



XXVI CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica

ILHÉUS/ITABUNA - BAHIA



XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica,
CREEM 2019
19 a 23 de agosto de 2019, Ilhéus, BA, Brasil

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA MESA DE IMPRESSÃO 3D NA DUREZA E DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DE AMOSTRAS EM ABS

Luiz Renato Rodrigues Carneiro, lrenato10@hotmail.com¹

George Dechichi Barbar, george.barbar@ufu.br¹

Lara Caroline Pereira dos Santos, laracpsantos@gmail.com²

Alexandre Zuquete Guarato, azguarato@ufu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Uberlândia - MG, CEP 38408-100

²RWTH Aachen University, Templergraben 55, 52062 Aachen, Alemanha

Resumo. Com a recente popularização da manufatura aditiva / impressão 3D e sua aplicação em diversos campos da ciência, se faz necessário maior conhecimento sobre as propriedades mecânicas das peças impressas e a influência da mudança dos parâmetros de impressão na peça final. Este estudo tem como objetivos mensurar a dureza de amostras impressas em ABS a partir do teste de dureza Shore D e analisar a influência da variação da temperatura da mesa de impressão sobre esta propriedade mecânica. Para realização do trabalho, quatro amostras foram impressas em ABS usando a impressora 3D GT Max PRO - GTMAX3D CORE A3 e a mesa de impressão à 80°C, 100°C, 120°C e 130°C. A dureza das amostras foi medida através do teste de indentação de dureza Shore D. Além disso, as dimensões macrogeométricas das amostras foram mensuradas usando um paquímetro digital. Não foram observadas variações significativas de dureza entre as amostras, entretanto, discrepâncias dimensionais em relação aos valores de projeto foram encontradas principalmente nas amostras impressas com a mesa à 80°C e 130°C. Trabalhos futuros investigarão a influência da temperatura da mesa de impressão em outras propriedades mecânicas.

Palavras chave: Manufatura aditiva. Impressão 3D. ABS. Dureza. Temperatura da mesa de impressão.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia a indústria desenvolveu métodos de manufatura cada vez mais rápidos e que possibilitam a confecção de peças com geometrias complexas, sem o uso de máquinas de corte e com pouco desperdício de material, tudo isso a partir de uma única máquina (Huang, *et al.*, 2013). Este é o caso da manufatura aditiva, que é um processo que se baseia na formação do objeto a partir da deposição de material camada por camada. Nesse processo existem diversos tipos de impressão 3D, tais como *Stereolithography* (SLA) em português Estereolitografia, *Digital Light Processing* (DLP) em português Processamento Digital de Luz, *Selective Laser Sintering* (SLS) em português Sinterização Seletiva a Laser, *Selective Laser Melting* (SLM) em português Fusão Seletiva a Laser, *Fused Deposition Modeling* (FDM) em português Modelamento por Deposição de Fundido, dentre outros.

Atualmente, o processo de manufatura aditiva deixou de ser aplicado exclusivamente na indústria como forma de prototipagem e passou a ser também empregado para produção de peças funcionais que podem ser, inclusive, confeccionadas domesticamente (Sun, *et al.*, 2008). Além disso, a técnica de impressão 3D já é aplicada em diversos outros campos, como na medicina (impressão de tecidos e órgãos vascularizados, implantes e próteses, modelos anatômicos para preparação cirúrgica, entre outros), na exploração espacial (a NASA testou materiais impressos em motores de foguetes), na moda (pesquisadores do MIT usaram bichos de seda para imprimir um pavilhão em forma de cúpula cobrindo o caminho mais barato) e na defesa pessoal (em 2013, Cody Wilson imprimiu uma arma) (Vardhan, *et al.*, 2014; Ventola, 2014; Santos, 2018).

Apesar de seu uso crescente, a manufatura aditiva ainda tem limites pouco conhecidos. O processo de impressão 3D exige a parametrização de variáveis como velocidade de impressão, temperatura do bico de extrusão, temperatura da mesa de impressão, dentre outras. Estes parâmetros influenciam diretamente no resultado final da peça tanto em termos dimensionais quanto em termos de propriedades mecânicas. Portanto, é necessária a investigação das propriedades mecânicas de peças impressas em 3D a fim de otimizar os parâmetros a serem utilizados em função da aplicação desejada.

O método de impressão 3D mais utilizado atualmente é o FDM, que se baseia na deposição de filamento de material fundido camada por camada. Este método apresenta relativo baixo custo e trabalha com uma grande amplitude de polímeros termoplásticos, tais como ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), PLA (poliácido láctico), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) e Nylon. Polímeros são definidos como macromoléculas formadas a partir de unidades de repetição (meros) unidas por ligações primárias fortes e suas propriedades mecânicas tais como resistência, rigidez, densidade e dureza podem variar de acordo com o grau de cristalinidade, que é a proporção de moléculas ordenadas (Canevarolo, 2010; Groover, 2007). O material mais comumente utilizado é o ABS devido a sua temperatura de transição vítrea elevada de 100°C, maior absorção de energia a impactos e custo inferior conforme o site da 3D Lab.

No método FDM o polímero é aquecido até seu ponto de fusão e, através de um bico que se movimenta ao longo da mesa de impressão, o material fundido é liberado e se solidifica camada sobre camada formando a peça projetada. Dessa forma, é possível a fabricação de peças com geometrias complexas de maneira rápida e eficiente.

Quando o filamento de material polimérico é extrudado do bico, ele resfria da temperatura de transição vítrea para a temperatura da câmara, fazendo com que tensões internas sejam criadas na peça devido à desigual velocidade de deposição. Essas tensões internas podem resultar em deformação entre camadas que aparecem na forma de rachaduras, delaminação ou mesmo falha de fabricação (Christiyan, *et al.*, 2016). Esse acúmulo de tensão também pode causar distorções na peça final, principalmente na superfície inferior (Zhang, 2008). Além disso, resultados experimentais mostraram que a temperatura e as condições de convecção dentro da câmara de impressão tem forte influência na qualidade e na resistência da união entre os filamentos (Sun, *et al.*, 2008). Estes estudos sugerem que a temperatura da mesa e da câmara de impressão possuem influência na integridade e propriedades mecânicas da peça final.

Na literatura existem vários trabalhos que verificam a influência da mudança dos parâmetros de impressão nos resultados de ensaios de tração, flexão e fadiga, porém, há uma escassez de trabalhos que investigam a dureza de peças impressas (Christiyan, *et al.*, 2016; Dizon, *et al.*, 2018; Rankouhi, *et al.*, 2016). Esta propriedade mecânica do material é de grande importância nos casos quando há movimento relativo entre peças ou quando o sistema está sujeito ao desgaste ou abrasão (Calister, 1999).

Conhecidas as demandas de projeto, é possível definir qual é a dureza adequada que a peça deve ter para a realização da atividade. A dureza de polímeros pode ser correlacionada a propriedades mecânicas macroscópicas, como tensão de escoamento, porém essa relação depende das propriedades específicas do material, como o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade (Flores, 2009).

O teste de indentação é o meio mais simples de determinar a dureza de um material, e a dureza, neste contexto, é definida como uma medida da resistência de um material a tensões de cisalhamento sob compressão local. O teste de indentação de dureza é uma técnica útil para se compreender o desenvolvimento do polímero do estado vítreo para uma estrutura mais ordenada, e é possível detectar com precisão a temperatura de transição vítrea dos polímeros vítreos através da medição da microdureza em função da temperatura (Flores, 2009).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivos verificar a dureza de amostras impressas em ABS a partir do teste de dureza Shore D e analisar a influência da variação da temperatura da mesa de impressão sobre esta propriedade mecânica e as dimensões macrogeométricas. A hipótese inicial é que mudanças na temperatura da mesa de impressão resultarão em variações na dureza das amostras e nas dimensões das amostras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A impressora 3D utilizada para a impressão das peças foi a GT Max PRO - GTMAX3D CORE A3, cujo volume de impressão é 300 mm x 300 mm x 300 mm conforme Fig. 1. Esta impressora usa tecnologia de *Fused Deposition Modeling* (FDM), isto é, a peça é formada a partir da deposição de filamento plástico fundido e posterior solidificação do mesmo em camadas.

O material do filamento impresso foi o ABS Premium MG94 da GT Max, de 1,75 mm de diâmetro, o qual, segundo o site do fabricante, tem uma maior resistência em relação ao ABS Premium normal, é mais rápido de ser impresso e tem uma menor contração térmica no resfriamento, dentre outras vantagens. Para este material é recomendado que a temperatura do bico extrusor esteja entre 215°C e 250°C e a temperatura da mesa esteja entre 100°C e 130°C, e que a velocidade de impressão seja de até 180 mm/s.

Figura 1. Impressora 3D GT Max PRO Core A3 (foto de acervo próprio)



Para realizar a medição de dureza em polímeros, recomenda-se o ensaio de dureza Shore, previsto na norma ASTM D2240 que apresenta vários tipos diferentes, porém os mais comuns são do tipo A, comumente utilizado em elastômeros, borrachas macias e ceras, e do tipo D, utilizado para materiais mais duros, como termoplásticos, borrachas e plásticos mais duros. Desta maneira, o ensaio de dureza escolhido para a aferição dessa propriedade mecânica nas amostras impressas em ABS foi o Shore D, nesse ensaio a dureza pode variar de 0 até 100, sendo os maiores valores para maiores durezas.

A norma deste ensaio, ASTM D2240, exige amostras planas de no mínimo 6 mm de espessura e a medição entre o um ponto e o subseqüente deve ter um espaçamento de no mínimo 6 mm. O ponto de medição também deve ficar a pelo menos 6 mm das bordas da amostra. Além disso, esta norma exige pelo menos 10 medições para cada peça. Levando em conta a resolução da impressora 3D e eventuais erros dimensionais, foram projetadas amostras, através do software SolidWorks 2018, com dimensões ligeiramente maiores que as exigidas pela norma: 170 mm x 20 mm x 7 mm. As amostras projetadas foram posicionadas no volume da impressora 3D através software Simplify 3D (Fig. 2).

No software Simplify 3D também são definidos os seguintes parâmetros de impressão:

- Resolução de cada camada de impressão: 0,150 mm;
- Temperatura do bico extrusor: 250°C para a primeira camada e 225°C para as demais camadas;
- Preenchimento de 100% em toda a amostra;
- Velocidade de impressão de 120 mm/s;
- Temperaturas da mesa da impressora 3D para cada uma das amostras: 80°C, 100°C, 120°C e 130°C. Esta última é a máxima temperatura possível indicada pelo fabricante.

A Figura 3 apresenta as quatro amostras impressas em ABS, sendo uma amostra para cada respectiva temperatura. A mesa de impressão é de vidro e, portanto, a primeira camada impressa possui acabamento superficial menos rugoso que as demais. Desta forma, a parte inferior das amostras foi utilizadas nas medições para garantir maior homogeneidade. As amostras foram guardadas em saco hermético com sílica para evitar absorção de umidade e mantidas na sala de medição à 23°C ±1°C por 4 horas antes da medição para equalização de temperatura.

Figura 2. Posicionamento da amostra 3D no software de fatiamento (foto de acervo próprio)

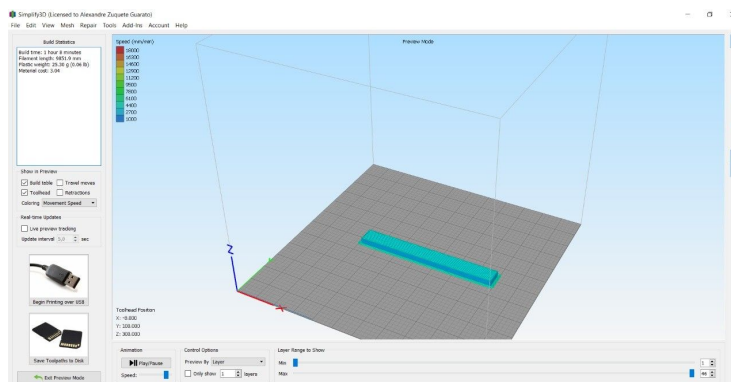
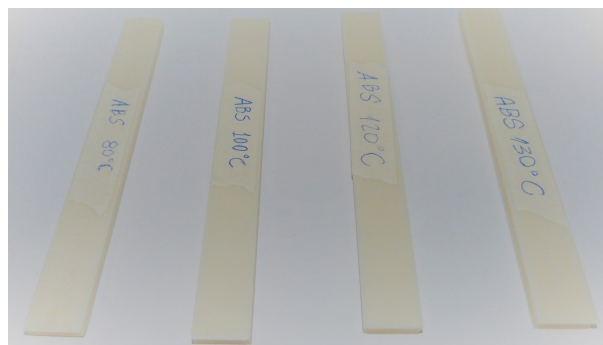


Figura 3. Amostras impressas em ABS com temperatura de mesa de 80°C, de 100°C, de 120°C e 130°C, respectivamente (foto de acervo próprio)



Três medições de altura, largura e comprimento foram realizadas em cada uma das amostras com paquímetro digital revestido de titânio MITUTOYO-530-118B-10 com resolução de 0,01 mm e faixa nominal de 200 mm. Foram marcados 17 pontos de medição espaçados de 9 mm entre si e em relação às bordas da amostra e o equipamento utilizado para este ensaio é o durômetro Shore D da marca TW (Fig. 4), que possui uma agulha que penetra na peça. A penetração da agulha é diretamente proporcional ao mostrador que indica o valor numa escala numérica com valores de dureza indo de zero a 100. Este equipamento portátil é pressionado contra a amostra de forma que a base plana inferior dele fique completamente apoiada sobre a mesma.

O ponteiro do marcador sobe rapidamente, tem um pequeno decaimento, e se estabiliza no valor de dureza após alguns segundos. Cada uma das medidas foi anotada após este período de estabilização. Por fim, foram calculados valores de média e desvio padrão para cada uma das amostras.

Figura 4. Medição com durômetro Shore D nos pontos marcados nas amostras (foto de acervo próprio)



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das medições feitos com um paquímetro digital para as medidas de altura, largura e comprimento serão mostrados na Tab. 1 para a respectiva temperatura da mesa.

Tabela 1. Dimensões das peças nas diversas condições de temperatura

Temperatura [°C]	Altura				Largura				Comprimento			
	80	100	120	130	80	100	120	130	80	100	120	130
Medida 1 [mm]	6,68	6,86	6,91	7,07	20,71	19,98	19,91	19,86	169,34	169,38	168,67	168,98
Medida 2 [mm]	7,18	6,95	7,02	7,12	20,64	20,03	19,93	19,92	168,46	169,36	168,67	168,61
Medida 3 [mm]	6,56	6,92	7,00	7,04	20,77	20,01	19,97	19,92	169,44	169,37	168,70	168,58
Média [mm]	6,81	6,91	6,98	7,08	20,71	20,01	19,94	19,90	169,08	169,37	168,68	168,72
Desvio Padrão [mm]	0,33	0,05	0,06	0,04	0,07	0,03	0,03	0,03	0,54	0,01	0,02	0,22

Nota-se que a amostra impressa com mesa a 80°C se descolou parcialmente durante o processo de impressão. Esta amostra apresentou uma curvatura pronunciada nas bordas, esse efeito é denominado de “warp” e é mais presente nos termoplásticos que apresentam maior retração, representado na Fig. 5. Além disso, a amostra impressa a 80°C teve os

valores dimensionais mais discrepantes em relação aos valores de projeto ($A = 7 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$ e $C = 170 \text{ mm}$) e menor precisão na dimensão das peças.

A amostra impressa com mesa à 130°C foi a segunda com dimensões mais discrepantes. Nesta configuração, a alta temperatura da mesa fez com que as camadas já impressas não se solidificassem por completo. Desta forma, esta amostra apresentou maiores dimensões na base em relação ao topo como apresentado na Fig. 6. As amostras com mesa a 100 e 120°C tiveram valores dimensionais bem próximos aos de projeto e uma precisão maior em suas dimensões. Vale lembrar que o fabricante de filamentos recomenda o uso de 100°C para a temperatura de mesa.

Figura 5. Borda da peça impressa a 80°C demonstrando o efeito de retração do plástico “warp” (foto de acervo próprio)



Figura 6. Borda de peça impressa a 130°C demonstrando o efeito da lenta solidificação (foto de acervo próprio)



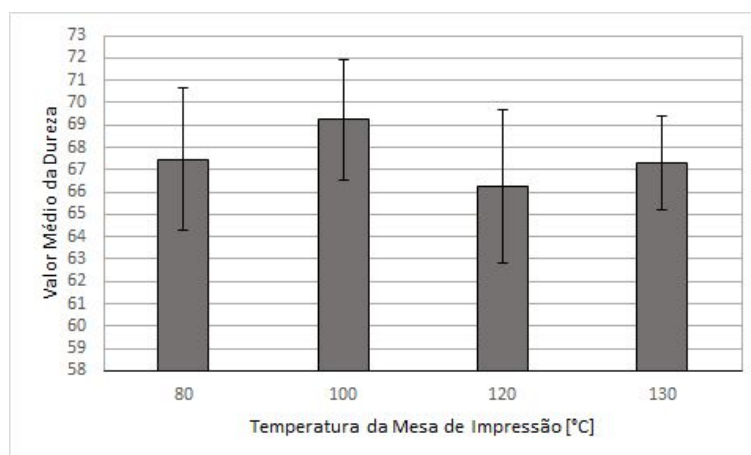
A Tab. 2 apresenta os valores experimentais de dureza Shore D para cada uma das amostras em função da temperatura da mesa. A média e o desvio padrão de cada amostra também são apresentados. A Fig. 7 mostra a evolução da média das durezas de cada amostra em função da temperatura de mesa da impressora 3D.

Tabela 2. Dados experimentais de dureza Shore D das amostras impressas em função da temperatura da mesa de impressão

Medida	Temperatura da mesa de impressão [$^\circ\text{C}$]			
	80	100	120	130
1	66	68	66	69
2	67	67	64	68
3	69	67	64	68
4	66	67	65	69
5	66	69	66	69
6	69	69	67	67
7	68	70	66	67

8	70	69	66	67
9	69	69	64	67
10	65	70	66	67
11	67	70	65	66
12	68	69	66	68
13	69	70	66	66
14	69	71	68	67
15	65	71	68	66
16	68	70	69	66
17	66	71	70	67
Média	67,47	69,24	66,24	67,29
Desvio padrão	1,59	1,35	1,71	1,05

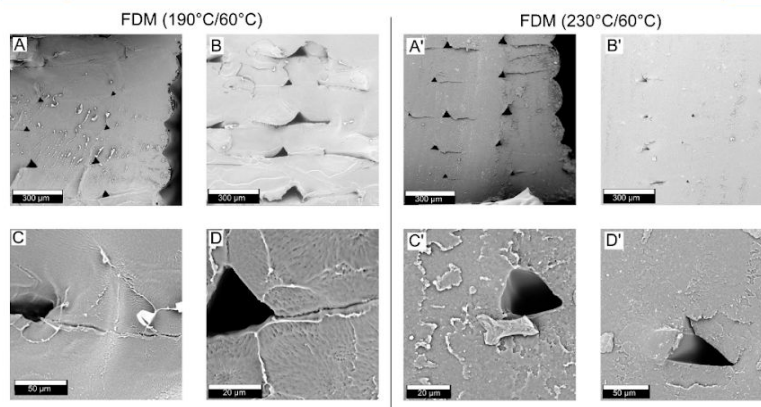
Figura 7. Valor médio e desvio padrão da dureza Shore D em função da temperatura da mesa da impressora 3D



É possível notar que a temperatura da mesa gerou pouca influência na dureza das peças. Apesar disso, a amostra impressa com a mesa a 100°C apresenta a maior dureza média frente às demais, o que corrobora com a temperatura sugerida pelo fabricante de filamentos. Constataram-se variações aleatórias nos valores das medidas ao longo da amostra. Esse fato pode ser explicado pelas lacunas presentes entre as trilhas de filamento depositadas. Assim, as regiões que apresentaram menores valores podem ser as regiões mais próximas dessas lacunas, possibilitando um avanço maior da agulha do durômetro.

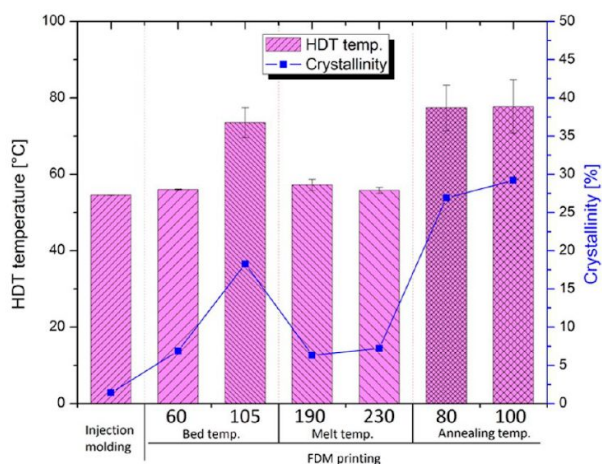
Como o processo de fabricação por FDM é feito através da fusão e deposição de filamento, a viscosidade do termoplástico impossibilita o preenchimento completo da amostra. Uma forma de minimizar este efeito é aumentando a temperatura do bico, o que reduz a viscosidade do filamento, possibilitando um melhor preenchimento desses espaços vazios, em detrimento da qualidade dimensional da peça finalizada. O aumento da temperatura da mesa também contribui para a redução destes vazios como mencionado por Benwood, *et al.* (2018). Este efeito das lacunas podem ser percebidos a partir das micrografias apresentadas na Fig. 8.

Figura 8. Micrografias de impressões 3D do tipo FDM feitas em PLA em diferentes temperaturas de bico feitas por Benwood et al. (2018). Estruturas das seções transversais da amostra mostrando a área da casca (A, A'), área de varredura (B, B') e ampliação da área dos vazios (C, C', D e D') (Benwood, *et al.*, 2018)



Era esperado uma dureza maior nas peças impressas com a mesa em temperatura mais elevadas devido a maior cristalinidade do polímero, pois, quanto mais lento é o resfriamento, maior é o valor dessa grandeza, e em temperaturas mais altas da mesa há menor diferença de temperatura entre a peça e o bico (Groover, 2007). Outra forma de variar a cristalinidade se dá pelo recozimento da peça, ou seja, deixando-a exposta a uma temperatura mais elevada e por tempo prolongado. Esses efeitos térmicos na cristalinidade podem ser verificados na Fig. 9 para amostras em PLA.

Figura 9. Gráfico que relaciona cristalinidade e Heat Deflection Temperature (HDT) em português Temperatura de Deflexão Térmica, em diferentes condições de temperatura da mesa, do bico, de recozimento e pelo processo de injeção (Benwood, *et al.*, 2018).



4. CONCLUSÕES

Os objetivos deste trabalho eram verificar a influência da temperatura de mesa de impressão na dureza de amostras impressas em ABS, e analisar a variação das dimensões macrogeométricas das peças. O aumento da temperatura da mesa, de acordo com a literatura, tende a fortalecer a união entre as camadas, reduzir vazios na amostra e aumentar a cristalinidade, o que levaria a uma peça final mais resistente. A hipótese inicial era que mudanças na temperatura da mesa de impressão resultam em variações na dureza das amostras e que a temperatura utilizada fora da condição indicada pelo fabricante poderia variar as dimensões das amostras.

Após a realização de todos os testes necessários e reunir os dados obtidos em uma tabela (Tab. 2) para possibilitar uma análise mais completa e a construção de um gráfico (Fig. 7), pôde-se concluir que a temperatura da mesa de impressão da impressora GTMax core A3 influencia pouco na dureza de peças impressas em ABS Premium MG94 com a temperatura do bico de extrusão constante.

A variação de temperatura da mesa de impressão gerou mudanças macrogeométricas significativas nas peças. As amostras com mesa a 100°C e 120°C tiveram valores dimensionais bem próximos aos de projeto e uma precisão

satisfatória quanto às dimensões. As amostras impressas com a mesa a 80°C e 130°C apresentaram dimensões mais discrepantes dos valores de referência, conforme a Tab. 1. Portanto, a hipótese inicial em relação à dureza foi refutada e a hipótese inicial a respeito das dimensões geométricas foi confirmada.

Trabalhos futuros serão conduzidos a fim de investigar a influência outros parâmetros como temperatura da mesa de impressão, temperatura do bico extrusor, velocidade de impressão, orientação de impressão, material de impressão, etc. em outras propriedades mecânicas como limite de escoamento, limite de resistência à tração e limite à fadiga.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio do Instituto Serrapilheira (Serrapilheira Grant - 12908), do Laboratório de Acústica e Vibrações (LAV) e do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

6. REFERÊNCIAS

- ASTM, 2017. “American Society for Testing and Materials”. Nov. 2017 . Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D2240>>. Acessado em: 21 jun. 2019.
- Benwood C., Anstey A., Andrzejewski J., Misra M. e Mohanty A.K., 2018. *Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid)*.
- Callister Jr., W.D., 1999. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. LTC, 5ª edição.
- Canevarolo Júnior, S.V., 2010. *Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. Artliber, 3ª edição.
- Christiyan, K.G.J., Chandrasekhar U. e Venkateswarlu K., 2016. “A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite”. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI:10.1088/1757-899X/114/1/012109
- Dizon, J.R.C., et. al, 2018. “Mechanical characterization of 3D-printed polymers”. *Additive Manufacturing*, Vol. 20, p. 44–67.
- Flores, A., Ania, F. e Baltá-Calleja, F.J., 2009. *From the glassy state to ordered polymer structures: A microhardness study*.
- Groover, M.P., 2007. *Fundamentos de Manufatura Moderna*. McGraw-Hill Interamericana, México, 3ª edição.
- GTMax3D. **Principais Características ABS PREMIUM MG94**. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/filamento-abs-premium-mg94-175mm-gtmax3d-natural>>. Acessado em: 25 jun. 2019.
- Huang, S.H., Liu, P., Moskadar, A. e Hou L., 2013. *Additive Manufacturing and Its Societal Impact: A Literature Review*.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F. e Letcher, T, 2016. “Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation”. *J Fail. Anal. and Preven.*, Vol. 16, p. 467–481.
- 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 (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil. <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21711>>
- Sun, Q., Rizvi, G.M., Bellehumeur, C.T. e Gu, P., 2008. *Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments*. In *Rapid Prototyping Journal*.
- Vardhan, G.H., Charan G.H., Reddy P.V.S. e Kumar K.S., 2014. *3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing*.
- Ventola, C.L., 2014. *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses*.
- Zhang, Y., Chou, K., 2008. *A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis*.
- 3D Lab. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Acessado em: 25 jun. 2019.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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