com e sem secagem



Fonte: autor (2025)

Figura 30: Módulo de perda para amostras impressas a 70 mm/s e a 200°C, recozidas, com e sem secagem



Fonte: autor (2025)

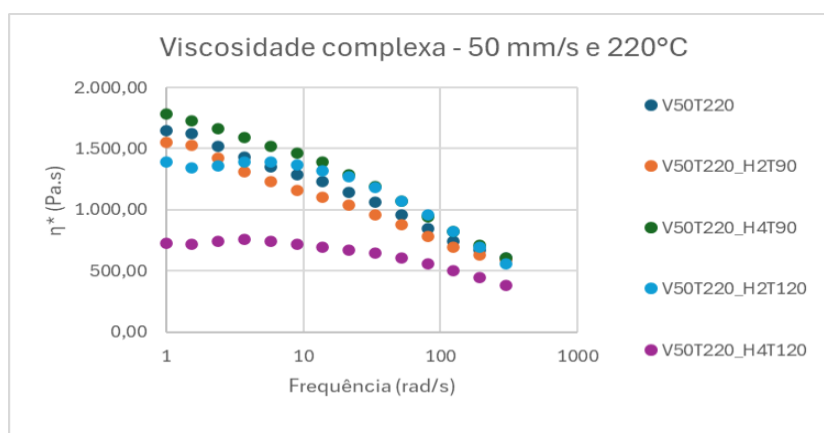
A análise das Figuras 28 a 30 mostram que a secagem não resultou em alterações significativas nos módulos viscoelásticos, porém teve impacto evidente na viscosidade em baixas frequências. As amostras que passaram pelo processo de secagem apresentaram viscosidade de cisalhamento zero (η_0) e viscosidade complexa (η^*) maior do que as não secas, indicando menor degradação hidrolítica e, consequentemente, maior massa molar efetiva. Isso se deve ao fato de que a secagem permitiu com que as amostras passassem pelo recozimento com a menor quantidade de umidade possível, diminuindo a ocorrência de hidrólise das cadeias poliméricas pelas altas condições de temperatura e tempo.

Essas análises corroboram com os dados apresentados na Tabela 5, uma vez que as amostras que passaram pela secagem apresentaram maior alongamento na ruptura, indicando que as cadeias estavam mais entrelaçadas entre si quando comparadas às cadeias da condição sem secagem, devido à menor ocorrência de cisão.

5.3.4 Efeito do recozimento

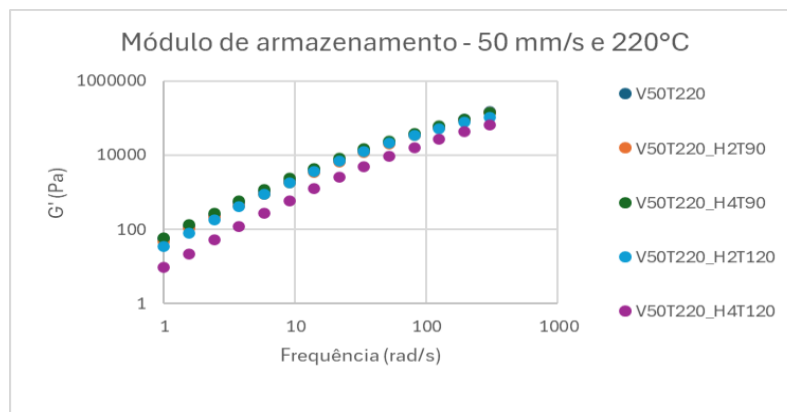
Para analisar a influência do recozimento sobre as propriedades reológicas, foram plotados gráficos de viscosidade complexa (η^*), módulo de armazenamento (G'), módulo de perda (G'') e fator de amortecimento ($\tan(\delta)$), como segue nas Figuras 31 a 38. As Figuras 31 a 34 dizem respeito às amostras impressas a 50 mm/s a 220°C e as Figuras 35 a 38 são referentes às impressas a 70 mm/s a 220°C.

Figura 31: Viscosidade complexa das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



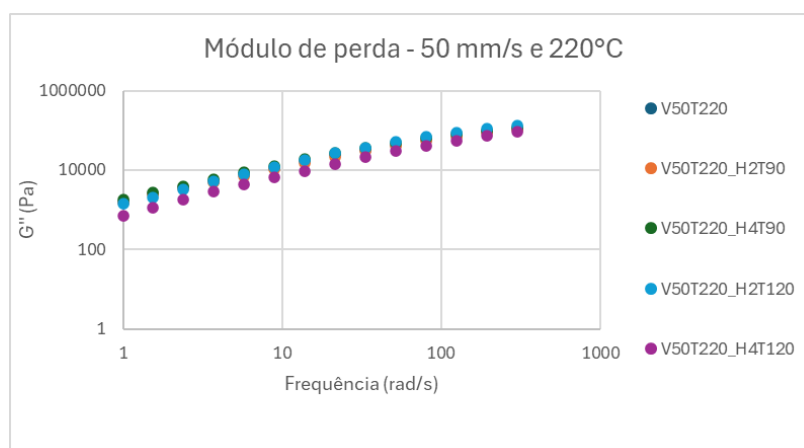
Fonte: autor (2025)

Figura 32: Módulo de armazenamento das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



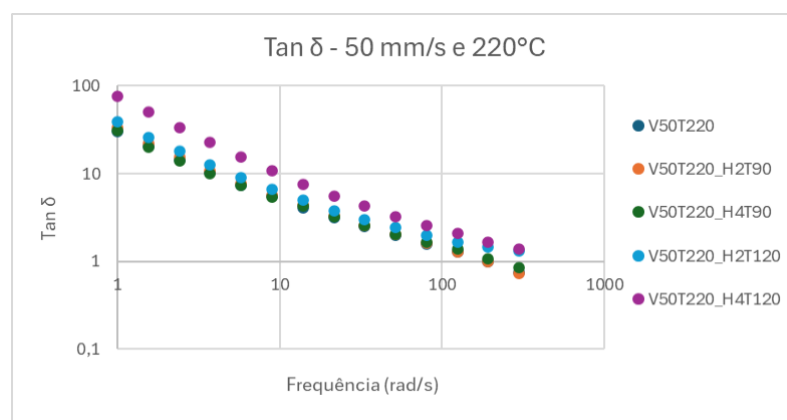
Fonte: autor (2025)

Figura 33: Módulo de perda das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



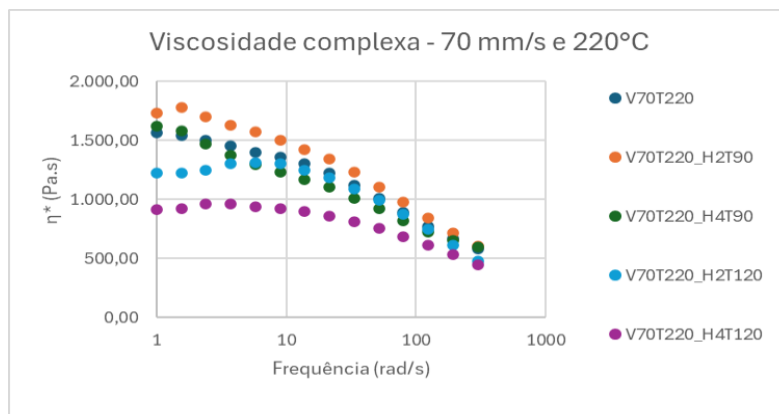
Fonte: autor (2025)

Figura 34: Tangente de delta das amostras impressas a 50 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



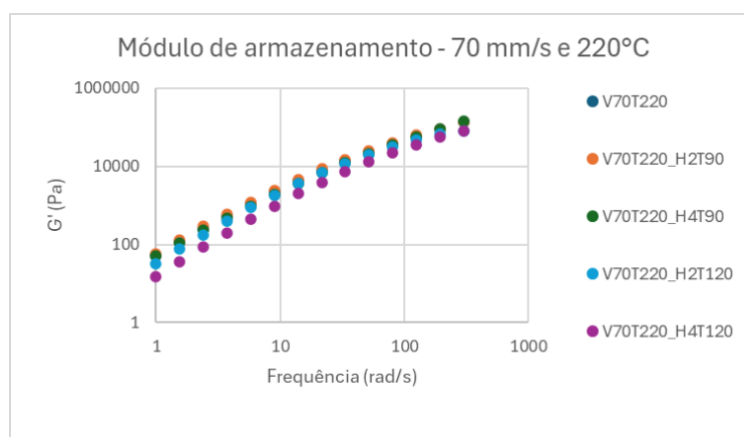
Fonte: autor (2025)

Figura 35: Viscosidade complexa das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



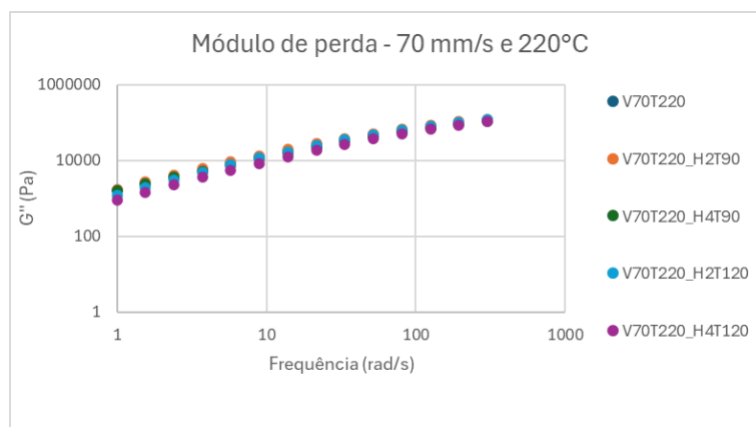
Fonte: autor (2025)

Figura 36: Módulo de armazenamento das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



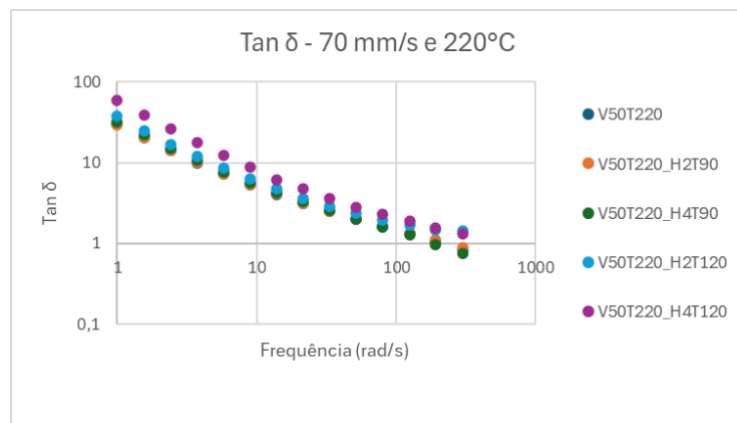
Fonte: autor (2025)

Figura 37: Módulo de perda das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



Fonte: autor (2025)

Figura 38: Tangente de delta das amostras impressas a 70 mm/s a 220°C em diferentes condições de recozimento



Fonte: autor (2025)

A análise das Figuras 31 e 35 mostra que, para ambas as velocidades de impressão (50 e 70 mm/s), o recozimento a 120 °C por 4 horas resultou em valores de viscosidade complexa significativamente inferiores aos das demais condições. Em contraste, os tratamentos a 90 °C (2 e 4 h) apresentaram os maiores valores, enquanto as demais combinações não exibiram variações relevantes.

Em ambas as velocidades, o módulo de armazenamento (G') também diminuiu levemente após o tratamento a 120 °C por 4 horas, acompanhado de uma redução mais discreta do módulo de perda (G''). Nas demais condições, os módulos permaneceram praticamente inalterados.

Esses resultados indicam que o recozimento mais severo reduziu a viscosidade complexa, G' e G'' , sugerindo ocorrência de degradação térmica e redução da massa molar do PLA. Tal comportamento é compatível com a ausência de ponto de crossover e com a queda de desempenho observada nos ensaios mecânicos. A influência do tempo e da temperatura de tratamento térmico sobre a cisão das cadeias poliméricas foi também estudada por WACHSEN; PLATKOWSKI; REICHERT, 1997, que observaram, de um modo geral, uma redução na massa molecular do PLA com aumento de temperaturas e tempos de exposição. Embora as condições analisadas naquele estudo sejam distintas das utilizadas neste trabalho, os resultados reforçam que tratamentos mais agressivos tendem a acelerar a degradação do material.

De forma complementar, as Figuras 34 e 38 sugerem que o recozimento em maior temperatura e tempo modificou a estrutura do polímero devido à redução da

massa molar. Observa-se que G' diminui em maior proporção do que G'' , elevando os valores de $\tan \delta$. Para as demais condições analisadas, não houve alteração suficiente para modificar a relação entre os comportamentos elástico e viscoso do material.

A análise reológica mostrou que a velocidade de impressão não alterou significativamente o comportamento do PLA no estado fundido, enquanto o aumento da temperatura do bico para 220 °C reduziu a viscosidade de cisalhamento zero e acelerou a relaxação das cadeias, indicando degradação térmica. A secagem conferiu menor teor de umidade às amostras, minimizando a hidrólise das cadeias poliméricas no recozimento, comprovado pelos maiores valores de viscosidade. O recozimento a 90°C manteve a estabilidade molecular, ao passo que o tratamento a 120 °C por 4 h levou a quedas acentuadas de η_0 , evidenciando cisão de cadeias.

Ainda assim, os resultados mecânicos permitem contextualizar esses achados. As condições submetidas a recozimento moderado (90 °C) apresentaram os maiores valores de tensão máxima e alongamento (por exemplo, impressões de 50 mm/s, 220°C recozimento de 2 horas a 90°C e de 70 mm/s, 220°C recozimento de 4 horas a 90°C) sugerindo que a manutenção da integridade molecular favorece a difusão entre camadas durante o tratamento térmico e, conseqüentemente, a adesão interlaminar no estado sólido. Por outro lado, condições associadas à redução mais severa de viscosidade no fundido (impressões de 70 mm/s, a 220°C com recozimento de 4 horas a 120°C), exibiram menores propriedades mecânicas, indicando que a degradação térmica limita a coesão entre as camadas e reduz a capacidade de transferência de carga. Contudo, as amostras impressas a 70 mm/s e a 220°C permitem compreender que há um ponto de equilíbrio entre a degradação térmica e a adesão intercamada. Ou seja, apesar de ocorrer a cisão das cadeias poliméricas, ainda sim é possível obter boa adesão intercamada, resultando em boas propriedades mecânicas.

Dessa forma, os resultados demonstram que, embora a reologia não permita avaliar diretamente a adesão intercamadas, ela fornece evidências fundamentais sobre a estabilidade molecular do material, que se refletem posteriormente no desempenho estrutural das peças impressas.

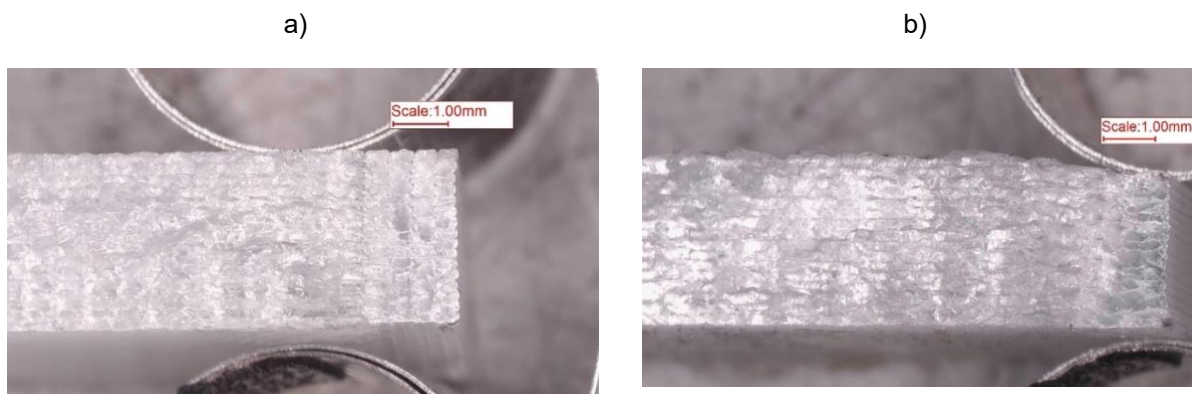
5.4 FRATOLOGRAFIA

Fratografias permitiram analisar a superfície de fratura, estudando a influência da velocidade de impressão, temperatura de bico e condições de recozimento sobre a qualidade e padrão de fratura.

5.4.1 Efeito da velocidade

Para a análise da influência da velocidade na superfície de fratura, foram utilizadas as amostras não recozidas impressas a 50 e 70 mm/s, ambas a 220°C, conforme segue na Figura 39.

Figura 39: Estereoscopias da superfície de fratura a) V50T220; b) V70T220



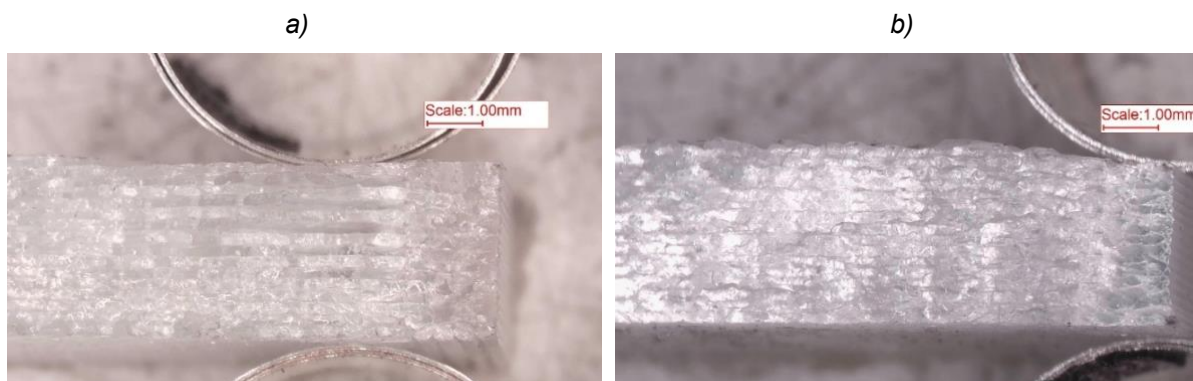
Fonte: autor (2025)

A observação estereoscópica das superfícies de fratura revelou diferenças morfológicas entre as condições analisadas. A impressão de 50 mm/s apresentou superfície mais homogênea e relativamente lisa, enquanto a de 70 mm/s exibiu maior rugosidade e variação de textura ao longo da seção fraturada. Essas características sugerem diferenças no modo de ruptura e são compatíveis com os resultados de tração, nos quais a impressão de 70 mm/s apresentou maior capacidade de deformação antes da fratura. No entanto, devido à baixa ampliação e à natureza qualitativa da análise, não é possível estabelecer conclusões definitivas sobre adesão intercamadas apenas a partir dessas imagens.

5.4.2 Efeito da temperatura

Para a análise da influência da temperatura na superfície de fratura, foram utilizadas as amostras não recozidas impressas a 70 mm/s, tanto a 200°C quanto a 220°C.

Figura 40: Estereoscopias da superfície de fratura a) V70T200; b) V70T220



Fonte: autor (2025)

As imagens das superfícies de fratura mostraram diferenças sutis entre as condições analisadas. A impressão de 200°C apresentou superfície menos retilínea e com relevos, enquanto a de 220°C não exibiu o mesmo comportamento. Para facilitar essa interpretação, a Figura 41 apresenta fotos dos corpos de prova de diferentes condições ensaiados, possibilitando a melhor compreensão do efeito da temperatura de bico sobre o padrão de fratura.

Figura 41: Fotografias das amostras fraturadas a) V70T200; b) V70T220



Fonte: autor (2025)

É possível observar que, tanto na Figura 40(a) quanto na Figura 41(a), são visíveis algumas camadas, provavelmente devido à delaminação, ficando saltadas para fora da superfície de fratura. Nas Figuras 40(b) e 41(b) não é observado o mesmo, sugerindo que não houve delaminação na sua condição devido à melhor adesão intercamada.

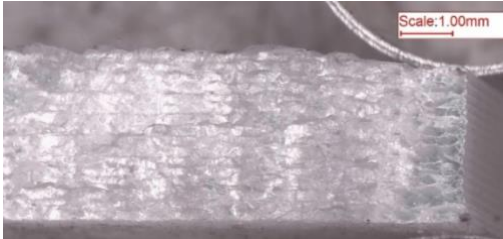
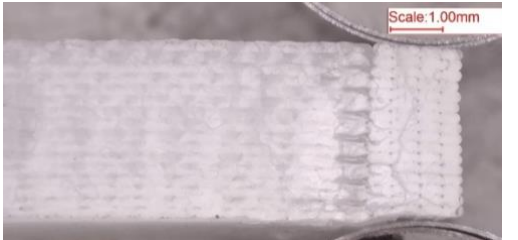
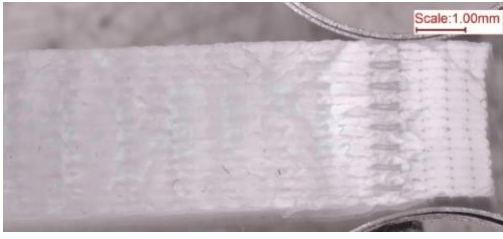
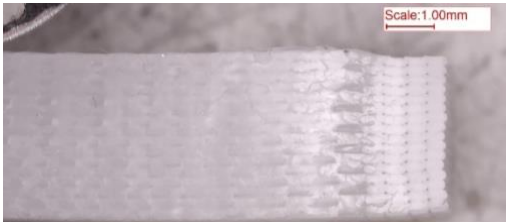
A análise visual dos corpos de prova fraturados revelou que as amostras impressas a 70 mm/s e 200°C apresentaram fraturas mais irregulares e com maior

desvio da trajetória, enquanto as amostras impressas a 70 mm/s e 220°C exibiram fraturas mais retilíneas e com menor deformação aparente. Esses resultados são consistentes com os dados mecânicos, apesar da redução da massa molar observada na reologia, para a condição de maior temperatura de impressão.

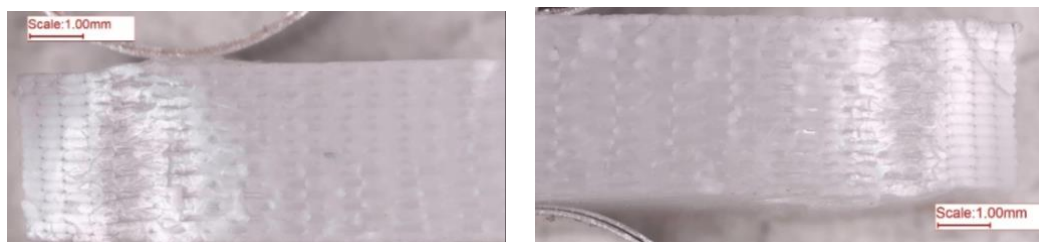
5.4.3 Efeito do recozimento

Para a análise da influência da do recozimento na superfície de fratura, foram utilizadas amostras representativas de todas as condições impressas a 220°C.

Tabela 14: Estereoscopia das superfícies de fratura das amostras impressas a 220°C em diferentes velocidades e condições de recozimento

	V50T220	V70T220
Sem tratamento		
H2T90		
H4T90		
H2T120		

H4T120



Fonte: autor (2025)

A análise das imagens da Tabela 14 corrobora com as observações realizadas em relação a Tabela 5, sendo possível observar, de forma mais geral, que amostras recozidas exibiram superfície mais homogênea e linear, com menor irregularidade na propagação da trinca, permitindo uma visualização melhor das camadas depositadas. Isso se deve ao fato de que a ruptura para as amostras recozidas foi mais frágil, devido ao possível aumento de cristalinidade, gerando menos deformações e alongamentos das camadas impressas, como evidencia a Tabela 5.

Apesar de não especificamente em amostras impressas por FDM, PARK; TODO; ARAKAWA, 2004 notou o mesmo comportamento citado acima, observando fratura mais frágil para as amostras recozidas, devido ao aumento de cristalinidade, e mais dúctil para amostras não tratadas termicamente.

Corroborando com a discussão acima, OMER et al., (2025) realizou uma consolidação de diversos estudos sobre a influência do recozimento sobre as características das amostras e concluiu que o recozimento otimiza a adesão intercamada. O tratamento térmico melhora a adesão, eleva a cristalinidade e por consequência torna o material menos dúctil, sujeitando-o à fratura frágil, na qual a superfície fica mais lisa, como nas imagens apresentadas acima.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou os efeitos da velocidade de impressão, temperatura de bico, secagem da amostra e diferentes condições de recozimento nas propriedades mecânicas, reológicas e fraturográficas do PLA impresso por FDM. De forma geral, constatou-se que cada parâmetro influencia de modo distinto o desempenho final do material, mas a temperatura de bico e o recozimento foram os fatores mais determinantes.

No ensaio de tração, foi observado que a velocidade de impressão (50 e 70 mm/s) apresentou pouca influência nas propriedades mecânicas, não resultando em diferenças estatisticamente significativas na tensão máxima, no módulo de elasticidade ou no alongamento máximo. Já a temperatura de bico mostrou impacto relevante, com amostras impressas a 220 °C apresentando maior resistência, alongamento e módulo, indicando melhor difusão entre camadas e menor presença de vazios. O processo de secagem conferiu maiores alongamentos, sugerindo que minimiza a cisão hidrolítica das cadeias, uma vez que a umidade é retirada das amostras antes do tratamento térmico. O recozimento foi o fator mais expressivo, diminuindo o alongamento e, em alguns casos, melhorando a resistência, especialmente quando associado às menores temperaturas de tratamento. Quando o tratamento térmico foi realizado em altas temperaturas e tempos, constatou-se a possibilidade de as cadeias terem degradado. Vale ressaltar que, comparando com a literatura, os valores de módulo de elasticidade obtidos nesse estudo foram muito menores e os de alongamento foram maiores.

No ensaio de SAOS, impressão a temperatura mais alta (220°C) apresentou menor valor de viscosidade, indicando possível degradação térmica, quando comparadas à impressão em menor temperatura (200°C). O ensaio SAOS para analisar a influência da secagem corroborou com os resultados de tração, visto que também concluíram que a secagem minimiza a cisão das cadeias poliméricas. O recozimento promoveu alterações no espectro viscoelástico, modificando G' , G'' e a viscosidade complexa, evidenciando a reorganização e estabilidade estrutural, além de possível degradação das cadeias no tratamento em altas temperaturas (120°C). Esses efeitos reológicos reforçam a influência dominante da temperatura, secagem e do pós-tratamento térmico sobre a microestrutura e o comportamento do PLA.

A análise fratógráfica complementou as conclusões anteriores ao revelar diferenças qualitativas entre as condições estudadas. Amostras produzidas a 200 °C apresentaram superfícies de fratura irregulares e com delaminação entre as camadas, indicando interfaces menos coesas, quando comparado com as impressas a 220°C, corroborando com as observações anteriormente realizadas. Já as amostras recozidas exibiram padrões de fratura frágil devido ao aumento da cristalinidade.

Analizando todas as observações realizadas, fica evidente que a adesão intercamada, apesar de não diretamente, pode ser estudada a partir dos resultados de tração e de ensaios reológicos. Além disso, é possível, com as amostras impressas a 220°C, compreender que, apesar de ocorrer a cisão das cadeias poliméricas, ainda é possível obter boa adesão intercamada e, conseqüentemente, boas propriedades mecânicas, existindo um equilíbrio entre resistência mecânica e integridade estrutural.

De forma geral, conclui-se que o desempenho e a estrutura do PLA impresso por FDM dependem principalmente da temperatura de bico, processo de secagem e das condições de recozimento, sendo esses fatores essenciais para melhorar adesão intercamada e otimizar as propriedades mecânicas e reológicas do material. A velocidade, embora importante para produtividade, mostrou impacto limitado dentro da faixa estudada. Assim, o controle térmico como um todo é determinante para elevar a qualidade final de peças impressas em PLA.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEYKOON, Chamil; SRI-AMPHORN, Pimpisut; FERNANDO, Anura. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 3, p. 284–297, 30 mar. 2020.

ACIERNO, Domenico; PATTI, Antonella. Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview. **Materials**, v. 16, n. 24, 1 dez. 2023.

AFSHARI, Hossein et al. Studying the effects of FDM process parameters on the mechanical properties of parts produced from PLA using response surface methodology. **Colloid and Polymer Science**, v. 302, p. 955–970, 12 mar. 2024.

ALAFAGHANI, Ala'aldin et al. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: a Design-for-Manufacturing Approach. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 791–803, 2017.

AMBADE, Vishwjeet et al. Influence of FDM process parameters on tensile strength of parts printed by PLA material. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 19, n. 1, p. 573–584, 1 jan. 2025.

ANSARI, Anis A.; KAMIL, M. Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5462–5468, 3 mar. 2021.

ARRIGO, Rossella; FRACHE, Alberto. FDM Printability of PLA Based-Materials: The Key Role of the Rheological Behavior. **Polymers**, v. 14, n. 9, 1 maio 2022.

AURAS, Rafael et al. **Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**. Nova Jersey: Wiley, 2010.

BAKHTIARI, Hamed; AAMIR, Muhammad; TOLOUEI-RAD, Majid. Effect of 3D Printing Parameters on the Fatigue Properties of Parts Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 2, 9 jan. 2023.

BASTIOLI, Catia. **Handbook of biodegradable polymers**. [S.l.]: Rapra Technology, 2005.

BEHZADNASAB, Morteza et al. Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 26, n. 2, p. 381–389, 25 fev. 2020.

BUTT, Javaid; BHASKAR, Raghunath. Investigating the effects of annealing on the mechanical properties of FFF-printed thermoplastics. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, 28 abr. 2020.

CANO-VICENT, Alba et al. Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects. **Additive Manufacturing**, v. 47, p. 102378, 2 out. 2021.

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 and Design**, v. 124, p. 143–157, 15 jun. 2017.

CONNER, Brett P. et al. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, v. 1–4, p. 64–76, 6 set. 2014.

COOGAN, Timothy J.; KAZMER, David O. Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 35, 1 out. 2020.

DAS, Arit et al. **Importance of Polymer Rheology on Material Extrusion Additive Manufacturing: Correlating Process Physics to Print Properties**. **ACS Applied Polymer Materials**. [S.l.]: American Chemical Society. , 12 mar. 2021

DE GENNES, P. G. Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. **The Journal of Chemical Physics**, v. 55, n. 2, p. 572–579, 1971.

EKŞİ, Seçil; KARAKAYA, Cetin. Effects of Process Parameters on Tensile Properties of 3D-Printed PLA Parts Fabricated with the FDM Method. **Polymers**, v. 17, n. 14, 1 jul. 2025.

ELHATTAB, Karim; BHADURI, Sarit B.; SIKDER, Prabaha. Influence of Fused Deposition Modelling Nozzle Temperature on the Rheology and Mechanical Properties of 3D Printed β -Tricalcium Phosphate (TCP)/Polylactic Acid (PLA) Composite. **Polymers**, v. 14, n. 6, 1 mar. 2022.

FARAH, Shady; ANDERSON, Daniel G.; LANGER, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367–392, 15 dez. 2016.

FERRY, John D.. **Viscoelastic properties of polymers**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley&Sons, 1980.

FRUNZEVERDE, Doina et al. The Influence of the Layer Height and the Filament Color on the Dimensional Accuracy and the Tensile Strength of FDM-Printed PLA Specimens. **Polymers**, v. 15, 19 maio 2023.

GAJJAR, Tusharbhair et al. Effects of key process parameters on tensile properties and interlayer bonding behavior of 3D printed PLA using fused filament fabrication. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 10, n. 2, p. 1261–1280, 1 fev. 2025.

GAO, Xia et al. **Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond**. **Additive Manufacturing**. [S.l.]: Elsevier B.V. , 1 jan. 2021

GHASEMKHANI, Ali et al. Effects of heat treatment on the mechanical properties of 3D-printed polylactic acid: Study of competition between crystallization and interlayer bonding. **Materials Today Communications**, v. 39, 1 jun. 2024.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2015.

GIUSTI, R.; LUCCHETTA, G. Modeling the adhesion bonding mechanism in overmolding hybrid structural parts for lightweight applications. 2014, [S.l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2014. p. 915–921.

GRINDY, Scott C. et al. Control of hierarchical polymer mechanics with bioinspired metal-coordination dynamics. **Nature Materials**, v. 14, n. 12, p. 1210–1216, 1 dez. 2015.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. 5. ed. Nova Jersey: Wiley, 2013.

HABITZREUTER, Filipe et al. BIOPOLÍMEROS, PROCESSAMENTO E APLICAÇÕES. **Nanotecnologia aplicada a polímeros**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda., 2022. p. 91–131.

HAGEN, R. Polylactic Acid. **Polymer Science: a Comprehensive Reference**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 231–236.

ISO/ASTM – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; ASTM INTERNATIONAL. *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*. ISO/ASTM 52900:2021. Geneva, 2021.

ILYAS, R. A. et al. Polylactic acid (PLA) Biocomposite: Processing, Additive Manufacturing and Advanced Applications. **Polymers**, v. 13, 18 abr. 2021.

JANMANEE, Pichai; RATCHAPAKDEE, Pongpun. Effect of Annealing on Tensile Strength of 3D Printed PLA with Material Extrusion. **Mechanics of Advanced Composite Structures**, v. 12, n. 3, p. 465–472, 1 nov. 2025.

KAHYA, Çağlar et al. Thermal annealing optimization for improved mechanical performance of PLA parts produced via 3D printing. **Polymer Testing**, v. 144, 1 mar. 2025.

KALPAKJIAN, Serop; SCHMID, Steven R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 4. ed. [S.l.]: Pearson Education Inc., 2001.

KARTAL, Fuat; KAPTAN, Arslan. Effects of annealing temperature and duration on mechanical properties of PLA plastics produced by 3D Printing. **European Mechanical Science**, v. 7, n. 3, p. 152–159, 20 set. 2023.

KECHAGIAS, J. D. et al. A multi-parametric process evaluation of the mechanical response of PLA in FFF 3D printing. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 38, n. 8, p. 941–953, 2023.

KHOSRAVANI, Mohammad Reza et al. Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2022.

LAKKALA, Preethi et al. Additive manufacturing technologies with emphasis on stereolithography 3D printing in pharmaceutical and medical applications: A review. **International Journal of Pharmaceutics: X**, v. 5, 2 jan. 2023.

LLUCH-CEREZO, Joaquín et al. Effect of a powder mould in the post-process thermal treatment of ABS parts manufactured with FDM technology. **Polymers**, v. 13, n. 15, 1 ago. 2021.

LOKESH, N. et al. Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature. **Materials Today: Proceedings**, v. 52, p. 1288–1293, 2022.

LUNA, Carlos B.B. et al. Annealing efficacy on pla. Insights on mechanical, thermomechanical and crystallinity characters. **Momento**, v. 2021, n. 62, p. 1–17, 2021.

MACOSKO, Christopher W.. **Rheology: principles, measurements, and applications**. [S.l.]: Wiley-VCH, 1994.

MAGULURI, Nagarjuna; SURESH, Gamini; RAO, K. Venkata. Assessing the effect of FDM processing parameters on mechanical properties of PLA parts using Taguchi method. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 36, n. 4, p. 1472–1488, 2023.

MAIA, Franciso Dayvison Freire. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CAMPUS DE RUSSAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA FRANCISCO DEYVISON FREIRE MAIA EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA RESISTÊNCIA À**. 2025. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2025.

MEGERSA, Getu Koro et al. Investigation of the Influence of Fused Deposition Modeling 3D Printing Process Parameters on Tensile Properties of Polylactic Acid Parts Using the Taguchi Method. **Materials**, v. 17, 5 dez. 2024.

MOHAMED, Omar A.; MASOOD, Syed H.; BHOWMIK, Jahar L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances in Manufacturing**, v. 3, p. 42–53, 25 fev. 2015.

MÜNSTEDT, Helmut. Rheological measurements and structural analysis of polymeric materials. **Polymers**, v. 13, n. 7, 1 abr. 2021.

MWEMA, Fredrick Madaraka; AKINLABI, Esther Titilayo. Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). **Briefs in Applied Sciences and Technology**. [S.l.]: Springer, 2020. p. 1–15.

NASSER, Mohamed et al. **Impact of Infill Strategy and Process Parameters on Selectivity and Performance of PLA Structures Obtained by 3D Printing**. . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchsquare.com/article/rs-4739701/v1>>. , 16 ago. 2024

NAVEED, Nida; ANWAR, Muhammad Naveed. Optimising 3D printing parameters through experimental techniques and ANOVA-Based statistical analysis. **SPE Polymers**, v. 5, n. 2, p. 228–240, 1 abr. 2024.

NYABADZA, Anesu et al. Mechanical and antibacterial properties of FDM additively manufactured PLA parts. **Results in Engineering**, v. 21, 1 jan. 2024.

OMER, Mohamed A.E. et al. **Advances in interlayer bonding in fused deposition modelling: a comprehensive review. Virtual and Physical Prototyping**. [S.l.]: Taylor and Francis Ltd. , 2025

PANG, Rayson et al. Characterization of the Dimensional Precision, Physical Bonding, and Tensile Performance of 3D-Printed PLA Parts with Different Printing Temperature. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 8, n. 2, 1 abr. 2024.

PARK, S. D.; TODO, M.; ARAKAWA, K. Effect of annealing on fracture mechanism of biodegradable poly(lactic acid). 2004, [S.l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2004. p. 105–110.

RADHIKA, C. et al. A review on additive manufacturing for aerospace application. **Materials Research Express**, v. 11, 6 fev. 2024.

RAJAN, Kumaresan et al. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 120, p. 1531–1570, 26 fev. 2022.

RASAL, Rahul M.; JANORKAR, Amol V.; HIRT, Douglas E. Poly(lactic acid) modifications. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 35, p. 338–356, 14 dez. 2009.

REDWOOD, Ben; SCHÖFFER, Filemon; GARRET, Brian. **The 3D printing handbook - technologies, design and applications**. Amsterdam: 3D HUBS, 2017.

REN, Jie. **Biodegradable Poly(Lactic Acid) : Synthesis, Modification, Processing and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. v. b.

RIVERA-LÓPEZ, Fernando et al. Effects of Nozzle Temperature on Mechanical Properties of Polylactic Acid Specimens Fabricated by Fused Deposition Modeling. **Polymers**, v. 16, n. 13, 29 jun. 2024.

STOJKOVIĆ, Jelena R. et al. An Experimental Study on the Impact of Layer Height and Annealing Parameters on the Tensile Strength and Dimensional Accuracy of FDM 3D Printed Parts. **Materials**, v. 16, n. 13, 25 jun. 2023.

SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 28 mar. 2008.

Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PAASTM International, 1 jul. 2022. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgibin/resolver.cgi?D638-22>>

THUMSORN, Supaphorn et al. Rheological Behavior and Dynamic Mechanical Properties for Interpretation of Layer Adhesion in FDM 3D Printing. **Polymers**, v. 14, n. 13, 1 jul. 2022.

TRIVEDI, Alok Kumar; GUPTA, M. K.; SINGH, Harinder. **PLA based biocomposites for sustainable products: A review**. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**. [S.l.]: KeAi Communications Co. , 1 out. 2023

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: Tecnologia e aplicações da impressão 3D**. 1 edição ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda., 2018.

WACHSEN, O.; PLATKOWSKI, K; REICHERT, K-h. **Thermal degradation of poly-L-lactide-studies on kinetics, modelling and melt stabilisation**. **Polymer Degradation and Stability**. [S.l.]: Ekevier Science Limited ELSEVIER, 1997.

XIAO, Lin et al. Poly(Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications. **Biomedical Science, Engineering and Technology**. [S.l.]: InTech, 2012. .

YU, Ning et al. Effects of auxiliary heat on the interlayer bonds and mechanical performance of polylactide manufactured through fused deposition modeling. **Polymer Testing**, v. 104, 20 out. 2021.

ZISOPOL, Gabriel Dragoş; PORTOACĂ, Alexandra-Ileana; RAMADAN, Naim Ibrahim. **A Comparative Analysis of the Mechanical Properties of Annealed PLA**. **Technology & Applied Science Research**. [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <www.etasr.com>.