



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS VIEIRA METZKER

EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM CORPOS DE PROVA FEITOS EM
RESINA ACRÍLICA FOTOPOLIMERIZÁVEL FABRICADOS POR MANUFATURA
ADITIVA

Belo Horizonte

2026

LUCAS VIEIRA METZKER

EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM CORPOS DE PROVA FEITOS EM
RESINA ACRÍLICA FOTOPOLIMERIZÁVEL FABRICADOS POR MANUFATURA
ADITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais,
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Nathália Mello Mascarenhas
Paixão

Belo Horizonte

2026

Metzker, Lucas Vieira
M596e Efeitos do tratamento térmico em corpos de prova feitos em resina acrílica fotopolimerizável
fabricados por manufatura aditiva / Lucas Vieira Metzker – 2026.
51 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação
em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientadora: Nathália Mello Mascarenhas Paixão.
Banca examinadora: Nathália Mello Mascarenhas Paixão, Artur Caron Mottin e Cristina
Almeida Magalhães.
Bibliografia: f. 49-51.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Manufatura aditiva – Teses. 2. Resinas acrílicas – tratamento térmico – Teses. 3. Testes –
máquinas – Teses. 4. Processamento de imagens – Técnicas digitais – Teses. I. Paixão, Nathália
Mello Mascarenhas. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

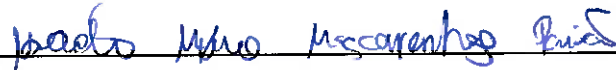
CDD 620.192

LUCAS VIEIRA METZKER

EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM CORPOS DE PROVA FEITOS EM
RESINA ACRÍLICA FOTOPOLIMERIZÁVEL FABRICADOS POR
MANUFATURA ADITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 24/06/2026



Nathália Mello Mascarenhas Paixão, Mestre, Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Artur Caron Mottin, Doutor, Avaliador

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Cristina Almeida Magalhães, Doutora, Avaliadora

Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

“Todos os nossos sonhos podem se tornar realidade se tivermos a coragem de os
perseguir”
Disney, Walt

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio, incentivo e presença constante ao longo de toda a minha trajetória. Em especial, aos meus pais, por todo amor, dedicação, esforço e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos de dificuldade. Esta conquista também é reflexo dos valores que me ensinaram e dos sacrifícios que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha irmã, pelo carinho, companheirismo e por fazer parte da minha caminhada, tornando os momentos mais leves e significativos.

Aos meus avós, pelo exemplo de vida, pelos ensinamentos, pelo afeto e por representarem uma base importante na minha formação pessoal. Suas histórias, conselhos e valores permanecerão sempre comigo.

Aos meus amigos, que estiveram presentes ao longo desta jornada, oferecendo apoio, incentivo e momentos de descontração, fundamentais para tornar essa caminhada mais leve.

À minha orientadora, pela orientação, paciência, atenção e pelas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação foi essencial para a construção e o aprimoramento desta pesquisa.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, pelos conhecimentos transmitidos ao longo da graduação e pela contribuição para minha formação acadêmica e profissional.

À Ordem DeMolay, por sua importante contribuição na minha formação pessoal, fortalecendo princípios como responsabilidade, liderança, fraternidade, respeito, disciplina e serviço ao próximo.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

Este estudo aborda a influência do tratamento térmico pós-processamento em corpos de prova fabricados por manufatura aditiva via *Digital Light Processing* (DLP), utilizando uma resina acrílica fotopolimerizável comercial. A manufatura aditiva tem se consolidado como tecnologia relevante para a fabricação de peças com elevada complexidade geométrica, boa precisão dimensional e possibilidade de personalização. Entre os processos disponíveis, o DLP se destaca por utilizar resinas fotossensíveis, permitindo a obtenção de peças com bom acabamento superficial e definição geométrica. Apesar dessas vantagens, resinas fotopolimerizáveis podem apresentar limitações mecânicas, especialmente sob solicitações de tração, tornando importante investigar estratégias de pós-processamento capazes de modificar seu comportamento. Nesse contexto, o tratamento térmico, foi avaliado como alternativa para analisar possíveis alterações nas propriedades mecânicas do material após a impressão e a pós-cura. Para o desenvolvimento experimental, foram fabricados corpos de prova conforme a norma ASTM D638, tipo IV. Após a fabricação, as amostras foram submetidas à pós-cura em câmara ultravioleta e divididas em grupos experimentais, incluindo um grupo de referência sem tratamento térmico e grupos tratados em diferentes temperaturas. Os tratamentos foram realizados em forno com controle de temperatura, permanência em regime isotérmico por tempo padronizado e resfriamento controlado no interior do forno. A caracterização mecânica foi realizada por ensaios de tração em máquina universal, permitindo determinar tensão máxima, módulo de elasticidade aparente, tenacidade e deformação na tensão máxima. A análise dos dados foi estruturada por estatística descritiva e métodos comparativos, possibilitando avaliar a influência do tratamento térmico sobre o comportamento mecânico da resina fabricada por DLP.

Palavras-chave: manufatura aditiva, resina acrílica, tratamento térmico, ensaio de tração e *Digital Light Processing* (DLP).

ABSTRACT

This study addresses the influence of post-processing heat treatment on specimens manufactured by additive manufacturing via Digital Light Processing (DLP), using a commercial photopolymerizable acrylic resin. Additive manufacturing has become established as a relevant technology for producing parts with high geometric complexity, good dimensional accuracy, and the possibility of customization. Among the available processes, DLP stands out for using photosensitive resins, enabling the production of parts with good surface finish and geometric definition. Despite these advantages, photopolymerizable resins may present mechanical limitations, especially under tensile loading, making it important to investigate post-processing strategies capable of modifying their behavior. In this context, heat treatment was evaluated as an alternative for analyzing possible changes in the material's mechanical properties after printing and post-curing. For the experimental work, specimens were manufactured in accordance with ASTM D638, Type IV. After manufacturing, the samples were subjected to post-curing in an ultraviolet chamber and divided into experimental groups, including a reference group without heat treatment and groups treated at different temperatures. The treatments were carried out in a temperature-controlled oven, with a standardized holding time under isothermal conditions and controlled cooling inside the oven. Mechanical characterization was performed through tensile tests on a universal testing machine, allowing determination of maximum stress, apparent elastic modulus, toughness, and strain at maximum stress. Data analysis was structured using descriptive statistics and comparative methods, making it possible to evaluate the influence of heat treatment on the mechanical behavior of the DLP-manufactured resin.

Keywords: additive manufacturing, acrylic resin, heat treatment, tensile test, and Digital Light Processing (DLP).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	07
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Processos de manufatura aditiva	12
3.1.1 <i>Digital Light Processing</i> (DLP)	13
3.2 Tratamentos térmicos de polímeros	14
3.3 Análises TGA e DSC aplicados a materiais acrílicos	15
3.4 Estado da arte	17
4. METODOLOGIA	21
4.1 Materiais	22
4.2 Métodos	23
4.2.1 Fabricação dos corpos de prova	23
4.2.2 Tratamentos térmicos	25
4.2.3 Ensaio de tração	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1 Curvas tensão-deformação	34
5.2 Tensão máxima	35
5.3 Módulo de elasticidade aparente	36
5.4 Tenacidade e deformação máxima	37
5.5 Discussão geral dos efeitos do tratamento térmico	39
6. CONCLUSÕES	43
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

Popularmente conhecida como impressão 3D, a manufatura aditiva tem se consolidado como uma das tecnologias mais promissoras no contexto da fabricação moderna, modificando a forma como peças e componentes são desenvolvidos em diferentes setores, como engenharia, arquitetura, medicina e *design* de produtos. Inicialmente aplicada de forma predominante à produção de protótipos, essa tecnologia evoluiu significativamente nas últimas décadas, impulsionada pelos avanços nos materiais, nos softwares de modelagem e nos sistemas de impressão. Como consequência, a manufatura aditiva passou a ser empregada não apenas na prototipagem, mas também na fabricação de componentes funcionais e em processos produtivos mais amplos. Segundo Araújo (2021), essa evolução está diretamente relacionada à capacidade da manufatura aditiva de produzir peças com alta complexidade geométrica, muitas vezes inviáveis por processos convencionais, além de permitir elevada personalização e redução no desperdício de material.

Os polímeros constituem uma classe de materiais de grande relevância para a manufatura aditiva, devido à sua versatilidade estrutural, baixa densidade, facilidade de processamento e ampla aplicabilidade industrial. De acordo com Callister e Rethwish (2008), as propriedades dos materiais poliméricos dependem fortemente de sua estrutura molecular, do grau de mobilidade das cadeias e das condições de processamento. No contexto da impressão 3D, esses fatores tornam os polímeros especialmente atrativos, pois possibilitam a fabricação de peças com geometrias complexas e propriedades ajustáveis a diferentes aplicações. Entre os materiais poliméricos de interesse, destacam-se os materiais acrílicos, grupo no qual o polimetilmetacrilato (PMMA) é frequentemente utilizado como referência devido ao seu comportamento amorfo, à presença de temperatura de transição vítrea bem definida e à ampla utilização em aplicações de engenharia.

Dentre as diferentes tecnologias de impressão 3D, destacam-se os processos baseados em fotopolimerização, como a estereolitografia (SLA) e o *Digital Light Processing* (DLP). Esses métodos utilizam resinas líquidas fotossensíveis, que são solidificadas por meio da exposição à radiação ultravioleta, promovendo a formação da peça camada por camada até a obtenção da geometria final (Golubovic *et al.*, 2024). Essas tecnologias são reconhecidas pela elevada precisão dimensional, boa qualidade superficial e capacidade de reprodução de detalhes finos, sendo

amplamente empregadas em áreas como odontologia, engenharia, joalheria, prototipagem e microfabricação (Stögerer *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2020).

Apesar dessas vantagens, as propriedades mecânicas e térmicas de peças produzidas por fotopolimerização ainda representam um desafio tecnológico. Resinas acrílicas fotopolimerizáveis podem apresentar boa rigidez, estabilidade dimensional e acabamento superficial, porém frequentemente exibem comportamento frágil e limitações quando submetidas a solicitações mecânicas mais severas (Stögerer *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2022). Essas limitações podem restringir sua aplicação em componentes sujeitos a esforços de tração, impactos repetitivos ou carregamentos funcionais, tornando necessária a investigação de estratégias capazes de melhorar seu desempenho mecânico.

Nesse contexto, o tratamento térmico pós-processamento surge como uma alternativa promissora para modificar o comportamento de polímeros impressos em 3D. Sob aquecimento controlado, especialmente em temperaturas próximas ou superiores à temperatura de transição vítrea, ocorre aumento da mobilidade molecular, permitindo o alívio de tensões residuais, a reorganização parcial da estrutura polimérica e possíveis melhorias na coesão entre regiões polimerizadas. Esses fenômenos podem contribuir para alterações nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura (Shang *et al.*, 2022; Amza *et al.*, 2021). Estudos recentes demonstram que o tratamento térmico pode melhorar o desempenho mecânico de polímeros processados por manufatura aditiva, especialmente quando as condições de temperatura e tempo são adequadamente controladas (Shbanah *et al.*, 2023; Amza *et al.*, 2021).

Entretanto, grande parte dos estudos disponíveis concentra-se em polímeros processados por extrusão de material, como o poliácido láctico (PLA), a acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o polietileno tereftalato modificado com glicol (PETG), havendo menor quantidade de trabalhos dedicados especificamente à avaliação sistemática de resinas acrílicas fotopolimerizáveis produzidas por DLP. Além disso, ainda há necessidade de compreender melhor como a escolha da temperatura de tratamento térmico influencia as propriedades mecânicas desses materiais, principalmente quando se considera a relação entre a temperatura de transição vítrea, a estabilidade térmica e o risco de perda de desempenho por aquecimento excessivo. Dessa forma, o comportamento térmico do PMMA e de materiais acrílicos descritos

na literatura torna-se uma referência relevante para a definição de faixas de tratamento térmico aplicáveis a resinas acrílicas fotopolimerizáveis.

Diante desse cenário, estabelece-se a seguinte questão de pesquisa: o tratamento térmico altera significativamente as propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por DLP em resina acrílica fotopolimerizável? Para responder a essa questão, o presente estudo propôs uma abordagem experimental baseada na fabricação de corpos de prova padronizados, submetendo diferentes grupos de amostras a condições controladas de tratamento térmico e comparando seus resultados com um grupo de referência sem tratamento.

A análise principal foi realizada por meio de ensaios de tração, permitindo avaliar propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura. Complementarmente, foram utilizados dados térmicos disponíveis na literatura, com base nos princípios da Análise Termogravimétrica (TGA) e da Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC), para fundamentar a definição das temperaturas de tratamento térmico e auxiliar na interpretação dos resultados. A TGA permite avaliar a estabilidade térmica e a decomposição do material em função da temperatura, enquanto a DSC possibilita identificar transições térmicas, como a temperatura de transição vítrea (T_g), parâmetro essencial para compreender o comportamento térmico de polímeros acrílicos e estabelecer condições seguras de tratamento térmico (Morgado, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Investigar a influência do pós-processamento térmico nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por manufatura aditiva via *Digital Light Processing* (DLP), utilizando resina acrílica fotopolimerizável comercial.

2.2. Objetivos específicos

- Fabricar corpos de prova em resina acrílica fotopolimerizável conforme a norma ASTM D638, utilizando manufatura aditiva por DLP.
- Utilizar dados de TGA e DSC disponíveis na literatura para fundamentar a escolha das condições térmicas de tratamento e auxiliar na interpretação do comportamento do material.
- Submeter os corpos de prova a diferentes condições de tratamento térmico, organizando-os em grupos experimentais com temperaturas distintas acima da faixa de transição vítrea adotada como referência.
- Avaliar a influência do tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas por meio de ensaio de tração da resina acrílica fotopolimerizável e propor recomendações com base nos dados obtidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão são abordados os fundamentos da manufatura aditiva, com ênfase nos processos aplicados à fabricação de componentes poliméricos. Inicialmente, são apresentados os principais conceitos associados à impressão 3D, suas categorias tecnológicas e suas vantagens em relação aos processos convencionais de fabricação. Embora a manufatura aditiva possibilite a produção de peças com elevada complexidade geométrica, personalização e redução de desperdício de material, ainda existem desafios relacionados ao desempenho mecânico dos materiais produzidos, especialmente quando comparados a peças obtidas por métodos tradicionais, como a moldagem por injeção (Amza *et al.*, 2021; Gonabadi; Yada; Bull, 2020).

Também é contextualizada a tecnologia *Digital Light Processing* (DLP), pertencente ao grupo dos processos de fotopolimerização em cuba. Essa tecnologia se destaca pela elevada precisão dimensional, boa qualidade superficial e capacidade de reprodução de detalhes finos. Entretanto, peças produzidas por fotopolimerização podem apresentar limitações mecânicas, como comportamento frágil, baixa tenacidade à fratura e sensibilidade às condições de processamento, cura e pós-processamento (Stögerer *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2022).

O foco principal desta revisão consiste na análise do tratamento térmico como técnica de pós-processamento aplicada a polímeros fabricados por manufatura aditiva. O tratamento térmico, também denominado recozimento ou *annealing*, pode promover alterações no estado físico e estrutural do material, como aumento da mobilidade molecular, alívio de tensões residuais e aumento da coesão interna, dependendo da natureza do polímero, da temperatura adotada e do tempo de exposição (Amza *et al.*, 2021; Shang *et al.*, 2022; Shbanah *et al.*, 2023).

Para compreender esses fenômenos, são apresentadas as técnicas de análise térmica, com destaque para a Análise Termogravimétrica (TGA) e a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Essas técnicas são amplamente utilizadas na literatura para avaliar estabilidade térmica, degradação e transições térmicas em polímeros, sendo importantes para a definição de faixas seguras de tratamento térmico (Morgado, 2022; Gu *et al.*, 2019).

3.1 Processos de manufatura aditiva

A manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, compreende um conjunto de tecnologias capazes de fabricar peças tridimensionais a partir de modelos digitais, por meio da adição sucessiva de material em camadas. Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021, os processos de manufatura aditiva podem ser classificados em sete categorias principais: extrusão de material, fotopolimerização em cuba, fusão em leito de pó, deposição de energia direcionada, jateamento de material, jateamento de aglutinante e laminação de folhas (Golubovic *et al.*, 2024).

Entre essas categorias, destacam-se, para materiais poliméricos, os processos de extrusão de material e fotopolimerização em cuba. A extrusão de material, amplamente representada pelo processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), utiliza filamentos termoplásticos que são aquecidos, fundidos e depositados seletivamente por meio de um bico extrusor, formando a peça camada por camada (Amza *et al.*, 2021; Gonabadi; Yadav; Bull, 2020).

Por outro lado, os processos de fotopolimerização, como a estereolitografia (SLA) e o *Digital Light Processing* (DLP), utilizam resinas líquidas fotossensíveis, que são solidificadas seletivamente por meio da exposição à radiação ultravioleta ou visível. Esses processos permitem a obtenção de peças com elevada precisão dimensional, boa qualidade superficial e capacidade de reprodução de detalhes finos (Stögerer *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2020).

Comparativamente, o FDM apresenta como vantagens o menor custo operacional, a ampla disponibilidade de materiais termoplásticos e a facilidade de operação. No entanto, peças produzidas por FDM tendem a apresentar maior rugosidade superficial, anisotropia mecânica mais evidente e menor resolução dimensional, devido à deposição sucessiva de filamentos e à dependência da adesão entre cordões e camadas (Gonabadi; Yadav; Bull, 2020; Amza *et al.*, 2021).

Os processos de fotopolimerização, por sua vez, apresentam maior qualidade superficial e melhor precisão geométrica, sendo adequados para aplicações que exigem alto nível de detalhamento. Entretanto, esses processos dependem de resinas fotossensíveis, parâmetros adequados de exposição, pós-cura e controle das condições de processamento, podendo resultar em materiais com comportamento

frágil ou baixa tenacidade dependendo da formulação utilizada (Stögerer *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2022).

3.1.1 Digital Light Processing (DLP)

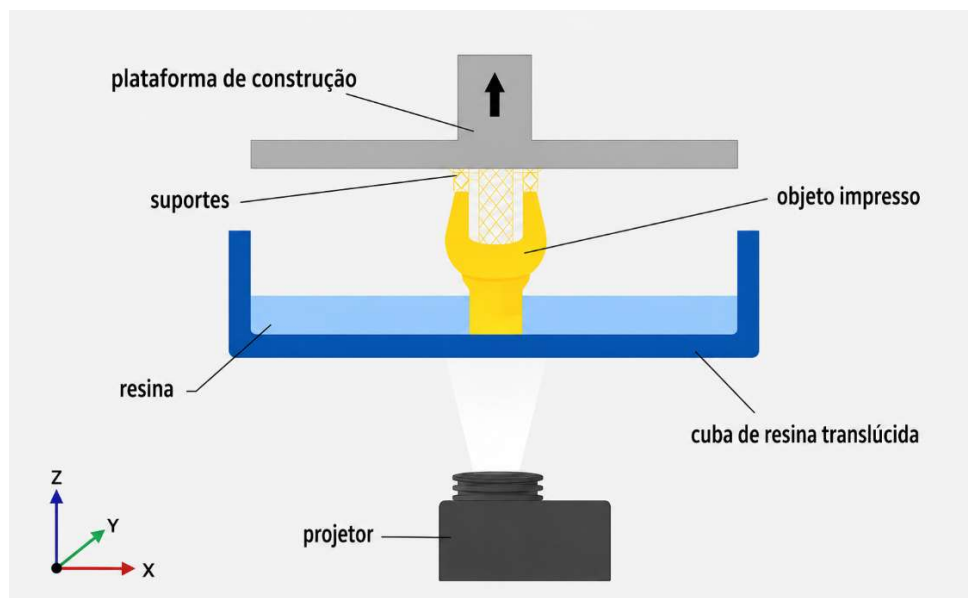
O processo *Digital Light Processing* (DLP) é uma tecnologia de fotopolimerização em cuba caracterizada pela utilização de um dispositivo de microespelhos digitais, conhecido como *Digital Micromirror Device* (DMD). Esse sistema projeta a imagem completa de cada camada sobre a superfície da resina fotossensível, promovendo a cura simultânea de toda a seção transversal da peça (Stögerer *et al.*, 2022).

Essa característica diferencia o DLP da tecnologia SLA, na qual a cura ocorre ponto a ponto por meio de um feixe de laser. Como consequência, o DLP pode apresentar maior velocidade de fabricação, especialmente em peças com grandes áreas de seção transversal, uma vez que toda a camada é polimerizada de uma só vez (Song *et al.*, 2023).

A resolução do processo DLP no plano X-Y, conforme figura 1 é definida principalmente pelo tamanho dos pixels projetados, enquanto a resolução no eixo Z depende da espessura de camada adotada no processo de impressão. Em geral, a espessura de camada pode variar entre aproximadamente 25 μm e 100 μm , dependendo do equipamento, da resina e da qualidade desejada para a peça final (Kim *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2023).

Além da precisão geométrica, a qualidade final das peças produzidas por DLP depende diretamente da formulação da resina, da intensidade e do tempo de exposição à luz, da orientação de impressão, da pós-cura e de tratamentos posteriores. Por esse motivo, embora o DLP seja reconhecido pela boa resolução e acabamento superficial, o desempenho mecânico final das peças ainda pode ser limitado por fatores como grau de cura, tensões residuais, defeitos internos e comportamento frágil do material (Stögerer *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2022).

Figura 1 – Esquema do processo de impressão DLP



Fonte: adaptado de www.additive.blog.

3.2 Tratamentos térmicos de polímeros

O tratamento térmico aplicado a polímeros, também denominado recozimento ou *annealing*, consiste em submeter o material a um ciclo controlado de aquecimento, permanência em determinada temperatura e posterior resfriamento. Em polímeros, esse processo pode ser utilizado para modificar o estado físico e estrutural do material, reduzir tensões residuais, aumentar a estabilidade dimensional e alterar propriedades mecânicas e térmicas (Amza *et al.*, 2021; Shang *et al.*, 2022).

A definição da temperatura de tratamento térmico deve considerar o comportamento térmico do polímero. Em materiais amorfos, como o PMMA, a temperatura de transição vítrea (T_g) representa um parâmetro fundamental, pois caracteriza a transição entre um estado vítreo, rígido e com baixa mobilidade molecular, e um estado de maior mobilidade das cadeias poliméricas. Acima da T_g , ocorre maior capacidade de relaxamento estrutural, o que pode contribuir para o alívio de tensões internas e para alterações nas propriedades mecânicas (Callister; Rethwish, 2008).

No caso de resinas acrílicas fotopolimerizáveis, o tratamento térmico deve ser analisado com cautela. Diferentemente de polímeros semicristalinos, em que o recozimento pode estar associado ao aumento de cristalinidade, em materiais acrílicos de comportamento predominantemente amorfo ou reticulado os efeitos esperados estão mais relacionados à mobilidade molecular, ao relaxamento de tensões, à complementação de processos de cura e a rearranjos estruturais limitados. Assim, o aumento de cristalinidade não deve ser tratado como mecanismo principal para esse tipo de material.

Estudos com polímeros fabricados por manufatura aditiva demonstram que o tratamento térmico pode melhorar propriedades mecânicas quando aplicado em condições adequadas. Amza *et al.* (2021) investigaram o tratamento térmico em peças poliméricas impressas em 3D e observaram ganhos de desempenho mecânico associados ao controle térmico pós-processamento, especialmente em materiais cuja resistência é influenciada pela adesão entre camadas e pelo histórico de fabricação.

Shbanah *et al.* (2023), ao avaliarem o efeito do tratamento térmico em polímero PLA impresso em 3D, observaram que a aplicação de temperaturas controladas pode promover melhoria nas propriedades mecânicas, desde que os parâmetros de tratamento sejam adequadamente selecionados. Esses resultados reforçam que o recozimento pode ser uma alternativa relevante para otimização do desempenho de materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva.

Entretanto, a eficiência do tratamento térmico depende fortemente da escolha dos parâmetros de processo. Temperaturas muito baixas podem não promover mobilidade molecular suficiente, enquanto temperaturas excessivamente elevadas podem causar deformação geométrica, relaxamento excessivo da estrutura ou degradação térmica. Dessa forma, a seleção da temperatura e do tempo de exposição deve ser realizada com base no comportamento térmico do material, especialmente em relação à T_g e à estabilidade térmica (Morgado, 2022; Gu *et al.*, 2019).

3.3 Análises TGA e DSC aplicadas a materiais acrílicos

As técnicas de análise térmica são ferramentas importantes para a caracterização de materiais poliméricos, pois permitem compreender o comportamento do material quando submetido ao aquecimento. Entre essas técnicas, destacam-se a Análise Termogravimétrica (TGA) e a Calorimetria Diferencial de

Varredura (DSC), amplamente empregadas em estudos com polímeros e materiais acrílicos (Morgado, 2022; Gu *et al.*, 2019).

A TGA avalia a variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, sob atmosfera controlada. Essa técnica permite identificar eventos associados à perda de massa, volatilização de componentes, degradação térmica e teor de resíduo. Para o presente trabalho, a TGA é relevante por permitir estimar a faixa de estabilidade térmica do material e auxiliar na definição de temperaturas de tratamento suficientemente distantes da região de degradação. Em sistemas poliméricos acrílicos e materiais à base de PMMA, estudos experimentais indicam que a degradação térmica ocorre em temperaturas superiores à faixa de transição vítrea, sendo geralmente observada acima de 250 °C (Gu *et al.*, 2019; Morgado, 2022).

A DSC, por sua vez, mede o fluxo de calor associado às transições térmicas do material durante o aquecimento ou resfriamento. O PMMA, por ser um polímero acrílico amorfo amplamente estudado, é utilizado neste trabalho como referência comparativa para a compreensão do comportamento térmico de materiais acrílicos. De modo geral, sua Tg é frequentemente reportada na literatura na faixa aproximada de 100 °C a 110 °C, podendo variar conforme a massa molar, a composição, o grau de polimerização e o histórico térmico do material (Callister; Rethwish, 2008; Morgado, 2022).

Além disso, estudos específicos com materiais comerciais à base de PMMA demonstram que a temperatura de transição vítrea pode apresentar variação significativa entre diferentes formulações. Jagger e Okdeh (1995), ao caracterizarem chapas comerciais de polimetilmetacrilato quanto à massa molecular, ao teor de monômero residual e à temperatura de transição vítrea, obtiveram valores médios de Tg entre 85,9 °C e 119,8 °C. Os autores destacam que esses valores devem ser considerados aproximados, uma vez que dependem do método de determinação empregado, além das características específicas de cada material.

Esses resultados evidenciam que materiais acrílicos e sistemas à base de PMMA podem apresentar uma faixa de transição vítrea variável, o que torna necessária a adoção de referências térmicas para a definição de ciclos de tratamento. Do ponto de vista físico, temperaturas próximas ou superiores à Tg podem favorecer o aumento da mobilidade molecular e a relaxação de tensões internas. Entretanto, quando aplicadas

de forma inadequada, também podem promover alterações indesejadas na rigidez, na resistência ou na estabilidade dimensional do material.

Assim, a combinação entre dados de DSC e TGA permite estabelecer uma janela de processamento térmico. A DSC fornece a referência inferior, associada à T_g e à ativação da mobilidade molecular, enquanto a TGA fornece a referência superior, associada à estabilidade térmica e ao limite de degradação. Dessa forma, dados térmicos obtidos na literatura podem ser utilizados como referência técnica para fundamentar a escolha de parâmetros experimentais e auxiliar na interpretação dos efeitos do tratamento térmico sobre resinas acrílicas fotopolimerizáveis fabricadas por DLP.

3.4 Estado da arte

A manufatura aditiva tem avançado significativamente nas últimas décadas, permitindo a fabricação de peças com elevada complexidade geométrica, alto grau de personalização e redução do desperdício de material. Inicialmente associada à prototipagem rápida, essa tecnologia passou a ser aplicada também na fabricação de componentes funcionais, especialmente em setores que demandam flexibilidade de projeto, redução de etapas produtivas e obtenção de geometrias complexas, muitas vezes inviáveis por processos convencionais (Araújo, 2021).

Apesar desses avanços, o desempenho mecânico dos materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva ainda representa uma das principais limitações para sua aplicação funcional. Em processos baseados em extrusão, como o FDM, a deposição sucessiva de filamentos pode gerar anisotropia mecânica, vazios internos, regiões de menor adesão entre camadas e elevada dependência dos parâmetros de impressão. Gonabadi, Yadav e Bull (2020) demonstram que variáveis de processamento influenciam diretamente as propriedades mecânicas de peças de PLA fabricadas por impressão 3D, evidenciando a importância do controle dos parâmetros de fabricação.

Nos processos de fotopolimerização, como SLA e DLP, a qualidade superficial e a precisão dimensional tendem a ser superiores às obtidas por processos de extrusão de material. O DLP, em particular, permite a cura simultânea de cada camada por projeção de luz, o que favorece maior velocidade de fabricação e boa definição geométrica. Além disso, o DLP apresenta vantagens relacionadas à isotropia mecânica. Stögerer *et al.* (2022), ao testarem compósitos poliméricos produzidos por

estereolitografia em três direções ortogonais diferentes, não encontraram evidências estatisticamente significativas de comportamento anisotrópico, demonstrando que a orientação da amostra durante a fabricação não impactou as propriedades mecânicas, como resistência à flexão, módulo de flexão e tenacidade à fratura das peças produzidas.

Além disso, estudos dedicados a resinas fotopolimerizáveis indicam que o desempenho final das peças depende fortemente da formulação do material, do grau de cura e das condições de pós-processamento. Yu *et al.* (2022), ao investigarem resinas fotossensíveis para impressão DLP, destacam a busca por estratégias capazes de melhorar o comportamento em tração e reduzir limitações associadas à anisotropia. De forma complementar, Kim *et al.* (2020) evidenciam que aspectos como pós-cura, retração e isotropia mecânica são relevantes para a qualidade final de peças produzidas por DLP, reforçando que o desempenho mecânico não depende apenas da geometria impressa, mas também das condições de processamento e pós-processamento.

Monzón *et al.* (2017), ao avaliarem peças fotopoliméricas fabricadas por *Digital Light Processing* (DLP), observaram que a direção de construção e o processo de pós-cura influenciam as propriedades mecânicas finais das amostras. Os autores destacam que a pós-cura pode, em alguns casos, reduzir a anisotropia das peças, dependendo da natureza do fotopolímero utilizado. Esse estudo reforça que, em peças produzidas por DLP, o desempenho mecânico está diretamente relacionado não apenas ao processo de fabricação, mas também às condições de pós-processamento adotadas.

Riccio *et al.* (2021) investigaram os efeitos da cura em resinas fotossensíveis comerciais utilizadas em manufatura aditiva por SLA. Os autores observaram que o processo de cura promoveu, de modo geral, aumento da resistência à tração e do módulo de Young das resinas avaliadas. Entretanto, também foi verificada redução da plasticidade, favorecendo comportamento mais frágil em determinadas condições. Esses resultados indicam que o aumento de rigidez e resistência após a cura nem sempre representa melhoria global do comportamento mecânico, especialmente quando há redução da capacidade de deformação do material.

Cheadle *et al.* (2025), ao estudarem peças produzidas por fotopolimerização em cuba, avaliaram o efeito da orientação de impressão e dos parâmetros de pós-cura

sobre propriedades mecânicas e físicas. Os autores observaram que o aumento do tempo e da temperatura de pós-cura influenciou significativamente o grau de conversão e a resistência à tração das amostras. Esse estudo evidencia que, em resinas fotopolimerizáveis, os parâmetros de pós-processamento devem ser cuidadosamente definidos, uma vez que podem alterar de forma significativa o desempenho final das peças impressas.

Nesse contexto, o tratamento térmico tem sido investigado como uma estratégia de pós-processamento capaz de modificar o comportamento mecânico de polímeros impressos em 3D. Amza *et al.* (2021) avaliaram o tratamento térmico em peças poliméricas impressas, destacando que o aquecimento controlado pode promover melhorias nas propriedades mecânicas, especialmente por meio do alívio de tensões residuais e da melhoria da coesão entre regiões depositadas. Esse efeito é particularmente relevante em peças fabricadas por manufatura aditiva, nas quais o histórico térmico e a formação camada a camada influenciam diretamente o desempenho final.

Shbanah *et al.* (2023), ao estudarem o tratamento térmico em PLA impresso em 3D, observaram que a aplicação de temperaturas controladas pode resultar em aumento da resistência à tração e melhoria do comportamento mecânico, desde que os parâmetros de temperatura e tempo sejam adequadamente selecionados. Esses resultados indicam que o recozimento pode ser uma técnica eficiente para melhorar o desempenho de polímeros fabricados por manufatura aditiva, embora sua eficácia dependa diretamente da natureza do material e da faixa térmica aplicada.

Entretanto, observa-se que grande parte dos estudos sobre tratamento térmico em manufatura aditiva está concentrada em polímeros termoplásticos processados por extrusão, como PLA, ABS e PETG. Essa concentração cria uma lacuna quando se considera o comportamento de resinas acrílicas fotopolimerizáveis produzidas por DLP, uma vez que esses materiais apresentam mecanismos distintos de formação da peça, baseados na fotopolimerização, além de comportamento frequentemente mais frágil e dependente da cura.

No campo dos materiais acrílicos, Morgado (2022) investigou a influência do tratamento térmico a seco pós-cura em resinas acrílicas e bisacrílicas, demonstrando que o aquecimento controlado pode modificar propriedades mecânicas e ópticas desses materiais. Embora o estudo esteja associado a aplicações odontológicas e não

especificamente à impressão DLP, seus resultados contribuem para compreender como materiais acrílicos podem responder a processos térmicos após a cura.

Gu *et al.* (2019), por sua vez, avaliaram o efeito do tratamento térmico em compósitos de PTFE/PMMA, observando que as condições de temperatura, tempo e processamento influenciam diretamente o desempenho do material. Ainda que o sistema estudado não corresponda diretamente à resina acrílica fotopolimerizável utilizada neste trabalho, o estudo reforça a importância do controle térmico em materiais acrílicos e sistemas contendo PMMA, especialmente para evitar condições que possam prejudicar a integridade do material.

Dessa forma, embora a literatura apresente avanços relevantes no tratamento térmico de polímeros impressos por manufatura aditiva e em estudos com materiais acrílicos, ainda são limitados os trabalhos que avaliam de forma sistemática a influência do tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas de resinas acrílicas fotopolimerizáveis fabricadas por DLP. Além disso, poucos estudos correlacionam diretamente a escolha das temperaturas de tratamento com parâmetros térmicos, como a temperatura de transição vítrea e a estabilidade térmica obtidas por DSC e TGA. Assim, o presente trabalho busca contribuir para essa lacuna ao avaliar o efeito de diferentes temperaturas de tratamento térmico sobre as propriedades de tração de corpos de prova fabricados por DLP em resina acrílica fotopolimerizável comercial, utilizando o comportamento térmico de materiais acrílicos e sistemas à base de PMMA como referência comparativa.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de forma sequencial, contemplando as etapas de fabricação dos corpos de prova, pós-cura, tratamento térmico e caracterização mecânica. Inicialmente, os corpos de prova foram modelados de acordo com a norma ASTM D638 e fabricados por manufatura aditiva utilizando a tecnologia DLP.

Após a impressão, as amostras foram submetidas a um processo de pós-cura em câmara ultravioleta (UV), com o objetivo de completar a polimerização do material e contribuir para a estabilidade dimensional das peças. Em seguida, os corpos de prova foram divididos em grupos experimentais, sendo um grupo de referência sem tratamento térmico e três grupos submetidos a diferentes condições de temperatura.

Os tratamentos térmicos foram realizados em forno com controle de temperatura, seguidos de resfriamento gradual no interior do forno, visando reduzir variações térmicas bruscas e minimizar a formação de tensões internas. Após o tratamento, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração para obtenção das propriedades mecânicas.

A definição das temperaturas de tratamento térmico foi fundamentada em dados da literatura referentes ao comportamento térmico de materiais acrílicos e sistemas à base de PMMA, incluindo temperatura de transição vítrea e estabilidade térmica, obtidas por meio de análises de DSC e TGA, respectivamente (Callister; Rethwish, 2008; Morgado, 2022; GU *et al.*, 2019).

O processo metodológico adotado neste trabalho pode ser representado pelo fluxograma apresentado nas figuras 2 e 3.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia etapas de 1 a 5



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia etapas de 6 a 10



Fonte: produzida pelo autor.

4.1 Materiais

O material utilizado neste estudo foi uma resina acrílica fotopolimerizável comercial, empregada em processos de manufatura aditiva por fotopolimerização. De acordo com a ficha técnica do fabricante, trata-se da *Anycubic Standard Resin*,

compatível com impressoras LCD/DLP de comprimento de onda de 405 nm, indicada para aplicações como modelos, protótipos e peças funcionais de pesquisa e desenvolvimento.

Segundo a Ficha Técnica de Dados (TDS) fornecida pelo fabricante, a resina apresenta viscosidade entre 200 e 230 mPa·s a 25 °C, densidade entre 1,05 e 1,20 g/cm³, dureza Shore D entre 84 e 86, resistência à tração entre 40 e 50 MPa e alongamento na ruptura entre 12% e 16%. Esses valores foram utilizados como informações técnicas iniciais do material empregado no estudo.

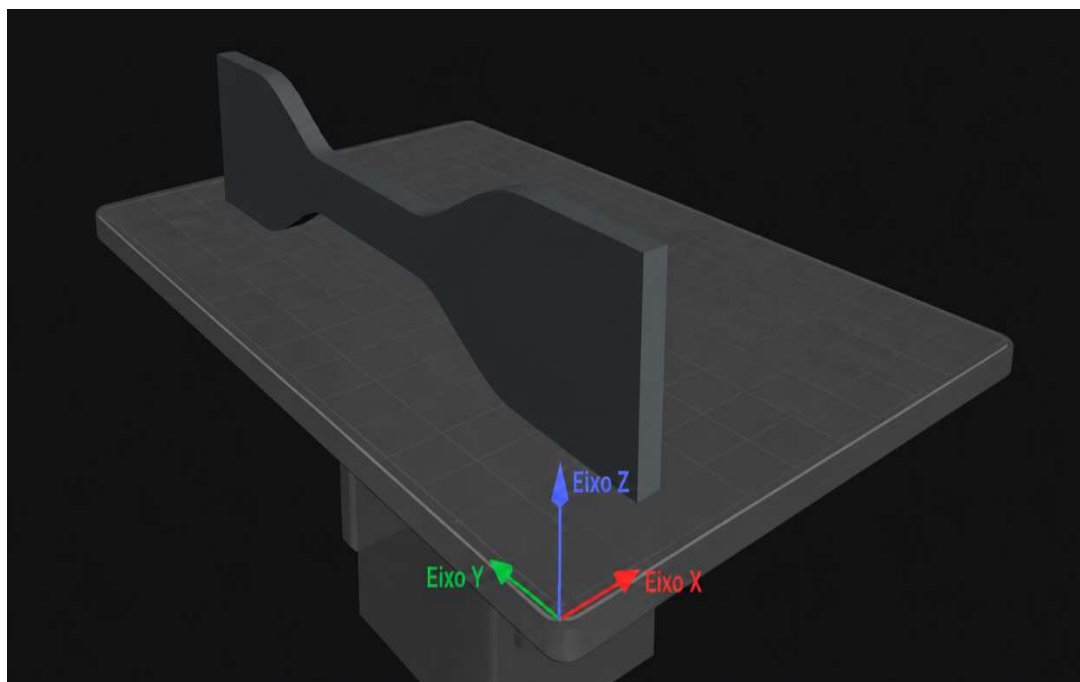
4.2 Métodos

A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: fabricação dos corpos de prova, pós-cura, aplicação dos tratamentos térmicos e caracterização mecânica. A caracterização térmica foi utilizada como base teórica, a partir de dados experimentais disponíveis na literatura científica, uma vez que os ensaios de TGA e DSC não foram realizados experimentalmente neste trabalho.

4.2.1 Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados por meio de manufatura aditiva utilizando a tecnologia DLP, com auxílio do software ChiTuBox para preparação dos arquivos e definição dos parâmetros de impressão. Os sentidos de impressão foram definidos conforme figura 4.

Figura 4 – Sentido de impressão



Fonte: produzida pelo autor.

Foi utilizada a impressora Creality LD-002H, operando com resina acrílica fotopolimerizável comercial. Os modelos foram desenvolvidos conforme a norma ASTM D638, tipo IV, apresentando dimensões aproximadas de 115 mm de comprimento, 19,00 mm de largura e 3,50 mm de espessura, garantindo conformidade geométrica com os ensaios mecânicos propostos.

A espessura de camada adotada foi de 0,05 mm, totalizando aproximadamente 430 camadas. O processo de fotopolimerização ocorreu por exposição à radiação ultravioleta, com comprimento de onda de 405 nm e tempo de exposição de 2 segundos por camada. As camadas iniciais foram submetidas a um tempo de exposição de 25 segundos, sendo utilizadas 8 camadas de base, com o objetivo de garantir adequada adesão à plataforma de impressão. As

Após a impressão, os corpos de prova foram submetidos à pós-cura em câmara ultravioleta SUNLU modelo *UV Resin Curing Box RC-1* por 300 segundos, visando completar a polimerização do material e estabilizar as amostras antes das etapas posteriores.

4.2.2 Tratamentos térmicos

As amostras foram divididas em quatro grupos experimentais, sendo um grupo de referência (sem tratamento térmico) e três grupos submetidos às temperaturas de 110 °C, 120 °C e 130 °C.

Os tratamentos térmicos foram realizados em forno com controle de temperatura, forno JUNG modelo LY07013 conforme figura 5, mantendo as amostras em regime isotérmico por 10 minutos em cada condição experimental. Esse intervalo de tempo foi adotado com fundamento em estudos de tratamento térmico pós-cura aplicados a materiais acrílicos, nos quais tempos reduzidos de exposição foram utilizados para promover alterações no comportamento do material sem submetê-lo a aquecimento prolongado (MORGADO, 2022).

Figura 5 – Forno JUNG para a realização de tratamentos térmicos



Fonte: produzida pelo autor.

Após o período de aquecimento, as amostras foram mantidas no forno até o resfriamento à temperatura ambiente. Esse procedimento foi adotado como critério experimental padronizado para todos os grupos tratados, permitindo avaliar o efeito das temperaturas de tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas dos corpos de prova. As amostras foram posicionadas sobre superfície plana durante o resfriamento, a fim de minimizar deformações geométricas.

4.2.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma ASTM D638, utilizando corpos de prova do tipo IV. Os testes foram conduzidos em máquina universal de ensaios, modelo AG-X Plus 10 kN da marca Shimadzu conforme figura 6, sob carregamento uniaxial e em temperatura ambiente. Para cada condição experimental, foram ensaiados cinco corpos de prova, totalizando quatro grupos, um grupo de referência sem tratamento térmico e três grupos tratados termicamente.

A partir das curvas tensão-deformação, foram determinadas as propriedades mecânicas de interesse, incluindo módulo de elasticidade aparente, resistência à tração, tenacidade e deformação na tensão máxima. Os resultados foram tratados estatisticamente por meio do cálculo de média e desvio padrão, permitindo comparar o comportamento dos grupos tratados termicamente com o grupo sem tratamento. Além disso, foi aplicada análise de variância *one-way* (ANOVA), considerando nível de significância de 5% ($p < 0,05$), com o objetivo de verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Quando identificada diferença significativa, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey HSD, a fim de determinar quais grupos diferiram entre si.

Figura 6 – Máquina universal de ensaios AG-X Plus 10 kN



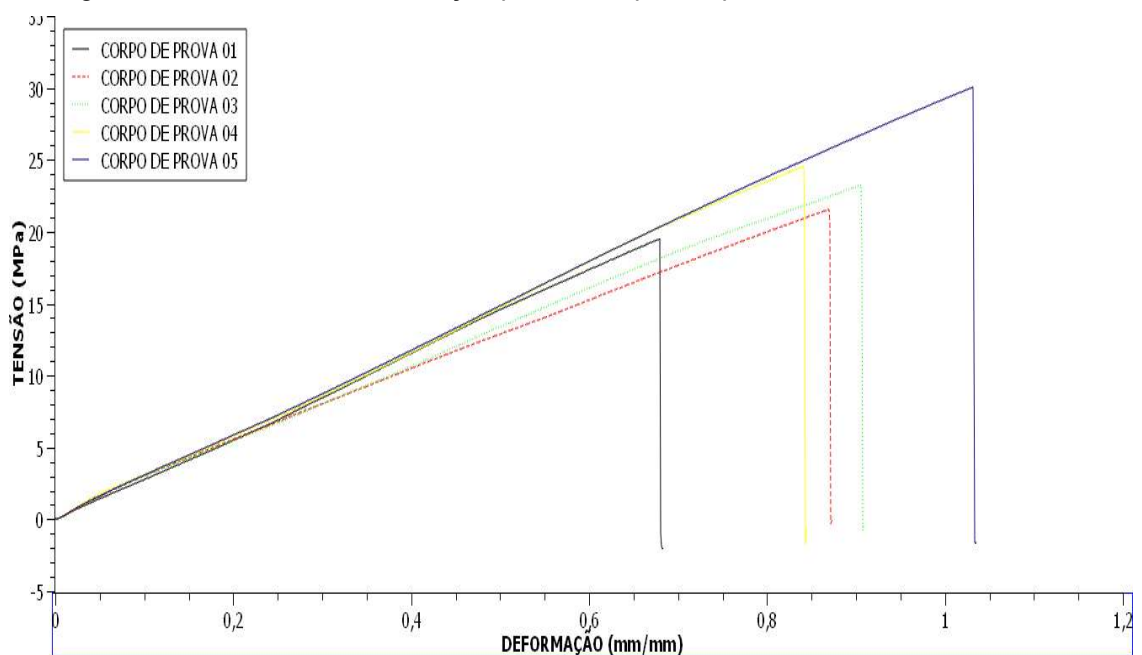
Fonte: Shimadzu Corporation, 2014.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova fabricados por manufatura aditiva via DLP.

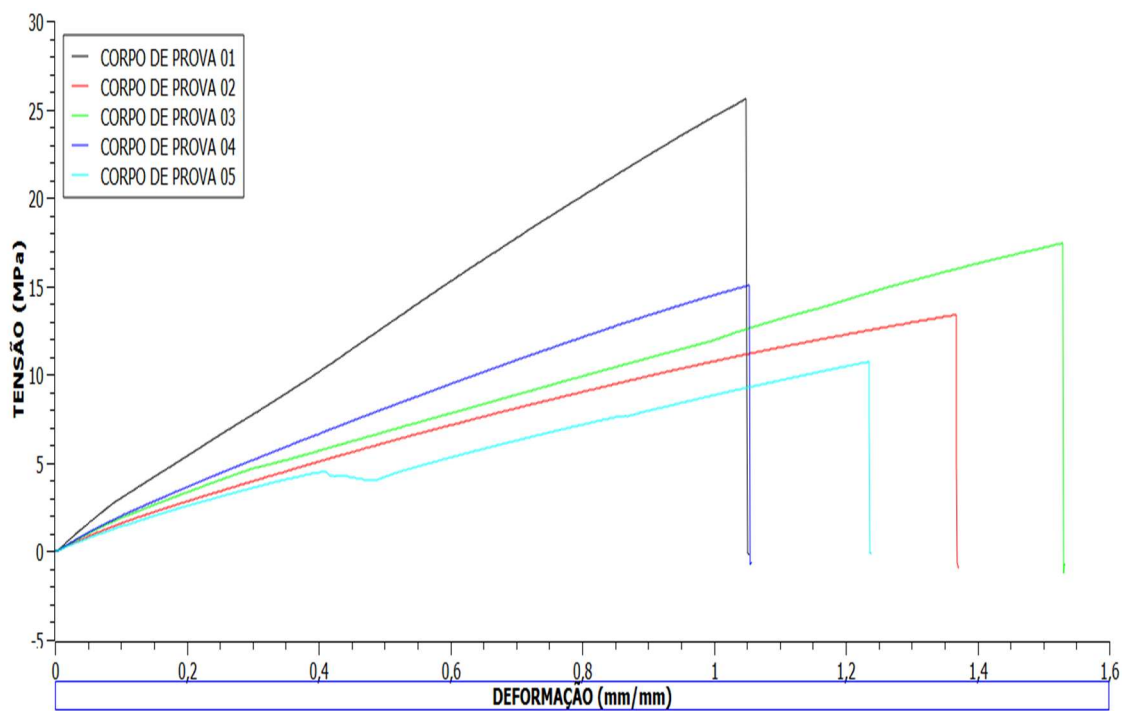
As figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam as curvas de tensão deformação dos corpos de prova para cada grupo testado. As figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam uma amostra dos corpos de prova de cada grupo.

Figura 7 – Curva tensão-deformação para os corpos de prova sem tratamento térmico



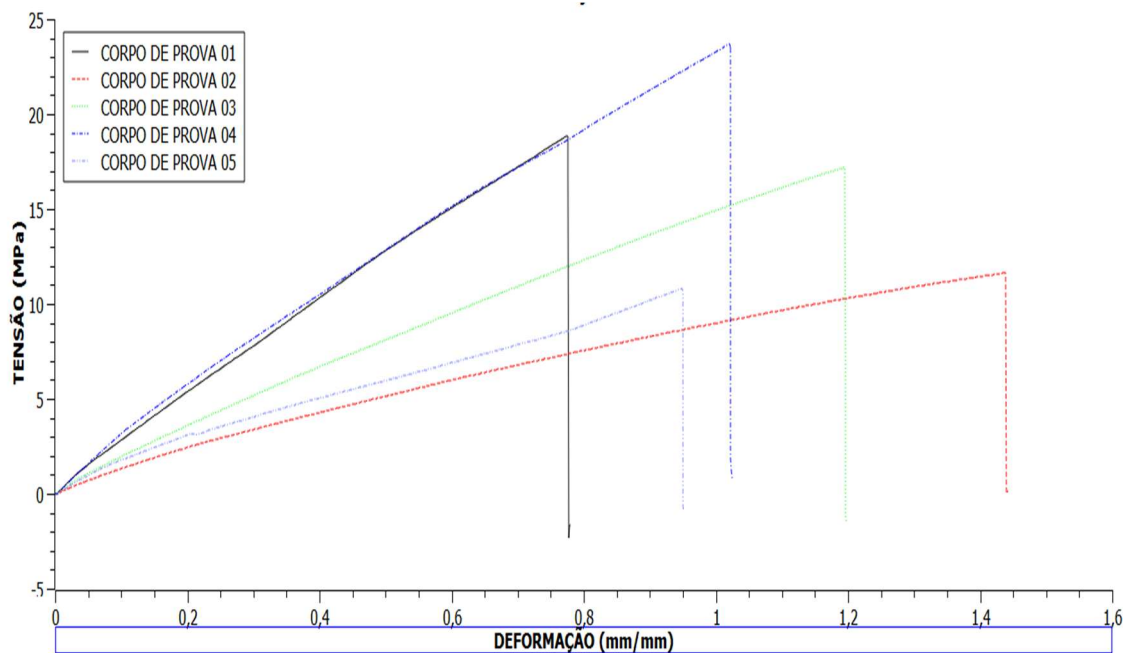
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 8 – Curva tensão-deformação para os corpos de prova tratados temicamente à 110 °C



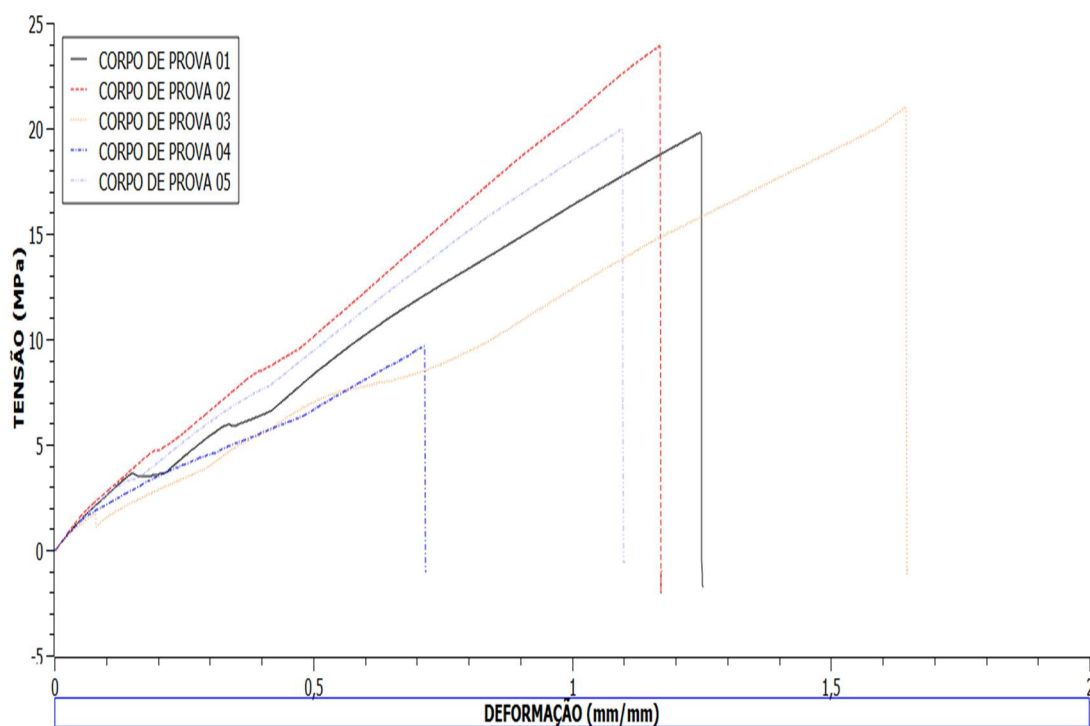
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 9 – Curva tensão-deformação para os corpos de prova tratados temicamente à 120 °C



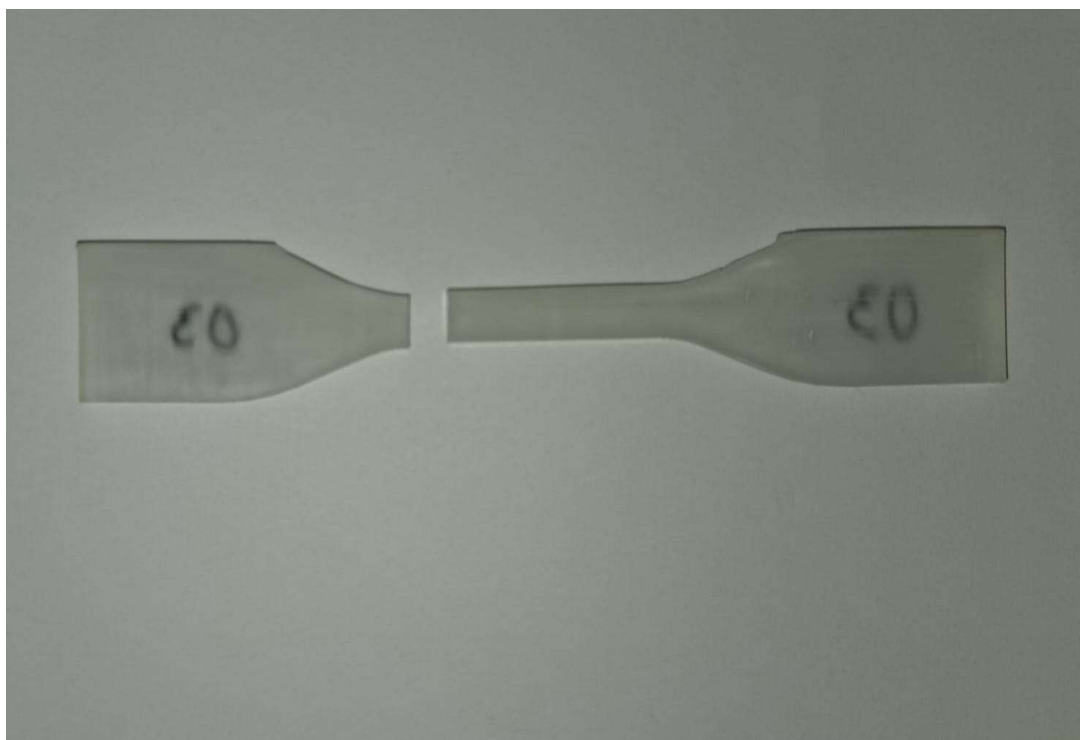
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 10 – Curva tensão-deformação para os corpos de prova tratados termicamente à 130 °C



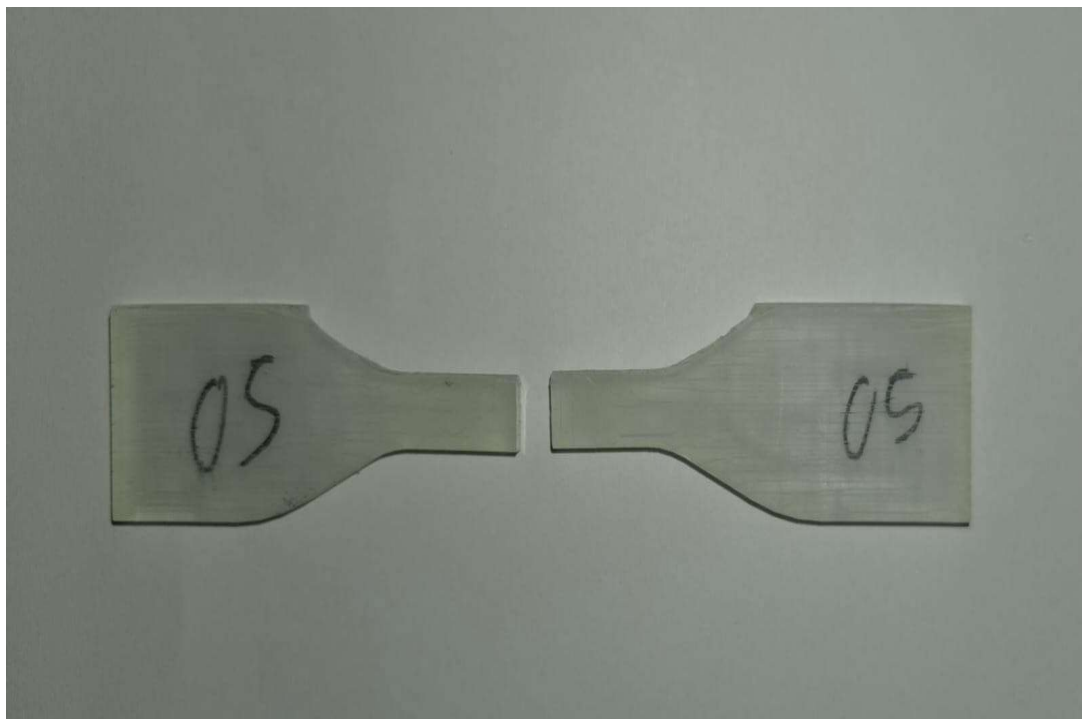
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 11 – Corpos de prova sem tratamento térmico



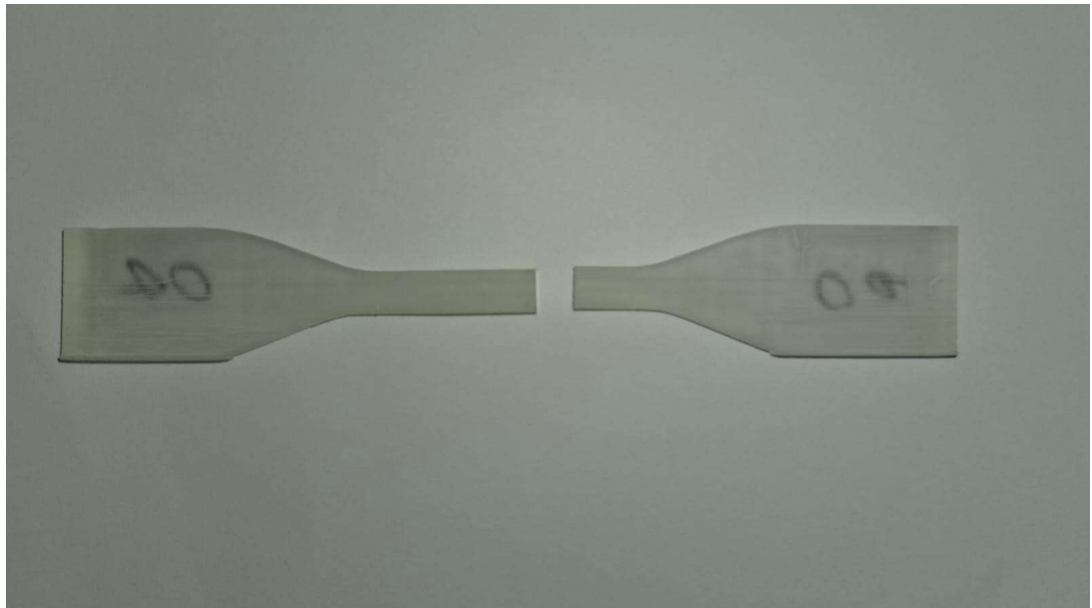
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 12 – Corpos de prova tratados termicamente à 110 °C



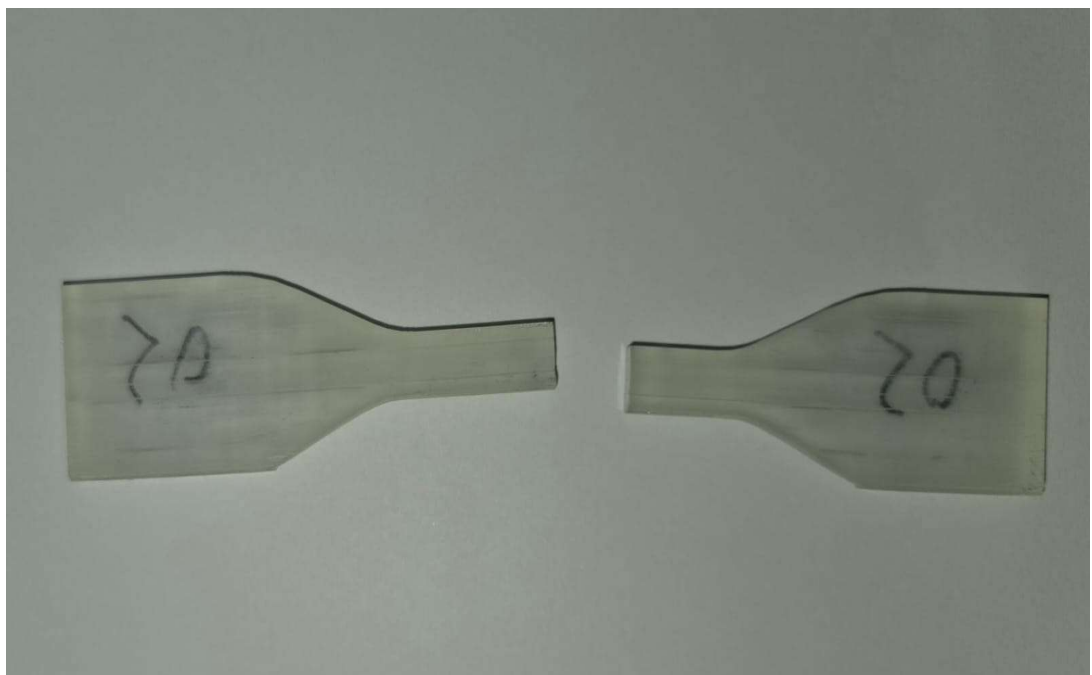
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 13 – Corpos de prova tratados termicamente à 120 °C



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 14 – Corpos de prova tratados termicamente à 130 °C



Fonte: produzida pelo autor.

A tabela 1 apresenta os valores médios e os respectivos desvios padrão obtidos para cada condição experimental.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas médias dos corpos de prova

Condição	Tensão máxima média (MPa)	Módulo aparente médio (MPa)	Tenacidade média (MJ/m ³)	Deformação na tensão máxima (%)
Fabricante	40-50	1600-1800	-	12-16
Sem tratamento térmico	23,8 ± 4	766,7 ± 63,3	0,39 ± 0,12	3,15 ± 0,46
110 °C	16,4 ± 5,7	357,7 ± 176,4	0,40 ± 0,12	4,53 ± 0,75
120 °C	16,4 ± 5,3	443,4 ± 207,9	0,34 ± 0,11	3,91 ± 0,92
130 °C	18,9 ± 5,4	406,9 ± 103,1	0,43 ± 0,18	4,27 ± 1,20

Fonte: produzida pelo autor.

Com o objetivo de verificar se as diferenças observadas entre os grupos eram estatisticamente significativas, foi aplicada análise de variância *one-way* (ANOVA) para cada propriedade avaliada. Os resultados, conforme tabela 2, indicaram que apenas o módulo aparente de elasticidade apresentou diferença estatisticamente significativa entre os grupos, com $F(3,16) = 7,724$ e $p = 0,0021$. Para a tensão máxima, a tenacidade e a deformação na tensão máxima, os valores de p foram superiores a 0,05, indicando ausência de diferença estatisticamente significativa entre as condições avaliadas.

Tabela 2 – Resultados teste ANOVA

	Tensão máxima média (MPa)	Módulo aparente médio (MPa)	Tenacidade média (MJ/m ³)	Deformação na tensão máxima (%)
F	2,302	7,724	0,382	2,351
p	0,1161	0,0021	0,7674	0,1108
Resultado	Não significativo	Significativo	Não significativo	Não significativo

Fonte: produzida pelo autor.

Como a ANOVA indicou diferença significativa apenas para o módulo aparente de elasticidade, aplicou-se o teste de Tukey HSD para essa propriedade. Os resultados, conforme tabela 3, demonstraram que o grupo sem tratamento térmico diferiu significativamente dos três grupos tratados, enquanto não houve diferença significativa entre as temperaturas de 110 °C, 120 °C e 130 °C.

Tabela 3 – Resultados teste Tukey HSD para o módulo de elasticidade aparente

Comparação	Diferença média (MPa)	p	Resultado
Sem TT x 110°C	409,0	0,0026	Significativo
Sem TT x 120°C	323,3	0,0164	Significativo
Sem TT x 130°C	359,8	0,0075	Significativo
110°C x 120°C	85,7	0,8006	Não Significativo
110°C x 130°C	49,2	0,9527	Não Significativo
120°C x 130°C	36,5	0,9796	Não Significativo

Fonte: produzida pelo autor.

Dessa forma, embora tenham sido observadas variações nos valores médios das propriedades mecânicas, o único efeito confirmado estatisticamente do tratamento térmico foi a redução do módulo aparente de elasticidade. Para as demais propriedades, as diferenças observadas devem ser interpretadas como tendências experimentais, sem confirmação estatística ao nível de 5%.

5.1 Curvas tensão-deformação

As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração permitiram observar o comportamento mecânico dos corpos de prova em cada condição experimental. De modo geral, as amostras apresentaram comportamento predominantemente frágil, caracterizado por uma região aproximadamente linear até a tensão máxima, seguida de ruptura abrupta.

No grupo sem tratamento térmico, as curvas, figura 7, apresentaram maior inclinação inicial e maiores valores de tensão máxima em comparação aos grupos tratados termicamente. Esse comportamento indica que os corpos de prova sem tratamento apresentaram maior rigidez aparente e maior resistência à tração dentro das condições avaliadas.

Nos grupos submetidos aos tratamentos térmicos, figuras 8, 9 e 10, observou-se maior dispersão entre os corpos de prova, especialmente nas condições de 110 °C e 120 °C. Essa variação pode estar relacionada à sensibilidade da resina fotopolimerizável ao aquecimento, à presença de heterogeneidades provenientes do processo de impressão e à resposta individual de cada corpo de prova ao ciclo térmico aplicado.

5.2 Tensão máxima

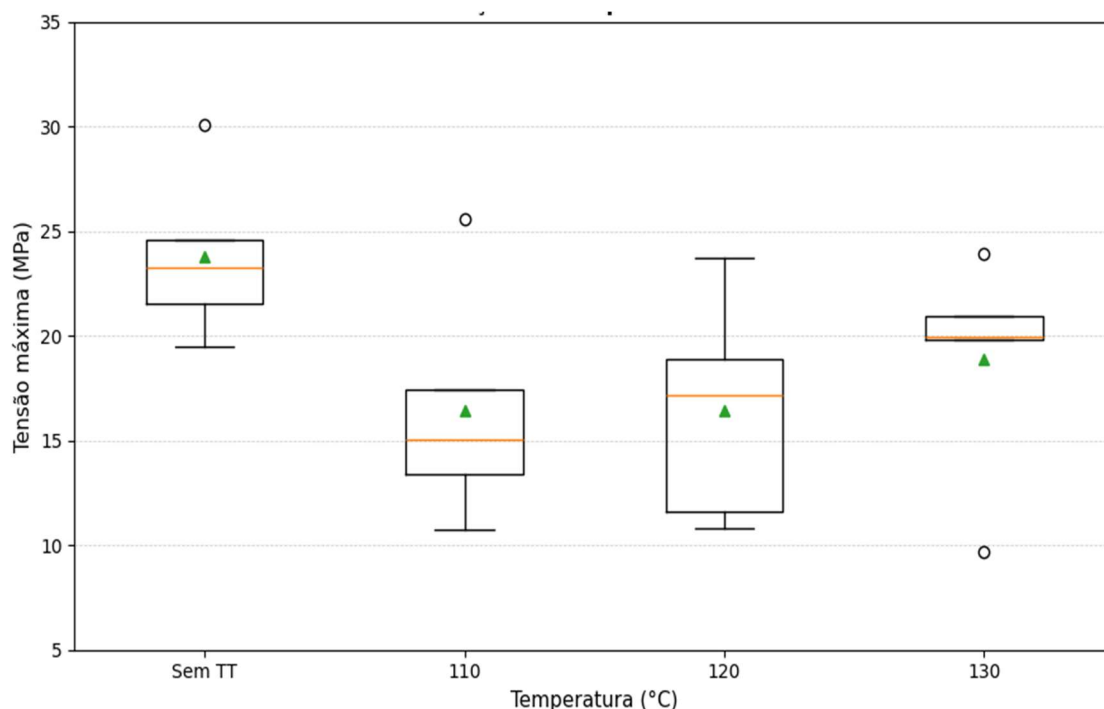
A tensão máxima representa a maior tensão suportada pelo corpo de prova durante o ensaio de tração. Os resultados indicaram que o grupo sem tratamento térmico apresentou a maior média de tensão máxima, com valor de $23,8 \pm 4$ MPa. Em comparação, os grupos tratados a 110 °C, 120 °C e 130 °C apresentaram médias de $16,4 \pm 5,7$ MPa, $16,4 \pm 5,3$ MPa e $18,9 \pm 5,4$ MPa, respectivamente.

Esses resultados indicam que, nas condições avaliadas, o tratamento térmico não promoveu aumento da resistência máxima à tração. Pelo contrário, observou-se redução nos valores médios de tensão máxima nos grupos tratados em comparação ao grupo de referência. A maior redução foi observada nas condições de 110 °C e 120°C, que apresentaram valores médios muito próximos entre si.

A condição de 130 °C apresentou tensão máxima média superior às condições de 110 °C e 120 °C, porém ainda inferior ao grupo sem tratamento térmico. Esse resultado sugere que o aumento da temperatura de tratamento não foi suficiente para recuperar a resistência observada no grupo de referência, embora tenha proporcionado desempenho intermediário entre os grupos tratados.

O *boxplot* da tensão máxima, figura 15, evidencia também a dispersão dos resultados dentro de cada grupo. A presença de valores atípicos em algumas condições indica variabilidade experimental, possivelmente associada a diferenças locais de cura, pequenas imperfeições geométricas, defeitos internos ou variações decorrentes do processo de impressão DLP.

Figura 15 – *Boxplot* da tensão máxima em função da temperatura de tratamento térmico



Fonte: produzida pelo autor.

5.3 Módulo de elasticidade aparente

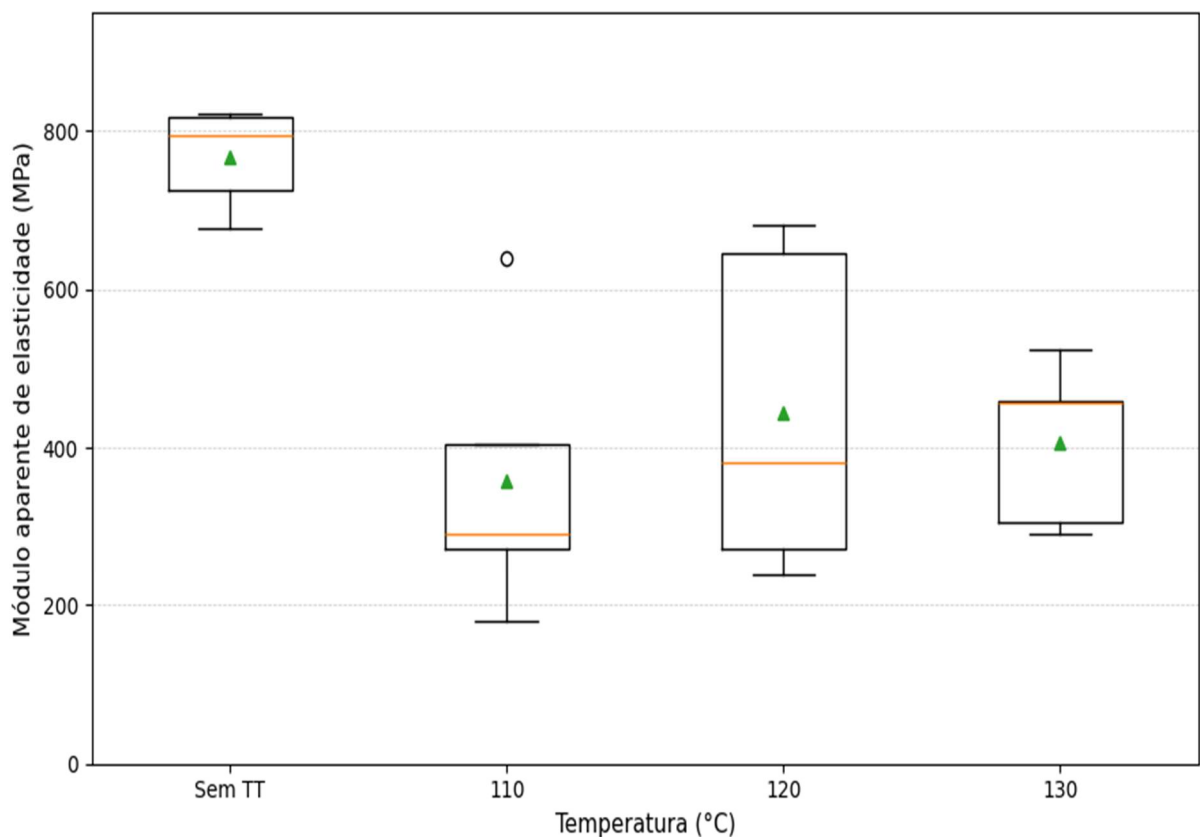
O módulo de elasticidade aparente foi determinado a partir da região linear inicial das curvas tensão-deformação, utilizando o mesmo critério de cálculo para todos os corpos de prova.

O grupo sem tratamento térmico apresentou o maior módulo aparente médio, com valor de $766,7 \pm 63,3$ MPa. Após o tratamento térmico, foram observadas reduções nos valores médios dessa propriedade. Os grupos tratados a 110 °C, 120 °C e 130 °C apresentaram módulos médios de $357,7 \pm 176,4$ MPa, $443,4 \pm 207,9$ MPa e $406,9 \pm 103,1$ MPa, respectivamente.

Esses resultados indicam que o tratamento térmico reduziu a rigidez aparente dos corpos de prova. Essa redução pode estar associada ao aumento da mobilidade molecular em temperaturas próximas ou superiores à faixa de transição vítrea adotada como referência. Nessa condição, o aquecimento pode favorecer relaxações estruturais e alterações internas no material, resultando em menor resistência à deformação elástica inicial.

A elevada dispersão, figura 16, observada nos grupos tratados, principalmente nas condições de 110 °C e 120 °C, sugere que o efeito do tratamento térmico não ocorreu de forma uniforme entre os corpos de prova. Esse comportamento pode estar relacionado à natureza fotopolimerizável da resina, ao grau de cura de cada amostra e à possível sensibilidade do material a pequenas variações de temperatura, geometria ou defeitos internos.

Figura 16 - *Boxplot* do módulo de elasticidade aparente em função da temperatura



Fonte: produzida pelo autor.

5.4 Tenacidade e deformação máxima

Os resultados obtidos indicaram valores médios de tenacidade de $0,39 \pm 0,12$ MJ/m³ para o grupo sem tratamento térmico, $0,40 \pm 0,12$ MJ/m³ para o grupo tratado a 110°C, $0,34 \pm 0,11$ MJ/m³ para o grupo tratado a 120°C e $0,43 \pm 0,18$ MJ/m³ para o grupo tratado a 130°C.

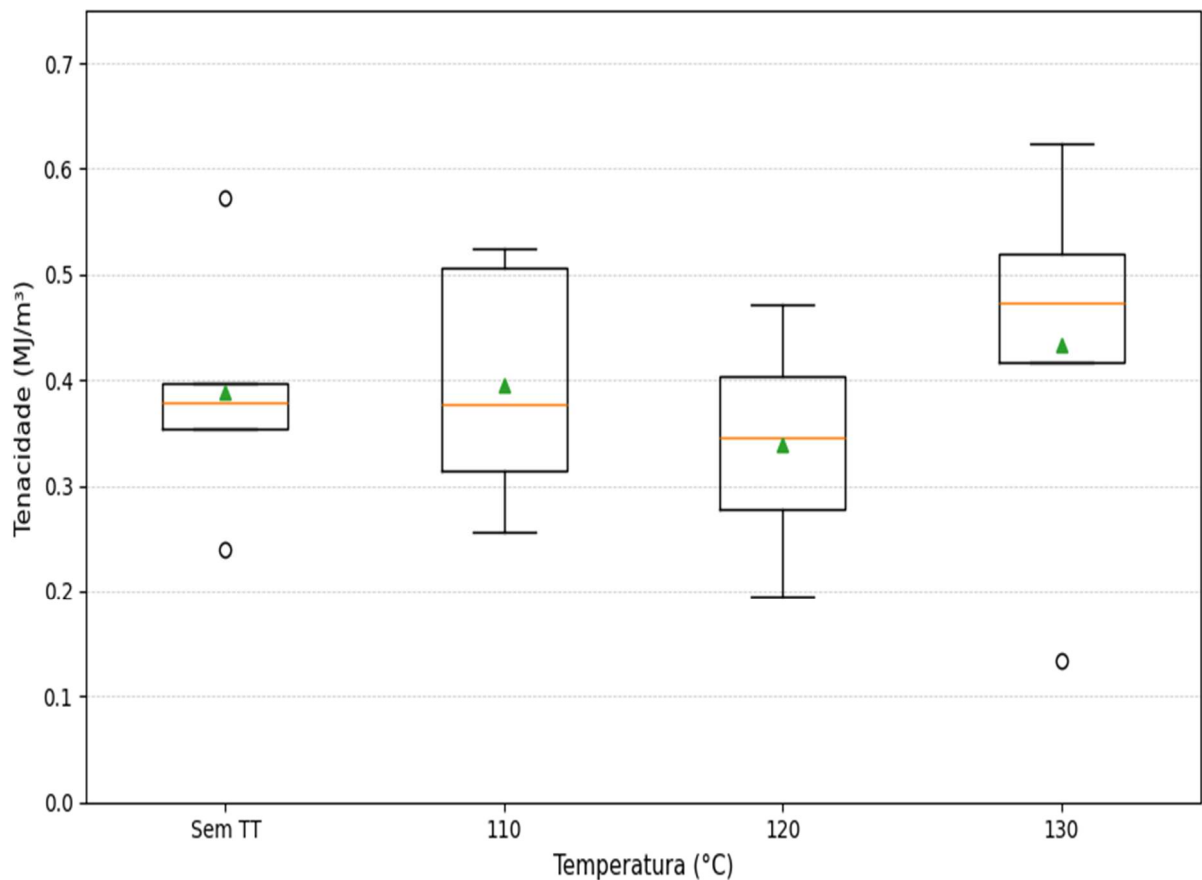
Diferentemente do comportamento observado para a tensão máxima e para o módulo de elasticidade aparente, a tenacidade não apresentou redução evidente em todos os grupos tratados. A condição de 130 °C apresentou o maior valor médio de

tenacidade, enquanto a condição de 120 °C apresentou o menor valor médio. O grupo tratado a 110 °C apresentou valor médio próximo ao grupo sem tratamento térmico.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a tenacidade depende simultaneamente da tensão suportada e da deformação alcançada até a ruptura. Embora os tratamentos térmicos tenham promovido tendência de redução na tensão máxima média, alguns grupos apresentaram maior deformação na tensão máxima, o que contribuiu para manter ou até elevar a energia absorvida antes da ruptura.

Dessa forma, os resultados sugerem que o tratamento térmico pode ter reduzido a resistência e a rigidez do material, mas não necessariamente reduziu sua capacidade de absorção de energia até a tensão máxima. No caso do tratamento a 130 °C, a maior tenacidade média, mostrado na figura 17, pode estar associada ao aumento da deformação antes da ruptura em algumas amostras.

Figura 17 - *Boxplot* da tenacidade em função da temperatura



Fonte: produzida pelo autor.

5.5 Discussão geral dos efeitos do tratamento térmico

A análise conjunta dos resultados indica que o tratamento térmico alterou o comportamento mecânico da resina acrílica fotopolimerizável fabricada por DLP. A hipótese inicial era que o aquecimento em temperaturas próximas ou superiores à faixa de transição vítrea pudesse promover alívio de tensões residuais e melhorar o desempenho mecânico dos corpos de prova. No entanto, os resultados experimentais indicaram que essa hipótese não foi confirmada de forma global, uma vez que apenas o módulo de elasticidade aparente apresentou diferença estatisticamente significativa entre os grupos.

A interpretação dos resultados deve considerar que a escolha das temperaturas de tratamento térmico foi baseada no comportamento térmico de materiais acrílicos e sistemas à base de PMMA descritos na literatura. Como a ficha técnica da resina utilizada neste trabalho não apresenta valores experimentais de temperatura de transição vítrea (T_g), DSC ou TGA, adotou-se como referência comparativa um estudo que caracterizou chapas comerciais de polimetilmetacrilato (PMMA) quanto à massa molecular, ao teor de monômero residual e à temperatura de transição vítrea. Nesse estudo, a T_g foi determinada por análise termomecânica, sendo obtidos valores médios entre 85,9 °C e 119,8 °C para os materiais avaliados (Jagger; Okdeh, 1995). Além disso, dados de estabilidade térmica obtidos por TGA em sistemas contendo PMMA indicam que a degradação térmica ocorre em temperaturas significativamente superiores à T_g , sendo frequentemente observada acima de 250 °C (Gu *et al.*, 2019; Morgado, 2022). Dessa forma, as temperaturas selecionadas permaneceram próximas ou acima da faixa de T_g adotada como referência e abaixo da região típica de degradação térmica, permitindo avaliar a influência do aquecimento controlado sobre o comportamento mecânico das amostras sem aproximar o material de uma condição térmica severa de degradação.

A temperatura de 110 °C foi definida por estar dentro da faixa superior de T_g reportada para materiais comerciais à base de PMMA, enquanto a temperatura de 120 °C foi escolhida por se aproximar do maior valor de T_g identificado na literatura, correspondente a aproximadamente 119,8 °C. Já a temperatura de 130 °C foi adotada como uma condição térmica mais elevada, acima da faixa de T_g de referência, com o objetivo de verificar se um aquecimento mais intenso poderia alterar positiva ou

negativamente as propriedades mecânicas dos corpos de prova (Jagger; Okdeh, 1995; Gu *et al.*, 2019; Morgado, 2022).

Durante a etapa preliminar do estudo, também foi avaliada a possibilidade de realizar o tratamento térmico a 150 °C. No entanto, os corpos de prova submetidos a essa condição apresentaram fragilidade acentuada após o aquecimento, dificultando o manuseio e indicando possível comprometimento da integridade mecânica das amostras. Em razão desse comportamento, a temperatura de 150 °C não foi mantida no planejamento experimental final, optando-se por limitar os tratamentos térmicos às temperaturas de 110 °C, 120 °C e 130 °C.

Os corpos de prova sem tratamento térmico apresentaram os maiores valores médios de tensão máxima e módulo aparente de elasticidade. Isso sugere que, para a resina e as condições avaliadas, o tratamento térmico não promoveu aumento da resistência à tração nem da rigidez aparente. No caso da tensão máxima, observou-se tendência de redução nos grupos tratados; entretanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa ao nível de 5%. Já para o módulo aparente de elasticidade, a redução observada foi confirmada estatisticamente pela ANOVA, e o teste de Tukey HSD indicou que o grupo sem tratamento térmico diferiu significativamente dos três grupos tratados.

A redução do módulo aparente pode estar associada ao efeito do aquecimento sobre a rede polimérica formada após a fotopolimerização. Como as temperaturas selecionadas foram próximas ou superiores à faixa de Tg adotada como referência para materiais acrílicos e sistemas à base de PMMA, é possível que tenha ocorrido aumento da mobilidade molecular e relaxação estrutural. Embora esses fenômenos possam ser benéficos em alguns polímeros, neste caso podem ter contribuído para a redução da rigidez aparente do material.

Outro fator relevante é que resinas fotopolimerizáveis acrílicas utilizadas em impressão DLP possuem comportamento diferente de termoplásticos convencionais. Após a cura UV, o material forma uma rede polimérica reticulada, cuja resposta ao aquecimento pode envolver relaxações internas, alterações dimensionais, fragilização localizada ou redistribuição de tensões. Assim, os resultados indicam que o tratamento térmico deve ser aplicado com cautela em resinas fotopolimerizáveis acrílicas, especialmente quando o objetivo é aumentar a resistência à tração ou a rigidez do material.

A comparação com estudos envolvendo resinas fotopolimerizáveis submetidas à pós-cura em temperaturas inferiores à T_g evidencia que os efeitos do tratamento térmico dependem fortemente das condições adotadas. Cheadle *et al.* (2025), ao avaliarem a influência da orientação de impressão e dos parâmetros de pós-cura em materiais produzidos por fotopolimerização em cuba, destacam que os protocolos de pós-cura normalmente utilizam temperaturas de até 80 °C, abaixo da temperatura de transição vítrea do polímero, e que o aumento do tempo e da temperatura de pós-cura pode influenciar significativamente o grau de conversão e a resistência à tração. De forma semelhante, Riccio *et al.* (2021), ao investigarem resinas fotossensíveis submetidas à cura em temperaturas controladas, observaram aumento do módulo de Young e da resistência à tração após o processo de cura, embora acompanhado de redução da plasticidade e tendência a comportamento mais frágil. Monzón *et al.* (2017), em estudo com peças fabricadas por DLP, também verificaram que a pós-cura pode influenciar as propriedades mecânicas e reduzir a anisotropia em determinadas resinas, dependendo da natureza do fotopolímero.

Esses resultados indicam que tratamentos realizados em temperaturas inferiores à T_g, especialmente quando associados à radiação UV, podem favorecer a continuidade da fotopolimerização, o aumento do grau de cura e a formação de ligações cruzadas adicionais, resultando em maior resistência e rigidez. No presente trabalho, entretanto, os corpos de prova já haviam sido submetidos à pós-cura UV previamente, e o tratamento térmico posterior foi realizado em temperaturas próximas ou superiores à faixa de T_g adotada como referência, sem nova etapa de radiação UV. Dessa forma, o efeito predominante pode ter sido diferente daquele observado em pós-curas abaixo da T_g, estando mais associado à relaxação estrutural, à redistribuição de tensões internas e à redução da rigidez aparente do material.

Assim, enquanto parte da literatura relata aumento de resistência e rigidez em resinas fotopolimerizáveis submetidas à pós-cura em temperaturas moderadas e inferiores à T_g, os resultados deste trabalho indicaram redução estatisticamente significativa apenas no módulo aparente de elasticidade após o tratamento térmico a 110 °C, 120 °C e 130 °C. Essa diferença sugere que o aquecimento aplicado após a pós-cura UV inicial, em temperaturas próximas ou superiores à faixa de transição vítrea de referência, não atuou principalmente como um processo de complementação de cura, mas como um ciclo térmico capaz de modificar a estrutura já reticulada da

resina. Portanto, a comparação com a literatura reforça que o tratamento térmico de resinas fotopolimerizáveis não deve ser generalizado: abaixo da T_g e associado à pós-cura UV, pode favorecer o aumento do grau de polimerização e da rigidez; próximo ou acima da T_g , como nas condições avaliadas neste estudo, pode promover relaxações estruturais e redução da rigidez aparente.

Apesar da tendência de redução na tensão máxima média e da redução estatisticamente significativa do módulo aparente, a tenacidade apresentou comportamento menos uniforme. A condição de 130 °C apresentou a maior tenacidade média, indicando que o material pode ter absorvido mais energia até a tensão máxima, mesmo com resistência média inferior à do grupo sem tratamento. Entretanto, a análise estatística não indicou diferença significativa para essa propriedade. Portanto, não é possível afirmar que o tratamento térmico aumentou de forma estatisticamente significativa a capacidade de absorção de energia do material.

Dessa forma, os dados obtidos indicam que o tratamento térmico, nas condições avaliadas, não foi eficiente para promover melhoria global das propriedades mecânicas da resina acrílica fotopolimerizável. O principal efeito confirmado estatisticamente foi a redução do módulo aparente de elasticidade, enquanto as variações observadas na tensão máxima, na tenacidade e na deformação na tensão máxima devem ser interpretadas como tendências experimentais. Assim, determinados ciclos térmicos podem modificar o equilíbrio entre resistência, rigidez, deformabilidade e tenacidade, mas, neste estudo, não resultaram em ganho global de desempenho em tração.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados por manufatura aditiva via *Digital Light Processing* (DLP), utilizando uma resina acrílica fotopolimerizável comercial. Para isso, foram produzidos corpos de prova conforme a norma ASTM D638, os quais foram divididos em quatro grupos experimentais: um grupo de referência, sem tratamento térmico, e três grupos submetidos às temperaturas de 110 °C, 120 °C e 130 °C, durante 10 minutos.

A definição das temperaturas de tratamento térmico foi fundamentada em dados da literatura referentes ao comportamento térmico de materiais acrílicos e sistemas à base de PMMA. Como a ficha técnica da resina utilizada não apresenta valores experimentais de temperatura de transição vítrea, DSC ou TGA, adotou-se como referência comparativa a faixa de Tg reportada para materiais comerciais à base de PMMA, entre 85,9 °C e 119,8 °C. Dessa forma, as temperaturas selecionadas permitiram avaliar o comportamento mecânico da resina em condições próximas e superiores à faixa de transição vítrea adotada como referência, sem aproximar o material da região típica de degradação térmica descrita na literatura.

Os resultados obtidos demonstraram que o tratamento térmico, nas condições avaliadas, não promoveu aumento da resistência máxima à tração. O grupo sem tratamento térmico apresentou a maior tensão máxima média, com valor de $23,8 \pm 4,0$ MPa, enquanto os grupos tratados a 110 °C, 120 °C e 130 °C apresentaram valores médios inferiores, de $16,4 \pm 5,7$ MPa, $16,4 \pm 5,3$ MPa e $18,9 \pm 5,4$ MPa, respectivamente. Entretanto, a análise de variância não indicou diferença estatisticamente significativa entre os grupos para essa propriedade, com $F(3,16) = 2,302$ e $p = 0,1161$. Dessa forma, a redução observada nos valores médios de tensão máxima deve ser interpretada como uma tendência, sem confirmação estatística.

Em relação ao módulo de elasticidade aparente, observou-se redução nos valores médios dos grupos tratados em comparação ao grupo sem tratamento térmico. O grupo de referência apresentou módulo aparente médio de $766,7 \pm 63,3$ MPa, enquanto os grupos tratados a 110 °C, 120 °C e 130 °C apresentaram valores de $357,7 \pm 176,4$ MPa, $443,4 \pm 207,9$ MPa e $406,9 \pm 103,1$ MPa, respectivamente. Diferentemente das demais propriedades avaliadas, a ANOVA indicou diferença estatisticamente significativa para o módulo aparente de elasticidade, com $F(3,16) =$

7,724 e $p = 0,0021$. O teste de Tukey HSD demonstrou que o grupo sem tratamento térmico diferiu significativamente dos três grupos tratados, enquanto não houve diferença significativa entre as temperaturas de 110 °C, 120 °C e 130 °C. Assim, o principal efeito estatisticamente confirmado do tratamento térmico foi a redução da rigidez aparente dos corpos de prova.

A tenacidade apresentou comportamento distinto entre os grupos, sem tendência uniforme de aumento ou redução. O grupo sem tratamento térmico apresentou tenacidade média de $0,39 \pm 0,12 \text{ MJ/m}^3$, enquanto os grupos tratados a 110 °C, 120 °C e 130 °C apresentaram valores médios de $0,40 \pm 0,12 \text{ MJ/m}^3$, $0,34 \pm 0,11 \text{ MJ/m}^3$ e $0,43 \pm 0,18 \text{ MJ/m}^3$, respectivamente. Embora a condição de 130°C tenha apresentado o maior valor médio dessa propriedade, a análise estatística não indicou diferença significativa entre os grupos, com $F(3,16) = 0,382$ e $p = 0,7674$. Portanto, não é possível afirmar estatisticamente que o tratamento térmico aumentou a capacidade de absorção de energia do material.

Com relação à deformação na tensão máxima, os grupos tratados apresentaram valores médios superiores ao grupo sem tratamento térmico em algumas condições. Entretanto, a ANOVA também não indicou diferença estatisticamente significativa para essa propriedade, com $F(3,16) = 2,351$ e $p = 0,1108$. Assim, a possível maior deformabilidade observada nos grupos tratados deve ser interpretada apenas como tendência experimental.

Dessa forma, conclui-se que a hipótese inicial de melhoria global das propriedades mecânicas pelo tratamento térmico não foi confirmada para as condições experimentais adotadas. O tratamento térmico promoveu alteração estatisticamente significativa apenas no módulo de elasticidade aparente, resultando em redução da rigidez aparente dos corpos de prova. Para a tensão máxima, a tenacidade e a deformação na tensão máxima, as diferenças observadas entre as médias não foram estatisticamente significativas ao nível de 5%.

Portanto, os resultados indicam que o recozimento aplicado a 110 °C, 120 °C e 130 °C deve ser utilizado com cautela em resinas acrílicas fotopolimerizáveis fabricadas por DLP. Nas condições avaliadas, o tratamento térmico modificou o comportamento mecânico do material, mas não promoveu ganhos globais de desempenho em tração. A principal alteração confirmada foi a redução da rigidez

aparente, enquanto as demais variações observadas permaneceram como tendências experimentais não confirmadas estatisticamente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho evidenciou aspectos que, por limitações de escopo, tempo ou recursos, não puderam ser aprofundados, mas que representam desdobramentos naturais da pesquisa realizada e podem contribuir para uma compreensão mais ampla do tema.

A principal limitação metodológica deste estudo foi a ausência de caracterização térmica experimental da resina acrílica fotopolimerizável utilizada. Como a ficha técnica do fabricante não apresenta dados de temperatura de transição vítrea, DSC ou TGA, as temperaturas de tratamento térmico foram definidas com base em referências da literatura para materiais acrílicos e sistemas contendo PMMA. Dessa forma, recomenda-se que trabalhos futuros realizem a caracterização térmica experimental da resina por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Análise Termogravimétrica (TGA), permitindo definir com maior precisão a faixa de transição vítrea e os limites de estabilidade térmica do material específico utilizado, tornando a escolha das temperaturas de tratamento mais fundamentada.

O tempo de exposição ao tratamento térmico foi fixado em 10 minutos para todas as condições experimentais. Investigar a influência de diferentes tempos de exposição sobre as propriedades mecânicas seria uma contribuição relevante, uma vez que a duração do ciclo térmico pode afetar o grau de relaxação estrutural e, conseqüentemente, o comportamento mecânico do material.

Também se recomenda que estudos futuros avaliem tratamentos térmicos realizados em temperaturas inferiores à T_g da resina, especialmente após a determinação experimental dessa temperatura por DSC ou DMA. A investigação de ciclos térmicos abaixo da transição vítrea permitiria verificar se temperaturas mais moderadas são capazes de promover alívio de tensões residuais ou complementação do pós-processamento sem provocar relaxação estrutural excessiva, fragilização ou redução significativa da rigidez aparente. Essa abordagem possibilitaria comparar o efeito de tratamentos abaixo, próximos e acima da T_g , contribuindo para a definição de uma janela térmica mais adequada para resinas fotopolimerizáveis fabricadas por DLP.

O resfriamento dos corpos de prova foi realizado no forno até a temperatura ambiente. Estudos futuros poderiam avaliar o efeito de diferentes condições de resfriamento, como resfriamento em temperatura ambiente ou resfriamento em meios

específicos, verificando se a taxa de resfriamento influencia as propriedades mecânicas finais.

A elevada dispersão observada nos grupos tratados, especialmente nas condições de 110 °C e 120 °C, sugere que o aumento do número de corpos de prova por grupo poderia contribuir para resultados mais robustos e maior confiabilidade na comparação entre os grupos experimentais. Recomenda-se a utilização de amostras com número superior a cinco corpos de prova em estudos futuros sobre o tema.

Este trabalho limitou-se à realização de ensaios de tração como método de caracterização mecânica. A complementação com outros ensaios, como flexão em três pontos, dureza, impacto ou análise dinâmico-mecânica (DMA), permitiria uma caracterização mais completa do efeito do tratamento térmico sobre o comportamento do material em diferentes condições de carregamento.

A análise microestrutural dos corpos de prova por microscopia eletrônica de varredura (MEV) poderia contribuir para a compreensão dos mecanismos associados às alterações mecânicas observadas, permitindo identificar mudanças na superfície de fratura, na coesão entre camadas ou na morfologia interna decorrentes do tratamento térmico.

Além disso, recomenda-se que estudos posteriores avaliem de forma combinada a influência de diferentes temperaturas de tratamento térmico, tempos de exposição e tempos de pós-cura UV sobre as propriedades mecânicas das resinas fotopolimerizáveis. A variação desses parâmetros permitiria compreender com maior precisão como o ciclo de pós-processamento interfere na resistência à tração, no módulo de elasticidade, na tenacidade e na deformação dos corpos de prova. Também seria relevante ampliar a investigação para outras formulações de resinas, como resinas rígidas, flexíveis, odontológicas ou de maior resistência mecânica, possibilitando comparar a resposta de diferentes materiais aos ciclos térmicos e identificar condições mais adequadas para cada tipo de aplicação.

Por fim, os resultados obtidos neste trabalho podem servir de referência para investigações futuras envolvendo outras formulações de resinas fotopolimerizáveis, incluindo resinas de uso odontológico, resinas rígidas, resinas flexíveis e sistemas com diferentes composições químicas e graus de reticulação. A ampliação do estudo para materiais com características distintas permitiria comparar a influência do tratamento térmico sobre propriedades como resistência mecânica, rigidez,

tenacidade, deformabilidade e estabilidade dimensional. Essa abordagem também contribuiria para identificar se os efeitos observados neste trabalho estão relacionados especificamente à resina acrílica utilizada ou se representam um comportamento mais amplo de materiais fotopolimerizáveis submetidos a ciclos térmicos de pós-processamento. Além disso, a avaliação de diferentes formulações poderia auxiliar na definição de condições térmicas mais adequadas para cada tipo de resina e aplicação, considerando que materiais com distintos graus de reticulação podem apresentar respostas diferentes ao aquecimento, à permanência em temperatura e ao resfriamento controlado. Dessa forma, estudos comparativos entre diferentes resinas podem ampliar o entendimento sobre a relação entre composição, estrutura polimérica e comportamento mecânico após o tratamento térmico, contribuindo para o uso mais seguro e eficiente desses materiais em aplicações funcionais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amza, C. G. *et al.* **Enhancing mechanical properties of polymer 3D printed parts.** *Polymers*, Basel, v. 13, n. 4, p. 1–18, fev. 2021.

ANYCUBIC. **Anycubic Standard Resin.** 2025. Disponível em: <https://www.anycubic.com/>. Acesso em: 17 jun. 2026.

Araújo, V. C. **Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura.** 2021. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

Callister, W. D. Jr.; Rethwisch, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Cheadle, A. *et al.* **The impact of modifying 3D printing parameters on mechanical strength and physical properties in vat photopolymerization.** *Scientific Reports*, United Kingdom, v. 15, p 1-13, abr. 2025.

Golubovic, Z. *et al.* **Comparative analysis of ABS materials mechanical properties.** *Procedia Structural Integrity*, Belgrade, v. 56, p. 153–159, fev. 2024.

Gonabadi, H.; Yadav, A.; Bull, S. J. **The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, London, v. 111, n. 3–4, p. 695–709, out. 2020.

Gu, D. *et al.* **Heat treatment to improve the wear resistance of PTFE/PMMA composites.** *RSC Advances*, Cambridge, v. 9, p. 22289–22294, jul. 2019.

Jagger, R. G.; Okdeh, A. **Thermoforming polymethyl methacrylate.** *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Cardiff, v. 74, n. 5, p. 542–545, nov. 1995.

Kim, D. S. *et al.* **Mechanical isotropy and postcure shrinkage of polydimethylsiloxane printed with digital light processing.** *Rapid Prototyping Journal*, College Station, v. 26, n. 8, p. 1447–1452, dez. 2020.

Monzón, M. *et al.* **Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing,** *Materials*, Basel, v. 10, n. 1, p. 1-15, jan. 2017.

Morgado, L. B. **Influência do tratamento térmico a seco pós-cura nas propriedades mecânicas e ópticas de resinas acrílicas ativadas quimicamente e resinas bisacrílicas.** 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Biomateriais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Riccio, C. *et al.* **Effects of curing on photosensitive resins in SLA additive manufacturing applied mechanics,** Basel, v. 2, p 942-955, nov. 2021.

Shang, N. *et al.* **A review on the effect of heat treatment for thermoplastic composites.** *Proceedings of the ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Conference*, Las Vegas, v. 4, n. PVP2022-84454, jul, 2022.

Shbanah, M. *et al.* **The effect of heat treatment on a 3D-printed PLA polymer's mechanical properties.** *Polymers*, Basel, v. 15, n. 6, p. 1–12, mar. 2023.

SHIMADZU. **Autograph AG-X Plus Series: Precision Universal Tester.** 2014. Disponível em: https://analit-spb.ru/files/TM/AG_X_plus.pdf. Acesso em: 17 jun 2026

Song, S. *et al.* **Effect of build orientation and layer thickness on manufacturing accuracy, printing time, and material consumption of 3D printed complete denture bases.** *Journal of Dentistry*, Xi'an, v. 130, p. 104435, jan. 2023.

Stögerer, J. *et al.* **Analysis of the mechanical anisotropy of stereolithographic 3D printed polymer composites.** *European Journal of Materials*, London, v. 2, n. 1, p. 12–32, fev. 2022.

Yu, B. *et al.* Preparation of isotropic tensile photosensitive resins for digital light processing 3D printing using orthogonal thiol-ene and thiol-epoxy dual-cured strategies. *Polymer Testing*, Zhanjiang, v. 116, p. 107767, set. 2022.