



## C A P Í T U L O 2

# ANÁLISE DOS EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CORPOS DE PROVA DE PETG OBTIDOS POR IMPRESSÃO 3D

**Luis Felipe Pereira Folha**

Universidade Tecnológica do Paraná Campus Ponta Grossa

**Sandra Mara Kaminski Tramontin**

Universidade Tecnológica do Paraná Campus Ponta Grossa

**Heliety Rodrigues Borges Barreto**

Universidade Tecnológica do Paraná Campus Ponta Grossa

## 1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, mais conhecida como impressão 3D, consolidou-se nas últimas décadas como uma das tecnologias mais promissoras da engenharia e do design de produtos. Seu avanço possibilitou não apenas a produção de geometrias complexas, antes inviáveis por métodos convencionais, como também a customização de peças em pequena ou larga escala, atendendo setores tão diversos quanto o automotivo, aeroespacial, médico, odontológico e educacional (VOLPATO, 2017). Essa flexibilidade, aliada à redução de custos e de desperdício de material, contribui para o crescimento contínuo da manufatura aditiva como alternativa viável em processos produtivos.

Apesar de suas vantagens, a impressão 3D ainda apresenta limitações relacionadas às propriedades mecânicas das peças produzidas, especialmente quando se trata de polímeros. Um dos principais problemas identificados é a fragilidade entre camadas sucessivas, resultado do gradiente térmico estabelecido durante a deposição do material. Esse fenômeno pode comprometer a resistência estrutural e a durabilidade das peças, restringindo sua aplicação em ambientes que exigem desempenho mecânico elevado (JAYANTH et al., 2021).

Nesse contexto, destaca-se o PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), um polímero termoplástico modificado que combina boa resistência mecânica, estabilidade química e facilidade de processamento. Sua crescente utilização em impressoras 3D

do tipo FDM (Fused Deposition Modeling) deve-se à versatilidade e ao equilíbrio entre custo acessível e propriedades físicas satisfatórias (VALVEZ et al., 2022). Ainda assim, tal como ocorre com outros polímeros, as peças em PETG sofrem influência da orientação de impressão, parâmetros de deposição e condições térmicas, fatores que impactam diretamente seu desempenho.

Para mitigar essas limitações, o tratamento térmico pós-impressão surge como uma alternativa eficaz. Esse processo, já consolidado na indústria metalúrgica, vem sendo adaptado ao campo dos polímeros, mostrando-se capaz de aliviar tensões internas, aumentar a cristalinidade e melhorar a adesão entre camadas (JAYANTH et al., 2021). Dessa forma, peças de PETG submetidas a aquecimento controlado podem alcançar propriedades mecânicas superiores às obtidas somente pela impressão.

Além disso, a análise dos efeitos do tratamento térmico não deve se restringir à resistência mecânica. Outras propriedades, como densidade aparente, porosidade e absorção de água, também são relevantes, pois impactam estabilidade dimensional e durabilidade das peças produzidas. Uma investigação abrangente desses fatores possibilita avaliar com maior precisão o real potencial do tratamento térmico como estratégia para ampliar as aplicações do PETG na manufatura aditiva.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PETG

O Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) é um copolímero termoplástico derivado do PET, modificado pela adição de glicol para eliminar a fragilidade típica da versão convencional. Essa modificação resulta em um material de maior tenacidade, excelente resistência química, boa estabilidade dimensional e facilidade de processamento (VALVEZ et al., 2022a).

O PETG combina propriedades de outros polímeros amplamente utilizados na impressão 3D, como o PLA e o ABS, oferecendo ao mesmo tempo facilidade de impressão, boa aderência entre camadas e resistência ao impacto. Além disso, apresenta transparência, brilho e boa resistência a agentes químicos, o que o torna adequado para embalagens, prototipagem, dispositivos médicos e componentes de uso geral (PARK; FU, 2021).

No âmbito da manufatura aditiva, o PETG é cada vez mais adotado por aliar custo acessível, boa resistência mecânica e facilidade de impressão em equipamentos FDM. Contudo, assim como outros polímeros, o desempenho das peças impressas é fortemente influenciado por parâmetros de impressão (temperatura, velocidade, preenchimento, orientação de camadas) e por tratamentos pós-processamento, como o tratamento térmico.

## 2.2 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, refere-se a um conjunto de tecnologias capazes de produzir objetos tridimensionais a partir da adição sucessiva de camadas de material. Diferentemente dos métodos convencionais de usinagem ou conformação, que envolvem a remoção ou deformação do material de partida, a manufatura aditiva é um processo construtivo que permite maior liberdade geométrica e otimização do uso de matéria-prima (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Entre as diversas técnicas disponíveis, o FDM destaca-se pelo baixo custo dos equipamentos e insumos, o que viabilizou sua ampla disseminação tanto em uso doméstico quanto acadêmico e industrial. O processo baseia-se na extrusão de um filamento termoplástico previamente aquecido até atingir temperatura superior à de fusão ou transição vítreia. O material é depositado camada por camada, seguindo o percurso definido por um arquivo digital.

Embora vantajoso, o processo apresenta desafios associados à adesão entre camadas, à presença de porosidades e à anisotropia mecânica. A orientação de impressão e os parâmetros de deposição exercem influência direta sobre as propriedades finais da peça, tornando necessário o estudo de estratégias que minimizem tais limitações (VOLPATO, 2017).

Além do campo da prototipagem, a manufatura aditiva vem ganhando relevância em aplicações de alto valor agregado, como implantes médicos personalizados, componentes aeronáuticos de geometrias complexas, e até mesmo a produção de peças sob demanda em setores automotivo e ferroviário. Essa evolução é impulsionada por pesquisas que buscam aprimorar tanto os materiais empregados quanto os tratamentos pós-processamento, como é o caso do tratamento térmico em polímeros.

## 2.3 Tratamento Térmico em Polímeros

O tratamento térmico em polímeros consiste na aplicação controlada de calor, com o objetivo de modificar sua microestrutura e propriedades mecânicas. Diferentemente dos metais, nos quais o tratamento térmico promove transformações de fases cristalinas bem definidas, nos polímeros os efeitos estão relacionados principalmente à reorganização das cadeias moleculares e à alteração do grau de cristalinidade.

Durante a impressão 3D pelo processo FDM, o resfriamento não uniforme das camadas pode gerar tensões residuais internas. O tratamento térmico, nesse contexto, atua no alívio dessas tensões e na reorganização estrutural, reduzindo a fragilidade e aumentando a resistência do material.

Esse processo é conhecido como recozimento, no qual a peça impressa é aquecida até uma temperatura próxima à temperatura de transição vítreia e mantida por um determinado tempo, seguido de resfriamento controlado. O resultado esperado é uma melhoria das propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e redução de falhas por trinca.

Estudos recentes mostram que o tratamento térmico em peças impressas em PETG promove uma melhoria significativa no módulo elástico e na resistência à tração, ainda que em alguns casos ocorra redução do alongamento na ruptura (VALVEZ et al., 2022b). Tais resultados confirmam que o tratamento térmico pode ser um recurso eficaz para ampliar a aplicabilidade do PETG em contextos em que se exige maior desempenho estrutural.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Preparação das Amostras

Os corpos de prova foram produzidos por manufatura aditiva do tipo FDM (Fused Deposition Modeling), utilizando filamento de PETG, em uma impressora 3D da marca Creality, modelo Ender 5 S1. A impressora possui um volume de impressão de 220 x 220 x 280 mm, temperatura máxima da mesa de até 110 °C, temperatura do bico de extrusão de até 300 °C e precisão de impressão de +/- 0.1 mm.

Os parâmetros de impressão utilizados foram definidos com base em testes de calibração da impressora, visando atingir a melhor qualidade de impressão para o filamento utilizado e estão indicados na Tabela 1. Foram utilizados dois parâmetros de preenchimento para os corpos de prova: 40% e 100%.

**Tabela 1 – Parâmetros de impressão utilizados**

Parâmetro	Valor
Altura de camada	0.12 mm
Largura de extrusão	0.4 mm
Número de filetes da parede	2
Alinhamento da costura em Z	Canto mais agudo
Temperatura do bico de impressão	230 °C
Temperatura da mesa de impressão	80 °C
Velocidade de preenchimento	80.0 mm/s
Velocidade da parede	40.0 mm/s
Velocidade da camada inicial	20.0 mm/s

Habilitar retração	Ativo
Distância de retração	3.0 mm
Velocidade de retração	45.0 mm/s
Velocidade da ventoinha	50.0 %
Preenchimento	40% e 100%
Padrão de preenchimento	Grade

Fonte: Autoria própria, 2024.

Após a impressão, as amostras foram separadas em oito lotes , sendo quatro lotes de controle (sem tratamento) quatro lotes submetidos ao tratamento térmico em estufa,nas temperaturas de 80°C e 100°C, conforme Tabela 2, a fim de avaliar a influência deste processo nas propriedades mecânicas e físicas do produto. Para cada lote foram impressos 5 corpos de prova.

O tratamento térmico foi conduzido no Laboratório de controle Térmico: Pesquisa & Desenvolvimento da UTFPR, em uma mufla fabricada pela SolidSteel Indústria e Comércio de Equipamentos Laboratoriais LTDA., modelo SSE-64L. Durante o tratamento térmico, a temperatura foi mantida constante, durante um período de 4 horas, seguido de resfriamento lento em ambiente de estufa.

**Tabela 2 - Lotes de tratamento térmico, preenchimento e ensaio realizado**

Tratamento	40 % Preenchimento	100% Preenchimento
Sem tratamento (1)	Lote 1	Lote 5
Tratado a 100 °C	Lote 2	Lote 6
Sem tratamento (2)	Lote 3	Lote 7
Tratado a 80 °C	Lote 4	Lote 8

Fonte: Autoria própria, 2024.

### 3.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638, na Máquina Universal de Ensaios, marca EMIC, modelo DL10000. Os corpos de prova foram impressos com geometria padrão do tipo I, conforme definido pela norma.

### 3.3 Ensaio de Absorção de Água

A determinação da absorção de água foi realizada conforme a metodologia definida pela norma ASTM D570: (a) pesagem das amostras em balança analítica, registrando a massa seca inicial; (b) imersão, as amostras foram totalmente submersas em água destilada, em temperatura ambiente controlada; (c)intervalos de medição: a massa foi novamente medida em intervalos regulares, até atingir estabilização.

A variação de massa foi expressa em termos percentuais, representando a quantidade de água absorvida ao longo do tempo.

### 3.4 Determinação da Densidade Aparente e Porosidade Aparente

A densidade aparente foi calculada pela razão entre a massa e o volume geométrico das amostras. O volume foi obtido por medição direta das dimensões dos corpos de prova com paquímetro digital, garantindo precisão milimétrica.

A porosidade aparente foi estimada a partir da comparação entre a densidade aparente experimental e a densidade teórica do PETG, determinada com base em valores de referência do material.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Ensaio de Tração

Os resultados obtidos no ensaio de tração revelaram diferenças significativas entre as amostras tratadas e não tratadas termicamente.

Observa-se que as amostras tratadas a 100 °C apresentaram aumento nos valores de tensão de escoamento, enquanto as amostras tratadas a 80 °C apresentaram redução na tensão, quando comparados com os lotes de controle. As tabelas 3 apresenta as médias dos resultados obtidos nos ensaios de tração realizados.

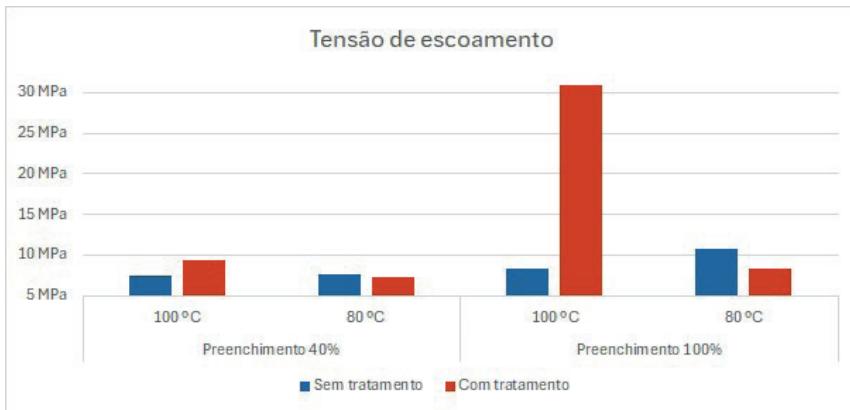
Tabela 3 – Valor médio das propriedades por lote ensaiado

Lote	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Tensão máxima (MPa)
1	7,36	10,22	29,54
2	9,44	11,57	27,96
3	7,63	11,65	29,62
4	7,19	7,28	17,52
5	8,32	10,34	45,62
6	30,86	10,70	40,50
7	10,81	11,34	32,04
8	8,23	10,22	30,22

Fonte: Autoria própria, 2024.

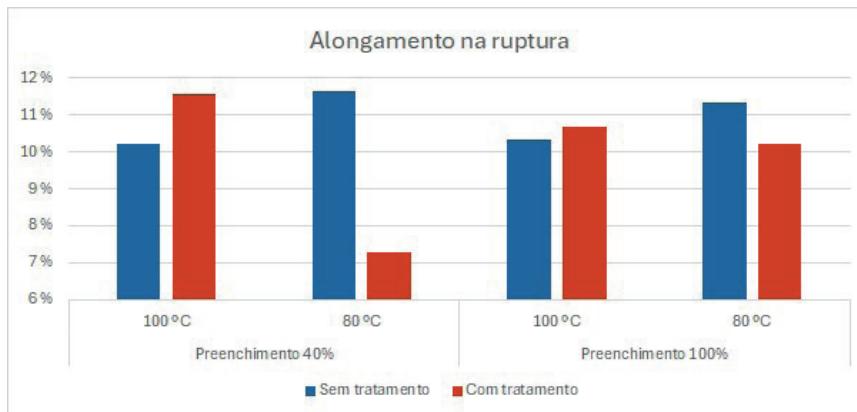
Os gráficos 1, 2 e 3 apresentam o comparativo entre as médias dos resultados obtidos nos ensaios de tração para os corpos de prova utilizados como referência e os tratados termicamente .

Grafico 1 – Comparação das tensões de escoamento entre os lotes tratados e sem tratamento



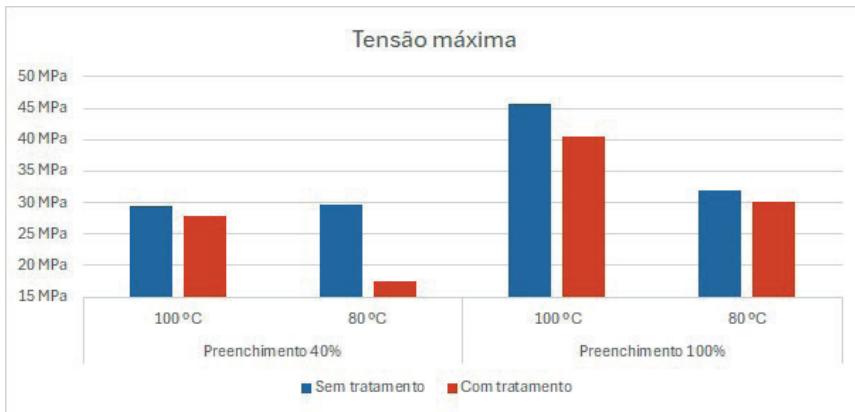
Fonte: Autoria própria, 2024.

Grafico 2 – Comparação dos alongamentos entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Grafico 3 – Comparação das tensões de máximas entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Esses resultados podem ser atribuídos à reorganização estrutural promovida pelo aquecimento, que tende a reduzir tensões internas e favorecer a cristalização parcial, aumentando a rigidez do material. Por outro lado, o aumento de cristalinidade reduz a capacidade de deformação plástica, justificando a menor ductilidade observada.

## 4.2 Absorção de Água

A análise da absorção de água mostrou comportamento crescente ao longo do tempo de imersão, até atingir valores estáveis, como os apresentados na tabela 4.

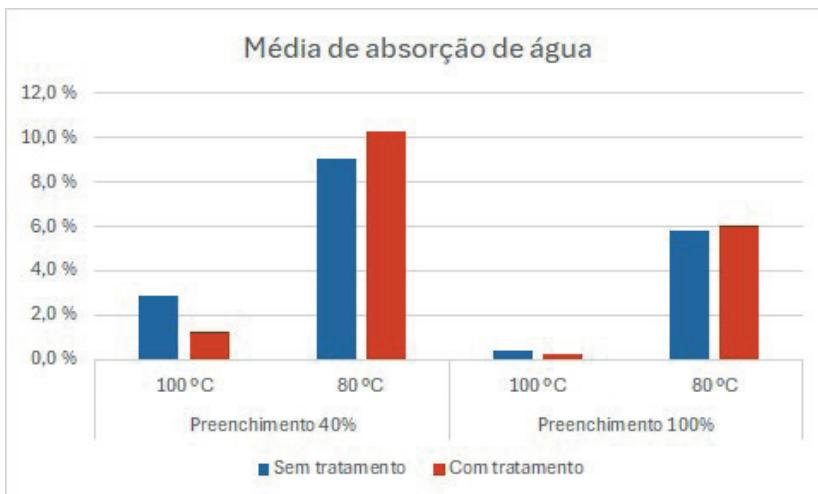
O gráfico 4 apresenta o comparativo entre as médias dos resultados obtidos nos testes de absorção de água para os corpos de prova utilizados como referência e os tratados termicamente .

Tabela 4 – Valores médios de absorção de água

Lote	Média de absorção de água (%)
1	2,897
2	1,222
3	9,051
4	10,27
5	0,413
6	0,231
7	5,802
8	6,061

Fonte: Autoria própria, 2024.

Gráfico 4 - Comparação da absorção de água entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

Os resultados indicam que amostras tratadas termicamente a 100 °C absorveram menor quantidade de água, em comparação às não tratadas. O tratamento térmico contribuiu para a redução da porosidade superficial, dificultando a difusão de água para o interior da peça.

A estabilização da absorção ocorreu mais rapidamente nas amostras tratadas, sugerindo menor conectividade entre poros. Esse comportamento é coerente com a hipótese de que o tratamento térmico promoveu uma reorganização molecular, diminuindo a permeabilidade do material.

### 4.3 Densidade Aparente e Porosidade Aparente

Os valores de densidade aparente apresentaram variação discreta, mas significativa entre os grupos de amostras.

As amostras com 40% de preenchimento apresentaram aumento na densidade aparente após o tratamento térmico, enquanto as amostras com 100% de preenchimento apresentaram redução no valor. Valores médios apresentados na tabela 5.

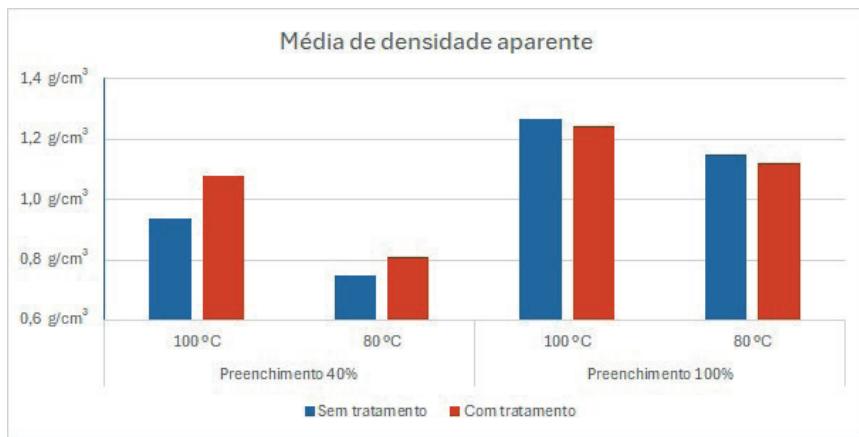
Tabela 5 – Valores médios de densidade aparente e porosidade aparente

Lote	Média de densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Média de porosidade aparente (%)
1	0,936	5,290
2	1,076	12,582
3	0,747	5,724
4	0,812	11,393
5	1,267	5,163
6	1,246	11,538
7	1,148	4,088
8	1,122	4,217

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os gráficos 5 apresenta o comparativo das médias dos resultados obtidos nos testes de densidade aparente para os corpos de prova para referência e os tratados termicamente.

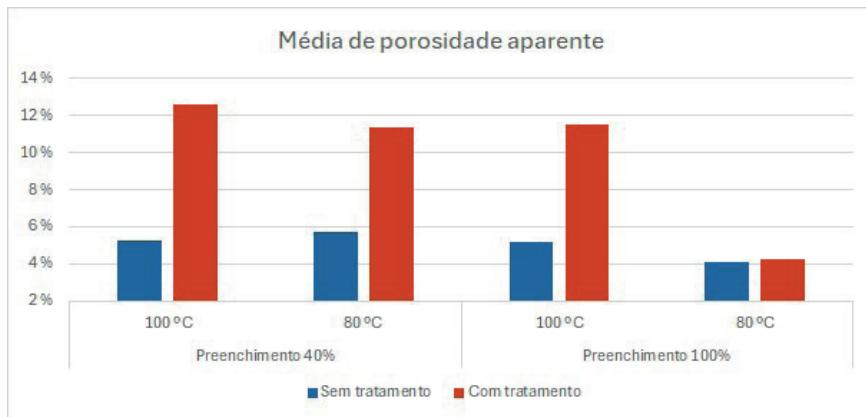
Gráfico 5 - Comparação da densidade aparente entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

O gráfico 6 apresenta o comparativo das médias dos resultados obtidos nos testes de porosidade aparente. A porosidade aparente mostrou tendência de aumento após o tratamento térmico, independente do preenchimento e temperatura de tratamento térmico.

Gráfico 6 - Comparação da porosidade aparente entre os lotes tratados e sem tratamento



Fonte: Autoria própria, 2024.

## 5. DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa demonstram que o tratamento térmico exerce uma influência significativa nas propriedades mecânicas e microestrutura do PETG obtido por impressão 3D. Especificamente, o tratamento a 100°C elevou a tensão de escoamento e o alongamento na ruptura, enquanto a 80°C houve redução nesses dois parâmetros. Evidencia-se, assim, a complexa interação entre o processo de impressão e o tratamento térmico. Foi possível observar que, um pós-tratamento muito utilizado em materiais metálicos, também pode ser vantajoso para polímeros fabricados por impressão 3D.

A análise de densidade aparente e porosidade indicou que o aquecimento pode promover tanto densificação quanto formação de poros, a depender das condições de processamento. A absorção de água também foi afetada, variando de modo diretamente relacionado à porosidade do material.

A principal contribuição deste trabalho é demonstrar que o tratamento térmico pode ser usado como ferramenta para ajustar as propriedades do PETG impresso, permitindo obter características específicas para diferentes aplicações. Contudo, é essencial otimizar os parâmetros de tratamento para cada peça e uso, a fim de evitar degradação e assegurar as propriedades desejadas.

O tratamento a 100°C mostrou-se mais eficiente para elevar propriedades mecânicas, aumentando o valor médio da tensão de escoamento, sem comprometer a ductilidade, inclusive proporcionando aumento na capacidade de alongamento à ruptura. Além disso houve diminuição da absorção de água. Em contrapartida, esta temperatura de tratamento conferiu maiores deformações aos corpos de prova.

O tratamento a 80 °C não alterou de maneira significativa a geometria da peça, porém resultou em diminuição da tensão de escoamento, redução do alongamento na ruptura e aumento na absorção de água.

Em relação aos corpos de prova sem tratamento, observou-se que os valores de tensão máxima diminuíram para os lotes tratados, independente do preenchimento ou da temperatura de tratamento térmico. Este comportamento também se repetiu quanto aos valores de porosidade aparente, houve acréscimo de porosidade, independente do preenchimento ou da temperatura de tratamento térmico;

Verificou-se aumento da densidade aparente para o preenchimento de 40%.

Importante ressaltar que as limitações do estudo incluem a avaliação de um único material e a variação restrita dos parâmetros de impressão e de tratamento térmico. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar outros termoplásticos, diferentes níveis e padrões de preenchimento, bem como explorar combinações variadas de

tempo e temperatura, buscando-se padrões de otimização do pós-tratamento para o PETG. Sugere-se, ainda, avaliar o comportamento de outras propriedades após o tratamento térmico, como dureza e resistência à flexão.

## 6. CONCLUSÃO

Em conclusão, o estudo demonstra o potencial do tratamento térmico como ferramenta para otimizar propriedades mecânicas e funcionais de peças impressas em 3D. Os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento sobre o comportamento de materiais impressos e podem orientar o desenvolvimento de novos produtos e processos de fabricação.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1895**: Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials. West Conshohocken, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D570**: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. West Conshohocken, 2022.

FRĂȚILĂ, D.; ROTARU, H. **Additive manufacturing – a sustainable manufacturing route**. In: MATEC WEB CONFERENCE, 94, 2017. Proceedings... [s.l.]: MATEC Web Conf., 2017. DOI: 10.1051/matecconf/20179403004. Disponível em: <[https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/08/matecconf\\_cosme2017\\_03004/matecconf\\_cosme2017\\_03004.html](https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/08/matecconf_cosme2017_03004/matecconf_cosme2017_03004.html)>. Acesso em: 21 de maio de 2023.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2015.

JAYANTH, N. et al. **Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA**. Coimbatore: Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 123, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616121004070>>. Acesso em: 21 mar. 2023.

NUNES, Edilene de Cássia Dutra; LOPES, Fábio Renato Silva Lopes. **Polímeros**: conceitos, estrutura molecular, classificação e propriedades. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

PARK, Soyeon; FU, Kun (Kelvin). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. Composites Science and Technology, v. 213, 2021, 108876. ISSN 0266-3538. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108876>>. Acesso em: 21 maio 2023.

VALVEZ, S.; SILVA, A. P.; REIS, P. N. B. **Compressive Behaviour of 3D-Printed PETG Composites**. Aerospace, v. 9, p. 124, 2022a. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/aerospace9030124>>. Acesso em: 17 de maio de 2023.

VALVEZ, S.; SILVA, A. P.; REIS, P. N. B. **Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts**. Polymers, v. 14, p. 2564, 2022b. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/polym14132564>>. Acesso em: 21 de maio de 2023.

VOLPATO, Neri (Org.). **Manufatura Aditiva**. São Paulo: Blucher, 2017.