

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE PREENCHIMENTO E DA ALTURA DE CAMADA DE DEPOSIÇÃO NA TENSÃO DE RUPTURA DE CORPOS DE PROVA FABRICADOS EM POLI ÁCIDO LÁTICO (PLA) A PARTIR DE IMPRESSÃO 3D



Revista
Desafios

Artigo Original
Original Article
Artículo Original

Analysis of influence of filling pattern and deposition layer height in test break tension manufactured in Lactic Acid Poly (PLA) from 3D printing

Análisis de la influencia del patrón de relleno y la altura de la capa de deposición en la tensión de rotura de cuerpos de prueba fabricados en Poliático de Ácido Láctico (PLA) a partir de impresión 3D

Tamires Pereira Alves¹, Alan Victor Santos de Jesus², Gabriel Valverde da Silva Pinto³, Roulien Roland Martins Ribeiro³, Luanda Kívia de Oliveira Rodrigues*⁴

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Produtos, Instituto Federal da Bahia –IFBA, Salvador, Brasil.

²Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Instituto Federal da Bahia –IFBA, Salvador, Brasil.

³Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal da Bahia –IFBA, Salvador, Brasil.

⁴Núcleo de Refrigeração, Controle e Automação, Departamento Acadêmico de Tecnologia Mecânica, Instituto Federal da Bahia –IFBA, Salvador, Brasil.

*Correspondência: Núcleo de Refrigeração, Controle e Automação, Instituto Federal da Bahia –IFBA, Rua Emidio dos Santos, S/N, Salvador, Brasil., CEP:40.301-015. e-mail luandakivia@ifba.edu.br.

Artigo recebido em 10/06/2020 aprovado em 28/11/2020 publicado em 12/03/2021.

RESUMO

A manufatura aditiva altera as propriedades mecânicas do polímero extrudado, além disso, os parâmetros de impressão 3D influenciam na resistência da peça fabricada. Por isso, este trabalho tem o objetivo de analisar a influência dos parâmetros de impressão 3D na tensão de ruptura de corpos de prova produzidos em PLA (Poli Ácido Láctico). Foram confeccionados quatro corpos de prova na impressora modelo 3D Cloner DH Plus, variando padrão de preenchimento (hexagonal e linha) e altura de camada (0,1mm e 0,35mm). O ensaio de tração foi realizado a uma velocidade de 5 mm/min. Após o ensaio de tração foi feita uma análise estática utilizando o *SolidWorks Simulation*. Os corpos de prova com maior altura de camada foram os que apresentaram maior deformação. A configuração que apresentou menor resistência foi a peça fabricada com padrão hexagonal e menor altura de camada, enquanto que a peça fabricada com padrão em linhas e menor altura de camada teve a maior força aplicada. Isso mostra que a resistência está relacionada com o padrão de preenchimento. Os resultados foram satisfatórios, o que motiva a realização de mais trabalhos na área. Por isso, como sugestão futura deve-se analisar a influência de outros parâmetros de impressão 3D.

Palavras-chave: Tensão de Ruptura, Impressão 3D, PLA.

ABSTRACT

Additive manufacturing alters the mechanical properties of the extruded polymer; in addition, 3D printing parameters influence the strength of the manufactured part. Therefore, this work aims to analyze the influence of 3D printing parameters on the rupture stress of specimens produced in PLA (Lactic Acid Poly). Four specimens were made using the 3D model Cloner DH Plus, varying the filling pattern (hexagonal and line) and layer height (0.1mm).

and 0.35mm). The tensile test was performed at a speed of 5 mm / min. After the tensile test, a static analysis was performed using SolidWorks Simulation. The specimens with the highest layer height showed the greatest deformation. The configuration that presented the least resistance was the part manufactured with hexagonal pattern and the lowest layer height, while the part manufactured with pattern in lines and the lowest layer height had the greatest applied force. This shows that the resistance is related to the filling pattern. The results were satisfactory, which motivates further work in the area. Therefore, as a future suggestion, the influence of other 3D printing parameters should be analyzed.

Keywords: Break tension, 3D Printing, PLA.

RESUMEN

La fabricación aditiva altera las propiedades mecánicas del polímero extruido, además, los parámetros de impresión 3D influyen en la resistencia de la pieza fabricada. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de los parámetros de impresión 3D sobre el estrés de rotura de las probetas producidas en PLA (Poli de ácido láctico). Se realizaron cuatro especímenes utilizando el modelo 3D Cloner DH Plus, variando el patrón de relleno (hexagonal y lineal) y la altura de la capa (0,1 mm y 0,35 mm). La prueba de tracción se realizó a una velocidad de 5 mm / min. Después de la prueba de tracción, se realizó un análisis estático con SolidWorks Simulation. Los especímenes con mayor altura de capa mostraron la mayor deformación. La configuración que presentó menor resistencia fue la pieza fabricada con patrón hexagonal y la menor altura de capa, mientras que la parte fabricada con patrón en líneas y menor altura de capa tuvo la mayor fuerza aplicada. Esto muestra que la resistencia está relacionada con el patrón de llenado. Los resultados fueron satisfactorios, lo que motiva a seguir trabajando en el área. Por tanto, como sugerencia futura, conviene analizar la influencia de otros parámetros de impresión 3D.

Descriptores: Tensión de rotura, Impresión 3D, PLA.

INTRODUÇÃO

A impressora 3D, criada por Chuck Hull em 1984, é um equipamento que vem sendo largamente aplicado na área da engenharia. Isso ficou mais evidente com o desenvolvimento da tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM - *Fused Deposition Modeling*), que possibilitou a prototipagem de peças poliméricas em 3 dimensões (Rajpurohit e Dave, 2019). A partir das impressoras 3D, é possível imprimir vários elementos complexos, como roupas e até mesmo órgãos através da sobreposição consecutiva de camadas de material de impressão, com um custo inicial relativamente baixo, representando uma evolução da manufatura aditiva de acordo com Galina *et al* (2018) e Frazier (2014).

Atualmente, o poli(ácido láctico) (PLA), é um dos materiais mais utilizados na impressão 3D (Rajpurohit e Dave, 2018). Se trata de um polímero termoplástico com boas propriedades ecológicas e derivado de fontes renováveis. É um material resistente, rígido, difícil de deformar ou flexionar, e de

alta dureza, tornando-o frágil com baixa resistência ao impacto (Silva *et al*, 2019). Sua alta fluidez e baixa contração durante o processo de extrusão permite a produção de peças com alta precisão dimensional e bom acabamento superficial. É um material indicado para produção de modelos físicos que não sejam submetidos às condições de altos esforços mecânicos, atritos ou altas temperaturas. Estes fatores implicam no processo de desgaste do material (Croucillo *et al*, 2018).

O principal problema acerca das impressões tridimensional está relacionado aos variados parâmetros de impressão. Com exceção do tempo de impressão e quantidade de filamento gasto, não há registros suficientes sobre as características mecânicas de uma peça produzida por este processo, e é preciso documentá-las pelo fato da manufatura aditiva alterar as propriedades mecânicas do polímero extrudado (Brischetto *et al*, 2019).

Portanto este trabalho tem por objetivo analisar a influência do padrão de preenchimento e da

altura de camada na tensão de ruptura de corpos de prova produzidas em PLA a partir da impressão 3D. Para isso os corpos de prova serão submetidos à um ensaio de tração e o resultado comparado com uma simulação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta etapa foi dividida em três momentos: confecção dos corpos de prova, ensaio de tração e simulação.

Confecção dos corpos de prova

Antes de confeccionar os corpos de prova, tinha que se determinar a quantidade necessária para realização dos testes, para isso foi utilizado os conceitos de estatística de planejamento do experimento. O planejamento do experimento é uma área da estatística que busca otimizar o processo de experimentação de modo a garantir dados úteis com menor custo, de acordo com Vivacqua e Pinho (2008 apud Nobrega, 2010). Dentro do planejamento do experimento o método fatorial 2k é utilizado para determinar a quantidade de amostras para o experimento considerando ou não a replicação, pois a replicação pode ser inviável devida limitação de recurso e tempo (Nobrega, 2010). Então devido ao custo da impressão 3D de corpos de prova poliméricos foi necessário utilizar a fatoração 2k sem replicação. A aleatorização é um dos princípios básicos do planejamento do experimento que visa balancear o erro experimental. Por isso foi realizado um sorteio para definir a ordem de impressão dos corpos de prova e de realização do ensaio de tração.

Logo, utilizando variações de dois parâmetros de impressão, padrão de preenchimento e espessura de camada de deposição, com dois níveis obteve-se quatro corpos de prova para realização da análise como mostrado na Tabela 1.

O padrão de preenchimento e a altura de camada são os parâmetros de impressão que, a partir

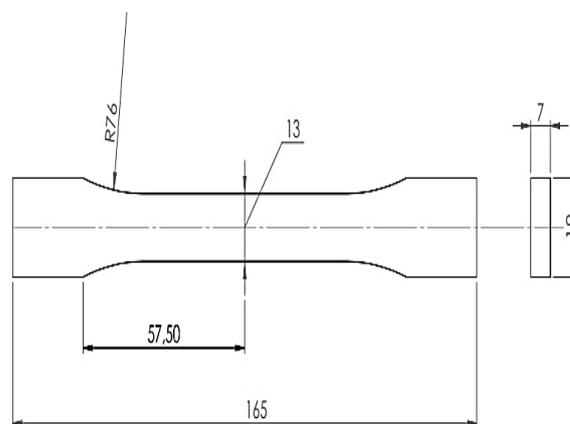
da experiência vivenciada no dia-a-dia de impressão de peças tridimensionais, percebeu-se que ao variar impactava na qualidade final da peça produzida e por isso, a necessidade de comprovar ou não esta percepção.

Tabela 1. Fatores considerado no experimento.

Fator	Nível (+)	Nível (-)
A: Padrão de preenchimento	Hexagonal	Linha
B: Altura da camada (mm)	0,1	0,35

A tecnologia da impressão 3D permite que peças complexas sejam fabricadas em questão de horas a partir de uma modelagem em softwares de Desenho Assistido por Computador (CAD) (Fereshtenejad, 2016). O *SolidWorks* é o software de CAD mais utilizado para modelagem tridimensional, além disso é o software cuja instituição possui a licença. Por isso na modelagem do corpo de prova, foi utilizado o software *SolidWorks* e às dimensões, foram seguidas as determinações da norma ASTM D638. A Figura 1 mostra as vistas, frontal e lateral, do corpo de prova e suas dimensões em milímetros.

Figura 1. Modelo do corpo de prova em 2D no *SolidWorks*.



Fonte: Autores

A maior parte das impressoras 3D utilizam a técnica FDM, que é um processo no qual o material

termoplástico fundido é depositado, camada sobre camada, a partir de uma extrusora (Carneiro *et al* 2015). Um dos polímeros mais utilizados na impressão 3D é o PLA. As propriedades mecânicas do PLA são dados conhecidos, com excelente dureza e resistência mecânica. Porém ao realizar uma impressão 3D a peça produzida pode apresentar propriedades que variam com os parâmetros de impressão. Isso acaba dificultando a prototipagem, pois não há materiais didáticos que relacionem propriedades mecânicas com parâmetros de impressão (Fernandes, 2015). Além disso, as propriedades do material são modificadas em função da sua coloração. O PLA sem qualquer tipo de pigmentação possui propriedades melhores que os PLA coloridos (Santana *et al*, 2018).

A impressora 3D e os materiais utilizados para fabricação das amostras foram cedidos pelo Polo de Inovação Salvador, unidade especial do Instituto Federal da Bahia. As propriedades do filamento de PLA utilizado na impressão das peças estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades do filamento de PLA.

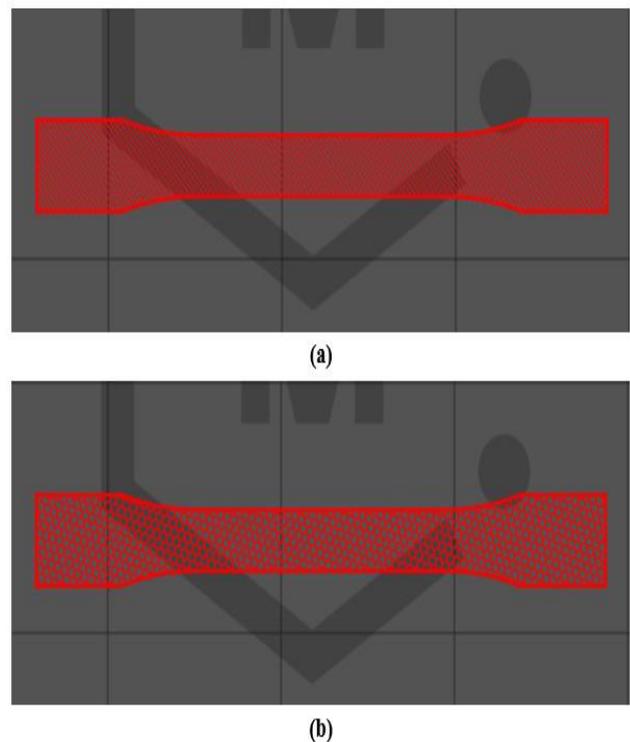
Temperatura de Preparação	190-210°C
Densidade	1,24 g/cm ³
Temperatura de distorção	56°C
Tensão de Resistência	65 Mpa
Alongamento até a quebra	8%
Tensão de Flexão	97 MPa
Módulo de Flexão	3600 MPa

Sendo assim, os corpos de prova foram fabricados com filamento de PLA com diâmetro de 1,75 mm, a partir de tecnologia FDM e utilizando a impressora 3D modelo DH Plus do fabricante 3DCloner, 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

temperatura da mesa aquecida adotada foi de 60°C e a temperatura de extrusão variando entre 190°C e 210°C.

Os parâmetros de impressão que foram combinados e analisados foram a altura de camada e padrão de preenchimento. Os valores de altura de camada adotados foram 0,10 mm e 0,35 mm. Os padrões de preenchimento utilizados foram linhas e hexagonal. Os demais parâmetros, número de camadas de contorno e densidade de preenchimento, foram mantidos constantes na fabricação dos quatro corpos de prova. A Figura 2 mostra os dois tipos de padrão de preenchimento adotados no estudo, linhas e hexagonal, no software utilizado como fatiador do arquivo.

Figura 2. Simulação de impressão das peças. (a) Padrão de preenchimento linhas e (b) padrão de preenchimento hexagonal.



Fonte: Autores.

Na tabela 3 são mostrados os parâmetros de impressão adotados para fabricação de cada corpo de prova, assim como o tempo gasto para a fabricação de cada peça e o volume de PLA consumido.

Tabela 3. Parâmetros de impressão, tempo de fabricação dos corpos de prova e volume de material consumido.

Corpo de Prova	Padrão de preenchimento	Altura da camada (mm)	Tempo de impressão (min)	Volume de material consumido (cm ³)
CP-01	Hexagonal	0,10	207	11,04
CP-02	Hexagonal	0,35	71	10,67
CP-03	Linhas	0,10	126	11,00
CP-04	Linhas	0,35	48	10,62

Ensaio de tração

Foram realizados ensaios de tração com os corpos de prova produzidos pela impressora 3D. A máquina de tração utilizada é do modelo DL30000 do fabricante Emic e possui capacidade de carga de até 30.000kgf. O equipamento pertence ao Departamento Acadêmico de Tecnologia Mecânica do Instituto Federal da Bahia, campus Salvador. O ensaio destrutivo, mostrado na Figura 3, 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 3. Ensaio de tração.



Fonte: 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 que as mesmas sofrem variação em virtude da combinação dos parâmetros definidos durante a manufatura, ou seja, uma análise da influência de variação nas configurações físicas do corpo de prova.

Simulação

Além do ensaio de tração, foi realizada uma análise estática, utilizando o *SolidWorks Simulation*. Considerando um corpo sólido, com as dimensões de modelagem, seguindo as determinações da norma ASTM D638, adotou-se a carga máxima de 1493,9 N, com base nas cargas dos ensaios de tração dos corpos de prova. As propriedades do material PLA foram configuradas no software, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante do filamento: modelo isotrópico linear elástico, com módulo de elasticidade igual a 2000 MPa, massa específica de 1240 kg/m³, resistência à tração igual a 65 MPa e coeficiente de Poisson igual a 0,43. Uma das extremidades do modelo foi fixada e a carga foi aplicada na outra extremidade. Considerou-se o modelo isotrópico linear elástico para simplificar a simulação de maneira a considerar a peça maciça, porém as propriedades mecânicas dos corpos de prova impressos variam de acordo com a direção dos esforços mecânicos aplicados.

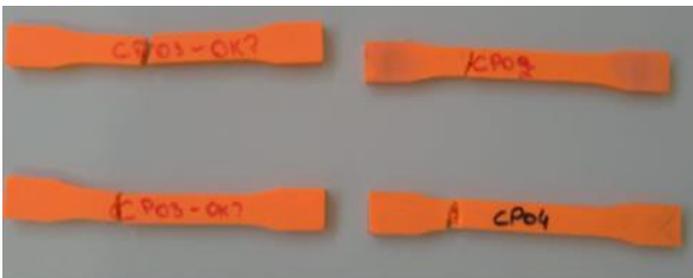
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 estão ilustrados os 4 corpos de prova após o ensaio de tração. Na Figura 5 é mostrado os gráficos de Força versus deformação para os corpos de prova ensaiados

Diante dos resultados obtidos através do ensaio de tração, apresentado na Figura 5, o CP-03 foi o que teve a maior força necessária para a ruptura,

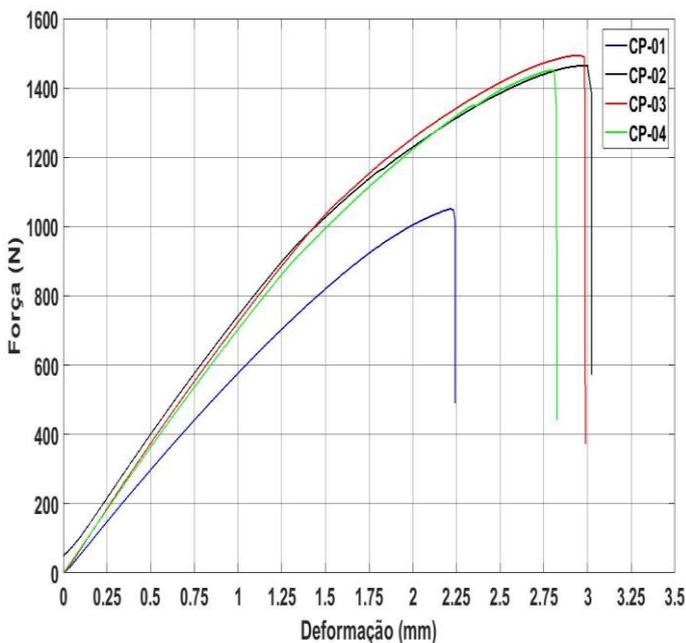
enquanto que o CP-02 foi o que mais se deformou. O CP-04 e o CP-02, que foram fabricados com a altura de camada de 0,35 mm, apresentaram maior deformação em comparação aos CP-01 e CP-03, que tem altura de camada de 0,10 mm. Analisando resultados do trabalho de Croucillo (2018) verificou-se que o material que suportou maior tensão até a ruptura apresentou menor alongamento. Este perfil de comportamento não foi observado nos gráficos apresentados na Fig. 5. No geral, os corpos de prova que suportaram maiores cargas apresentaram maiores valores de alongamento.

Figura 4. Corpos de prova após ensaio de tração.



Fonte: Autores

Figura 5. Gráfico de força x deformação plotado a partir de dados obtidos no ensaio de tração.



Fonte: Autores

Além de conhecer o perfil é importante conhecer os valores absolutos de algumas propriedades. Na Tabela 4 estão indicados os valores obtidos como resultado dos ensaios de tração realizados.

Tabela 4. Propriedades mecânicas obtido a partir de ensaio de tração.

Corpo de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CP-01	11,17	2,23	1048,42	5171,80
CP-02	15,61	3,02	1464,81	6235,50
CP-03	15,92	2,95	1493,87	6442,60
CP-04	15,46	2,79	1450,61	6155,12

100

Além dos valores apresentados na Tab. 4 é importante conhecer a tensão, deformação e força máxima. Por isso estes valores são apresentados na Tab 5.

Tabela 5. Valores de tensão, deformação e força máxima obtido a partir de ensaio de tração.

Corpo de Prova	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (mm)	Força Máxima (N)
CP-01	11,20	2,20	1051,12
CP-02	15,61	3,02	1464,81
CP-03	15,92	2,93	1493,87
CP-04	15,46	2,79	1450,61

Materiais frágeis apresentam valores de tensão e deformação de ruptura iguais aos valores máximos.

Por isso apesar de parecer redundante a informação da Tab. 5 é fundamental para complementar a Tab.4.

O padrão de preenchimento hexagonal garantiu ao CP-02 uma maior ductilidade em relação ao CP-04, que foi preenchido por meio do padrão em linhas. Analisando para o CP-01, o padrão de preenchimento hexagonal não influenciou, pois ele teve uma deformação menor em relação ao CP-03, e a força necessária para a ruptura foi a menor entre todos os corpos de prova ensaiados. Vale destacar o fato de que o CP-01, que foi o que menos se deformou, foi o corpo de prova que teve a região de ruptura mais próxima do centróide da peça.

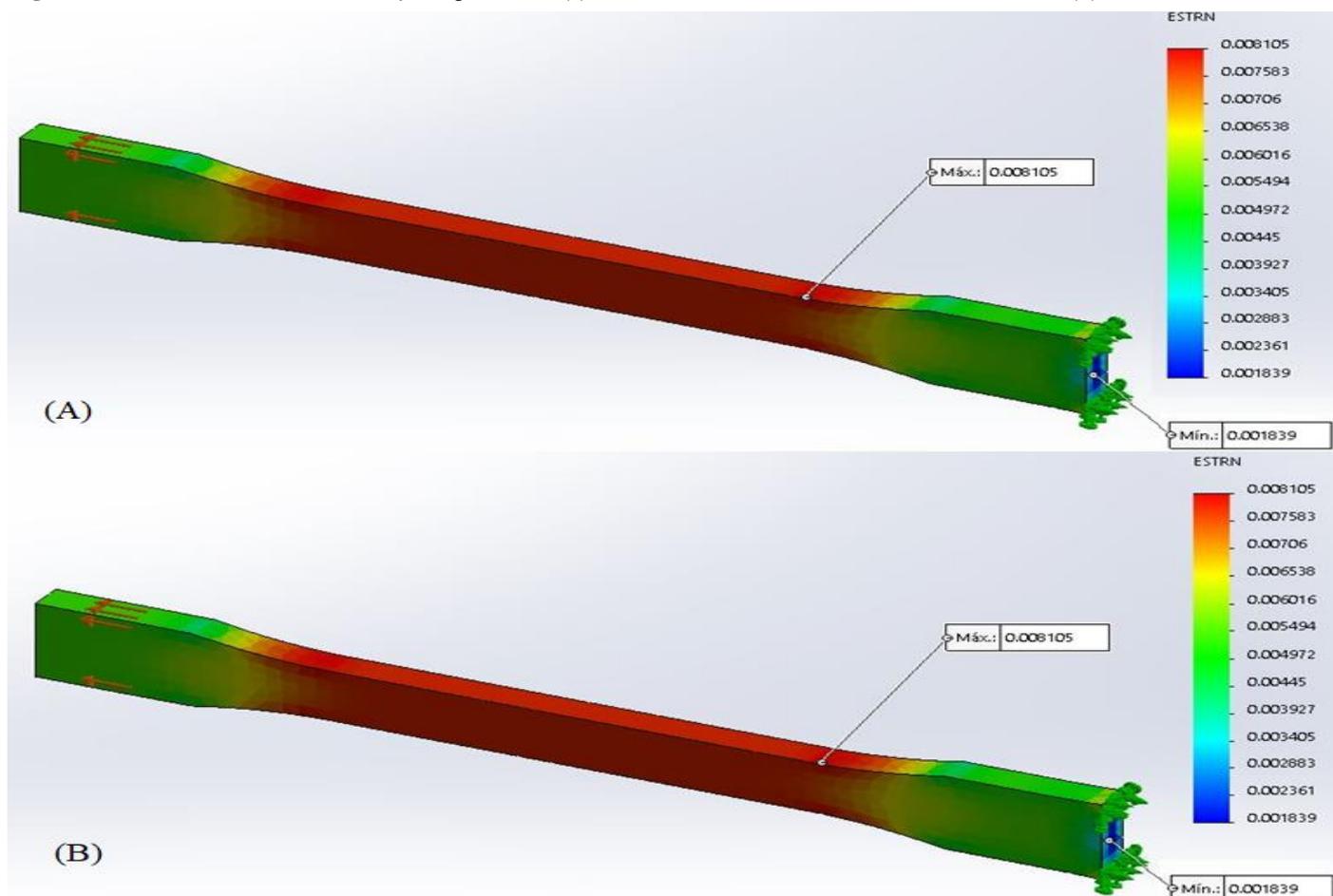
A Figura 6 mostra as análises de deformação e tensão, respectivamente, realizada no *SolidWorks Simulation*.

A partir dos resultados obtidos com realização de análise estática, utilizando o *SolidWorks*

Simulation, observou-se o comportamento de um corpo sólido fabricado em PLA e submetido a carga estática de 1493,9 N, a máxima obtida durante os ensaios de tração. Uma vez que não foi encontrado na literatura dados que possibilitassem uma comparação para avaliar se há coerência nos dados do ensaio de tração, a simulação passa a ter este papel.

Os resultados mostraram que, a deformação máxima da peça foi de 8,105 mm, 168% maior do que a deformação do CP-02, que obteve o melhor resultado dentre as amostras ensaiadas. Observando a plotagem de tensão máxima, o corpo sólido apresentou uma tensão máxima de 17,19 N, 12,5% maior do que a tensão máxima do CP-03, sendo a carga máxima suportada pelo corpo sólido simulado, definida a partir da área da seção transversal do modelo de 133 mm², igual a 2286 N. A carga máxima obtida entre os corpos de prova ensaiados, foi de 1493,9 N, do CP-02.

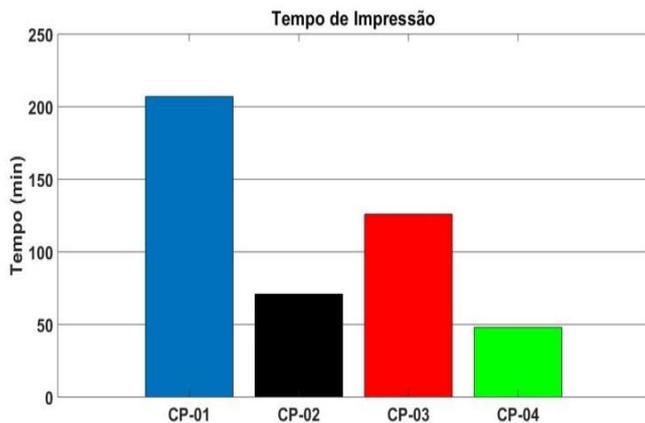
Figura 6. Análise estática da deformação equivalente (ϵ) (A) e análise estática da Tensão de von-Mises (σ) (B)



Fonte: Autores

É importante verificar se a variação dos parâmetros influencia no tempo de impressão. A Figura 7 mostra o tempo de fabricação de cada corpo de prova.

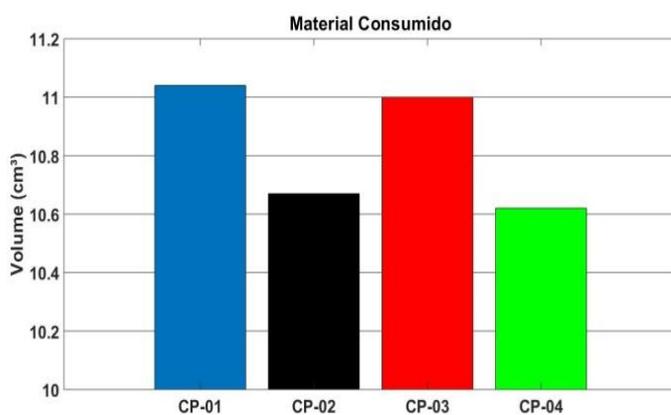
Figura 7. Tempo de impressão para fabricação de cada Corpo de Prova



Fonte: Autores

A Figura 8 mostra o volume de material consumido para cada configuração de corpo de prova.

Figura 8. Volume de material consumido na fabricação de cada Corpo de Prova



Fonte: Autores

Os corpos de prova que apresentaram maior tempo de impressão foram aqueles que

utilizaram menor valor para altura de camada. Isso porque para mesma espessura do corpo de prova, uma altura de camada menor implicar em maior quantidade de camadas depositadas, o que leva maior tempo. Em relação a quantidade de material consumido, entre os CP – 01 e CP – 02 a variação é mínima, podendo ser até uma variação estatística e não uma diferença influenciada pelo padrão de preenchimento, já que houve um consumo de material no CP 03 apenas 0,36% a menos que CP -01.

CONCLUSÃO

Neste artigo foi verificado a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas de peças de Poli Ácido Lático.

Os ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova de PLA mostraram uma baixa resistência mecânica para esforços que exijam resistência ao impacto devido à sua baixa ductilidade e alta dureza. As características apresentadas durante o ensaio de tração foram de fraturas frágeis, reafirmando a sentença anterior, reiterada pelos gráficos que apresentam baixa ductilidade, e ausência de estricção.

A dificuldade da impressora em produzir peças com maior precisão de deposição, associado aos erros de impressão que podem vir à ocorrer, prejudicou um pouco os resultados, já que era esperado que a tensão máxima fosse encontrada no CP-01, em função do maior número de camadas, resolução, tempo de impressão, e consequentemente maior quantidade de material consumido. Entretanto, o CP-02 que teve o mesmo padrão de

preenchimento porém altura de camada maior, apresentou-se dentre os corpos de prova analisado, o com maior elasticidade. O que leva à conclusão de que com o padrão de preenchimento hexagonal para obter-se uma maior elasticidade, deve-se utilizar padrões de preenchimento maiores que 0,10mm.

Dentre os quatro corpos de prova, os com maior altura de camada, independente do padrão de preenchimento escolhido, possuem maior elasticidade devido à maior deformação sofrida.

A simulação feita no *SolidWorks* com um corpo de prova maciço, considerado como isotrópico, constatou que a tecnologia FDM, devido à necessidade do derretimento do material de impressão seguido de uma solidificação no formato desejado, altera as propriedades da peça polimérica quando impressa. Porém, mesmo assim, os valores de força máxima e deformação estão coerentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Polo de Inovação Salvador e ao Instituto Federal da Bahia pela viabilidade da realização do trabalho.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials - ASTM D638. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.**

BRISCHETTO, S., TORRE, R., & FERRO, C. G. Experimental Evaluation of Mechanical Properties and Machine Process in Fused Deposition Modelling Printed Polymeric Elements. **Anais AHFE 2019 International Conference on Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping**, **377–389**, (2019)

CARNEIRO, O.S., SILVA, A. F., GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**, v.83,n.15, p.768-776, 2015:.

CROUCILLO, A.P. R.; ARRUDA, J. D. ; FRANCO, L.J V.; LEITE, J. F.; CARVALHO, M. R. Avaliação das características mecânicas do pla, impressa em 3D, para aplicação em próteses em animais de pequeno e médio porte. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v.15, n.3,p. 221-225, 2018.

FERNANDES, J. F.M. Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA, Lisboa, Portugal. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – IST, 2016.

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and Performance** v.23, n.6, p.1917-1928, 2014.

FERESHTENEJAD, S.; SONG, J-J. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 49, n. 6, p. 2065-2074, 2016

Galina, D. M. ; Garcia, D. P. ; Maziero, R. ; Zancanella, A. C. B. ; Castro, B. D. ; Rubio, J. C. C. . Influência da espessura de camada de impressão 3D nas propriedades mecânicas de peças fabricadas com o copolímero ABS. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 19, p. 116-127, 2018.

NÓBREGA, M. P. Estudo comparativo de gráficos de probabilidade normal para análise de experimentos fatoriais não replicados. 2010. 196 f. Dissertação (Mestrado em Probabilidade e Estatística; Modelagem Matemática) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

RAJPUROHIT, S. R., DAVE, H. K., Prediction and Optimization of Tensile Strength in FDM Based 3D Printing Using ANFIS. In: Gupta, K.; Gupta, M. K. **Optimization of Manufacturing Processes**, 111–128. 2019.

RAJPUROHIT, S. R., DAVE, H. K., Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.101, p. 1525–1536, 2018.

SANTANA, L., ALVES, J., NETTO, A., MERLINI, C., A comparative study between PETG and PLA for 3D Printing through thermal, chemical and mechanical characterization. **Revista Matéria**, v. 23, n. 4, 2018

SILVA, C. G., CAMPINI, P. A. L., ROCHA, D. B., ROSA, D. S., The influence of treated eucalyptus microfibers on the properties of PLA biocomposites. **Composites Science and Technology**. v.179, p 54-62, 2019.