



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENVELOPE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ABS OBTIDO POR MANUFATURA ADITIVA

Fabio L. Crucinsky^{1*}, Luciano Z. Olanyk¹ e Neri Volpato¹

1 - Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, CEP 81280-340, PR.

fcrucinsky@yahoo.com.br

RESUMO

A Manufatura Aditiva (AM) vem ampliando a sua gama de aplicabilidade nas indústrias, seja como protótipo, na engenharia ou até mesmo como produto final. Em particular, para esta última utilização, as peças devem atender determinadas propriedades mecânicas. Um dos fatores que afeta as propriedades mecânicas, em especial no processo de AM por extrusão de material, é a adesão entre os filamentos na mesma camada. Essa adesão, por sua vez, é diretamente afetada pela temperatura em que a mesma ocorre. O objetivo geral da pesquisa é avaliar a influência da temperatura de envelope e do tempo de deposição entre filamentos nas propriedades mecânicas em corpos de prova produzidos em ABS por AM por extrusão de material. Este trabalho apresenta o problema da pesquisa e os resultados preliminares da influência da variação da temperatura de envelope nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. Os resultados mostraram que, para a faixa de temperatura de envelope avaliada, houve pouca influência nas propriedades mecânicas quando comparada a temperatura ambiente. A deformação específica teve uma variação maior, diminuiu 10% quando aumentamos a temperatura de 25 °C para 49 °C. Porém as variações da tensão máxima e do módulo de elasticidade foram menores. Isso implica que o projeto de um enclausuramento de impressoras, pensando em controlar baixa temperatura, pode não ser efetivo para um aumento significativo nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: *Manufatura aditiva, AM por extrusão de material, Temperatura de envelope, ABS, Propriedades mecânicas.*

INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (AM) pode ser definida como um processo de adição de material para a construção de objetos físicos a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição aos processos de subtração de material⁽¹⁾. A AM vem sendo aplicada em muitos setores da economia, como construção civil, saúde, indústria, etc. Na indústria em particular, ela vem crescendo em utilização, seja na aplicação como protótipo, na engenharia ou até mesmo como produto final. Essa tecnologia tem como vantagens a liberdade geométrica na fabricação, pouco desperdício de material, não requer dispositivos de fixação e nem troca de ferramentas durante a fabricação do componente⁽²⁾.

Entre os processos de AM, é possível citar a tecnologia denominada como de extrusão de material, onde a matéria-prima é depositada na forma de um filamento, pelo princípio da

extrusão, através de um bico calibrado⁽³⁾. É comum que as impressoras de extrusão de baixo custo tenham a mesa aquecida onde se constrói a peça, mas sem aquecimento e controle da temperatura de envelope (Tenv), que é a temperatura dentro da câmara da impressora. Esses controles são comuns em impressoras industriais mais caras, como exemplo as oferecidas pela empresa Stratasys. A temperatura do equipamento influencia na adesão dos filamentos, tanto na mesma camada quanto entre camadas, que, por sua vez, afetam diretamente as propriedades mecânicas da peça impressa. Com um controle da temperatura do ar ao redor do filamento sendo depositado, é possível minimizar o empenamento, a perda de precisão dimensional da peça impressa e o aumento na qualidade geral da resistência da adesão entre os filamentos⁽⁴⁾. A Tenv afeta diretamente a troca térmica entre os filamentos depositados. O seu aumento melhora a coesão entre os filamentos adjacentes e entre as camadas adjacentes, o que pode aumentar as propriedades mecânicas da peça 3D⁽⁵⁾. Quanto maior a Tenv, menos calor será transferido dos filamentos depositados para o ambiente, com isso o material ficará um tempo maior acima da temperatura de transição vítrea, que é a temperatura que o material começa a assumir um estado pastoso. Isso possibilitará uma melhor adesão entre os filamentos e, conseqüentemente um aumento nas propriedades mecânicas. Obviamente, um aumento excessivo da Tenv vai impedir que o filamento se solidifique, e isso vai comprometer a estabilidade do material e a forma geométrica da peça sendo fabricada⁽⁶⁾.

Outra variável que afeta o grau de adesão é o tempo de deposição entre os filamentos. A qualidade da ligação formada é amplamente influenciada pelo tempo que o material tem para esfriar antes que o filamento adjacente seja depositado, pois isso afeta a temperatura do material no momento da formação da ligação. Quanto mais longo o filamento na estratégia de preenchimento tipo zigue-zague, maior será a diminuição nas propriedades mecânicas de uma camada de uma peça produzida. Isso é atribuído ao tempo maior para produzir essa faixa de preenchimento⁽⁴⁻⁷⁾. O gradiente de temperatura presente entre os arredores e a temperatura de extrusão faz com que o filamento extrudado se solidifique mais rapidamente⁽⁸⁾. Dessa forma, a estratégia de fabricação, a temperatura ambiente e as variações na convecção determinam a qualidade geral da resistência da união⁽⁴⁻⁹⁾.

Visando estudar a influência da otimização da sequência de deposição (tempo entre deposição), Volpato e Zanotto introduziram uma interrupção intencional no meio da peça durante o processo de extrusão nas camadas transversais⁽¹⁰⁾. Os tempos considerados foram 17 s e 65 s, e os resultados mostraram que houve uma redução na tensão máxima dessas peças, conforme o tempo entre filamentos aumentava, quando comparadas a peça sem interrupção. A impressora utilizada pelos autores não tinha aquecimento de mesa e nem controle da Tenv, e o material utilizado foi o PLA.

Atualmente, um dos desafios para melhorar a adesão de peças impressas pelo processo de AM por extrusão de material é otimizar a temperatura na interface entre os filamentos depositados⁽¹¹⁾. Como discutido, muitos pesquisadores estão preocupados em melhorar esta adesão, seja controlando o Tenv ou o tempo de deposição entre os filamentos. Porém não foram encontrados trabalhos que abordem estas duas variáveis em um mesmo estudo. Identificou-se então essa oportunidade de pesquisa. Este trabalho relata os resultados preliminares da influência da variação da temperatura de envelope nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. A análise do tempo entre filamentos será reportada em trabalho futuro.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesta pesquisa foi o ABS (acrilonitrila butadieno estireno), que é um polímero termoplástico amorfo. Algumas de suas características, conforme o fornecedor Slim3d do material utilizado, são temperatura de transição vítrea de 105 °C, resistência à

tração de 46 MPa e alongamento até a ruptura de 20%. Os corpos de prova foram fabricados em uma impressora experimental por extrusão de material montada e pertencente ao Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Essa impressora possui mesa com aquecimento, com temperatura máxima atingida de 100 °C. Possui também, fechamentos laterais e portas em acrílico e sistema de aquecimento interno, que permitem aquecimento e manutenção da temperatura do envelope. Porém como a impressora não possui isolamento térmico, pode haver influência pela temperatura ambiente. A máxima Tenv já testada no equipamento foi de 49 °C.

A configuração dos parâmetros de processo foi feita a partir do fatiamento do modelo 3D, executada com o software Slic3R, e estão demonstradas na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de processo utilizados para este trabalho.

Parâmetros	Valores
Diâmetro do filamento	1,75 mm
Diâmetro do bico extrusor	0,40 mm
Espessura da camada	0,20 mm
Velocidade de extrusão	35 mm/s
Temperatura da mesa	100 °C
Temperatura de extrusão	245 °C
Preenchimento	100%
Ângulo de raster	0° / 90°

Foram impressos cinco (5) corpos de prova para os ensaios de tração conforme a norma⁽¹²⁾, que foi a mesma norma utilizada para o ensaio de tração.

Os ensaios de resistência à tração foram realizados no laboratório de ensaios de polímeros da UTFPR. O equipamento utilizado foi máquina de ensaio EMIC TM, modelo DL 10000, com célula de carga com capacidade de 1000 N, interligada ao software Tesc V3.04, o qual registrava os valores de força e deslocamento. Os ensaios foram realizados em ambiente climatizado com controle de temperatura, em torno de 21 °C.

As temperaturas de envelope utilizadas foram 25 °C, 36 °C e 49 °C, temperaturas similares ao método utilizado por Costa, Ferreira da Silva e Sousa Carneiro⁽¹³⁾. Na temperatura mais baixa (25 °C), foi trabalhado com as portas abertas da impressora, simulando a maioria das impressoras de baixo custo, e com o sistema de aquecimento desligado. Já para a temperatura de 36 °C a impressão das peças foi feita com as portas fechadas e o aquecimento também desligado. Para a temperatura mais alta (49 °C) as portas da impressora estavam fechadas e o sistema de aquecimento ligado na sua capacidade máxima.

Foi utilizada a análise de correlação para verificar a influência do Tenv nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. Uma correlação é a uma relação entre duas variáveis, onde uma variável é independente, e a outra é dependente⁽¹⁴⁾. Quanto maior a correlação, maior é a influência de uma variável sobre a outra. Uma correlação positiva significa que quando aumentamos uma das variáveis, a outra aumentará também. Já a correlação negativa é o contrário, ou seja, quando aumentamos uma das variáveis, a outra diminuirá.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do ensaio de tração obteve-se a tensão máxima de ruptura, o módulo de elasticidade e a deformação específica, apresentados nas figuras 1 a 3, respectivamente. Na tabela 2 podemos verificar a correlação da Tenv com essas propriedades mecânicas.

Tabela 2: Correlação entre Tenv e as variáveis propriedades mecânicas.

	Correlação Tenv
Tensão máxima	-0,4036
Módulo de elasticidade	0,3583
Deformação específica	-0,9550

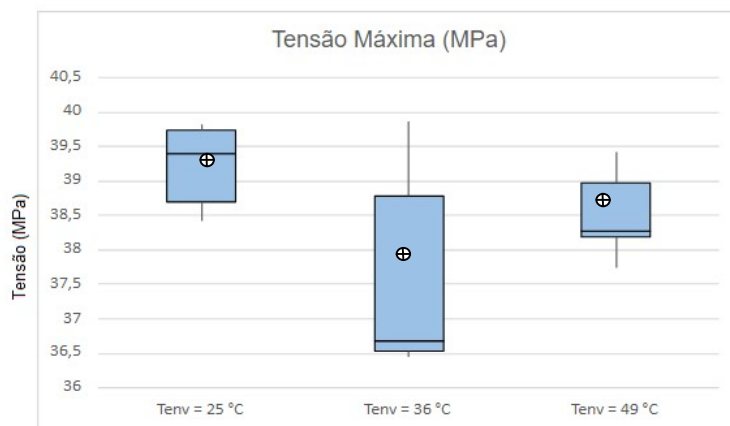


Figura 1: Resultados da tensão máxima obtidos nos ensaios de tração.

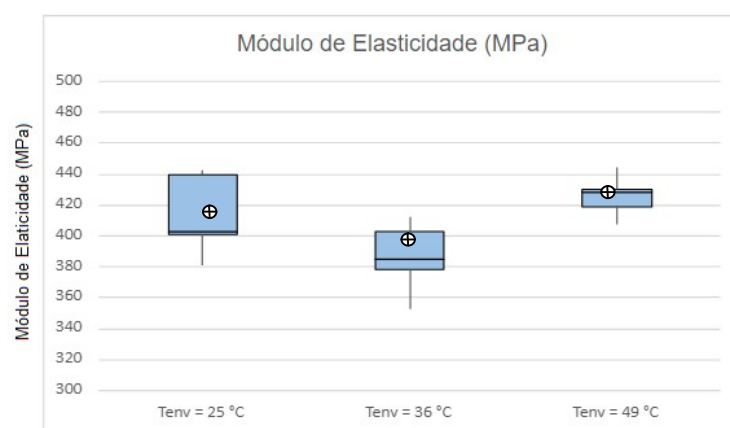


Figura 2: Resultados do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de tração.

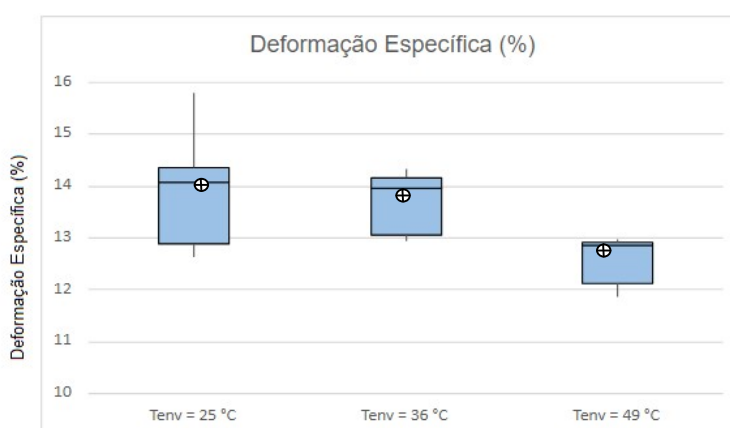


Figura 3: Resultados da deformação específica obtidos nos ensaios de tração.

Nota-se que a Tenv influenciou pouco nas propriedades mecânicas dos corpos de prova produzidos pelo processo de extrusão de material na faixa de temperatura avaliada. A deformação específica teve uma maior correlação com a Tenv do que as outras propriedades.

Ou seja, quanto maior for a Tenv, menor será a deformação específica, pois a correlação é negativa. Esperava-se também que a resistência máxima aumentasse com o aumento da Tenv, o que aconteceu quando aumentamos de 36 °C para 49 °C, porém encontramos uma diminuição quando passamos de 25 °C para 36°C.

CONCLUSÕES

O ABS é um material bastante utilizado em peças na indústria devido à sua resistência mecânica e térmica. Através do processo de AM por extrusão de material, é possível aumentarmos a flexibilidade na produção destas peças. Porém, alguns parâmetros de processo influenciam nestas propriedades mecânicas, como no caso da Tenv e do tempo de deposição entre os filamentos. Os resultados obtidos mostram que a Tenv teve pouca influência nas propriedades mecânicas dos corpos de prova, na faixa de temperatura de envelope avaliada, produzidos pelo processo por extrusão de material.

Esta pesquisa é um estudo preliminar para compreender a influência do parâmetro temperatura de envelope nas propriedades mecânicas das peças produzidas em ABS por AM. Em desenvolvimentos futuros deve-se focar na influência do tempo de deposição entre os filamentos de uma mesma camada com a introdução de interrupções intencionais, e também em aspectos microscópicos das regiões de fratura dos corpos de prova. A análise do tempo entre filamentos será reportada em trabalho futuro.

REFERÊNCIAS

1. ISO/ASTM 52900. Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. ASTM International, vol. i, p. 1–9, 2015. Available at: http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?ISOASTM52900+15.
2. VOLPATO, N.; CARVALHO, J. de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, N. (ed.), Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017, p.16-31.
3. VOLPATO, N. Processo de AM por extrusão de material. In: VOLPATO, N. (ed.), Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017, p.146-181.
4. SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyping Journal, vol. 14, no. 2, p. 72–80, 2008. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>.
5. CHARLON, S.; SOULESTIN, J. Thermal and geometry impacts on the structure and mechanical properties of part produced by polymer additive manufacturing. Journal of Applied Polymer Science, vol. 137, no. 35, p. 1–23, 2020. <https://doi.org/10.1002/app.49038>.
6. LEPOIVRE, A.; BOYARD, N.; LEVY, A.; SOBOTKA, V. Heat transfer and adhesion study for the FFF additive manufacturing process. Procedia Manufacturing, vol. 47, no. 2019, p. 948–955, 2020. DOI 10.1016/j.promfg.2020.04.291. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.291>.
7. SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostructures and Properties of Prototypes. Solid Freeform Fabrication Proceedings, no. 403, p. 313–323, 2003. Available at: <http://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF%5Cn2003%5CnProceedings/2003%5CnSFF%5CnPapers/29-Bellehumeur.pdf%5Cnhttp://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF%5Cn2003%5CnProceedings/2003%5CnSFF%5CnPapers/29-Bellehumeur.pdf>.
8. BHALODI, D.; ZALAVADIYA, K.; GURRALA, P. K. Influence of temperature on polymer parts manufactured by fused deposition modeling process. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 41, no. 3, p. 1–11, 2019. DOI 10.1007/s40430-019-1616-z. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1616-z>.

9. GURRALA, P. K.; REGALLA, S. P. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 141–149, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.913400>
10. VOLPATO, N.; ZANOTTO, T. T. Analysis of deposition sequence in tool-path optimization for low-cost material extrusion additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 5–8, p. 1855–1863, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3108-1>.
11. VANAEI, H. R.; RAISSI, K.; DELIGANT, M.; SHIRINBAYAN, M.; FITOUSSI, J.; KHELLADI, S.; TCHARKHTCHI, A. Toward the understanding of temperature effect on bonding strength, dimensions and geometry of 3D-printed parts. *Journal of Materials Science*, vol. 55, no. 29, p. 14677–14689, 2020. DOI 10.1007/s10853-020-05057-9. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05057-9>.
12. ASTM D 638-14. Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2014.
13. COSTA, A. E.; FERREIRA DA SILVA, A.; SOUSA CARNEIRO, O. A study on extruded filament bonding in fused filament fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 3, p. 555–565, 2019. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2018-0062>.
14. LARSON, R. Estatística aplicada. 4th ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. vol. 1.

INFLUENCE OF ENVELOPE TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ABS OBTAINED BY ADDITIVE MANUFACTURING

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) has been expanding its range of applicability in industries, whether as a prototype, in engineering or even as a final product. In particular, for this last use, the parts must meet certain mechanical properties. One of the factors that affect the mechanical properties, especially in the AM process by extrusion of material, is the adhesion between the filaments in the same layer. This adhesion, in turn, is directly affected by the temperature at which it occurs. The general objective of the research is to evaluate the influence of the envelope temperature and the deposition time between filaments on the mechanical properties of specimens produced in ABS by AM by extrusion of material. This work presents the research problem and the preliminary results of the influence of the envelope temperature variation on the mechanical properties of the specimens. The results showed that, for the envelope temperature range evaluated, there was little influence on the mechanical properties when compared to room temperature. The specific strain had a greater variation, it decreased by 10% when we increased the temperature from 25 °C to 49 °C. However, variations in maximum stress and modulus of elasticity were smaller. This implies that the design of a printer enclosure, considering low temperature control, may not be effective for a significant increase in mechanical properties.

Keywords: *Additive manufacturing, AM by material extrusion, Envelope temperature, ABS, Mechanical properties.*