

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PLA

DAVI F. SILVA¹, LOURENÇO H. N. PEREIRA², LUIZ H. S. DE PAULA³, CARLOS EDUARDO S. ZAMBON⁴, VICENTE GERLIN NETO⁵

¹ Graduando em Engenharia da Computação, Bolsista PIBIC-IFSP, IFSP, Campus Birigui, felipe.davi@ifsp.edu.br.

² Graduando em Engenharia da Computação, IFSP, Campus Birigui, lourenco.henrique@aluno.ifsp.edu.br

³ Bacharel em Engenharia Civil, Mestrando em Astronomia, Bolsista PROEX-CAPES, IAG-USP, São Paulo, h.paula@usp.br

⁴ Professor PEEBTT, IFSP, Campus Birigui, eduardozambon@ifsp.edu.br

⁵ Professor PEEBTT, IFSP, Campus Birigui, gerlin@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.05.04-7 Polímeros, Aplicações

RESUMO:

A impressora 3D revolucionou o desenvolvimento de produtos e protótipos, permitindo a fabricação de objetos tridimensionais diretamente a partir de modelos digitais. Entre as diversas tecnologias de impressão 3D, o *Fused Deposition Modeling* (FDM) se destaca por sua acessibilidade e eficiência, utilizando a deposição controlada de material termoplástico camada por camada para a criação de objetos tridimensionais. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes parâmetros de impressão na resistência à tração do material impresso em 3D. O material escolhido para ser analisado foi o ácido polilático (PLA), material bastante difundido para impressoras 3D, foi escolhido e caracterizado. Foram definidos parâmetros de impressão (espessura de camada, temperatura de extrusão e velocidade de impressão), produzidos corpos de prova e ensaiados à tração até a ruptura, obtendo resultados como a resistência à tração do PLA. Observamos que alguns parâmetros de impressão foram mais resistentes, principalmente se tratando da temperatura de extrusão, onde temperaturas acima de 200°C tornaram o PLA mais resistente. Desta forma o objetivo do trabalho de caracterizar as propriedades mecânicas do o PLA a partir dos ensaios de tração foi devidamente atingido.

PALAVRAS-CHAVE: caracterização mecânica; ácido polilático (PLA); impressão 3D; ensaios de tração; temperatura de extrusão; resistência à tração.

INFLUENCE OF PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS MANUFACTURED BY THE FDM PROCESS

ABSTRACT:

The 3D printer has revolutionized product and prototype development, enabling the creation of three-dimensional objects directly from digital models. Among the various 3D printing technologies, Fused Deposition Modeling (FDM) stands out for its accessibility and efficiency, utilizing controlled deposition of thermoplastic material layer by layer to build 3D objects. The objective of this work is to assess the influence of different printing parameters on the tensile strength of 3D-printed material. The chosen material for analysis was polylactic acid (PLA), widely used in 3D printers. Printing parameters were defined (layer thickness, extrusion temperature, and print speed), test specimens were produced, and tensile tests were performed until failure, yielding results for PLA tensile strength. It was observed that certain printing parameters, particularly extrusion temperature, contributed to higher strength, with temperatures above 200°C making PLA more resilient. Thus, the objective of characterizing the mechanical properties of PLA through tensile testing was successfully achieved.

KEYWORDS: mechanical characterization; polylactic acid (PLA); 3D printing; tensile testing; extrusion temperature; tensile strength.

INTRODUÇÃO

A impressora 3D, desenvolvida na década de 1980, revolucionou o desenvolvimento de produtos e protótipos, permitindo a fabricação de objetos tridimensionais diretamente a partir de modelos digitais. Inicialmente restrita a aplicações industriais, essa tecnologia se expandiu para diversas áreas, como medicina, engenharia, design e educação (Guimaraes A. L. A. e Hellmeister L. A. V., 2018). Entre as diversas tecnologias de impressão 3D, o Fused Deposition Modeling (FDM) se destaca por sua acessibilidade e eficiência, utilizando a deposição controlada de material termoplástico camada por camada para a criação de objetos tridimensionais. O FDM é amplamente utilizado pela sua versatilidade e capacidade de atender tanto à prototipagem rápida quanto à produção de peças funcionais (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

Um dos materiais mais utilizados no FDM é o Ácido Polilático (PLA), conhecido por sua biodegradabilidade, o que o torna uma escolha popular para aplicações sustentáveis. No entanto, o PLA apresenta limitações mecânicas, como baixa resistência ao impacto e à deformação térmica, o que exige otimizações no processo de fabricação para melhorar seu desempenho (Farah, Anderson & Langer, 2016). As propriedades mecânicas do PLA variam significativamente de acordo com as condições de processamento, como temperatura de extrusão e taxa de resfriamento (Tymrak, Kreiger & Pearce, 2014). Além disso, fatores como a orientação de deposição e o padrão de preenchimento interno influenciam diretamente a resistência à tração e à flexão das peças produzidas (Popescu et al., 2018). Ensaios mecânicos demonstram que o PLA, quando fabricado sob condições controladas, pode apresentar uma boa resistência à tração e uma ductilidade moderada (Es-Said et al., 2000). Com o crescente uso da impressão 3D e a disponibilidade de uma impressora 3D no laboratório IFMaker do IFSP Campus Birigui, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes parâmetros de impressão na resistência à tração do PLA, buscando aprimorar o desempenho mecânico deste material.

MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar o trabalho, foi escolhido um processo de impressão 3D do tipo FDM com uma impressora 3D modelo Ender-6 3D Printer Enclosed version da marca Creality e, para avaliar as propriedades mecânicas, uma máquina universal de ensaios EMIC DL30000 foi utilizada para realizar ensaios de tração em corpos de prova padronizados.

A produção dos corpos de prova, passou por três etapas; escolha do material para a impressão 3D de acordo com as condições da impressora, estudo e definição dos parâmetros de impressão e produção de corpos de provas para os ensaios mecânicos; e pôr fim a análise de resultados e proposta de uma combinação ótima de parâmetros de impressão para a impressora. O material escolhido para a impressão dos corpos de prova foi o PLA (ácido polilático) na cor branca da marca GTMax3D. Para a impressão dos corpos de prova a norma ASTM 618 (ASTM *International*, 2019) foi utilizada e desta forma, foram definidas as dimensões apresentadas no desenho do corpo de prova na Figura 1. Após a definição das dimensões e geometria dos corpos de prova, sucedeu-se a impressão dos corpos.

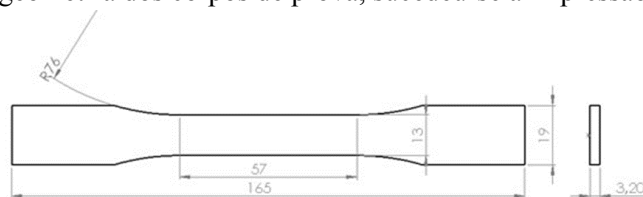


Figura 1 - Desenho com dimensões em milímetros dos corpos de prova segundo a norma ASTM-618.

Fonte: Dados do próprio autor.

Com o objetivo de realizar a caracterização e avaliar o comportamento do PLA à tração, escolheram-se como parâmetros a serem avaliados, a velocidade de impressão, espessura de camada e temperatura de extrusão da impressora e seus valores estão descritos na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de impressão escolhidos.

Espessura de camada	Temperatura de impressão	Velocidade de impressão
0,50mm	190 °C	90,00 mm/s
	210 °C	95,00 mm/s
	220 °C	100,00 mm/s

Afim de facilitar a comparação entre diferentes parâmetros de impressão, foi definido um código de nomenclatura sendo AX_1X_2 , onde o valor de X_1 varia de 0 a 2 representando as temperaturas de impressão, tendo a temperatura inicial (0) como 190 °C, e o 1 representando a impressão a 210 °C e 2 para 220 °C, quanto X_2 foi de 0 a 2 representando a velocidade de extrusão, a velocidade inicial (0) é de 90,00 mm/s, o número 1 representaria a velocidade de 95,00 mm/s e o número 2 representa a velocidade de 100,00 mm/s. Para garantir uma quantidade maior de corpos de prova com qualidade, foi realizada a impressão de 9 amostras ou corpos de prova para cada velocidade de impressão. Desta forma, a nomenclatura recebeu um dígito extra ficando da seguinte forma “A00-X” onde o algoritmo após o traço representa o sequencial de impressão, variando de 1 até o 9, desta forma como exemplo temos que o corpo de prova A00-1, é um corpo de prova que possui 0,50 mm de altura da camada, foi impresso com a temperatura de 190 °C e sua velocidade de extrusão foi de 90,00 mm/s, e o mesmo é o primeiro corpo de prova a ter sido ensaiado com essas características. A impressão se iniciou com 9 corpos de prova por condição também pela limitação de espaço físico da mesa de impressão, mostrada durante a impressão dos corpos de prova na Figura 2-A.

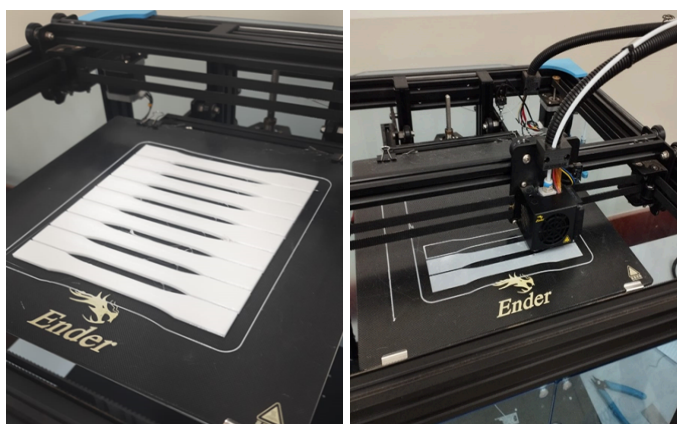


Figura 2: A) Mesa de impressão e corpos de prova durante a impressão. B) Corpos de prova após a impressão finalizada.

Fonte: Dados do próprio autor.

Já na Figura 2-B estão mostrados os corpos de prova após a impressão finalizada, e antes do destacamento da mesa de impressão, após a impressão partiu-se para a medição das dimensões dos corpos de prova e nomeação dos mesmos antes da realização dos ensaios. Após a impressão de todas as condições de corpos de prova, pode-se definir a realização dos ensaios de tração na máquina universal de ensaios. A célula de carga escolhida foi a de 500 kgf e os parâmetros de ensaio foram escolhidos de acordo com a norma ASTM-618 ou com a capacidade e segurança do equipamento utilizado, sendo a velocidade de ensaio de 5,00 mm/min, limite de força de 480 kgf para não danificar a célula de carga e todos corpos de prova foram ensaiados até a ruptura.. Foram ensaiados no total 5 corpos de prova de cada condição de parâmetros de impressão, sendo guardados os demais corpos para garantia de checagem futura. Após os ensaios realizados foram levantadas as propriedades mecânicas do PLA, sendo registrados a TENSÃO LIMITE DE RESISTÊNCIA, a FORÇA MÁXIMA e a DEFORMAÇÃO TOTAL do material após os ensaios. Os valores foram obtidos por meio da construção de uma curva tensão-deformação com os dados brutos retirados da máquina de ensaio. A força máxima foi obtida pelo máximo valor registrado pela célula de carga, da própria máquina e, para cálculo da tensão e deformação foram utilizadas as equações (1) e (2) respectivamente, baseadas nas análises de Souza (1982).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

- σ - tensão (MPa)
- F - Força (N)
- A - Área inicial do corpo de prova (m²)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Onde:

- ε - Deformação
- Δl - Variação do comprimento do corpo (mm)
- l_0 - Comprimento inicial do corpo de prova (mm)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a produção dos corpos de prova, e realização dos ensaios mecânicos para 5 dos 9 corpos de prova para cada condição, foi possível encontrar e avaliar a resistência mecânica à tração e comportamento do material PLA para as condições de impressão realizadas. A tabela 2 traz os valores da tensão limite de resistência média para os corpos testados, da força máxima média atingida e da deformação total média dos corpos de prova após os ensaios.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de tração para a condição A.

Condição	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Força Máxima (kN)	Deformação Total (%)
A00	31,15	1,97	0,35
A01	41,10	1,99	0,15
A02	44,89	1,86	0,14
A10	43,65	2,10	0,15
A11	47,85	1,92	0,12
A12	62,07	1,94	0,13
A20	58,63	1,83	0,12
A21	46,22	1,83	0,12
A22	46,95	1,98	0,13

A tensão limite de resistência média encontrada para o PLA no grupo do A0X foi de $39,04 \pm 2,5$ MPa, valor bem menor que o esperado, em média de 50 a 70 MPa (Santana L. *et al.*, 2018), valor médio 21,9% menor que o esperado para o PLA. Este valor menor se deve pela baixa temperatura de impressão do corpo de prova A0X, tendo em vista que o material atinge a sua temperatura de transição vítrea em torno de 55°C a 60°C (MENG, B., *et al.*, 2012 apud Santana L., *et al.*, 2018), o bico de extrusão permite que o PLA atinja essa característica quando aquecido entre 210°C e 220°C. Já no grupo A1X temos um aumento na média na tensão limite de resistência, que foi de $51,19 \pm 5,25$ MPa, o parâmetro de temperatura de impressão que foi utilizado é de 210°C, atingindo assim a temperatura de transição vítrea que faz com que o PLA se torne mais maleável para a impressão. O grupo A2X teve a tensão limite de resistência média de $50,6 \pm 4,85$ MPa também dentro do valor esperado pela literatura, este também possui uma temperatura de impressão maior que o grupo A1X, de 220°C, sendo esta uma das temperaturas indicadas pelo fabricante para realização das impressões.

Ao analisar os resultados, com a proximidade dos valores de força máxima que tiveram desvio médio de 1% a 6%, com exceção do corpo de prova A11 que teve um desvio padrão de 11%, mostrando uma boa repetibilidade dos ensaios e do material. Comparando novamente com Santana L. *et al.* (2018) a deformação média variou de 13% a 15%, próximo do esperado para a literatura, sendo que a deformação média do PLA foi de 15% para o autor citado, exceto o A00 tendo uma deformação média de 35%. Essa deformação se dá pelos parâmetros de impressão usados, como a camada de espessura de 0,5 mm com a temperatura de extrusão de 190°C e velocidade de 90m/s, como podemos observar na tabela 1, como não atingimos a temperatura de transição vítrea no bico de extrusão, o corpo de prova apresentou uma deformação maior que os demais corpos de prova e muito acima do esperado na literatura, pois o PLA não conseguiu se moldar e cristalizar pela falta da condição física de “gota de vidro” que o material alcança para se cristalizar e aumentar sua resistência, foram observados esse comportamento nos corpos com maior temperatura de extrusão. Por fim, para analisar o comportamento do PLA na tração, as curvas tensão-deformação foram levantadas e estão demonstradas na figura 4. Observando os gráficos, é possível se enxergar um comportamento parecido

de todas as amostras de PLA, tendo deformações primordialmente elásticas e com corpos deformando pouco mais que outros. Este comportamento corrobora com a ideia mostrada na tabela 2 e nas discussões de que o material teve comportamento esperado, mesmo tendo resistência mecânica um pouco menor que a da literatura consultada.

Figura 3 - Gráficos dos corpos de prova A0X

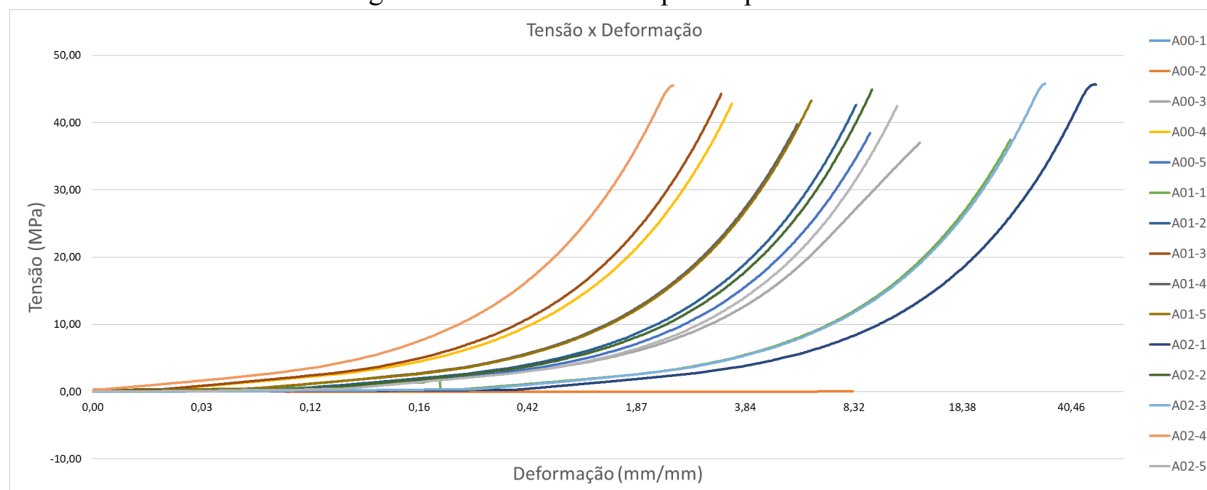


Figura 4 - Gráficos dos corpos de prova A1X

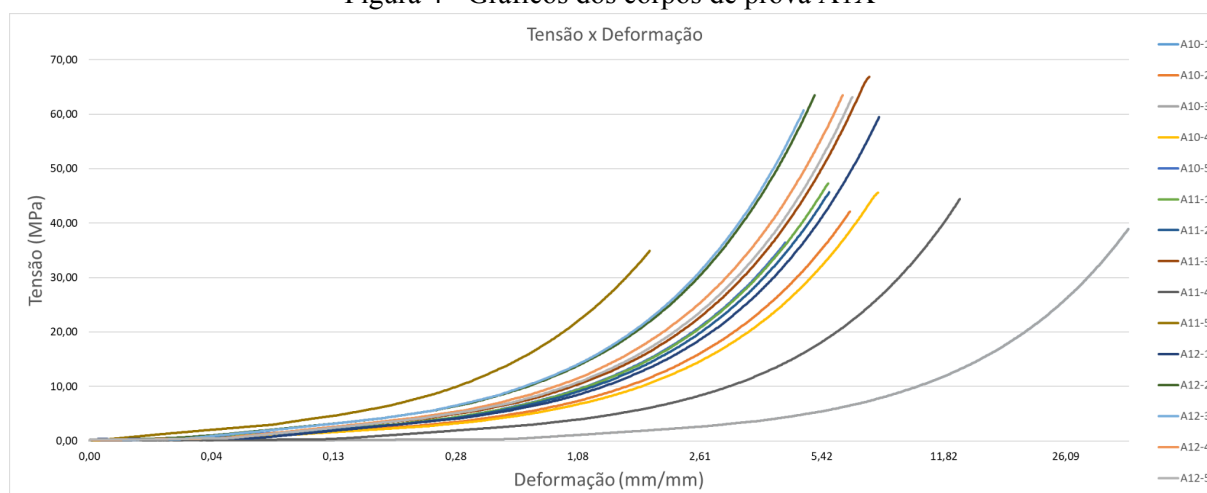
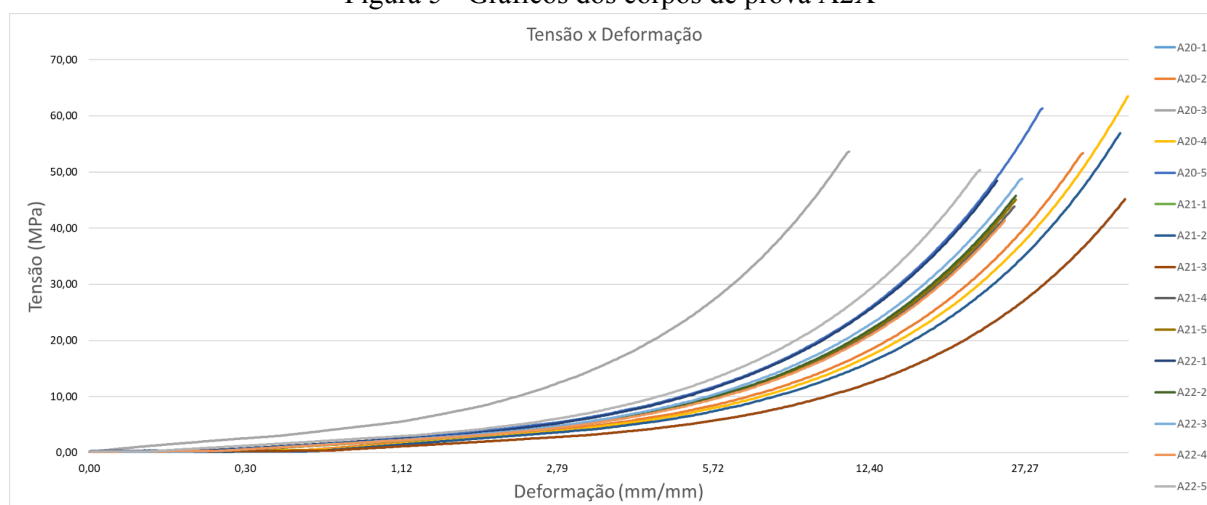


Figura 5 - Gráficos dos corpos de prova A2X



CONCLUSÕES

O objetivo do estudo foi analisar diversos parâmetros de impressões e a influência dos mesmos nas propriedades mecânicas do PLA. Foram variados esses parâmetros, nos ensaios mecânicos foi possível observar que na maior temperatura de extrusão, de 220°C, o PLA teve maior resistência mecânica, se comparado com as outras temperaturas de extrusão utilizadas. Considerando o manual do fabricante, o PLA escolhido tem temperatura de manipulação ideal entre 190° e 220° sendo esse intervalo a temperatura ideal para o alcance da transição vítrea e facilitar a manipulação do material e sua cristalização no fim do processo, o que pode ser confirmado neste trabalho. Outro parâmetro a se considerar é o de velocidade de impressão, os corpos de prova impressos na velocidade acima de 95 mm/s obtiveram uma tensão limite de resistência superior aos demais, ficando dentro das configurações sugeridas pelo fabricante que gira em torno de 80 à 150 mm/s. Portanto, após o trabalho, para impressões de melhor comportamento mecânico, uma temperatura de 220°C com uma velocidade de 95 mm/s se mostra a ideal no contexto da resistência mecânica.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

D.F.S e L.H.P.S contribuíram com a curadoria e análise dos dados. D.F.S, L.H.N.P e V.G.N procederam com a metodologia e experimentos. D.F.S, L.H.P.S. e V.G.N atuaram na redação do trabalho. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRP) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) pelo fomento e ao orientador, Dr. Vicente Gerlin Neto, pelo apoio, incentivo e orientação recebidos durante o processo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASTM International, **ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

ES-SAID, O. S.; FOYOS, J.; NOORANI, R.; et al. **Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples**. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 15, n. 1, p. 107-122, 2000.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. **Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review**. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 107, p. 367-392, 2016.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. Springer, 2015.

GUIMARAES A. L. A., HELLMEISTER L. A. V., **PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS DE ABS OBTIDAS UTILIZANDO UMA IMPRESSORA 3D REPRAP**. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - (CONEM-2018). Salvador (Bahia) - Brasil, 2018.

POPESCU, D.; ZAPCIU, A.; AMZA, C.; BACIU, F.; MARINESCU, R. **FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review**. *Polymer Testing*, v. 69, p. 157-166, 2018.

SANTANA, L. et al.. **Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, p. e12267, 2018.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5ªed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 1982.

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. **Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions**. *Materials & Design*, v. 58, p. 242-246, 2014.