

14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

Efeito do tratamento térmico na geometria de peças de PLA-HT impressas em 3D

KELVIN DOS S. TIENE¹, GABRIEL BONI MAGOSSE², CLEITON L. F. DE ASSIS³

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, kelvin.tiene@aluno.ifsp.edu.br.

² Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFSP, Câmpus Votuporanga, gabriel.magosse@aluno.ifsp.edu.br.

³ Docente, Área Engenharia Mecânica, IFSP, Câmpus Votuporanga, fazolocla@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.05.04-7 Polímeros, Aplicações

RESUMO: A Manufatura Aditiva, também conhecida por impressão 3D, é baseada na fabricação de peças a partir da adição de camada por camada de material. Dentre os polímeros, o PLA (Poliácido Láctico) é um dos materiais para filamentos mais utilizados pela facilidade de trabalho e pode ser tratado termicamente para aumento da resistência mecânica. Contudo, alterações na geometria das peças podem ocorrer após o recozimento. O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito do tratamento térmico e da temperatura de impressão na geometria de corpos de prova impressos em 3D com PLA de alta temperatura. Corpos de prova foram impressos com temperaturas de impressão de 190 a 260 °C e submetidos a um recozimento em forno a 100°C por 4 horas. Análises estatísticas foram aplicadas aos dados experimentais. Os resultados indicaram o efeito do recozimento na redução média de 0,87% da largura e 1,48% do comprimento dos corpos de prova na faixa de temperatura de impressão de 210 a 240°C. Além disso, as peças precisaram ser enterradas em areia durante o recozimento para evitar empenamentos. Considerando a aplicação de tratamentos térmicos em peças impressas em 3D, o controle da geometria no projeto é importante para a qualidade do produto.

PALAVRAS-CHAVE: recozimento; desvios geométricos; temperatura de impressão; manufatura aditiva.

Effect of Heat Treatment on the Geometry of 3D Printed PLA-HT Parts

ABSTRACT: Additive Manufacturing, also known as 3D printing, is based on the fabrication of parts through the layer-by-layer addition of material. Among polymers, PLA (Polylactic Acid) is one of the most commonly used filament materials due to its ease of use and can be thermally treated to enhance mechanical strength. However, changes in the geometry of the parts can occur after annealing. The aim of this study is to assess the effect of heat treatment and printing temperature on the geometry of 3D printed test specimens using high-temperature PLA. Test specimens were printed at printing temperatures ranging from 190 to 260°C and subjected to annealing in an oven at 100°C for 4 hours. Statistical analyses were applied to the experimental data. The results indicated that annealing led to an average reduction of 0,87% in width and 1,48% in length of the test specimens within the printing temperature range of 210 to 240°C. Furthermore, the parts needed to be buried in sand during annealing to prevent warping. Considering the application of heat treatments to 3D printed parts, controlling geometry in the design phase is crucial for product quality.

KEYWORDS: annealing; geometric deviations; printing temperature; additive manufacturing.

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, conhecida por impressão 3D, é baseada na criação de peças a partir da adição de camada por camada de material, utilizando softwares de fatiamento que geram camadas de áreas de seção transversal extremamente finas, possibilitando a criação de peças que métodos convencionais não possibilitariam com a mesma eficiência (Jandyal *et al.*, 2022). Esse método de

fabricação possibilita diversas aplicações e avanços tecnológicos em áreas como engenharia de fabricação e outras áreas industriais (Mallakpour, Tabesh e Hussain, 2021).

Nesse sentido, a Fabricação por Filamento Fundido (FFF) é uma das técnicas mais utilizadas, cuja qual é realizada a fusão de um filamento de material termoplástico para deposição e fabricação de peças tridimensionais (Rajan *et al.*, 2022).

O PLA (Poliácido Láctico) é um dos polímeros termoplásticos mais utilizados na fabricação de filamentos para impressão 3D. É um material de fácil trabalho, além de ser um biopolímero biodegradável e bioabsorvível (Arif *et al.*, 2022). O PLA oferece uma excelente qualidade de impressão, bem como estabilidade térmica e resistência à degradação em altas temperaturas, superiores a outros filamentos, e excelentes propriedades mecânicas e elétricas (Matos *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2021).

Pesquisas apontam a melhora da resistência mecânica dessas peças após a aplicação de tratamentos térmicos (Yu *et al.*, 2023). Contudo, após a redução do encruamento causado pela FFF, como a geometria das peças podem ser afetadas?

Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa é contribuir com o estudo do efeito do tratamento térmico na geometria de peças de PLA-HT (Poliácido Láctico de Alta Temperatura) impresso em 3D.

MATERIAL E MÉTODOS

A técnica de impressão dos corpos de prova foi a Fabricação por Filamento Fundido (FFF). A impressora 3D foi fornecida pela empresa Topink3D Ltda, parceira do projeto, visando pesquisas de desenvolvimento e inovação tecnológica. O equipamento é da marca Kywood3D, modelo Tycoon Max, com eixo linear. O tamanho útil de impressão é de 300 mm x 300 mm x 230 mm. A velocidade máxima de impressão é de 100 mm/s e de deslocamento de 150 mm/s. O diâmetro de filamento do material é de 1,75 mm. A temperatura máxima do bico de extrusão é de 260 °C. A mesa de impressão é de alumínio aquecida, com tampo de vidro temperado (até 110 °C), nivelamento automático e detecção de fim de filamento. O gabinete da impressora é aberto, sendo adequada ao trabalho com PLA (Figura 1).



FIGURA 1. Impressora 3D adotada na produção dos corpos de prova.

O software de fatiamento utilizado foi o Ultimaker Cura® de código aberto. Os corpos de prova foram impressos com padrão de preenchimento concêntrico, conforme ilustrado na Figura 2, com altura da camada de 0,2 mm e preenchimento de 100%. A velocidade de impressão foi de 30 mm/s e o diâmetro do bico de extrusão de 0,4 mm. Oito temperaturas de impressão foram aplicadas, sendo 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250 e 260 °C. Cinco corpos de prova de cada condição foram impressos para posterior análise estatística.

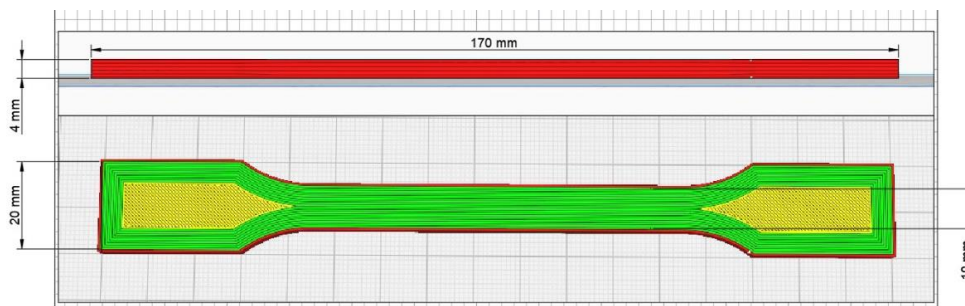


FIGURA 2. Modelo e dimensões dos corpos de prova de tração.

O material polimérico utilizado na fabricação dos corpos de prova foi o PLA-HT (Poliácido láctico de alta temperatura), fornecido pela empresa 3DX Filamentos Ltda, parceira do projeto de pesquisa. Considerando as réplicas e temperaturas de extrusão, 40 corpos de prova foram impressos e submetidos a um tratamento térmico de recozimento em forno a 100 °C por 4 horas, conforme determinado pela análise térmica do filamento, presente no gráfico da Figura 3. Os corpos de prova foram enterrados em areia fina para evitar deformações geométricas e tratados termicamente em uma estufa da marca Marqlabor, modelo EES81.

A avaliação geométrica, antes e após o tratamento térmico, foram realizadas considerando a largura (região mais estreita), altura e comprimento das amostras. As medições da largura e altura foram realizadas com auxílio de um micrômetro e do comprimento com medição de imagens fotográficas com auxílio de software CAD (*Computer Aided Design*). A Análise de Variância foi aplicada nas medições que atenderam as condições de independência, normalidade e homogeneidade das variâncias. As médias foram calculadas considerando uma confiabilidade de 95%.

A curva DSC (Calorimetria Exploratório Diferencial) do PLA-HT foi obtida com auxílio do equipamento DSC-Q20, com sistema de refrigeração RCS-9 da TA Instruments® em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 60 mL min⁻¹ e razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹ na faixa de temperatura de 0 a 300 °C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta o gráfico do comportamento do filamento de PLA-HT quando submetido ao aumento da temperatura e fluxo de calor absorvido. De acordo com a curva de temperatura por fluxo de calor, a temperatura de transição vítrea do material está entre 64,7°C e 93,5°C. Além disso, a temperatura de fusão é de 180°C, a partir da qual o material passa a sofrer o processo de degradação molecular, principalmente a partir de 290°C. Dessa forma, a temperatura mínima necessária para a realização do recozimento das peças, visando aumento da resistência mecânica é de 93,5 °C.

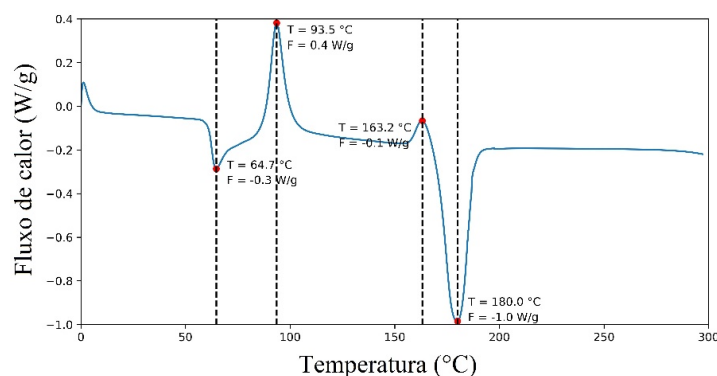


FIGURA 3. Gráfico da curva DSC do PLA-HT.

A Figura 4 apresenta o gráfico do efeito da temperatura de impressão e tratamento térmico na altura dos corpos de prova. O gráfico revelou que não houve diferença estatística entre as médias. Contudo, foi observado uma maior normalidade entre as medidas de altura das peças após o recozimento. O recozimento das amostras pode ter favorecido a acomodação das camadas de material depositado, favorecendo melhor uniformidade da altura das peças.

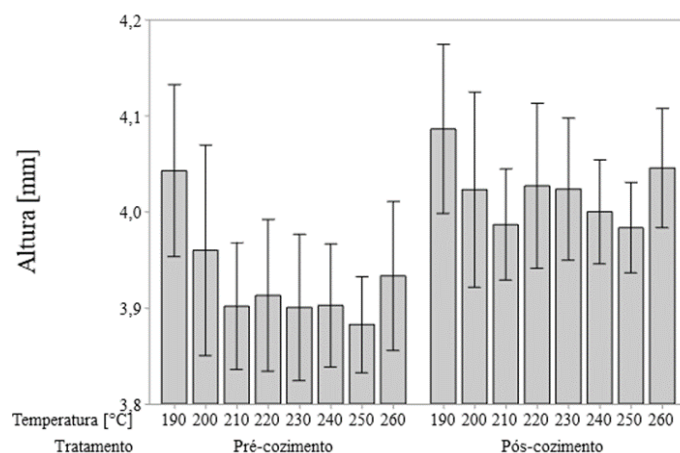


FIGURA 4. Gráfico do efeito dos fatores de controle na altura dos corpos de prova.

A Figura 5 apresenta o gráfico do efeito da temperatura de impressão e tratamento térmico na largura dos corpos de prova. A análise gráfica indicou aumento da largura dos corpos de prova com o aumento da temperatura de impressão, possivelmente decorrente do maior achatamento das linhas de deposição devido ao aumento da fluidez do material. Com relação ao tratamento térmico, alterações na largura foram registradas nas temperaturas de impressão abaixo de 240 °C, decorrente da redução do encruamento do material, porém apresentando maiores desvios geométricos.

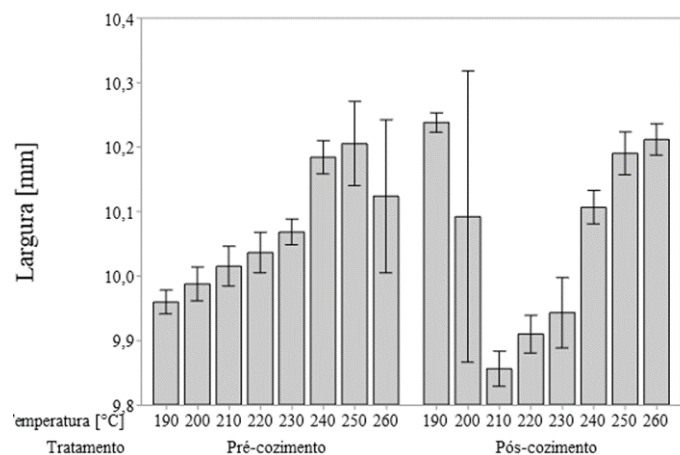


FIGURA 5. Gráfico do efeito dos fatores de controle na largura dos corpos de prova.

O quadro ANOVA da Tabela 1 apresenta os resultados da Análise de Variância aplicada para avaliar estatisticamente o efeito dos fatores de controle no comprimento dos corpos de prova. O valor do R^2 ajustado foi de 95,78%, validando o modelo estatístico adotado. De acordo com a tabela, tratamento térmico, temperatura de impressão e respectiva interação influenciaram a resposta ($P < 0,05$). Com relação a contribuição dos fatores de controle na variação da resposta, o tratamento térmico foi o mais significativo (70,66%), seguido pela interação entre o tratamento térmico e a temperatura de impressão (19,87%), e por fim uma contribuição menor da temperatura de impressão (9,32%).

TABELA 1. Quadro ANOVA do efeito dos fatores de controle no comprimento dos corpos de prova.

Fator de controle	GL	SQ-Ajustado	QM-Ajustado	Freq.	P	Contribuição
Recozimento	1	56,443	56,443	464,93	0,000	70,66%
Temperatura	7	52,118	7,445	61,33	0,000	9,32%
Recozimento*Temperatura	7	111,091	15,870	130,72	0,000	19,87%
Erro	64	7,770	0,121			0,15%
Total	79	227,421				

A Figura 6 apresenta os gráficos do efeito dos fatores de controle no comprimento dos corpos de prova. De acordo com as análises, o recozimento dos corpos de prova e o aumento da temperatura de impressão resultaram em retração dimensional dos corpos de prova. A acomodação das camadas depositadas devido a redução dos vazios internos das peças, provenientes do processo de impressão 3D, pode ser a responsável pelo fenômeno observado.

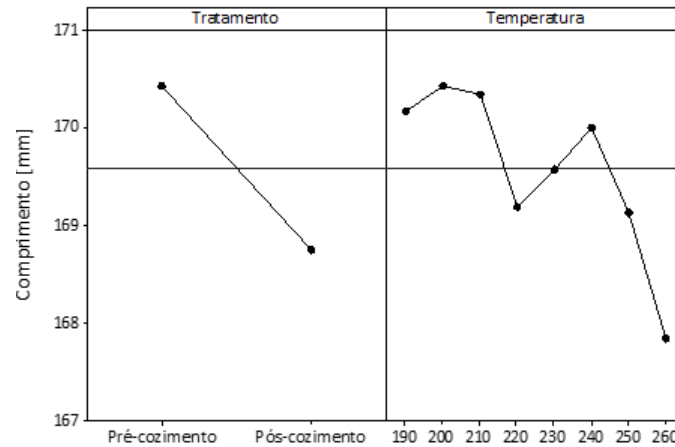


FIGURA 6. Gráfico do efeito dos fatores de controle no comprimento dos corpos de prova.

A Figura 7 apresenta o gráfico do efeito da interação entre os fatores de controle no comprimento dos corpos de prova. De acordo com gráfico, ocorreu interação entre os fatores de controle na temperatura de 200°C. Isso indica que o comprimento dos corpos de prova foi dependente de um efeito combinado entre o tratamento térmico e a temperatura de impressão. Além disso, essa mesma temperatura resultou no comprimento mais próximo ao valor ideal previsto no projeto geométrico dos corpos de prova.

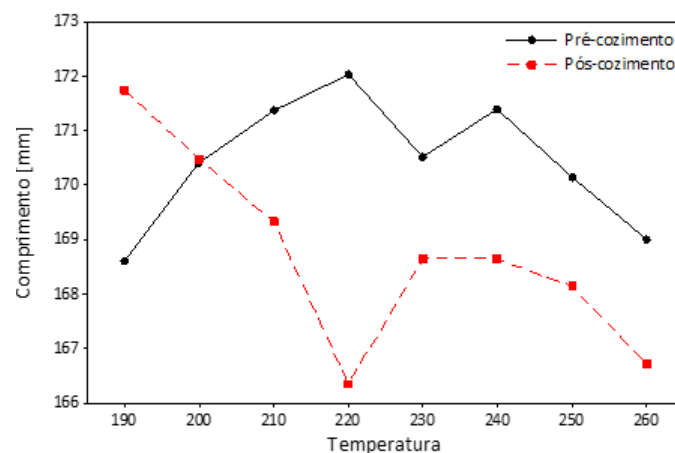


FIGURA 7. Gráfico do efeito da interação dos fatores de controle no comprimento dos corpos de prova.

CONCLUSÕES

A investigação abrangente do filamento de PLA-HT em diversas condições térmicas revelou observações fundamentais. A temperatura de transição vítrea entre 64,7°C e 93,5°C delimitou uma faixa crítica de temperatura para aplicações de tratamentos térmicos visando aumentar a resistência mecânica de peças impressas em 3D, enquanto a temperatura de fusão a 180°C precedeu o início do processo de degradação molecular do material. O tratamento térmico uniformizou a altura das peças, enquanto a largura se correlacionou ao aumento da temperatura de impressão. A análise de variância revelou a influência do tratamento térmico no comprimento das peças, assim como a interação significativa entre tratamento térmico e temperatura de impressão. A retração dimensional após recozimento e aumento de temperatura sugere acomodação das camadas de deposição. A interação entre os fatores de controle a

200°C aponta dependência e conformidade geométrica. Esses achados aprofundam a compreensão das interações termo-geométricas do PLA-HT, informando futuras otimizações de fabricação e aplicação.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

K. S. T., G. B. M. e C. L. F. A. contribuíram com a curadoria, análise dos dados e procederam com a metodologia e experimentos. K. S. T. e G. B. M. atuaram na redação do trabalho. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas 3DX Filamentos Ltda e Topink3D Impressoras e Suprimentos Ltda pelo apoio a pesquisa e ao Instituto Federal de São Paulo pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

ARIF, Zia Ullah et al. Recent advances in 3D-printed polylactide and polycaprolactone-based biomaterials for tissue engineering applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2022.

JANDYAL, Anketa et al. 3D printing—A review of processes, materials and applications in industry 4.0. **Sustainable Operations and Computers**, v. 3, p. 33- 42, 2022.

MALLAKPOUR, Shadpour; TABESH, Farbod; HUSSAIN, Chaudhery Mustansar. 3D and 4D printing: From innovation to evolution. **Advances in Colloid and Interface Science**, p. 102482, 2021.

MATOS, Bruna Driussi Mistro et al. Evaluation of commercially available polylactic acid (PLA) filaments for 3D printing applications. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 137, n. 2, p. 555-562, 2019.

RAJAN, Kumaresan et al. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-40, 2022.

YU, Wangwang et al. The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts. **Materials & Design**, v. 226, p. 111687, 2023.

ZHU, Caihan et al. Realization of circular economy of 3D printed plastics: A review. **Polymers**, v. 13, n. 5, p. 744, 2021.