

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS TÉRMICOS NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE PEÇAS IMPRESSAS PELA TÉCNICA FUSED FILAMENT FABRICATION

Luiz Gustavo Antonio Pereira

Thiago Oliveira Santos

Pedro Henrique Veiga Oliveira

Felipe Chagas Rodrigues de Souza

Felipe dos Anjos Rodrigues Campos

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, MG

luizgustavoap@outlook.com; thiago.de@ufu.br; pedroh.veiga.o@gmail.com; felipechagaslepu@gmail.com;

filipin_anjos@hotmail.com; leonardo.rrs@gmail.com

Elberton Santos Castro

Centro Universitário UNA, Alameda Paulina Margonari 59, Uberlândia, MG

elbertonscastro@hotmail.com

Resumo: A manufatura aditiva, ou impressão 3D, através do processo de Fused Filament Fabrication (FFF) tem se mostrado bastante eficaz em produzir peças com geometrias diversas a um custo menor do que outras técnicas de manufatura aditiva. O método vem sendo aplicado em diversas áreas da engenharia, indústria, medicina (como próteses), entre outros. As peças produzidas por este método são fabricadas camada por camada, a partir de parâmetros programados previamente pelo computador. Devido a isso, as peças não necessariamente necessitam ser maciças, o que irá possibilitar um menor gasto de matéria prima, mas, em consequência, virá a influenciar a resistência mecânica das peças impressas. Com isso, uma problemática observada no resultado final destas peças fabricadas por FFF se dá pela menor resistência na interface das camadas impressas, devido a seu caráter anisotrópico provocado pela direção de impressão. Assim, se faz necessário discutir métodos que visam o aprimoramento das propriedades mecânicas relacionadas à resistência destas peças. No caso desta pesquisa, foram analisados três parâmetros de impressão que podem influenciar na resistência mecânica das peças, sendo eles a porcentagem de ventoinha da impressora 3D, a temperatura da mesa e a temperatura do bocal. Estes parâmetros térmicos influenciam na adesão das camadas e a cristalinidade da peça, processos determinantes para a resistência à tração e à propagação de trincas. Dessa forma, a alteração dada pelo aumento ou diminuição destes parâmetros no momento da impressão possibilitou o conhecimento do quão relevantes estes são para a qualidade da peça impressa. Assim, para a produção dos corpos de prova foram aplicados diferentes arranjos entre as quantidades de porcentagem de ventoinha, temperatura da mesa e a temperatura do bocal, a partir de um planejamento fatorial completo em dois níveis com estas três variáveis, com a posterior realização dos testes de tração e impacto, seguindo as normas ASTM D638 e ASTM D4508, respectivamente. Com isso, os resultados obtidos nestes testes mecânicos foram submetidos à análise de variância permitindo, assim, uma melhor compreensão do processo de impressão e a influência destes parâmetros na qualidade final no que se refere à resistência mecânica das peças produzidas, contribuindo, assim, para uma aplicação mais eficaz dessa tecnologia. **Palavras-chave:** manufatura aditiva, impressão 3D, Fused Filament Fabrication, temperatura da mesa de impressão, temperatura do bocal, resistência mecânica.

Palavras-chave: manufatura aditiva, impressão 3D, temperatura da mesa de impressão, temperatura do bocal, resistência mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Fused Filament Fabrication (FFF), ou Fabricação de Filamento Fundido, em português, é um processo de impressão 3D que emprega um filamento contínuo de um determinado material termoplástico. O filamento, alimentado por um longo carretel contendo o material, é encaminhado para o bocal extrusor aquecido da impressora e é depositado sobre a mesa de impressão. O bocal de impressão é movimentado a partir do computador, definindo e construindo aditivamente a peça. Uma exemplificação deste método é dada pela Fig. 1. Essa metodologia garante grande flexibilidade pela facilidade de personalização das peças, de acordo com a necessidade de cada projeto.

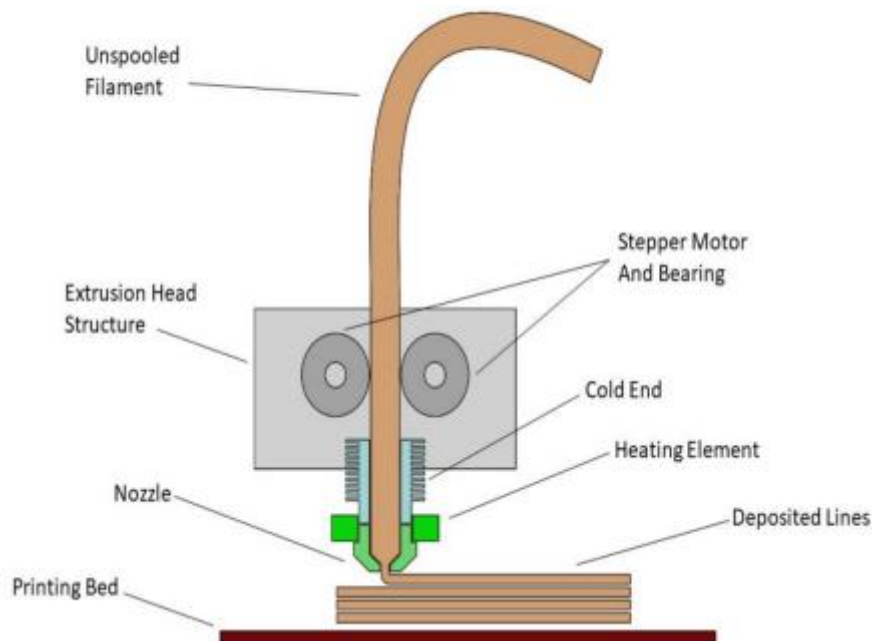


Figura 1. Demonstração do processo de Fused Filament Fabrication. (Cabreira et al, 2020)

A manufatura aditiva vem sendo cada vez mais aplicada na indústria, trazendo benefícios para diversas áreas além da engenharia mecânica, como arquitetura (Hager, 2016), odontologia (Bhargav, 2017) e medicina (Konta et al, 2017), pois, além de possibilitar a produção de peças com um alto nível de complexidade, é um método eficaz, simples, razoavelmente rápido e barato, além de evitar grandes desperdícios de material.

Porém, observa-se, nos processos de manufatura aditiva que implementam o método de impressão Fused Filament Fabrication, uma baixa resistência mecânica entre as camadas impressas. Nesse contexto, estudos anteriores revelaram que os componentes impressos em 3D possuem uma natureza anisotrópica, com propriedades de resistência mecânica mais baixas na interface das camadas (Bhandari et al, 2019), por exemplo, diminuição na resistência à tração na direção ortogonal às camadas impressas (Cole et al, 2016; Fernandez-Vicent et al, 2016), torção (Rodríguez et al, 2001), compressão (Percoco et al, 2012; Sood et al, 2012) e flexão (Sun et al, 2021). Além disso, essa baixa adesão entre os filamentos pode acarretar, também, na nucleação e propagação de trincas nas peças finais (Sharafi et al, 2021).

Nessa conjuntura, fazem-se essencialmente importantes o desenvolvimento de pesquisas que visam atenuar a problemática da baixa adesão entre as camadas impressas, bem como a questão da baixa resistência mecânica entre estas. Existem várias pesquisas focadas em diversos parâmetros que influenciam o resultado final de uma peça, boa parte deles focam nas em aspectos dimensionais e de preenchimento das peças, como o infill, isto é, o preenchimento (Fernandez-Vicent et al, 2016) e a altura de camada (Favero et al, 2017). Porém, estes aspectos não são os únicos a serem avaliados quanto a sua influência na resistência mecânica da peça produzida. Parâmetros térmicos, como a temperatura da ventoinha, que influencia na refrigeração durante a impressão, e as temperaturas da mesa e do bocal de impressão também são importantes e podem afetar consideravelmente a resistência obtida. Em vista disso, foram avaliados neste trabalho os efeitos desses parâmetros na resistência da peça, avaliada por ensaios de impacto e de tração. Um planejamento experimental do tipo fatorial completo em 2 níveis para cada uma dessas 3 variáveis foi executado, a fim de revelar a magnitude de cada fator pela análise de variância (ANOVA). A metodologia empregada permitiu a avaliação dos efeitos isolados e combinados dos diferentes parâmetros de impressão, e os resultados revelaram efeitos importantes do tempo e temperatura de impressão na resistência mecânica das peças.

2. METODOLOGIA

A primeira etapa da presente pesquisa se deu pela enumeração de quais parâmetros influenciadores, no que se refere à impressão 3D, seriam estudados. Foram, então, elencados três parâmetros, sendo eles a porcentagem da ventoinha e as temperaturas de mesa e bocal. Com estes parâmetros definidos, foram estabelecidos dois valores distintos para cada variável, simplificados por -1 e 1, como explicitado pela Tabela 1. Assim, cada teste foi nomeado por uma letra, sendo que cada um possui uma combinação única das três variáveis, totalizando, portanto, oito testes, de A a H, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 1. Dois níveis de valores estabelecidos para cada parâmetro.

T bocal (°C)	-1	1
	200	220
T mesa (°C)	-1	1
	40	60
Vent (%)	-1	1
	50	100

Tabela 2. Planejamento fatorial completo com três variáveis e dois níveis.

Ensaio	T Mesa	T Bocal	% Vent
A	-1	-1	-1
B	-1	-1	1
C	-1	1	-1
D	-1	1	1
E	1	-1	-1
F	1	-1	1
G	1	1	-1
H	1	1	1

2.1. Preparação e produção das amostras

Dessa maneira, com estes três parâmetros em mente, foi elaborado o planejamento experimental, utilizando-se da metodologia fatorial completa, isto é, tais parâmetros foram combinados de forma a obter todos os possíveis subconjuntos dos mesmos, o que levou à oito (8) combinações diferentes, sendo produzidos três (3) corpos de prova para cada combinação, a fim de verificar também a variabilidade dos resultados. Assim, foram produzidos um total de quarenta e oito (48) corpos de prova, individualmente, ao longo dessa primeira etapa da pesquisa, sendo vinte e quatro (24) corpos de prova do ensaio de impacto (ASTM D4508) e a outra metade para os corpos de prova de tração (ASTM D638), cujas dimensões estão expostas na Fig. 2 e Tab. 3. Estas peças foram produzidas na impressora Creality Ender 3, com filamento PLA (ácido polilático) comum da 3DFILA.

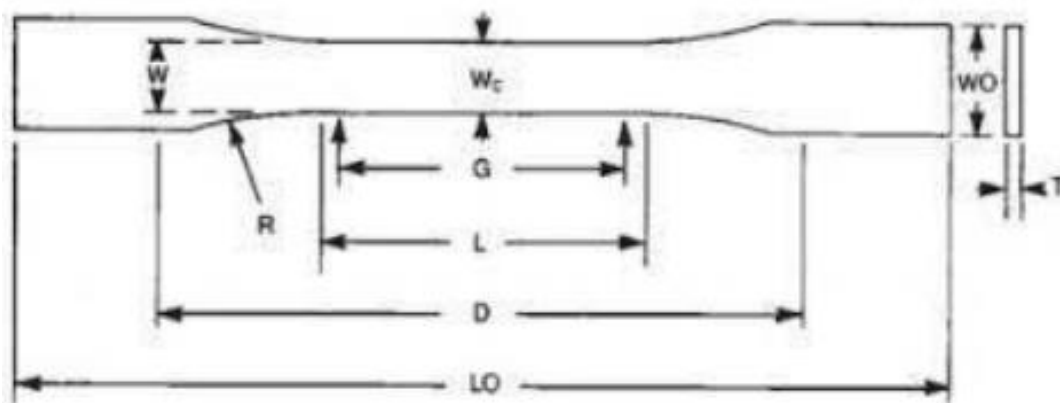


Figura 2. Corpo de prova ASTM D638 para ensaio de tração

Tabela 3. Dimensões para a norma ASTM D638 (tipo V).

Dimensões ASTM D638 (mm)	
W	$3,18 \pm 0,5$
L	$9,53 \pm 0,5$
W_0	$9,53 \pm 3,18$
L_0	63,5
G	$7,62 \pm 0,25$
D	$25,4 \pm 5,00$
R	$12,7 \pm 1$

É importante salientar que os parâmetros que não estavam sendo avaliados foram mantidos constantes, para que não houvesse interferência destes nos resultados. Além disso, cada unidade de corpo de prova foi impressa individualmente, de modo que uma peça já pronta não continuasse na mesa de impressão aquecida, recebendo calor enquanto outra peça fosse produzida, o que levaria a uma maior difusão das cadeias poliméricas, podendo gerar incongruências nos resultados.

2.2. Ensaio de impacto

A resistência ao impacto das peças foi examinada por meio de ensaios de impacto Izod, com a confecção dos corpos de prova e a realização dos ensaios seguindo as recomendações da norma ASTM D4508. Nesta norma, os corpos de prova ensaiados têm formato de prisma retangular com comprimento, altura e largura de aproximadamente 19 mm, 12 mm e 3 mm, respectivamente, sem presença de entalhe. Essa condição de teste torna o corpo de prova mais sensível a parâmetros que afetem a resistência à nucleação e propagação de trincas na superfície do material, onde o nariz do pêndulo impacta. O pêndulo utilizado tem comprimento 0,778 m e massa 0,96 kg, resultando numa energia de impacto de 1,79 J disponível para a fratura das amostras. O ensaio foi feito elevando-se o mesmo até uma inclinação de -30° com a horizontal, que resultou numa velocidade de impacto de 4 m/s para todos os ensaios. Essa informação é importante para que se tenha uma ideia da taxa de cisalhamento a qual a amostra estava sujeita, uma vez que o comportamento mecânico pode ser mais dúctil ou mais frágil dependendo da velocidade de aplicação da carga. A energia de fratura foi calculada segundo a diferença de altura atingida pelo centro de massa do pêndulo, descontando-se a energia cinética transferida a amostra fraturada.

2.3. Ensaio de tração

A resistência à tração das peças foi examinada por meio de ensaios de tração uniaxial, com a confecção dos corpos de prova e a realização dos ensaios seguindo as recomendações da norma ASTM D638, para amostra tipo E. A velocidade de deformação das amostras foi de 0,1 mm/s, aproximando-se da condição de carga estática preconizada neste tipo de teste. A célula de carga utilizada se baseia na deformação de uma viga engastada, a fim de deformar proporcionalmente um extensômetro resistivo. O sinal é diretamente correlacionado com a tensão, utilizando-se de um sistema de aquisição digital, com resolução de 0,01 kg e faixa de medição de 0 a 50 kg para as leituras. O valor de interesse foi apenas a resistência máxima a tração neste caso. A tensão foi calculada dividindo-se a carga máxima pela área da seção transversal das amostras impressas, todas em aproximadamente 9 mm^2 .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a obtenção de dados analíticos dos ensaios, foi realizada uma análise de variância utilizando o software Statistica 12.0, com um nível de confiança de 95%, tanto para o ensaio de impacto, quanto para o de tração. Com isso, foram gerados gráficos e tabelas que proporcionaram uma visualização mais clara a respeito dos dados estatísticos.

3.1. Ensaio de impacto

Foi possível perceber que os parâmetros avaliados que mais influenciaram na resistência mecânica ao impacto, por meio da absorção de energia durante o ensaio, foram, em primeiro lugar, a temperatura do bocal de extrusão, seguido pela temperatura da mesa de impressão, como é mostrado na Fig. 3, por meio de um diagrama de Pareto.

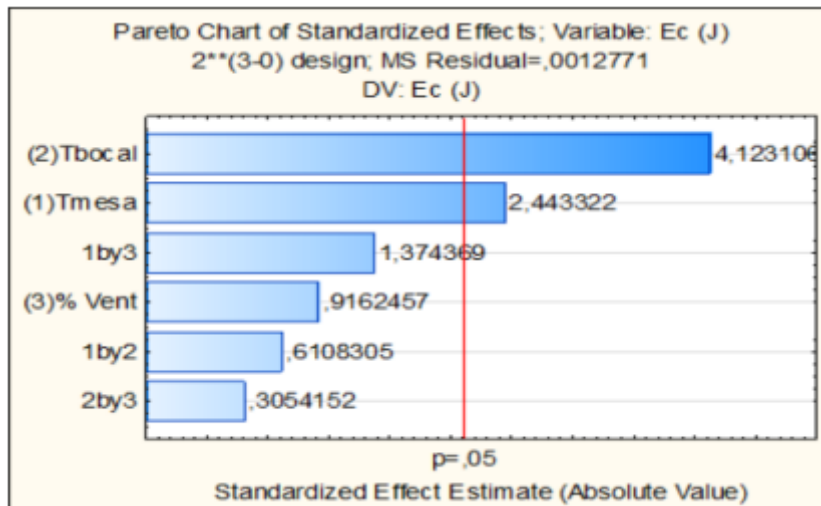


Figura 3. Significância das variáveis de entrada, segundo ANOVA, para ensaio de impacto.

Ainda, com os dados obtidos pelas análises de variância, foi montado o gráfico da Fig. 4, com os valores das médias de energia de impacto por metro (EI) de cada combinação das variáveis de entrada.

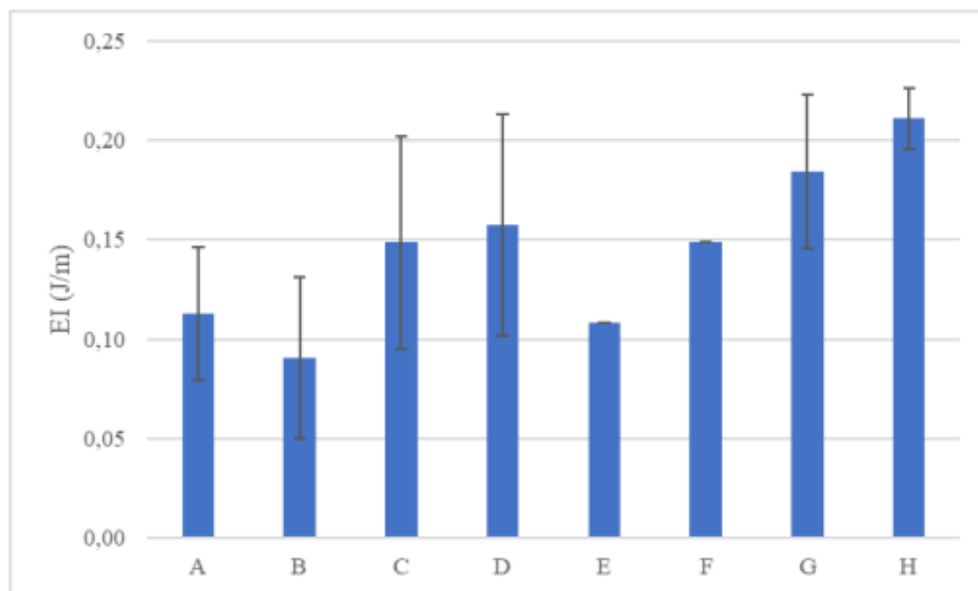


Figura 4. Gráfico com a energia absorvida (J/m) para cada teste no ensaio de impacto.

No ensaio de impacto, há a aplicação de carga de maneira muito rápida, ocasionando, consequentemente, uma taxa de deformação muito rápida. Dessa maneira, o tempo para o material se deformar é muito pequeno. Neste caso, a ductilidade do material tem um efeito mais relevante, no que se refere à sua resistência ao impacto. Além disso, ao aumentar as temperaturas do bocal e da mesa de impressão, confere-se uma maior adesão entre as camadas, outro fator relevante para o aumento da resistência ao impacto. Observou-se que justamente as amostras G e H, que tinham as combinações com as maiores temperaturas de bocal e mesa, obtiveram as maiores absorções de energia.

Os resultados obtidos com o ensaio de impacto são condizentes, por exemplo, com as conclusões expostas por (Wang et al, 2017), baseadas no fato de que maiores condições de temperatura de mesa e bocal de impressão podem conferir maior cristalinidade ao PLA, aumentando sua resistência. Ou ainda, é possível que o ganho de resistência se justifique pela diminuição dos interstícios graças ao coalescimento das camadas depositadas, o que aumentaria a área resistente e reduziria os concentradores de tensão.

3.2. Ensaio de tração

Como foi evidenciado pelos resultados do ensaio de tração, o aumento da temperatura do bocal e da mesa resultam em um aumento da resistência ao impacto. Todavia, estes parâmetros têm um efeito inverso quanto ao alongamento e ruptura das amostras, isto é, a aplicação de esforço de tração, com a aplicação de uma carga estática, de maneira lenta e

gradual. Isso se deve pelo fato de que, ao transferir uma maior quantidade de calor para a peça que está sendo produzida, o mecanismo de cristalização é favorecido, ocasionando a diminuição de sua capacidade de deformação plástica. A princípio, isso é contra intuitivo, uma vez que nesse tipo de teste a cristalinidade favoreceria a resistência. No entanto, devido ao fenômeno pata de elefante, típico de peças impressas por FFF, a aplicação de carga nas amostras de tração criou tensões não uniformes ao longo da seção da amostra, tracionando mais a face anterior do corpo de prova. Nessas condições, a baixa ductilidade favoreceu a ruptura precoce devido à nucleação de trincas nessa face, reduzindo os valores encontradas para a resistência máxima das peças. Esses efeitos podem ser constatados na Fig. 5. Ressalta-se que em comparação com estudos anteriores nesta área, percebe-se que os resultados e conclusões obtidos com o ensaio de tração estão de acordo com a faixa de valores esperada para o PLA (Hanon et al, 2021).

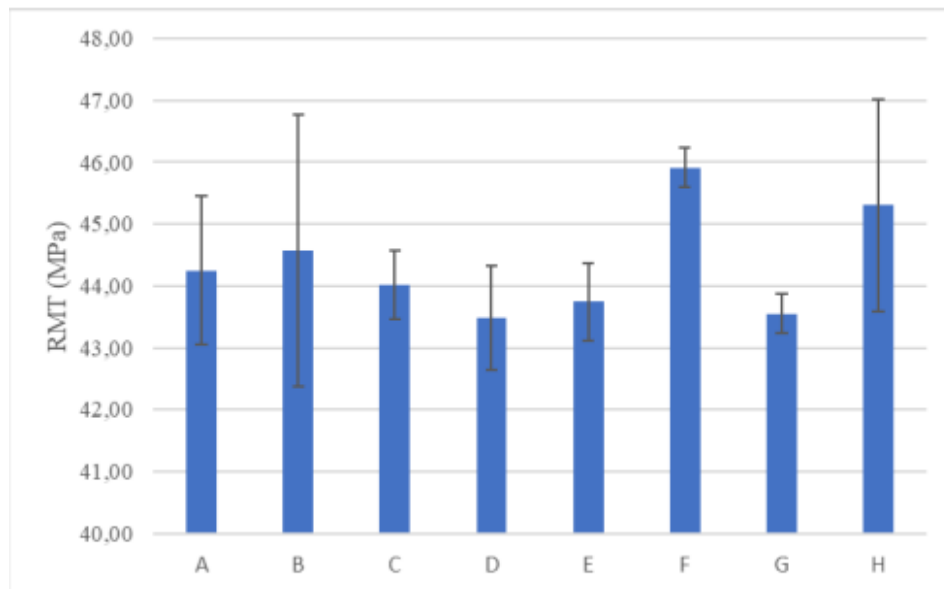


Figura 5. Gráfico com a média da resistência máxima à tração (RMT) para cada teste no ensaio de tração.

Além disso, percebeu-se, por meio do diagrama de Pareto da Fig. 6, que a porcentagem da ventoinha de refrigeração em conjunto com a temperatura da mesa, alcançaram valores de influência significativos no ensaio de tração. Porém, é importante pontuar que a impressora Creality Ender 3 utilizada nesta pesquisa, possui uma segunda ventoinha para resfriar o bocal de extrusão, além da utilizada para resfriar a peça. O resfriamento do bocal de extrusão opera sempre a 100% de sua capacidade durante toda a impressão, não sendo possível alterar seu valor. Dessa forma, parte do fluxo de ar da ventoinha de refrigeração do bocal é disperso para a peça que está sendo impressa. Portanto, mesmo abaixando a velocidade da ventoinha de refrigeração da peça, ainda ocorre o efeito de resfriamento das camadas depositadas. Assim, os resultados que envolvem este parâmetro estudado podem ser influenciados por esta especificidade da impressora.

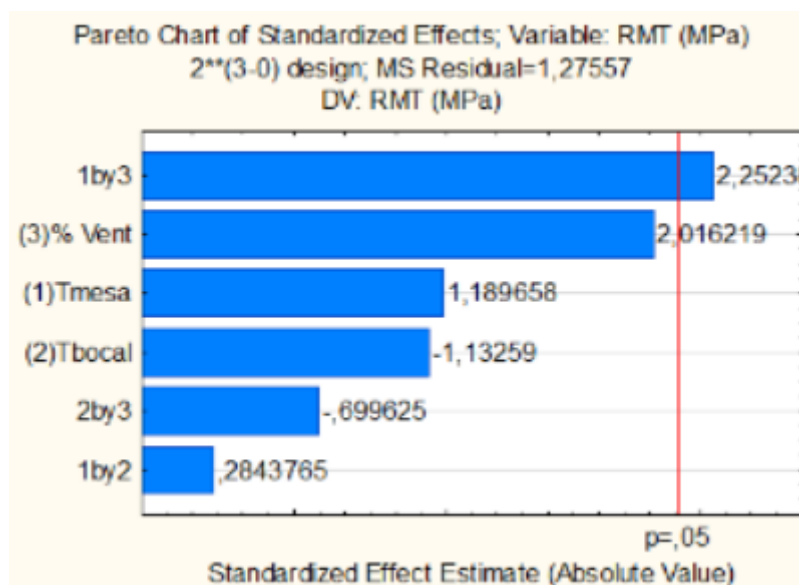


Figura 6. Significância das variáveis de entrada, segundo ANOVA, para ensaio de tração.

4. CONCLUSÃO

Observou-se, nos testes realizados, que, com o aumento da temperatura do bocal e da mesa de impressão, houve um aumento da resistência ao impacto e uma diminuição da resistência à tração. Isso provavelmente se deve, como explicado, pelo efeito de maior cristalização em condições de maior aquecimento da peça, o que causa uma perda da ductilidade do material. Estes parâmetros, portanto, de fato influenciam na resistência mecânica da peça produzida utilizando-se o método Fused Filament Fabrication, em especial com material proveniente do PLA. Este estudo também pode servir de base para testes utilizando-se outros polímeros, embora sugira-se uma variação maior nos níveis dos parâmetros. Finalmente, a resistência ao impacto, incrementada pelo aumento das variáveis térmicas do bocal e da mesa de impressão, se deu em detrimento da resistência à tração. Nessa conjuntura, faz-se importante que futuras pesquisas nesta área procurem um equilíbrio ideal entre estes parâmetros, de modo que se possa obter o maior nível de excelência em quesito de resistência mecânica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), Laboratório de Mecânica das Estruturas (LMEST-UFU) e ao Centro Universitário UNA de Uberlândia pelo apoio na realização dos experimentos, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais-FAPEMIG e a Associação Brasileira de Ciências Mecânicas pelo apoio na forma das bolsas de pós-graduação e de iniciação científica, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

- Bhandari, S., Lopez-Anido, R.A. & Gardner, D.J., 2019. "Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing". *Additive Manufacturing*, 30, pp. 100922.
- Bhargav, A., Sanjairaj, V., Rosa, V., Feng, L. W., & Fuh YH, J. 2018. "Applications of additive manufacturing in dentistry: A review". *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 106(5), 2058-2064.
- Cole, D. P., Riddick, J. C., Iftekhar Jaim, H. M., Strawhecker, K. E., & Zander, N. E. 2016. "Interfacial mechanical behavior of 3D printed ABS". *Journal of Applied Polymer Science*, 133(30).
- Favero, C. S., English, J. D., Cozad, B. E., Wirthlin, J. O., Short, M. M., & Kasper, F. K. 2017. "Effect of print layer height and printer type on the accuracy of 3-dimensional printed orthodontic models". *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 152(4), 557-565.
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. 2016. "Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing". *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. 2016. "3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?". *Procedia Engineering*, 151, 292-299.
- Hanon, M. M., Marczis, R., & Zsidai, L. 2021. "Influence of the 3D printing process settings on tensile strength of PLA and HT-PLA". *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(1), 38-46.
- Konta, A. A., García-Piña, M., & Serrano, D. R. 2017. "Personalised 3D printed medicines: which techniques and polymers are more successful?". *Bioengineering*, 4(4), 79.
- Percoco, G., Lavecchia, F., & Galantucci, L. M. 2012. "Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing". *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), 3838-3842.
- Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E., 2001. "Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation". *Rapid Prototyping Journal*.
- Sharafi, S., Santare, M. H., Gerdes, J., & Advani, S. G. 2021. "A review of factors that influence the fracture toughness of extrusion-based additively manufactured polymer and polymer composites". *Additive Manufacturing*, 38, 101830.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. 2012. "Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement". *Journal of Advanced Research*, 3(1), 81-90.
- Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. 2008. "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments". *Rapid prototyping journal*.
- Wang, L., Gramlich, W. M., & Gardner, D. J. 2017. "Improving the impact strength of Poly (lactic acid)(PLA) in fused layer modeling (FLM)". *Polymer*, 114, 242-248.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMAL PARAMETERS ON THE MECHANICAL STRENGTH OF PARTS PRINTED BY THE FUSED FILAMENT FABRICATION TECHNIQUE

Luiz Gustavo Antonio Pereira

Thiago Oliveira Santos

Pedro Henrique Veiga Oliveira

Felipe Chagas Rodrigues de Souza

Felipe dos Anjos Rodrigues Campos

Federal University of Uberlândia, Laboratory for Machining Teaching and Research, 2121 João Naves de Ávila Avenue, 38408-100, Uberlândia/MG

luizgustavoap@outlook.com; thiago.de@ufu.br; pedroh.veiga.o@gmail.com; felipechagaslepu@gmail.com;

filipin_anjos@hotmail.com; leonardo.rrs@gmail.com

Elberton Santos Castro

UNA University Center, 59 Paulina Margonari Street, Uberlândia/MG

elbertonscastro@hotmail.com

Abstract. Additive manufacturing, or 3D printing, through the Fused Filament Fabrication (FFF) process has been shown to be quite effective in producing parts with different geometries at a lower cost than other additive manufacturing techniques. The method has been applied in several areas of engineering, industry, medicine (such as prostheses), among others. The parts produced by this method are manufactured layer by layer, from parameters previously programmed by the computer. Due to this, the pieces do not necessarily need to be massive, which will allow for a lower cost of raw material, but, as a consequence, will influence the mechanical resistance of the printed pieces. Thus, a problem observed in the result of these pieces manufactured by FFF is due to the lower resistance at the interface of the printed layers, due to their anisotropic character caused by the printing direction. Thus, it is necessary to discuss methods aimed at improving the mechanical properties related to the strength of these parts. In the case of this research, three printing parameters that can influence the mechanical strength of the parts were analyzed, namely the percentage of the 3D printer fan, the table temperature, and the nozzle temperature. These thermal parameters influence the adhesion of the layers and the crystallinity of the part, processes that are decisive for the tensile strength and crack propagation. In this way, the change given by the increase or decrease of these parameters at the time of printing made it possible to know how relevant these are to the quality of the printed part. Thus, to produce the specimens, different arrangements were applied between the amounts of fan percentage, table temperature and nozzle temperature, from a complete factorial planning in two levels with these three variables, with the subsequent realization of the tensile and impact tests, following ASTM D638 and ASTM D4508, respectively. Thus, the results obtained in these mechanical tests were submitted to analysis of variance, thus allowing a better understanding of the printing process and the influence of these parameters on the final quality with regard to the mechanical strength of the parts produced, thus contributing to more effective application of this technology.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, print bed temperature, nozzle temperature, mechanical strength.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.