

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS DE ABS FABRICADAS POR FDM

Renata Sobrado Jabour Braz da Silva, renatasjbraz@gmail.com¹

Renan Pereira Gonçalves, renan-em@hotmail.com¹

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia Mecânica – Laboratório de Tecnologia Mecânica, 29075-910, Vitória/ES, Brasil

Resumo: O avanço tecnológico e industrial demanda por peças com geometrias cada vez mais complexas, e que apresentem elevada resistência mecânica, eficiência/peso e redução do desperdício de matéria-prima. Este cenário veio contribuir para a popularização da fabricação de componentes de engenharia por manufatura aditiva (MA), um dos segmentos da indústria 4.0. E dentre os processos de manufatura aditiva, a modelagem por fusão e deposição (FDM – Fused Deposition Modeling) destaca-se por ser a tecnologia mais difundida na fabricação por extrusão de peças termoplásticas, apresentando a melhor relação custo-benefício, devido à sua simplicidade de funcionamento, componentes e insumos relativamente acessíveis. Todavia, é conhecido que as variáveis de entrada nos processos de MA impactam fortemente as propriedades da peça e devem ser levadas em consideração na elaboração da padronização técnica do segmento. Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento pesquisas tecnológicas e científicas a fim de compreender a influência da matéria prima e dos parâmetros de controle no desempenho dos elementos fabricados por MA. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a influência dos parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de amostras fabricadas por FDM. O polímero ABS (Acrinolitrla Butadieno Estireno), foi definido para a presente investigação, por ser um dos principais materiais usados na fabricação por manufatura aditiva. Este termoplástico, permite boa rigidez, resistência ao impacto à baixas temperaturas, elevada estabilidade dimensional, porém baixa resistência a intempéries ambientais. Para tanto, foram fabricadas amostras em diferentes condições de processamento, com 100% de preenchimento, variando-se a temperatura de extrusão e a velocidade de deposição, e avaliadas as respostas dos corpos de prova submetidos à ensaios de tração e dureza Shore D. Os resultados mostraram que a maior velocidade de deposição (60 mm/s) apresentou melhores características de resistência mecânica. A interação entre temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição: menor velocidade de deposição (30 mm/s) com maior temperatura de extrusão (245°C) e maior velocidade de deposição (60 mm/s) com menor temperatura do bico extrusor (230°C), promoveram uma maior tendência de se obter peças com maior módulo de elasticidade e dureza. O maior alongamento foi encontrado para as mínimas condições de processamento (30 mm/s e 230°C).

Palavras-chave: FDM, ABS, Resistência à tração, Módulo de Elasticidade, Dureza.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e industrial demanda por peças com geometrias cada vez mais complexas, e que apresentem elevada resistência mecânica, eficiência/peso, redução do desperdício de matéria prima, sem a necessidade de utilização de diferentes máquinas para a fabricação da peça (Huang *et al.*, 2013). Este cenário veio contribuir para a popularização da fabricação de componentes de engenharia por manufatura aditiva (MA), um dos segmentos da indústria 4.0.

A manufatura aditiva vem sendo aplicada em diversos campos do conhecimento, dentre eles a indústria aeroespacial, arquitetura, medicina e indústria bélica (Vardhan *et al.*, 2014; Santos, 2018). A MA muito utilizada na fabricação de protótipos de forma rápida vem sendo, atualmente, estudada para construção de produto final, devido a vantagem de se utilizar apenas um equipamento para fabricação de peças complexas (Volpato, 2017).

Dentre os processos de manufatura aditiva, a modelagem por fusão e deposição (FDM – Fused Deposition Modeling) destaca-se por ser a tecnologia mais difundida na fabricação por extrusão de peças termoplásticas, tais como ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) e PLA (Polylactic Acid), apresentando a melhor relação custo-benefício, devido à sua simplicidade de funcionamento, componentes e insumos relativamente acessíveis. Entretanto, ainda existe uma infinidade de incertezas perante o comportamento estático e dinâmico de peças produzidas por FDM, devido à grande variedade de parâmetros de processo, que devem ser ajustados de acordo com as características e propriedades necessárias à peça para uma determinada aplicação (Singh *et al.*, 2017; Turner *et al.*, 2014; Volpato, 2017).

O termoplástico ABS é considerado um dos principais materiais usados na fabricação por manufatura aditiva, devido as suas características que permitem boa rigidez, resistência ao impacto à baixas temperaturas, elevada estabilidade dimensional, porém baixa resistência a intempéries ambientais (Silva, 2017; Ferreira *et al.*, 1997).

Desta forma, fez-se necessário o desenvolvimento de pesquisas tecnológicas e científicas a fim de compreender a influência da matéria prima e dos parâmetros de controle no desempenho dos elementos fabricados em FDM. E as regulamentações técnicas, apesar de embrionárias, podem auxiliar na determinação dos parâmetros a serem utilizados nos diferentes ensaios mecânicos, tais como os encontrados na literatura que apresentam estudos das influências dos parâmetros de controle nos resultados de ensaios de tração em peças de PETG (Miranda *et al.*, 2019); dureza e tolerância dimensional de peças de ABS fabricadas por FDM (Carneiro *et al.*, 2019).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em avaliar a influência dos parâmetros de processo (temperatura do bico extrusor e velocidade de preenchimento) nas propriedades mecânicas de amostras de ABS fabricadas por FDM, através de ensaios de tração e dureza Shore D.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Ensaio de Tração

Para avaliação da influência dos parâmetros de processo foram realizados ensaios de tração segundo a Norma ASTM D638-14, utilizando o corpo de prova Tipo I (Fig. 1), indicado para plásticos rígidos e semirrígidos com espessura de no máximo 7 mm. As dimensões dos corpos de prova de tração estão apresentadas na Tab. 1.

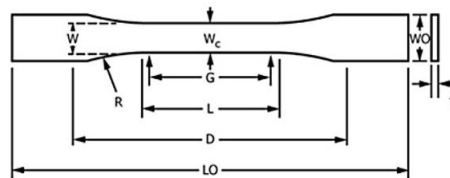


Figura 1. Corpo de prova Tipo I para ensaio de tração (ASTM 638-14).

Tabela 1. Dimensões do corpo de prova de tração do Tipo I (ASTM 638-14).

Dimensão	Medida e Tolerância [mm]
T – Espessura	$3,2 \pm 0,4$
W – Largura da seção estreita	$13 \pm 0,5$
L – Comprimento da seção estreita	$57 \pm 0,5$
WO – Largura total	$19 \pm 6,4$
LO – Largura total	165
G – Comprimento de Calibração	$50 \pm 0,25$
D – Distância entre fixação	115 ± 5
R – Raio de contorno	76 ± 1

Foram fabricados 10 corpos de prova para cada estratégia de deposição, os quais foram posteriormente armazenados em sacos herméticos com sílica, para evitar a absorção de umidade; e mantidos em ambiente escuro com temperatura controlada $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 48 horas antes da realização dos testes, conforme a recomendação da Norma ASTM 618-21.

Os ensaios de tração foram executados em uma máquina de ensaio universal MTS Exceed, modelo E43, utilizando velocidade de 5 mm/min, totalizando 5 testes válidos para cada estratégia de deposição. As respostas avaliadas do ensaio de tração foram: limite de resistência à tração, limite de ruptura e módulo de elasticidade.

2.2. Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram amparados na Norma ASTM D2240-15, que recomenda que a amostra deve ser plana, com espessura mínima de 6 mm; garantindo distância mínima entre as indentações do teste e entre a indentação e a borda do corpo de prova de 6 mm; além de uma largura de 15 mm. Seguindo as recomendações da Norma, foram determinadas as dimensões dos corpos de prova para os ensaios de dureza Shore D (Tab. 2). Para a avaliação da resposta de dureza foi fabricada 1 amostra para cada estratégia de deposição, as quais foram armazenadas conforme a Norma ASTM 618-21, por 48h antes da realização dos testes.

Tabela 2. Dimensões das amostras para o ensaio de dureza Shore D.

Dimensão	Medida [mm]
Comprimento	100
Largura	17
Espessura	7

O ensaio foi executado utilizando um durômetro portátil analógico de dureza tipo Shore D, da marca LX-D, em que foram realizadas 10 indentações em cada amostra.

2.3. Fabricação dos Corpos de Prova

A fabricação dos corpos de prova para os ensaios de tração e dureza foi realizada em uma impressora 3D do tipo FDM modelo Ender-3 V2 da Creality, com bico extrusor de 0,3mm de diâmetro e gabinete de isolamento térmico, utilizando filamento ABS sem pigmento, com diâmetro de 1,75 mm, da fabricante WT filamentos.

As estratégias de deposição foram definidas em função das faixas de utilização do filamento e da impressora 3D. Para tanto, os parâmetros de processo investigados, temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição, foram variados em dois níveis, cujos valores estão apresentados na Tab. 3. A temperatura da mesa de impressão foi mantida constante em 100°C.

Tabela 3. Configuração das estratégias de deposição com variação da temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição em dois níveis.

Estratégia	Temperatura do Bico Extrusor[°C]	Velocidade de Deposição [mm/s]
A1	230	30
A2	245	30
A3	230	60
A4	245	60

O fatiamento dos modelos STL foram executados no *software* Ultimaker Cura 4.9.1, utilizando preenchimento 100%, altura da camada de 0,16mm e recurso de adesão *raft*, para melhor fixação do corpo de prova na mesa de impressão e evitar possíveis empenamentos na amostra. A estratégia de preenchimento e construção empregada foi a combinada (*contour* e *raster*), com 4 filetes de preenchimento de parede (*contour*) e preenchimento interno em zigue-zague a 45° alternados de 90° entre as camadas (*raster*).

A Figura 2 mostra a orientação do posicionamento dos modelos STL dos corpos de prova na mesa de impressão para fatiamento e geração do código *gcode* de impressão. As amostras foram impressas individualmente.

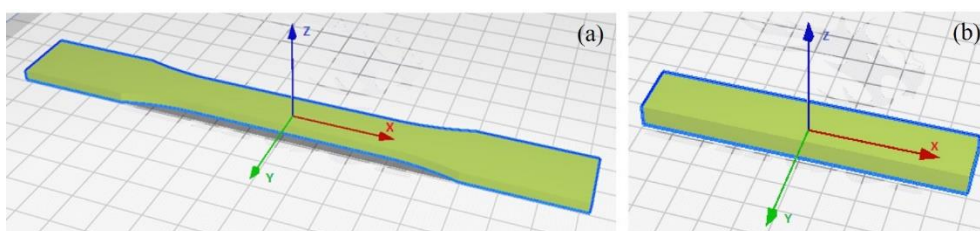


Figura 2. Orientação de posicionamento dos modelos STL dos corpos de prova para fatiamento e geração de código *gcode* para impressão. (a) Corpo de prova Tipo I para ensaio de tração, (b) corpo de prova para ensaio de dureza Shore D.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra as curvas tensão-deformação representativas para as quatro estratégias de deposição avaliadas.

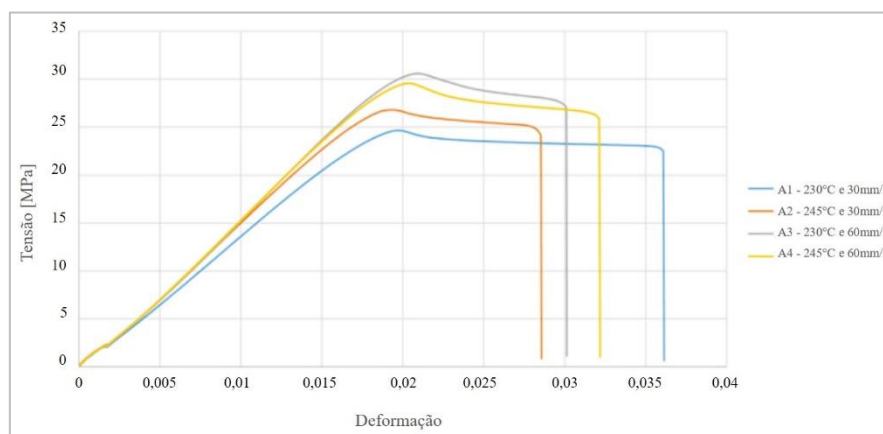


Figura 3. Curva tensão-deformação representativa obtidas do ensaio de tração de amostras de ABS fabricadas por FDM em diferentes estratégias de deposição variando a temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição.

Na Figuras 4 são apresentados os gráficos comparativos dos resultados médios dos limites de resistência a tração, limite de ruptura, módulo de elasticidade, e alongamento, respectivamente, para as diferentes amostras de ABS impressas nas quatro estratégias de deposição investigadas.

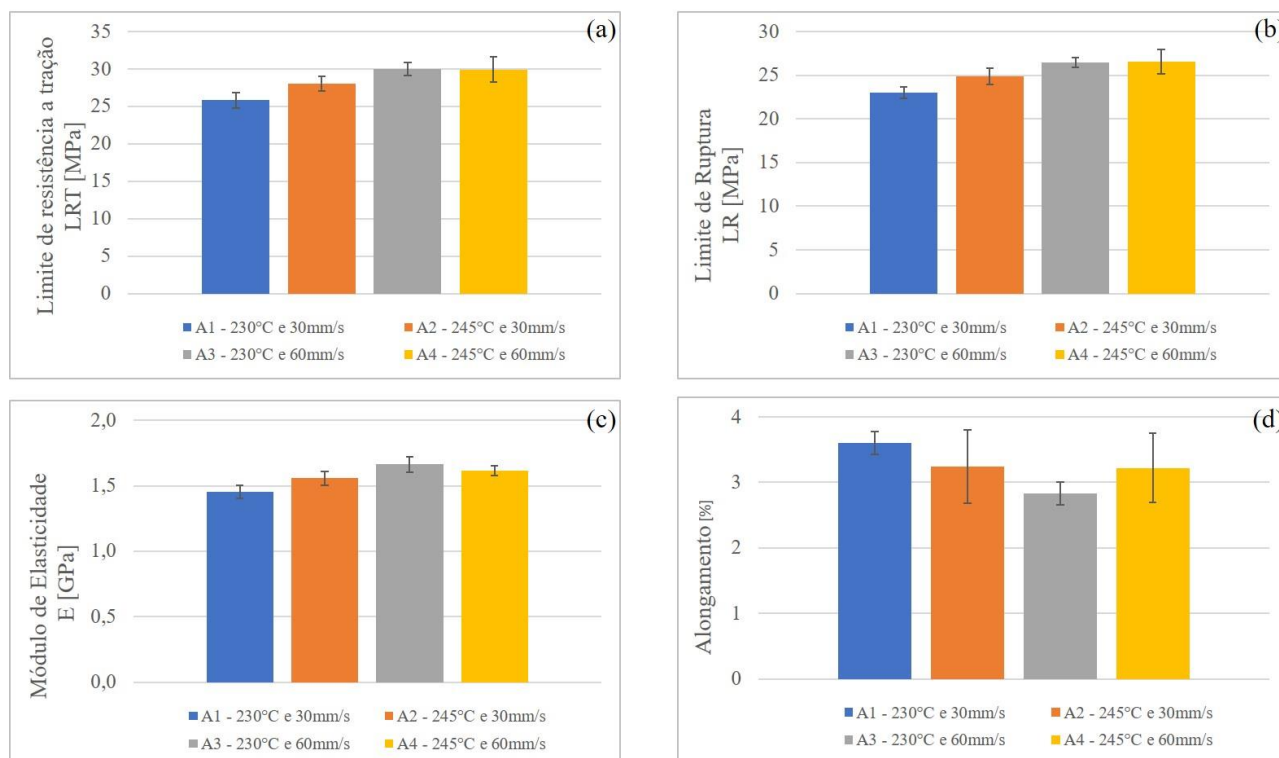


Figura 4. Respostas médias obtidas do ensaio de tração de amostras de ABS fabricadas por FDM em diferentes estratégias de deposição variando a temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição. (a) Limite de resistência a tração, (b) limite de ruptura, (c) módulo de elasticidade, e (d) alongamento.

Com a alteração dos parâmetros do processo FDM, é possível observar uma variação das características mecânicas entre as estratégias. De maneira geral o aumento da temperatura do bico extrusor e da velocidade de impressão resultaram em aumento médio das características mecânicas. E dentre as variáveis de entrada o aumento da velocidade de deposição se mostrou mais eficiente do que a temperatura do bico, podendo ser observado uma diferença significativa entre as amostras A1 e A3, em que esta última impressa utilizando a maior velocidade de deposição (60 mm/s) e temperatura (230°C) representou uma melhor resposta média para o aumento de resistência mecânica (Fig. 4(a)). Isso pode ser devido ao fato de que o aumento da velocidade permite que a camada, uma vez finalizada, tenha menos tempo de resfriamento antes da deposição da camada subsequente, promovendo uma melhor ligação entre as camadas, e consequentemente, aumentando a resistência. O mesmo pode ser dito para o aumento da temperatura, que permite uma melhor adesão entre as camadas da impressão, resultando em uma peça mais coesa, mesmo este último fator se mostrando menos eficiente que a velocidade, e que possivelmente possa ser devido ao intervalo de variação pequeno e já estabelecido para o ABS como faixa de utilização de temperatura para impressão por FDM pelo fabricante.

A estratégia A4 (245°C e 60 mm/s), diferente do esperado, não resultou em aumento simultâneo das características mecânicas com o aumento da velocidade e da temperatura. Apesar de resultar em valores semelhantes ao da estratégia A3 (230°C e 60 mm/s) para os limites de resistência a tração e ruptura (Fig. 4(a) e 4(b)), mostrou uma redução em média de 3% em relação ao módulo de elasticidade (Fig. 4(c)).

Para o alongamento (Fig. 4(d)), observa-se uma diminuição em média de 10% dos resultados obtidos de A1 para A2 e de 21,1% da estratégia A1 para A3, evidenciando uma perda da capacidade de alongamento com o aumento da temperatura e com o aumento da velocidade separadamente. Para estratégia A4, o aumento da temperatura permitiu manter a capacidade de alongamento de A2 (comparação entre A2 e A4), tendo uma variação de 0,62% sem perder alongamento máximo devido ao aumento da velocidade. Isso pode ser devido a uma interação entre os fatores velocidade de deposição com a temperatura, mostrando tendência de comportamento mecânico oposta dos encontrados para a resistência mecânica. Dos resultados encontrados pode-se verificar uma diferença significativa no alongamento entre as amostras A1 (230°C e 30 mm/s) e A3 (230°C e 60 mm/s), neste caso específico o aumento da velocidade de deposição contribuiu para a redução do alongamento do ABS.

A Figura 5 mostra os resultados médios de dureza Shore D das amostras de ABS fabricadas por FDM nas diferentes estratégias de deposição.

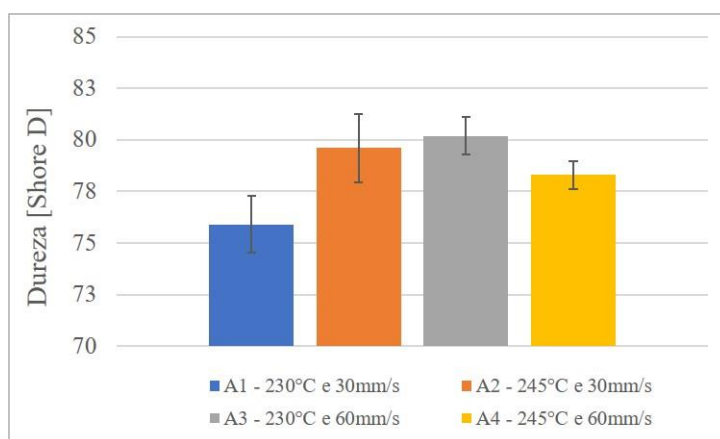


Figura 5. Respostas médias de dureza Shore D das amostras de ABS fabricadas por FDM em diferentes estratégias de deposição variando a temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição.

Os resultados encontrados para o comportamento do ABS à dureza (Fig. 5) mostraram-se similar à tendência observada para os de tração (Fig. 4). Os melhores resultados médios de dureza foram observados para as amostras A2 (245°C e 30 mm/s) e A3 (230°C e 60 mm/s) mostrando uma possível interação entre velocidade de deposição e temperatura do bico extrusor. Ainda foi observado uma inversão no comportamento à dureza do ABS em função do aumento da temperatura para a maior velocidade de deposição. Nesse sentido, é necessário avaliar a aplicação do ABS em função das propriedades de resistência mecânica e dureza, principalmente quando se considera a estratégia com maior gasto energético A4 (245°C e 60 mm/s) que promove um material com elevada resistência mecânica, porém com baixa dureza.

Carneiro (2019) avaliou a dureza de peças de ABS fabricadas por FDM utilizando velocidade de deposição de 120 mm/s, temperatura de extrusão de 225°C, variando a temperatura da mesa de impressão em 80°C, 100°C, 120°C e 130°C, e 100% de taxa de preenchimento. Seus resultados não mostraram diferenças significativas de dureza com a variação da temperatura da mesa, encontrando um valor médio de 69,24 Shore D. Pode ser observado que a velocidade utilizada por Carneiro (2019) na ordem de 2 a 4 vezes maior que a utilizada neste trabalho promoveu um resultado de dureza inferior. Este resultado pode ser atribuído às características do ABS de fabricantes diferentes e às marcas distintas dos durômetros Shore D utilizados nos dois trabalhos, ou mesmo a mudança de comportamento do ABS em velocidades de deposição elevadas.

Assim de modo geral, foi observado que diferentes estratégias de impressão por FDM têm influência nas propriedades mecânicas em peças de ABS com 100% de preenchimento. Sendo importante avaliar cada situação relativa tanto ao custo de fabricação considerando tempo e gasto energético com as propriedades requeridas para aplicação da peça considerando resistência mecânica, limite de ruptura, módulo de elasticidade, alongamento e dureza. E que uma interação adequada entre velocidade de deposição e temperatura do bico extrusor podem resultar em ganhos de resistência mecânica e dureza, como os encontrados para as condições utilizadas nas amostras A2, que utilizou maior temperatura com menor velocidade; e A3, produzida com menor temperatura e maior velocidade.

4. CONCLUSÕES

Após análise das características mecânicas estudadas nesse trabalho, é possível concluir como os parâmetros de impressão por FDM afetam a peça de ABS. Nesse sentido:

- Peças em ABS produzidas com a maior velocidade de deposição (60 mm/s) apresentam melhores características de resistência mecânica relacionadas com o limite de resistência a tração, limite de ruptura e módulo de elasticidade;
- Existe uma interação entre temperatura do bico extrusor e velocidade de deposição que tende a influenciar o módulo de elasticidade e dureza das peças de ABS. Maior temperatura do bico extrusor (245°C) com menor velocidade de deposição (30 mm/s) e menor temperatura do bico extrusor (230°C) com maior velocidade de deposição (60mm/s) promovem maior tendência de se obter peças com maior módulo de elasticidade e dureza;
- Em aplicações que requeiram maior alongamento em detrimento às outras características mecânicas, a manufatura aditiva por FDM com os menores parâmetros de impressão (230°C e 30 mm/s) se mostram mais eficientes.

5. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials, 2015. *D2240-15 Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness*, ASTM International, West Conshohochen, United States, 13p.
- American Society for Testing and Materials, 2021. *D618-21 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing*, ASTM International, West Conshohochen, United States, 4p.
- American Society for Testing and Materials, 2014. *D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International, West Conshohochen, United States, 17p.

- Carneiro, L.R.R., Barbar, G.D., Santos, L.C.P. e Guarato, A.Z., 2019. "Influência da temperatura da mesa de impressão 3D na dureza e dimensões geométricas de amostras em ABS". In: XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (CREEM 2019), Ilheus. Anais do CREEM 2019. ABCM, Rio de Janeiro, Brasil. doi://10.26678/ABCM.CREEM2019.CRE2019-0046.
- Ferreira, L.A.S., Pessan, L.A. e Hage Júnior, E., 1997. "Comportamento mecânico e termo-mecânico de blendas poliméricas PBT/ABS". *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 7, n. 1, pp. 67–72.
- Huang, S.H., Liu, P., Moskadar, A. and Hou, L., 2013. "Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review". *Production Planning & Control*, Vol. 25, pp. 1169–1181.
- Miranda, M.F.O., Ribeiro, F.J.O., Guarato, A.Z. and Saad, N.S., 2019. "Experimental analysis on the mechanical properties of petg parts made with fused deposition modeling manufacturing". In: XXV International Congress of Mechanical Engineering (CONEM 2019), Uberlândia. Anais do CONEM 2019. ABCM, Rio de Janeiro, Brazil.
- Santos, L. C. P., 2018. *Análise de rugosidade e energia superficial de amostra fabricada por manufatura aditiva visando aplicação em implantes dentários*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Silva, C. M. D., 2017. "Elaboração de uma linha de extrusão para reciclagem de polímeros (ABS e PLA)". In: 17º Congresso Nacional de Iniciação Científica - CONIC/SEMESP.
- Singh, S., Ramakrishna, S. and Singh, R., 2017. "Material issues in additive manufacturing: A review". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 185–200.
- Turner, B. N., Strong, R. and Gold, S.A., 2014. "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modelling". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20, n. 3, pp. 192–204.
- Vardhan, G.H., Charan G.H., Reddy, P.V.S. and Kumar, K.S., 2014. "3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing". *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, Vol. 2, pp. 2373–2376.
- Volpato, N., 2017. *Manufatura aditiva; Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 400 p.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PROCESS PARAMETER INFLUENCE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ABS PARTS MANUFACTURED BY FDM

Renata Sobrado Jabour Braz da Silva, renatasjbraz@gmail.com¹

Renan Pereira Gonçalves, renan-em@hotmail.com¹

Patrícia Alves Barbosa, patricia.a.barbosa@ufes.br¹

¹ Federal University of Espírito Santo – Mechanical Engineering Department – Mechanical Technology Laboratory, 29075-910, Vitória/ES, Brazil

Abstract. Technological and industrial advances demand parts with increasingly complex geometries, which present high mechanical strength, efficiency/weight and reduction of raw material waste. This scenario has contributed to manufacturing popularization of engineering components by additive manufacturing (AM), such as Fused Deposition Modeling - FDM technology. However, it is known the input variables of AM processes strongly impact the part properties. In this context, the present work aimed to evaluate the process parameter influence on the mechanical properties of ABS samples manufactured by FDM. For this purpose, samples with 100% filling were manufactured under different processing conditions. The extrusion temperature and deposition speed were varied at two levels. The responses of specimens submitted to tensile and Shore D hardness tests were evaluated. The results showed that the highest deposition speed (60 mm/s) presented better mechanical strength characteristics. Interaction between extruder nozzle temperature and deposition speed interaction - higher extrusion temperature (245°C) with lower deposition speed (30 mm/s), and lower extruder nozzle temperature (230°C) with higher deposition speed (60 mm/s) - promoted a greater tendency to obtain parts with higher modulus of elasticity and hardness. The highest percentage elongation was found for the minimum processing conditions (230°C and 30 mm/s).

Keywords: FDM, ABS, tensile strength, modulus of elasticity, hardness.

RESPONSIBILITY NOTICE

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