

Influência da temperatura ambiente no comportamento mecânico do PLA utilizado em manufatura aditiva

Influence of room temperature on the mechanical behavior of PLA for application in additive manufacturing

Luís Fernando de Lima¹ , Vinicius Abrão da Silva Marques² , Marcos Massao Shimano² 

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Av. Doutor Randolpho Borges Júnior, 1250, Univerdecidade, 38064-200, Uberaba, MG, Brasil.

²Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Doutor Randolpho Borges Júnior, 1250, 38064-200, Uberaba, MG, Brasil.

e-mail: fernando.lfl@hotmail.com, vinicius.marques@uftm.edu.br, marcos.shimano@uftm.edu.br

RESUMO

Os polímeros utilizados para impressão 3D do tipo FFF apresentam uma sensibilidade muito grande às variações de temperatura, que vai desde o processo de fabricação até o uso do produto final. Essa é uma característica importante para o processo de impressão, porém, pode representar um fator limitante para sua utilização em ambientes com grandes variações de temperatura. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de corpos de provas de PLA (ácido polilático) fabricados por impressão 3D utilizando a tecnologia FFF (Fabricação por Filamento Fundido) e submetido às temperaturas de 5°C, 25°C e 45°C. Foram realizados testes de tração e flexão em três pontos em corpos de prova fabricados em três orientações diferentes (flat, on-edge e upright). Foi utilizado um equipamento constituído por uma câmara térmica e um sistema de controle de temperatura anexado a uma Máquina Universal de Ensaios. Os corpos de prova foram distribuídos em grupos experimentais de 5 unidades cada. Todos os parâmetros de impressão foram iguais para todos os grupos. O PLA à 5°C apresentou um aumento significativo do módulo de elasticidade e limite de escoamento, gerando um comportamento mais frágil. À 25°C, o comportamento mecânico foi semelhante à literatura. Por fim, à 45°C, foi observado uma queda na resistência e um aumento acentuado da plasticidade do PLA, devido à proximidade da temperatura de transição vítrea. Os corpos de prova impressos nas orientações flat e on-edge apresentaram desempenho mecânico similar, enquanto os corpos de prova impressos na orientação upright apresentaram os menores valores das propriedades mecânicas analisadas.

Palavras-chave: FFF; Impressão 3D; Comportamento Termomecânico; Câmara Ambiental.

ABSTRACT

Polymers used for 3D printing with FFF technology are very sensitive to temperature variations, which occurs from its manufacturing process to its final usage. This is an important characteristic for the printing process, however it can represent a limiting factor for its use in environments with large temperature variations. Therefore, this paper aimed to analyze the mechanical behavior of PLA (polylactic acid) specimens manufactured by 3D printing using the FFF (Fused Filament Fabrication) technology and subjected to temperatures of 5°C, 25°C and 45°C. Tensile and three-point bending tests were performed on specimens manufactured in three different orientations (flat, on-edge and upright). An equipment, consisting of a thermal chamber and a temperature control system attached to the Universal Testing Machine, was used to control the temperature in the environment where the specimens were subjected to the mechanical tests. The specimens were distributed in experimental groups of 5 units each. All printing parameters were the same for all groups. PLA at 5°C showed a significant increase in the modulus of elasticity and yield strength, causing a more fragile behavior. At 25°C the mechanical behavior was similar to the literature. Lastly, at 45°C, a decrease in strength and a high increase in PLA plasticity were observed, due to the proximity of the glass transition temperature. The specimens printed in the flat and on-edge orientations presented similar mechanical performance, while the ones printed in the upright orientation presented the lowest values of the analyzed mechanical properties.

Keywords: FFF; 3D Printing; Thermomechanical Behavior; Environmental Chamber.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva é definida pela norma ISO/ASTM 52900:2021 [1] como o “processo de união de materiais para fabricação de objetos a partir de dados de modelos computacionais 3D, geralmente utilizando a sobreposição de camadas, em contrapartida a metodologias de fabricação subtrativas, como a usinagem tradicional”. Outros termos são utilizados na literatura para se referir ao mesmo processo, como “fabricação aditiva” ou “prototipagem rápida”, porém atualmente a nomenclatura mais utilizada é “impressão 3D” [2]. Na atualidade, pode-se considerar a tecnologia de impressão 3D como um grande acelerador para projetos de baixo custo, pois permite a fabricação de peças variadas e de considerável complexidade geométrica, com apenas um equipamento. Dentre algumas vantagens da impressão 3D, pode-se destacar a fabricação de objetos com formas mais complexas [3], o baixo desperdício e a possibilidade de reciclagem e reaproveitamento do material [4, 5], a grande variedade de materiais que podem ser utilizados como matéria-prima [6–8] e a maior facilidade de personalização e adaptação do produto final que pode ser utilizado nas mais diversas áreas da indústria [9–13].

Existem diversas tecnologias de manufatura aditiva no mercado, tais como a Estereolitografia (SLA), a Fabricação por Filamento Fundido (FFF), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Manufatura Laminar de Objetos (LOM), entre outras. A tecnologia FFF é uma das tecnologias mais usadas atualmente, sendo utilizada como base para muitas impressoras 3D mais acessíveis. É importante ressaltar que, na literatura, é comum encontrar o termo FDM (Fused Deposition Modeling – Modelagem por fusão e deposição), porém deve-se tomar cuidado; ambos termos FDM e FFF se referem ao mesmo tipo de fabricação por extrusão de material fundido. A principal diferença reside em uma questão jurídica: a patente. A empresa Stratasys Inc. foi a desenvolvedora da tecnologia FDM, possuindo a patente e a marca registrada. Portanto, apenas ela pode utilizar a terminologia FDM. A patente da tecnologia FDM expirou a validade em 2008, fazendo com que os preços das impressoras 3D reduzissem drasticamente, facilitando o acesso e difundindo o seu uso da manufatura aditiva através de impressoras de código aberto; como a marca registrada ainda continua sendo da Stratasys Inc., criou-se o novo termo livre FFF para se referir a este processo [14].

A impressão utilizando a tecnologia FFF consiste, resumidamente, na fabricação de um objeto tridimensional a partir da deposição de sucessivas camadas de filamentos de polímeros termoplásticos fundidos. Esse objeto é modelado pelo usuário em um software CAD e exportado, em formato STL, para o software de controle da impressora. Então, o software de controle envia os comandos para a impressora realizar os movimentos necessários para deposição de cada camada, até a formação do objeto [6].

Dentre os polímeros utilizados para impressão com tecnologia FFF, o PLA (Polylactic Acid – Ácido polilático) se destaca por apresentar maior facilidade para impressão, ser biodegradável e biocompatível, apresentar baixa temperatura de fusão e alta resistência mecânica, além de outras características que o torna um dos polímeros mais utilizados na manufatura aditiva [15–17].

A influência da temperatura no comportamento mecânico de polímeros, sempre foi objeto de estudo de pesquisadores. KARAMANLIOGLU e ALKAN [18] estudaram como a temperatura ambiente, o tratamento térmico e o tempo de armazenamento afetam as propriedades mecânicas do PLA, constatando que longos períodos de armazenamento e exposição a temperaturas elevadas causam perdas significativas nas propriedades mecânicas do PLA. O'MAHONY *et al.* [19] investigaram as propriedades térmicas e viscoelásticas de misturas de PLA a fim de otimizar o processo de impressão. COPPOLA *et al.* [20] abordaram como a temperatura de impressão afeta as propriedades finais de compósitos de PLA e argila. KOLLAMARAM *et al.* [21] demonstraram que a tecnologia FDM pode ser usada para fabricação de remédios utilizando baixas temperaturas de impressão, evitando com que haja degradação devido ao aquecimento. CHOI *et al.* [22] determinaram que existe uma temperatura ótima da mesa de impressão que contribui para a diminuição dos erros de formato causados pelo encolhimento causado durante o resfriamento de peças de ABS após a impressão. SANTANA *et al.* [15] compararam as propriedades mecânicas, químicas e térmicas do PLA e do PETG, indicando onde cada um pode ser aplicado com melhores resultados.

Logo, percebe-se que o efeito da temperatura é abordado de diferentes maneiras em alguma etapa da vida útil do polímero utilizado na impressão 3D, desde a sua fabricação até o seu uso final. Um ponto em comum nos trabalhos é que, de modo geral, o aumento elevado da temperatura provoca perdas mecânicas significativas no material e que existe um valor ótimo de temperatura para cada fase da impressão. Outra similaridade entre os trabalhos é que os autores notam que os resultados podem variar significativamente entre um estudo e outro devido a diversos fatores que estes não abordam ao decidir direcionar o estudo para menos variáveis; então, é comum a justificativa que a falta de dados comparativos e que fatores como temperatura, umidade e condições da impressão podem afetar os resultados obtidos [2, 22–24]. Ainda, na literatura não são encontrados muitos estudos analisando estes parâmetros em impressoras de código livre, uma vez que muitos estudos utilizam a tecnologia FDM que, apesar das similaridades com a tecnologia FFF, não é a mesma e pode gerar resultados diferentes [25].

Além dos fatores externos, para fabricação utilizando impressão 3D, a impressora possui vários parâmetros que podem ser alterados e, como consequência, resultados diferentes podem ser obtidos. Em seu

estudo, PRABHAKAR *et al.* [26] destacou 11 parâmetros de impressão e propôs uma divisão entre classes, separando-os em parâmetros geométricos (diâmetro do bico extrusor e diâmetro do filamento), parâmetros de processo (temperatura de extrusão, temperatura da mesa de impressão e velocidade de impressão) e parâmetros estruturais (espessura da camada, padrão de preenchimento, densidade de preenchimento, número de camadas, ângulo de preenchimento, espaço entre os filamentos depositados e largura do filamento depositado). Além dos parâmetros destacados, existem outros parâmetros relevantes que não foram citados, tais como a orientação de deposição, número de contornos, espessura da primeira camada, velocidade nos perímetros, entre outros. Sendo assim, fica evidente a complexidade de um processo de impressão 3D, uma vez que a alteração de qualquer um destes parâmetros pode impactar significativamente nas propriedades mecânicas finais do objeto. Portanto, a influência destes parâmetros nas propriedades mecânicas dos materiais é objeto de estudo frequente dos pesquisadores, que buscam a melhor combinação dos parâmetros para determinada aplicação [23, 25, 27–29].

A temperatura é um dos principais fatores que tem influência direta nas propriedades mecânicas, químicas e físicas de polímeros utilizados na manufatura aditiva, desde a fabricação até o uso final do produto, podendo gerar os mais variados comportamentos. Conforme observado por GRASSO *et al.* [30] o PLA sofre grandes mudanças na sua estrutura, principalmente em temperaturas próximas a sua temperatura de transição vítrea; mesmo assim, o autor aponta como a temperatura é um fator frequentemente negligenciado na maioria dos estudos, sendo difícil encontrar trabalhos que abordem o efeito da temperatura de serviço em objetos de PLA fabricados por impressão 3D.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência da temperatura ambiente (5°C, 25°C e 45°C) no comportamento mecânico do PLA fabricados por impressão 3D do tipo FFF e submetidos a testes de tração e flexão em três pontos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho o objetivo principal foi estudar os efeitos da temperatura ambiente nas propriedades mecânicas do PLA. Para isso, foram definidas três temperaturas: 5°C (baixa temperatura), 25°C (média temperatura) e 45°C (alta temperatura). Para justificar a escolha destas temperaturas, foram consideradas algumas aplicações do PLA, como próteses e órteses ortopédicas [31], roupas e joias [11], peças de carro e de avião [32]. Além disso, a temperatura de 45°C foi escolhida devido a sua proximidade da temperatura de transição vítrea do PLA [30], a temperatura de 5°C foi definida pela limitação do equipamento de resfriamento e também por ser uma temperatura razoável para o ambiente. A temperatura de 25°C é a metade da diferença entre as outras duas temperaturas.

Todos os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM).

Como o foco principal do trabalho foi analisar o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do PLA, os parâmetros foram fixados experimentalmente para otimizar a qualidade de impressão, sendo que o único parâmetro alterado foi a orientação da deposição do material, onde foram impressos corpos de provas em três orientações diferentes: *upright*, *flat* e *on-edge* (Figura 1). As camadas das orientações *flat* e *on-edge* foram depositadas paralelamente ao comprimento, enquanto as camadas da orientação *upright* foram depositadas perpendicularmente ao comprimento [23].

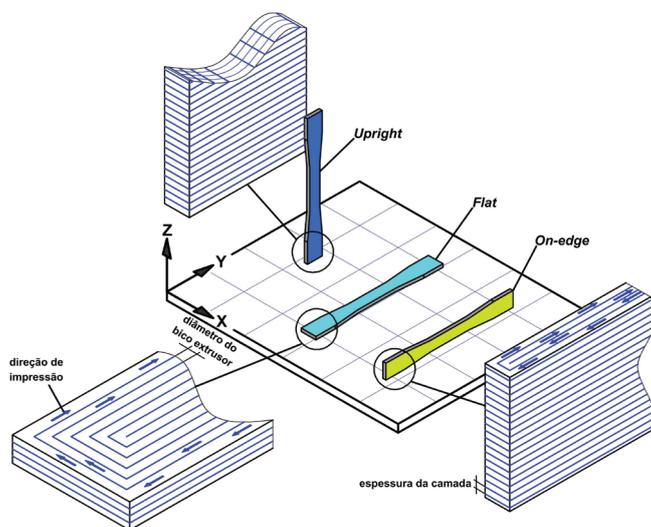


Figura 1: Desenho esquemático mostrando as orientações de impressão *upright*, *on-edge* e *flat*.

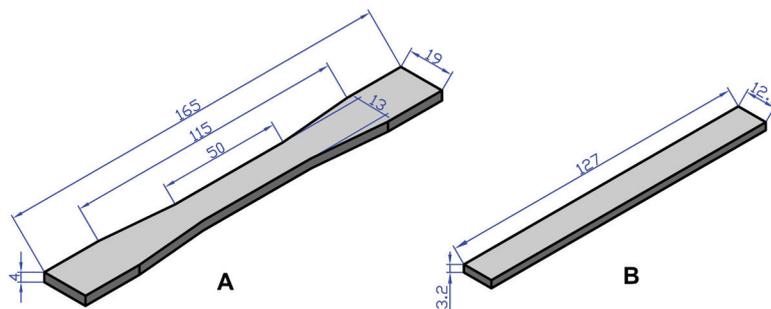


Figura 2: Dimensões, em milímetros, e formato dos corpos de prova utilizados nos ensaios de (A) tração e (B) flexão em três pontos.

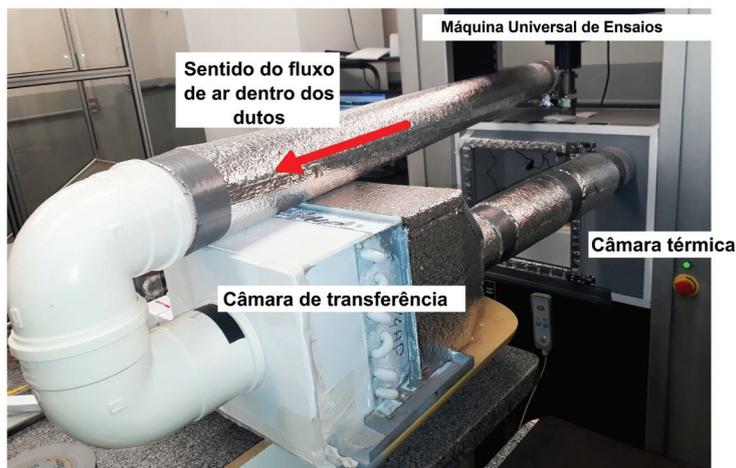


Figura 3: Detalhes do sistema de controle da temperatura durante a realização dos ensaios mecânicos.

2.1. Impressão dos Corpos de Prova

Neste estudo foi utilizado o filamento de PLA BASIC sem corante com diâmetro de 1.75 mm, fabricado pela 3DFila®. Os principais parâmetros de impressão foram: espessura de camada de 0,20 mm; quantidade de camadas laterais igual a 30; velocidade de impressão igual a 45 mm/s; temperatura de extrusão igual a 210°C; e temperatura da mesa igual a 60°C.

Os corpos de prova foram modelados utilizando o *software* AutoCad® e impressos em uma impressora 3D da marca GTMax® - modelo core A1 versão 2 com bico extrusor de 0,4 mm. Foi utilizado neste estudo o *software* Simplify3D® para realizar o fatiamento das camadas e gerar o arquivo GCODE.

As dimensões e formatos dos corpos de prova (Figura 2) foram retirados das normas ASTM D638 [33] para os ensaios de tração e ASTM D790 [34] para os ensaios de flexão.

Foram impressos 90 corpos de prova distribuídos em 18 grupos experimentais de 5 unidades cada, sendo 45 para os ensaios de tração e 45 para os ensaios de flexão. Para cada tipo de ensaio, 15 corpos de prova foram impressos em cada orientação de impressão, e foram submetidos a ensaios nas três temperaturas. Portanto, foi possível atender o número mínimo de corpos de prova exigido pelas normas ASTM D638 e ASTM D790, executando os ensaios para cada temperatura e orientação de impressão definidas.

Após impressos, todos os corpos de prova foram identificados e feitas medições da largura e da espessura da seção útil utilizando um paquímetro digital da marca INSIZE® (resolução de 0,01 mm). Também foi obtida a massa individual em uma balança de precisão da marca MARTE®, modelo AC-2000 (resolução de 0,001 g).

2.2. Sistema de Refrigeração e Aquecimento

Para o controle da temperatura durante os ensaios foi utilizada uma câmara térmica anexada na Máquina Universal de Ensaios (Figura 3). Esta câmara é ligada por meio de dutos a uma câmara de transferência, que possui no interior um ventilador (realizar a circulação do ar), um evaporador conectado a um sistema de refrigeração por compressão de vapor (baixa temperatura) e um soprador térmico (alta temperatura). O ar circula entre as duas câmaras e a temperatura dentro da câmara térmica é controlada por um circuito equipado com termostatos.

Para aferição da temperatura dentro da câmara térmica, foram utilizados 5 termômetros digitais. Um foi posicionado na entrada de ar da câmara, um na saída de ar da câmara, um termômetro na mesa de apoio dos corpos de prova e dois termômetros posicionados nos acessórios dos ensaios mecânicos.

O equipamento foi ligado com antecedência suficiente para que a temperatura dentro da câmara térmica estivesse equilibrada na temperatura desejada. Logo depois, os corpos de provas foram posicionados na mesa de apoio dentro da câmara de ensaio e deixados por 1 hora para entrar em equilíbrio térmico.

Durante todos os ensaios, o equipamento de refrigeração e aquecimento manteve a temperatura interna da câmara de ensaio estável, com uma variação de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ nos termômetros da entrada e saída da câmara, e uma variação de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ nos termômetros próximos aos corpos de provas. Esta variação está de acordo com o trabalho de GRASSO *et al.* [30].

2.3. Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ASTM D638, que aborda ensaios de tração em materiais plásticos. Foi utilizada uma célula de carga de 5kN e a velocidade de aplicação da carga foi 2 mm/min. Os corpos de provas foram presos em duas garras distanciadas inicialmente de 115 mm e tracionados até a ruptura total (Figura 4).

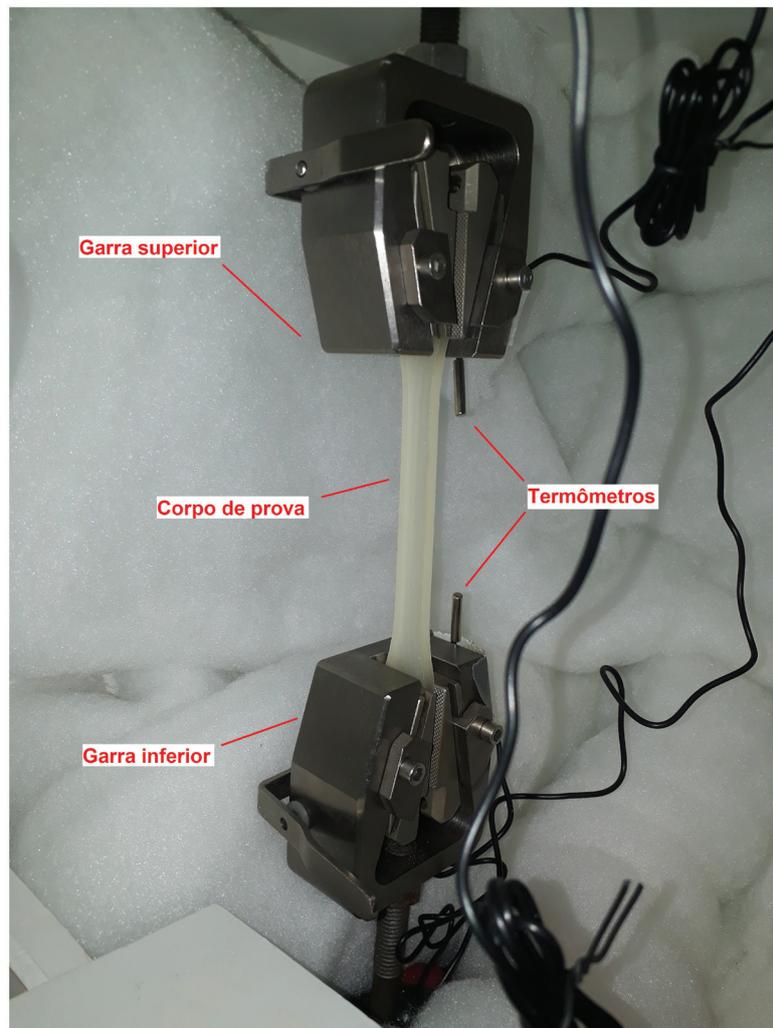


Figura 4: Montagem para realização do ensaio de tração.

Com os resultados dos ensaios mecânicos de tração, foram obtidas curvas de tensão (MPa) x deformação relativa (adimensional). A partir destas curvas, foram obtidas as seguintes propriedades mecânicas obtidas:

- Limite de escoamento (σ_e) – valor da tensão suportada pelo material antes de sofrer deformações plásticas ou permanentes.

- Módulo de elasticidade (E) – representa a rigidez do material e é obtida pela inclinação da curva na região elástica. Ela foi determinada entre os pontos de 25% e 75% da tensão máxima.
- Tensão Máxima (σ_{\max}) – tensão máxima suportada pelo material antes da ruptura.
- Deformação até a tensão máxima (ε_{\max}).

2.4. Ensaio de Flexão em Três Pontos

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado de acordo com a norma ASTM D790, que aborda ensaios de flexão em materiais plásticos e elétricos. Foi utilizado uma célula de carga de 5kN e a velocidade de aplicação da carga foi 2 mm/min. O diâmetro dos apoios foi de 20 mm e distanciados de 51,2 mm, e o diâmetro do aplicador de carga foi de 5 mm, posicionado na metade do comprimento do corpo de prova (Figura 5).

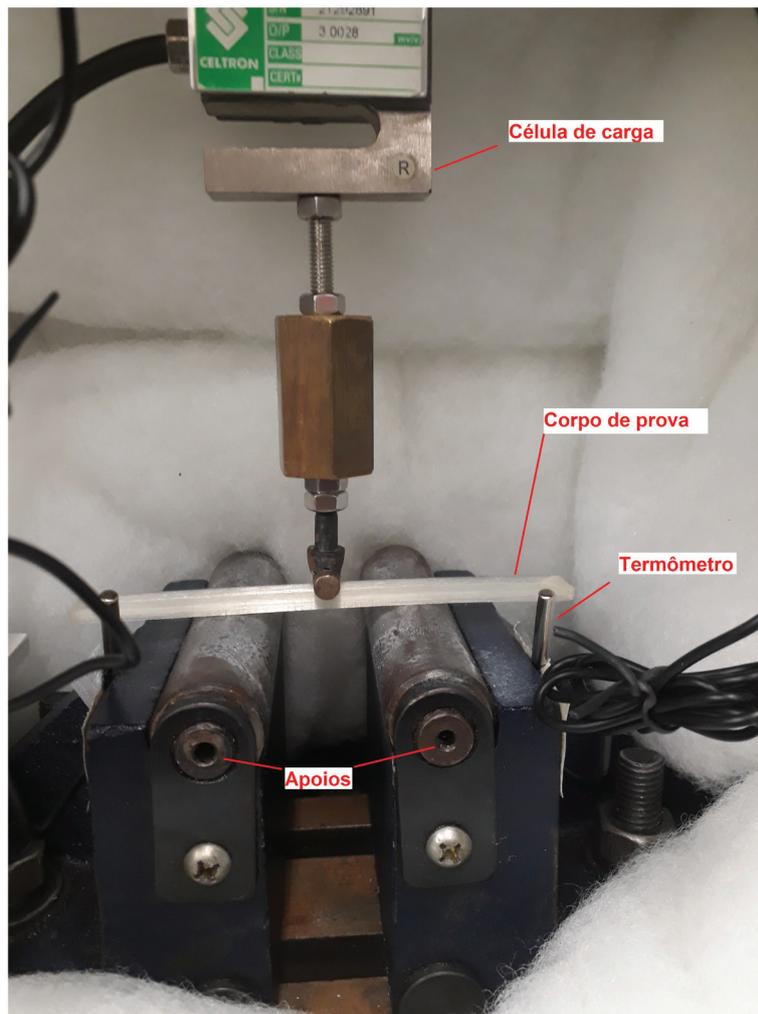


Figura 5: Montagem do ensaio de flexão em três pontos.

Foram obtidas curvas de tensão flexural (MPa) x deformação relativa de flexão (adimensional), e a partir destas curvas foram obtidas as seguintes propriedades mecânicas:

- Limite de escoamento flexural (σ_{ef}) – valor da tensão flexural suportada pelo material antes de sofrer deformações plásticas ou permanentes.
- Módulo de elasticidade de flexão (E_f) – representa a rigidez do material e é obtida pela inclinação da curva na região elástica.
- Tensão flexural máxima ($\sigma_{f\max}$) – tensão máxima suportada pelo material.
- Deformação relativa até a tensão flexural máxima ($\varepsilon_{f\max}$).

2.5. Análise Estatística

Para a análise estatística dos resultados obtidos dos ensaios mecânicos, foram utilizados os softwares *Microsoft Excel*[®] e *ActionStat*[®].

O tamanho de cada amostra foi definido de acordo com as normas, consistindo em 9 grupos de 5 corpos de prova para cada ensaio. Para cada grupo foi determinado a média, o desvio padrão e os intervalos de confiança. Foi adotado um nível de confiança de 95% para todas as análises realizadas.

As variáveis respostas estudadas foram: limite de escoamento, tensão máxima, deformação até a tensão máxima e módulo de elasticidade.

Primeiramente, foram realizados testes estatísticos para analisar a normalidade dos dados (teste Kolmogorov-Smirnov) e a homogeneidade das variâncias (teste Bartlett), onde:

- $p_{\text{valor}} \geq 0,05$, as variâncias são iguais e/ou os dados são normalmente distribuídos;
- $p_{\text{valor}} < 0,05$, as variâncias não são iguais e/ou os dados não estão normalmente distribuídos.

Após verificar a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias, foram feitos os testes de hipóteses para analisar a influência de cada nível de temperatura na variável resposta analisada. Dessa maneira, para cada variável resposta foram feitos 3 testes estatísticos, sendo um teste para cada orientação sob efeito de três temperaturas diferentes.

Então, foram feitos testes de análise de variância ANOVA de um fator (*One Way Analysis of Variance*), considerando as seguintes hipóteses:

- H_0 (hipótese nula): Todas as médias são iguais, $p_{\text{valor}} \geq 0,05$;
- H_1 (hipótese alternativa): No mínimo uma média é diferente das outras, $p_{\text{valor}} < 0,05$.

Quando a hipótese nula é aceita, significa que os níveis do fator analisado não geraram nenhum efeito no valor final da variável resposta observada e, com isso, temos a conclusão da análise.

Quando a hipótese nula é rejeitada, sabemos que um dos níveis do fator influenciou mais que o outro, porém apenas com o teste ANOVA não é possível saber quais foram os níveis que influenciaram mais que os outros. Assim, quando a hipótese nula é rejeitada, é necessário fazer um teste *post hoc*.

Os testes *post hoc* consistem em comparações pareadas para descobrir quais são os grupos que diferem entre si. O teste de comparação múltiplas de médias escolhido foi o teste de Tukey, pois ele se torna um teste exato quando o número de amostras dos grupos é igual.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com as Tabelas 1 e 2, as dimensões e as massas das amostras não tiveram variações significativas entre os grupos, isso comprova que as impressões foram realizadas de forma controlada e sem nenhum tipo de intercorrência.

Tabela 1: Valores da média \pm desvio padrão das dimensões dos corpos de prova de cada grupo para os ensaios de tração.

ORIENTAÇÃO	DIMENSÃO	TEMPERATURA		
		5°C	25°C	45°C
<i>Flat</i>	Largura (mm)	13,07 \pm 0,02	13,19 \pm 0,05	13,08 \pm 0,06
	Espessura (mm)	4,09 \pm 0,03	4,08 \pm 0,05	4,04 \pm 0,06
	Massa (g)	12,776 \pm 0,015	12,706 \pm 0,010	12,727 \pm 0,026
<i>On-edge</i>	Largura (mm)	13,04 \pm 0,04	13,03 \pm 0,01	13,06 \pm 0,01
	Espessura (mm)	4,16 \pm 0,02	4,08 \pm 0,01	3,97 \pm 0,02
	Massa (g)	12,785 \pm 0,019	12,645 \pm 0,026	12,616 \pm 0,020
<i>Upright</i>	Largura (mm)	13,06 \pm 0,01	13,21 \pm 0,03	13,12 \pm 0,04
	Espessura (mm)	4,16 \pm 0,04	4,26 \pm 0,04	4,05 \pm 0,08
	Massa (g)	12,832 \pm 0,021	12,862 \pm 0,026	12,891 \pm 0,018

Tabela 2: Valores da média \pm desvio padrão das dimensões dos corpos de prova de cada grupo para os ensaios de flexão.

ORIENTAÇÃO	DIMENSÕES	TEMPERATURA		
		5°C	25°C	45°C
<i>Flat</i>	Largura (mm)	12,79 \pm 0,07	12,82 \pm 0,04	12,65 \pm 0,02
	Espessura (mm)	3,00 \pm 0,14	2,94 \pm 0,09	3,05 \pm 0,01
	Massa (g)	5,512 \pm 0,061	5,495 \pm 0,049	5,195 \pm 0,039
<i>On-edge</i>	Largura (mm)	12,96 \pm 0,15	12,89 \pm 0,16	12,97 \pm 0,17
	Espessura (mm)	3,02 \pm 0,01	3,03 \pm 0,01	3,02 \pm 0,00
	Massa (g)	5,482 \pm 0,010	5,480 \pm 0,009	5,478 \pm 0,027
<i>Upright</i>	Largura (mm)	12,81 \pm 0,07	12,79 \pm 0,04	12,77 \pm 0,06
	Espessura (mm)	3,07 \pm 0,02	3,07 \pm 0,01	3,06 \pm 0,02
	Massa (g)	5,519 \pm 0,032	5,501 \pm 0,047	5,500 \pm 0,043

3.1. Ensaio de Tração

Nos gráficos da Figura 6 são representados uma curva de cada grupo do ensaio de tração, divididos por orientações de impressão e subdivididos por temperatura de ensaio.

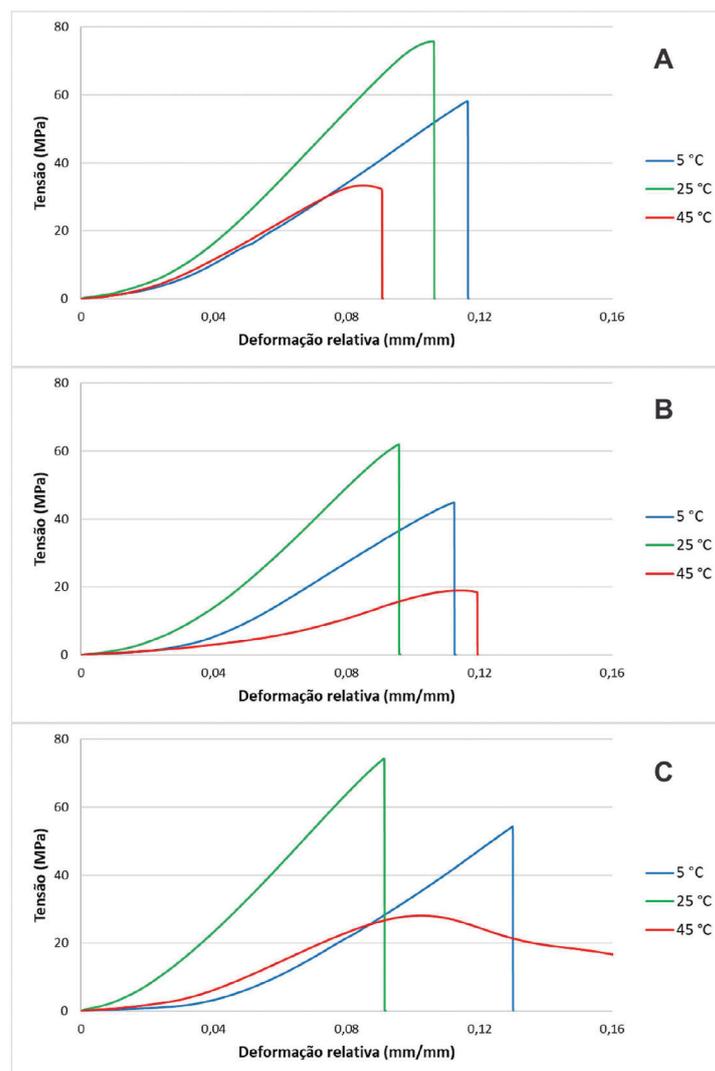
**Figura 6:** Curvas “tensão x deformação relativa” resultantes do ensaio de tração para cada temperatura nas orientações. A) *flat*; B) *on-edge*; C) *upright*.

Tabela 3: Média e desvio padrão das propriedades mecânicas obtidas do ensaio de tração.

PROPRIEDADE MECÂNICA	ORIENTAÇÃO	TEMPERATURA		
		5°C	25°C	45°C
Limite de escoamento (MPa)	<i>Flat</i>	57,24 ± 3,45	73,57 ± 3,1	34,43 ± 0,96
	<i>On-edge</i>	57,55 ± 4,26	74,95 ± 3,29	25,80 ± 5,23
	<i>Upright</i>	44,23 ± 0,88	55,10 ± 12,39	17,14 ± 1,35
Módulo de elasticidade (GPa)	<i>Flat</i>	0,640 ± 0,015	0,970 ± 0,038	0,556 ± 0,015
	<i>On-edge</i>	0,593 ± 0,023	1,007 ± 0,016	0,447 ± 0,045
	<i>Upright</i>	0,561 ± 0,041	0,835 ± 0,103	0,260 ± 0,049
Tensão máxima (MPa)	<i>Flat</i>	57,24 ± 3,45	74,69 ± 2,94	34,81 ± 0,99
	<i>On-edge</i>	57,55 ± 4,26	75,00 ± 3,37	27,54 ± 5,60
	<i>Upright</i>	44,62 ± 0,79	60,55 ± 2,59	17,15 ± 1,36
Deformação relativa até a tensão máxima	<i>Flat</i>	0,114 ± 0,009	0,100 ± 0,005	0,086 ± 0,004
	<i>On-edge</i>	0,143 ± 0,010	0,093 ± 0,004	0,097 ± 0,011
	<i>Upright</i>	0,127 ± 0,014	0,098 ± 0,014	0,095 ± 0,016

Na Tabela 3 são representados os valores de cada propriedade mecânica analisada no ensaio de tração, bem como os respectivos desvios padrão.

Para a orientação *flat*, houve diferença significativa em todas as propriedades mecânicas analisadas, entre as três temperaturas. As tensões máximas e de escoamento foram maiores nos ensaios realizados a temperatura de 25°C. A deformação até a tensão máxima e a deformação no limite de escoamento foram maiores nos ensaios à 5°C. O módulo de elasticidade foi maior nos ensaios à 25°C. Todas as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de 45°C foram menores quando comparadas com as outras temperaturas, entrando em concordância com o observado em outros trabalhos [18, 20, 30].

No geral, observou-se a ausência de fase plástica nos corpos de prova ensaiados a 5°C e 25°C, e o aumento da plasticidade nos ensaios a 45°C. Esses fenômenos acontecem, devido à temperatura de transição vítrea, que é o valor de temperatura na qual o material passa de um estado rígido para um estado mais flexível, devido ao ganho de mobilidade das cadeias poliméricas. Não existe um valor fixo para essa temperatura, uma vez que ela pode ser afetada por inúmeros fatores, tais como polaridade, simetria, massa molecular e outros. Os valores típicos da temperatura de transição vítrea do PLA encontrados na literatura variam de 45 a 80°C [35]. Sendo assim, quanto mais próximo da temperatura de transição vítrea, maior o ganho de energia e mobilidade das cadeias poliméricas, fazendo com que o material apresente maior plasticidade.

Para explicar algumas diferenças entre os comportamentos mecânicos observados em cada orientação, pode-se considerar que a força de tração aplicada nos corpos de prova é suportada pelas fibras do PLA e pela força de adesão entre as camadas depositadas. Logo, a orientação de deposição das camadas é de suma importância para compreender os resultados mostrados na Tabela 3. Analisando a Figura 4, a força de tração é aplicada longitudinalmente ao comprimento do corpo de prova. Sendo assim, têm-se que nas orientações *flat* e *on-edge*, as camadas são depositadas no mesmo sentido de aplicação da força, fazendo com que as fibras do PLA e a força de adesão entre as camadas, ambas, contribuam para resistir a força de tração. Já na orientação *upright*, as camadas são depositadas no sentido perpendicular a aplicação da força, o que faz com que apenas a força de adesão entre as camadas seja responsável por suportar a força de tração. Esse fenômeno explica o baixo desempenho mecânico observado nos corpos de prova impressos na orientação *upright*, uma vez que a força de adesão entre as camadas não é o suficiente. Os corpos de prova na orientação *flat* e *on-edge* apresentaram comportamento semelhante, com valores de tensão de escoamento e módulo de elasticidade próximos. Especificamente no ensaio a 45°C, os corpos de prova na orientação *on-edge* mostraram maior deformação. Isso também é explicado pela força de adesão entre as camadas, já que os corpos de prova impressos na orientação *on-edge*, ficaram com maior quantidade de camadas do que os corpos de prova impressos na orientação *flat*, levando a um maior escorregamento entre as camadas e um comportamento mais plástico. Estes resultados entram em concordância com os resultados de outros autores [23, 36, 37].

3.2. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Nos gráficos da Figura 7 são representados uma curva de cada grupo do ensaio de flexão, divididos por orientações de impressão e subdivididos por temperatura de ensaio.

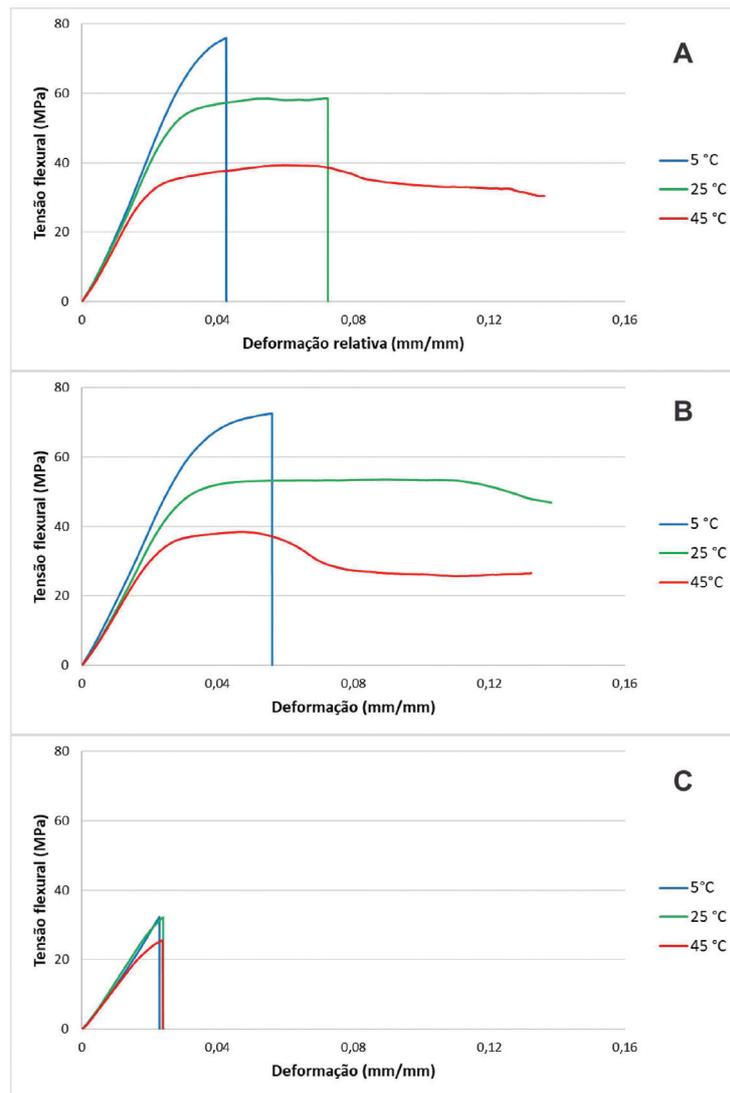


Figura 7: Curvas “tensão flexural x deformação relativa” resultantes do ensaio de flexão em três pontos para cada temperatura nas orientações. A) *flat*; B) *on-edge*; C) *upright*.

Tabela 4: Média e desvio padrão das propriedades mecânicas obtidas do ensaio de flexão em três pontos.

PROPRIEDADE MECÂNICA	ORIENTAÇÃO	TEMPERATURA		
		5°C	25°C	45°C
Limite de escoamento flexural (MPa)	<i>Flat</i>	64,03 ± 4,13	49,70 ± 1,15	33,55 ± 1,18
	<i>On-edge</i>	59,56 ± 2,47	46,1 ± 0,74	33,24 ± 0,46
	<i>Upright</i>	36,24 ± 2,64	30,95 ± 1,90	24,23 ± 1,79
Módulo de elasticidade de flexão (GPa)	<i>Flat</i>	2,214 ± 0,156	2,032 ± 0,046	1,726 ± 0,062
	<i>On-edge</i>	2,006 ± 0,077	1,833 ± 0,039	1,584 ± 0,015
	<i>Upright</i>	1,605 ± 0,124	1,505 ± 0,033	1,274 ± 0,110
Tensão flexural máxima (MPa)	<i>Flat</i>	73,95 ± 3,49	56,81 ± 1,15	39,44 ± 0,35
	<i>On-edge</i>	69,92 ± 3,39	53,17 ± 1,00	38,33 ± 1,16
	<i>Upright</i>	36,24 ± 2,64	31,02 ± 1,97	25,11 ± 1,78
Deformação relativa até a tensão flexural máxima	<i>Flat</i>	0,049 ± 0,005	0,044 ± 0,002	0,043 ± 0,002
	<i>On-edge</i>	0,053 ± 0,005	0,046 ± 0,001	0,042 ± 0,002
	<i>Upright</i>	0,024 ± 0,001	0,023 ± 0,002	0,023 ± 0,000

Na Tabela 4 são representados os valores de cada propriedade mecânica analisada no ensaio de flexão, bem como os respectivos desvios padrão.

Para a orientação *upright*, os corpos de prova apresentaram comportamento semelhante independente da temperatura. A causa desse comportamento inferior em relação as outras orientações é que a deposição das camadas na orientação *upright* é perpendicular ao seu comprimento, fazendo com que a carga aplicada seja suportada apenas pela força de adesão entre as camadas, ou seja, as fibras de PLA não auxiliam na resistência do corpo de prova. Ao comparar este fenômeno na tração, onde a força de tração é distribuída ao longo do corpo de prova, com o ensaio de flexão, onde a força é aplicada na metade do comprimento do corpo de prova, causando uma concentração de tensão, têm-se que na flexão o efeito é mais evidente, conforme observado nos resultados obtidos na Figura 7C e na Tabela 4 [23, 36].

Em todas as orientações a tensão máxima, o módulo de elasticidade e a tensão no limite de escoamento apresentaram diferença significativa entre as três temperaturas, sendo que os maiores valores foram obtidos na temperatura de 5°C. Isso acontece pois, em baixas temperaturas, o PLA se torna mais rígido, aumentando seu módulo de elasticidade e diminuindo a sua plasticidade.

Os resultados dos testes de Tukey para a deformação até a tensão máxima e a deformação no limite de escoamento apontaram, em algumas comparações entre as temperaturas, diferenças não significativas. Porém, no geral, também é possível afirmar que as deformações analisadas foram maiores na temperatura de 5°C e menores na temperatura de 45°C. Apesar de não ter sido abordado a deformação total dos corpos de prova, resalta-se que os corpos ensaiados a 45°C apresentaram a maior deformação total e não sofreram ruptura devido à alta plasticidade do PLA nesta temperatura. Na temperatura de 25°C também aconteceu este fenômeno, indicando um comportamento dúctil natural do PLA.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi analisada a influência da temperatura no comportamento mecânico do PLA utilizado para manufatura aditiva. Para isso, foram executados ensaios de tração e flexão em corpos de prova fabricados por impressão 3D do tipo FFF, impressos em três orientações diferentes (*flat*, *on-edge* e *upright*) e submetidos à três diferentes temperaturas (5°C, 25°C e 45°C).

A influência da temperatura no comportamento mecânico de polímeros sempre foi objeto de estudo de pesquisadores. Nos trabalhos de KARAMANLIOGLU e ALKAN [18], KOLLAMARAM *et al.* [21], GRASSO *et al.* [30] e O'MAHONY *et al.* [19], por exemplo, é abordado o efeito da temperatura de diferentes maneiras em alguma etapa da fabricação do polímero, porém todos concluem que, de modo geral, a temperatura causa efeitos significativos nas propriedades finais do polímero. Embora os estudos sobre a influência da temperatura sejam comuns, a abordagem direcionada para as propriedades mecânicas de peças fabricadas por impressão 3D (ou seja, a influência direta da temperatura na peça pós fabricada) não é objeto de estudo, conforme apontado por GRASSO *et al.* [30], mesmo a temperatura influenciando significativamente em aplicações práticas da impressão 3D, como no caso de um avião ou um carro com peças fabricadas por impressão 3D que são submetidas a variações de temperatura constantemente.

Já a influência dos parâmetros de impressão é frequentemente abordada, sendo possível encontrar inúmeras pesquisas sobre o tema. Por ser um processo que envolve uma grande quantidade de variáveis que podem afetar o comportamento físico, químico e mecânico dos materiais, busca-se, a todo tempo, encontrar as combinações de variáveis que alcancem um resultado ótimo. Conforme apontado por muitos autores, por ser uma tecnologia que se tornou acessível recentemente, não ser padronizada e ter muitos fatores que afetam o comportamento final do material estudado, os resultados encontrados divergem entre os estudos [2, 23, 25, 28, 30, 36, 37].

Diante deste cenário, não foi possível comparar diretamente os resultados obtidos com outras pesquisas, pois não foram encontrados outros trabalhos que abordassem o efeito da temperatura em peças após a fabricação por impressão 3D. O estudo mais próximo da abordagem proposta neste trabalho é o feito por GRASSO *et al.* [30], porém nele não foi estudado as propriedades de flexão e nem o efeito de baixas temperaturas. CHACÓN *et al.* [23] e DOMINGO-ESPIN *et al.* [36], por outro lado, abordaram as propriedades mecânicas de tração e flexão do PLA, porém não fizeram nenhuma análise variando a temperatura. No entanto, apesar de não ter sido possível a comparação direta dos valores das propriedades mecânicas, foi feita uma comparação geral do comportamento do PLA.

Foi notado que existe uma influência significativa da temperatura ambiente sobre o comportamento mecânico em peças de PLA fabricadas por impressão 3D. Em baixas temperaturas, o PLA se torna mais rígido e apresenta um comportamento frágil, não sendo indicado para peças que não possam sofrer falha abrupta. Em altas temperaturas, o PLA aumenta sua plasticidade e perde sua resistência, não sendo indicado para peças que suportem altos esforços mecânicos. Particularmente os resultados obtidos em altas temperaturas corroboraram

com o que foi encontrado no trabalho de GRASSO *et al.* [30], evidenciando a importância do efeito da temperatura, bem como a necessidade de maiores pesquisas sobre o assunto, inclusive simulações numéricas.

Quanto à orientação de impressão, deve-se tomar cuidado com o sentido de aplicação do esforço mecânico em que a peça estará submetida no seu uso final, conforme observado por DOMINGO-ESPIN *et al.* [36] em seu trabalho. A configuração ideal da peça é aquela cuja orientação de deposição das camadas esteja paralela ao sentido do esforço submetido, para que as fibras do PLA ajudem a suportar o esforço mecânico. Em comparação com os resultados de CHACÓN *et al.* [23], notou-se uma similaridade, onde os corpos de provas impressos nas orientações *flat* e *on-edge* mostraram comportamentos semelhantes, enquanto os impressos na orientação *upright* tiveram uma baixa performance.

Por fim, destaca-se a necessidade de constante estudo e desenvolvimento na área de impressão 3D, para padronizar os procedimentos e alcançar as configurações ótimas de impressão a fim de obter os resultados ideais para cada aplicação.

5. AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica (PMPIT) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION, *ASTM 52900:2021 Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and Vocabulary*, New Jersey, West Conshohocken, Wiley, 2021.
- [2] LANZOTTI, A., GRASSO, M., STAIANO, G., *et al.*, “The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer”, *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 5, pp. 604–617, Ago. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>.
- [3] CONNER, B.P., MANOGHARAN, G.P., MARTOF, A.N., *et al.*, “Making sense of 3-D printing: creating a map of additive manufacturing products and services”, *Additive Manufacturing*, v. 1–4, pp. 64–76, Out. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.
- [4] MIKULA, K., SKRZYPCZAK, D., IZYDORCZYK, G., *et al.*, “3D printing filament as a second life of waste plastics—a review”, *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 28, n. 10, pp. 12321–12333, Mar. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>. PubMed PMID: 32888147.
- [5] ZHU, C., LI, T., MOHIDEEN, M.M., *et al.*, “Realization of circular economy of 3D printed plastics: a review”, *Polymers*, v. 13, n. 5, pp. 744, Fev. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13050744>. PubMed PMID: 33673625.
- [6] RECH, F., SILVA, S.M., ROLDO, L., *et al.*, “Formulação e caracterização de potenciais filamentos compósitos de PLA e talos de tabaco para aplicação em manufatura aditiva”, *Revista Matéria*, v. 26, n. 2, pp. 1–13, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210002.1288>.
- [7] TRAN, T.N., BAYER, I.S., HEREDIA-GUERRERO, J.A., *et al.*, “Cocoa shell waste biofilaments for 3D printing applications”, *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 302, n. 11, pp. 1700219, Ago. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/mame.201700219>.
- [8] DEY, D., SRINIVAS, D., PANDA, B., *et al.*, “Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: a review”, *Journal of Cleaner Production*, v. 340, pp. 130749, Mar. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130749>.
- [9] MA, Y., ZHANG, L., “Formulated food inks for extrusion-based 3D printing of personalized foods: a mini review”, *Current Opinion in Food Science*, v. 44, pp. 100803, Abr. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2021.12.012>.
- [10] YAN, Q., DONG, H., SU, J., *et al.*, “A review of 3D printing technology for medical applications”, *Engineering*, v. 4, n. 5, pp. 729–742, Out. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>.
- [11] YAP, Y.L., YEONG, W.Y., “Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review”, *Virtual and Physical Prototyping*, v. 9, n. 3, pp. 195–201, Jul. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>.
- [12] FICO, D., RIZZO, D., CASCIARO, R., *et al.*, “A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (FFF): focus on sustainability and recycled materials”, *Polymers (Basel)*, v. 14, n. 3, pp. 465, Jan. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/polym14030465>. PMID:35160455.

- [13] HUANG, S.H., LIU, P., MOKASDAR, A., *et al.*, “Additive manufacturing and its societal impact: a literature review”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 5–8, pp. 1191–1203, Out. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>.
- [14] MINETOLA, P., IULIANO, L., MARCHIANDI, G., “Benchmarking of FDM machines through part quality using it grades”, *Procedia CIRP*, v. 41, pp. 1027–1032, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.075>.
- [15] SANTANA, L., ALVES, J.L., SABINO NETTO, A.C., *et al.*, “Estudo comparativo entre PETG e PLA para impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 4, pp. 1–28, Dez. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0601>.
- [16] 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, pp. 367–392, Dez. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>. PubMed PMID: 27356150.
- [17] RAJ, S.A., MUTHUKUMARAN, E., JAYAKRISHNA, K., “A case study of 3D printed PLA and its mechanical properties”, *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 5, pp. 11219–11226, 2018.
- [18] KARAMANLIOGLU, M., ALKAN, U., “Influence of time and room temperature on mechanical and thermal degradation of poly(lactic acid)”, *Thermal Science*, v. 23, pp. 383–390, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.2298/TSCI181111051K>.
- [19] O’MAHONY, C., GKARTZOU, E., HAQ, E.U., *et al.*, “Determination of thermal and thermomechanical properties of biodegradable PLA blends: for additive manufacturing process”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 42, n. 2, pp. 715–722, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-020-09859-6>.
- [20] COPPOLA, B., CAPPETTI, N., DI MAIO, L., *et al.*, “3D printing of PLA/clay nanocomposites: influence of printing temperature on printed samples properties”, *Materials (Basel)*, v. 11, n. 10, pp. 1947, Out. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/ma11101947>. PubMed PMID: 30314390.
- [21] KOLLAMARAM, G., CROKER, D.M., WALKER, G.M., *et al.*, “Low temperature fused deposition modeling (FDM) 3D printing of thermolabile drugs”, *International Journal of Pharmaceutics*, v. 545, n. 1–2, pp. 144–152, Jul. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.04.055>. PubMed PMID: 29705104.
- [22] CHOI, Y., KIM, C., JEONG, H., *et al.*, “Influence of bed temperature on heat shrinkage shape error in fdm additive manufacturing of the abs-engineering plastic”, *World Journal of Engineering and Technology*, v. 4, n. 3, pp. 186–192, Out. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/wjet.2016.43D022>.
- [23] CHACÓN, J.M., CAMINERO, M.A., GARCÍA-PLAZA, E., *et al.*, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”, *Materials & Design*, v. 124, pp. 143–157, Jun. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.
- [24] BANJANIN, B., VLADIC, G, PÁL, M., “Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 4, pp. 1–15, Jan. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>.
- [25] FERRETTI, P., LEON-CARDENAS, C., SANTI, G.M., *et al.*, “Relationship between FDM 3D printing parameters study: parameter optimization for lower defects”, *Polymers (Basel)*, v. 13, n. 13, pp. 2190, Jun. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13132190>. PMid:34209372.
- [26] PRABHAKAR, M.M., SARAVANAN, A.K., LENIN, A.H., *et al.*, “A short review on 3D printing methods, process parameters and materials”, *Materials Today: Proceedings*, v. 45, pp. 6108–6114, 2021.
- [27] COELHO, A.W.F., ARAUJO, A.C., THIRÉ, R.M.S.M., “Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 4, pp. 1–8, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0600>.
- [28] CABREIRA, V., SANTANA, R.M.C., “Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance”, *Revista Matéria*, v. 25, n. 3, pp. 1–9, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1126>.
- [29] MAGALHÃES, I.P., OLIVEIRA, P.M., DERNOWSEK, J., *et al.*, “Investigation of the effect of nozzle design on rheological bioprinting properties using computational fluid dynamics”, *Revista Matéria*, v. 24, n. 3, pp. 1–10, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0714>.
- [30] GRASSO, M., AZZOUZ, L., RUIZ-HINCAPIE, P., *et al.*, “Effect of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens”, *Rapid Prototyping Journal*, v. 24, n. 8, pp. 1337–1346, Nov. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-04-2017-0055>.

- [31] KIELBUS, A., FURYK-GRABOWSKA, K., OSTROWSKA, K., “Application of FFF method in orthopedics”, *Machine Dynamics Research*, v. 40, n. 3, pp. 67–78, 2017.
- [32] LIM, C.W.J., LE, K.Q., LU, Q., *et al.*, “An overview of 3-D printing in manufacturing aerospace, and automotive industries”, *IEEE Potentials*, v. 35, n. 4, pp. 18–22, Jul. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MPOT.2016.2540098>.
- [33] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D638-14, Test Method for Tensile Properties of Plastics*, New Jersey, West Conshohocken, Wiley, 2014.
- [34] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D790: Standard terminology for additive manufacturing technologies*, New Jersey, West Conshohocken, Wiley, 2007.
- [35] PEREIRA, R.B., MORALES, A.R., “Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto”, *Polímeros*, v. 24, n. 2, pp. 198–202, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2014.042>.
- [36] DOMINGO-ESPIN, M., PUIGORIOL-FORCADA, J.M., GARCIA-GRANADA, A., *et al.*, “Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts”, *Materials & Design*, v. 83, pp. 670–677, Out. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>.
- [37] DOMINGO-ESPIN, M., BORROS, S., AGULLO, N., *et al.*, “Influence of building parameters on the dynamic mechanical properties of polycarbonate fused deposition modeling parts”, *3D Printing And Additive Manufacturing*, v. 1, n. 2, p. 70–77, Jun. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1089/3dp.2013.0007>.