

Influência da Densidade de Preenchimento e do Número de Perímetros nas Propriedades Mecânicas de Peças Fabricadas em PLA a Partir de Impressão 3D

Magno M. de Medeiros¹; Marlon C. da Silva¹; Daniella M. de Oliveira¹; Fábio D. R. dos Santos¹; Luanda Kívia de O. Rodrigues¹
¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA - Salvador - BA, Brasil

Recebido: __22 Set 2020__ / Aceito: __16 Out 2020__ / Publicado: __20 Dez 2020__.

Resumo: Com a disseminação da manufatura aditiva por deposição de material fundido, popularmente conhecida como impressão 3D, fazem-se necessários estudos a respeito das propriedades mecânicas das peças fabricadas por este processo a fim de aumentar a compreensão do comportamento destes objetos e expandir os horizontes de aplicação da tecnologia na fabricação de itens que irão trabalhar sob solicitações mecânicas. Portanto, o objetivo deste artigo é analisar a influência de dois parâmetros de impressão (número de perímetros e densidade de preenchimento) sobre as propriedades mecânicas de corpos de prova fabricados em PLA a partir da impressão 3D. Para o estudo, os corpos de prova foram confeccionados a partir do filamento de PLA com diâmetro de 1,75 mm, por meio da técnica FDM, utilizando uma máquina 3D Cloner, modelo DH Plus, e submetidos ao ensaio de tração. A partir das análises efetuadas, foi possível constatar que o parâmetro “número de perímetros” é mais relevante no que tange a resistência mecânica à tração. Os resultados foram satisfatórios e permitem traçar paralelos interessantes com dados obtidos em outros estudos utilizados como referência na elaboração deste artigo.

Palavras-chave: PLA; impressão 3D; número de perímetros; densidade de preenchimento; propriedades mecânicas

Abstract: With the dissemination of the additive manufacturing by deposition of molten material, popularly known as 3D printing, studies on the mechanical properties of the pieces manufactured through this process are necessary to increase the understanding of their behaviors, as well as to know how to expand the application horizons of the technology in the manufacture of items that will work under mechanical stresses. Therefore, the aim of this article is to analyze the influence of two printing parameters (number of perimeters and filling density) on the mechanical properties of specimens manufactured in PLA from 3D printing. For the study, the specimens made of PLA filament with a diameter of 1.75 mm, using the FDM technique and a 3D Cloner DH Plus model machine, were submitted to tensile test. From the analyzes carried out, it was possible to verify that the number of perimeters is more relevant with regard to the mechanical resistance to traction. The results were satisfactory and allow to trace interesting parallels with the data obtained in other studies used as references in present work.

Key words: PLA; 3D printing; number of perimeters; filling density; mechanical properties

Nomenclatura

ASTM: American Society for Testing and Materials

CP: Corpo de Prova

FDM: Fused Deposition Modeling

PLA: Polylactic Acid

1. Introdução

A manufatura aditiva faz referência a uma gama de processos para fabricação de peças com geometrias complexas. Esses processos são classificados principalmente em relação à natureza da matéria-prima e à estratégia de deposição do material (Bakrani Balani et al., 2019).

Identifica-se o surgimento do processo de produção de peças por adição de material com o engenheiro físico Charles Hull em 1984, ano de solicitação da primeira patente do processo de estereolitografia que foi concedida em 1986 (Hull, 1986). Em seguida, o processo de deposição de material fundido chamado de FDM, do inglês Fused Deposition Modeling, é patenteado pela empresa Stratasys (Almeida, 2007). Desde então, diversas empresas produziram seus próprios modelos de máquinas de prototipagem, popularmente conhecidas como impressoras 3D, com funcionamento através da deposição de material fundido. As restrições de acesso ao processo de manufatura aditiva, devido aos custos dos equipamentos envolvidos e os conhecimentos necessários para a operação do maquinário, têm sido superadas na última década. O surgimento de projetos de código aberto e de baixo-custo, como o “RepRap project” de autoria do professor Adrian Bowyer da University of Bath (RU) possibilitam a democratização da tecnologia (Barreto, 2019). Uma

relação de custo de diferentes métodos é apresentada por Irwin et al., (2014).

Originalmente dedicada somente à produção rápida de protótipos, a impressão 3D tem encontrado aplicações não só no campo da prototipagem industrial, como também na arquitetura, confecção de objetos de decoração, brinquedos e utensílios, devido à grande versatilidade e à facilidade com que objetos complexos podem ser criados utilizando este tipo de maquinário. Até a fabricação por adição de tecidos humanos, processo conhecido como bioimpressão, é uma realidade no contexto da medicina regenerativa. Aplicações na indústria militar também emergem conforme a tecnologia é difundida e aprimorada (Gross et al., 2014).

De acordo com Raut et al (2014) o método FDM é um dos processos de manufatura aditiva mais utilizados na produção de protótipos e finalização de peças, consistindo em uma tecnologia que faz a extrusão do filamento termoplástico e o deposita camada por camada (Almeida, 2007). O avanço tecnológico dos materiais que compõem os filamentos termoplásticos possibilitou a ampliação das aplicações desta técnica. Os modelos mais comuns no mercado utilizam filamentos poliméricos, pela facilidade de manuseio e pelo custo de fabricação, em especial o Polylactic Acid (PLA), um polímero da família dos poliésteres alifáticos, geralmente produzido a partir de vegetais e considerado um polímero biodegradável (Choksia & Desaib, 2017). O PLA é classificado como um termoplástico que pode ter características de um material semicristalino ou amorfo, com propriedades reológicas e boa processabilidade térmica (Santana et al., 2016).

Contudo, observando o processo de Deposição de Material Fundido, percebe-se que ainda há muito a ser estudado no que diz respeito às propriedades mecânicas das peças fabricadas com impressão 3D. É necessário compreender a influência dos parâmetros

Autor correspondente: Magno M. de Medeiros, magno.morelli@gmail.com.

de impressão nas propriedades mecânicas das peças fabricadas por este método, a fim de garantir a segurança em aplicações que exijam algum tipo de esforço. Para Raut et al., (2014), no FDM, um dos fatores críticos é selecionar a orientação de construção do modelo, ou seja, estabelecer os parâmetros de impressão da peça, pois essas ações afetam o tempo de construção, o custo total e, o mais importante, as propriedades mecânicas do produto final. Assim, conhecendo os limites mecânicos das peças impressas, é possível aumentar a gama de aplicações da técnica de impressão 3D à medida em que se aumenta a eficiência econômica na produção das mesmas.

As impressoras 3D mais comumente disponíveis no mercado permitem a variação de parâmetros de impressão como a densidade de preenchimento, número de camadas de contorno, padrão de preenchimento e altura das camadas de impressão. Tais parâmetros estão intrinsecamente ligados, e a variação deles interfere nas características estéticas e mecânicas da peça produzida. A velocidade de impressão define a velocidade com que o cabeçote de extrusão percorre o caminho projetado pelo software para formação da peça, e conseqüentemente, o tempo que a camada impressa tem para resfriar antes da camada seguinte ser depositada. O diâmetro do cabeçote de extrusão é também ajustável e determina a vazão de material. A espessura da camada, também chamada de resolução, é a altura de cada camada impressa. Quanto mais fina for a altura de cada camada, mais camadas serão necessárias para a conclusão da impressão. Já a espessura do extrusor varia conforme a velocidade de impressão e a espessura desejada das camadas. Christiyani et al. (2016) demonstram em seus estudos que a tensão de ruptura do material é inversamente proporcional a velocidade de impressão, e que esse efeito é agravado pela menor espessura da camada.

Atualmente a criação de modelos com impressoras 3D é um processo bastante empírico, e os limites da manufatura aditiva 3D ainda não estão bem definidos.

O objetivo deste artigo é analisar a influência dos parâmetros de impressão citados sobre a resposta de um corpo de prova de PLA fabricado pelo processo de impressão 3D por extrusão, através de ensaios mecânicos de tração, análises de material consumido, tempo de impressão e custos envolvidos no processo de fabricação, relacionando a viabilidade econômica da fabricação 3D com a resistência mecânica à tração apresentada pelos corpos de prova.

2. Materiais e Métodos

Foi adotado um procedimento para análise das propriedades mecânicas do material polimérico a partir da realização de ensaios de tração, com o objetivo de avaliar a combinação de parâmetros de impressão e sua influência no comportamento da peça final. Para modelagem do corpo de prova, foi utilizado o software SolidWorks e, quanto às dimensões, foram seguidas as determinações da norma ASTM D638.

Os corpos de prova analisados foram fabricados com filamento de PLA com diâmetro de 1,75 mm, a pela técnica FDM, utilizando uma máquina modelo DH Plus do fabricante 3D Cloner, que possui área de impressão de 320 x 320 x 400 mm e bico extrusor com diâmetro de 0,40 mm. Seguindo as orientações do fabricante do material, a configuração adotada para a temperatura da mesa aquecida foi de 60°C e a temperatura de extrusão limitada entre 190°C e 210°C. De acordo com Santana et al. (2018), o PLA sem qualquer tipo de pigmentação possui propriedades melhores que o PLA pigmentado. Para realização do trabalho foi utilizado material pigmentado e por isso foi importante usar como referência as propriedades do fabricante. Essas propriedades do filamento de PLA utilizado na impressão das peças estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do filamento de PLA.

Temperatura de Preparação	190-210°C
Densidade	1,24 g/cm ³

Temperatura de distorção	56°C
Tensão de Resistência	65 MPa
Alongamento até a ruptura	8%

A impressora 3D e o material utilizado para fabricação das amostras foram cedidos pelo Polo de Inovação Salvador, unidade especial do Instituto Federal da Bahia.

A determinação do número de corpos de prova ensaiados observou o princípio estatístico multiplicativo, adotando-se que o número de corpos de prova utilizados seria $2k$, onde k é o número de parâmetros de impressão analisados. Logo, utilizando variações de dois parâmetros de impressão, densidade de preenchimento e número de perímetros, chegou-se a um total de quatro corpos de prova para realização da análise. A ordem de fabricação dos corpos de prova e realização do ensaio de tração foi determinada de maneira aleatória.

Os parâmetros de impressão combinados e analisados foram a densidade de preenchimento e o número de perímetros. O valor de densidade de impressão variou entre 40% e 70%. Os números de perímetros utilizados foram 2 e 5. Os parâmetros-padrão de preenchimento e altura de camada foram mantidos constantes nos quatro corpos de prova. Na Tabela 2 são mostrados os parâmetros de impressão que variaram para fabricação de cada corpo de prova.

Tabela 2 – Parâmetro de impressão.

Corpo de Prova	Densidade de preenchimento	Número de Perímetros
CP 1	40%	2
CP 2	40%	5
CP 3	70%	2
CP 4	70%	5

Foram realizados ensaios de tração com os corpos de prova produzidos por impressão 3D. A máquina de tração utilizada é do modelo DL30000 do fabricante Emic, e possui capacidade de carga de até 30.000 kgf. O equipamento pertence ao Departamento Acadêmico de Tecnologia Mecânica do Instituto Federal da Bahia, campus Salvador. O ensaio destrutivo, mostrado na Figura 1, foi realizado a uma velocidade de 5 mm/min de acordo com a ASTM D638, que determina a velocidade do ensaio para o layout do corpo de prova utilizado.



Figura 1 - Ensaio de tração (acervo dos autores).

É importante salientar que as propriedades mecânicas do polímero PLA são conhecidas e certificadas pelo fabricante do filamento, e o objetivo da análise realizada é determinar as propriedades mecânicas de peças fabricadas a partir do processo de impressão 3D e comprovar, ou não, que estas propriedades sofrem variação em virtude da

combinação dos parâmetros definidos durante a manufatura.

3. Resultados e Discussões

Os resultados do ensaio de tração podem ser observados na Figura 2. Dessa maneira, foi possível compará-los quando a densidade é mantida em dois valores distintos e varia-se apenas o número de camadas, assim como na situação oposta, quando se mantém o número de camadas constante e varia-se a densidade de preenchimento.

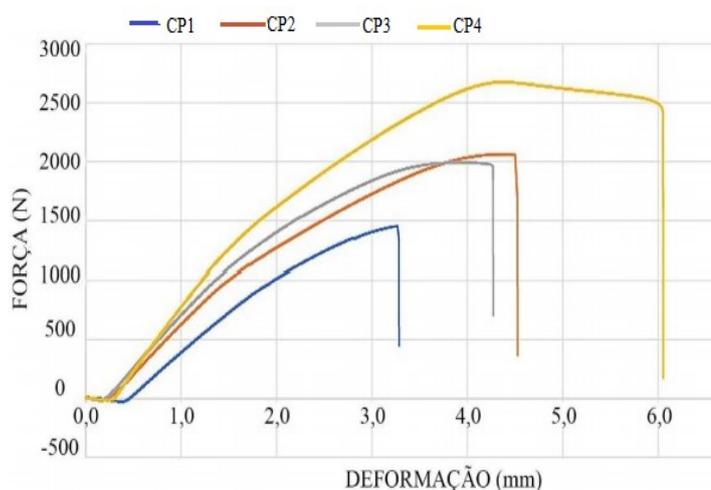


Figura 2 - Diagrama de força versus deformação.

A partir da análise do diagrama de força versus deformação, foi possível verificar que, apesar do PLA ser um termoplástico, as amostras apresentaram um comportamento semelhante aos termofixos e rompeu por fratura frágil em todos os casos. Isso foi afirmado com base, principalmente, nos valores de tensão máxima e tensão de ruptura que se apresentaram iguais ou próximos. Os gráficos apresentados na Figura 2 não apresentam zona de escoamento bem definida, o que dificulta a identificação do ponto de separação da deformação elástica da deformação plástica. Por isso foi necessário associar o comportamento exibido nos gráficos com as

informações que constam na Tabela 3. Essa mudança de comportamento do material para a peça impressa ratifica a teoria de que há influência dos parâmetros de processamento nas propriedades mecânicas das peças produzidas por impressão 3D. Tal mudança de comportamento do material dúctil para uma peça frágil pode ser devida aos espaços vazios formados pela impressão 3D.

Na Figura 2 é possível observar que para CP 1, com densidade de preenchimento de 40% e número de camadas 2, a força de ruptura suportada foi de 1450,61 N com uma deformação máxima de 2,79 mm. Já para CP 2, construída com as mesmas características CP 1 exceto pelo número de camadas que passou a ser 5, observou-se que a força de ruptura do material foi de 2061,01 N com uma deformação máxima de 4,20 mm. Sendo assim, houve um aumento da força máxima.

Analisando os gráficos de CP 3 e CP 4, com número de camadas 2 e 5, respectivamente, e ambos com 70% de padrão de preenchimento, observou-se que para o CP 3 a força de ruptura foi de 1977,86 N e a máxima deformação foi de 4,02 mm. Já para CP 4, a força de ruptura e a deformação máxima correspondem a 2444,95 N e 5,75 mm, respectivamente. A partir do ensaio de tração foi possível também determinar os dados dispostos na Tabela 3.

Analisando a Tabela 3, foi possível verificar que o CP 1 possui uma tensão de ruptura igual a tensão máxima, indicando que não há ductilidade. Esse comportamento é comum aos polímeros termofixos. Apesar do corpo de prova ter sido construído a partir do PLA, que é um polímero termoplástico, pode-se afirmar que a peça impressa apresentou um comportamento termofixo. Nos demais corpos de prova, este comportamento não foi identificado, pois a tensão máxima é maior que a tensão de ruptura, indicando que o material deforma antes do rompimento.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração.

Corpo de Prova	Tensão de ruptura (MPa)	Deformação de ruptura (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
CP 1	15.46	2.79	15.46	6155.12
CP 2	21.96	4.20	21.98	7343.75
CP 3	21.08	4.02	21.24	7857.75
CP 4	26.05	5.75	28.52	9404.83

Ao comparar CP 1 e CP 2, ambos com 40% de densidade de preenchimento, verificou-se que aumentando o número de camadas de impressão de 2 para 5 conferiu-se maior ductilidade ao material, fato comprovado pelo aumento da capacidade de deformação da peça. Além disso, percebeu-se o aumento da tensão de ruptura, da tensão máxima e do módulo de elasticidade dos corpos de prova. O crescimento da tensão de ruptura do CP 1 para o CP 2 foi de aproximadamente 42% somente devido ao aumento do número de perímetros.

Aumentos da deformação máxima, da tensão máxima e da tensão de ruptura foram observados, também, quando comparados CP 3 e CP 4, ambos com 70% de densidade de preenchimento. Ao relacionar o CP 1 com o CP 3 foi possível verificar um aumento da ductilidade, da tensão de ruptura, da tensão máxima e do módulo de elasticidade das amostras. A diferença entre eles está na densidade de preenchimento que variou de 40% para 70%, com o mesmo número de camadas, 2. Neste caso, o crescimento da tensão de ruptura devido ao aumento no número de perímetros, para o mesmo valor de densidade de preenchimento, foi de 23,57%. Sendo assim o aumento do número de perímetros foi mais significativo para o aumento da

tensão de ruptura na configuração com menor padrão de preenchimento.

Analisando os dados CP 2 e CP 4, ambos com 5 camadas, e variando a densidade de preenchimento de 40% para 70%, respectivamente, também foram verificados aumentos entre a tensão de ruptura e a tensão máxima, porém, pouco significativos. O ganho na tensão de ruptura devido ao aumento da densidade de preenchimento foi de 18,62%. Agora, comparando os valores das propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 3 para o CP 2 e o CP 3, é possível verificar que são próximos, apesar das peças terem sido fabricadas com configurações distintas. A diferença no valor da tensão de ruptura é de 4,17%. Com uma diferença pouco expressiva como essa, a decisão de qual a melhor configuração de impressão pode ser influenciada por outras variáveis como tempo de impressão ou consumo de material.

4. Conclusão

A partir do ensaio de tração e das análises comparativas entre as amostras foi possível concluir que, para as condições analisadas, houve influência dos parâmetros de impressão 3D sobre as propriedades mecânicas quando aplicado o ensaio de tração. Do CP 1 para o CP 4 houve um aumento da tensão de ruptura de 68,49%. O número de perímetros e a densidade de preenchimento quando elevados conferiu maiores módulos de elasticidade às peças finais, garantindo melhor resistência mecânica em peças mais densas.

Como sugestão para trabalhos futuros é importante avaliar estes mesmos parâmetros sob novas configurações, além de avaliar novos parâmetros de impressão e realizar ensaios sobre configurações com menor quantidade de espaços vazios para verificar se o comportamento das peças continua frágil. Adicionalmente, seria interessante realizar outros ensaios mecânicos como os de flexão, compressão e impacto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFBA e ao Polo de Inovação de Salvador pela impressão 3D dos corpos de prova.

Referências

- Almeida, W. J. (2007). *Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método de elementos finitos* Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais). Universidade de São Paulo.
- Bakrani Balani, S., Chabert, F., Nassiet, V., & Cantarel, A. (2019). Influence of printing parameters on the stability of deposited beads in fused filament fabrication of poly(lactic) acid. *Additive Manufacturing*, 25, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.012>
- Barreto, L. C. (2019). *Desenvolvendo impressora 3D de materiais pastosos* Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de Brasília.
- Choksia, N., & Desaib, H. (2017). Synthesis of Biodegradable Polylactic Acid Polymer By Using Lactic Acid Monomer. *International Journal of Applied Chemistry*, 13, 377–384.
- Christiyan, K. G. J., Chandrasekhar, U., & Venkateswarlu, K. (2016). A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114, 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012109>
- Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., & Spence, D. M. (2014). Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical Chemistry*, 86(7), 3240–3253
- <https://doi.org/10.1021/ac403397>
- Hull, C. W. (1986). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* (United States Patent No. US4575330A). Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US4575330/en> Acesso em 19 jul 2020
- Irwin, J. L., Pearce, J., Anzalone, G., & Oppliger, D. (2014, January 1). *The reprop 3-D printer revolution in STEM education*. ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings.
- Raut, S., Jatti, V. S., Khedkar, N. K., & Singh, T. P. (2014). Investigation of the Effect of Built Orientation on Mechanical Properties and Total Cost of FDM Parts. *Procedia Materials Science*, 6, 1625–1630. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.146>
- Santana, L., Alves, J. L., Sabino Netto, A. da C., & Merlini, C. (2018). A comparative study between PETG and PLA for 3D Printing through thermal, chemical and mechanical characterization. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(4). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0601>
- Santana, L., Merlini, C., Barra, G. M. de O., Ahrens, C. H., & Netto, A. da C. S. (2016). Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de pla para impressoras 3d de código aberto. *Anais. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Fortaleza.