REVISTA MATÉRIA V.31
ISSN 1517-7076 artigos e20260339, 2026

A influência da orientação de preenchimento da manufatura aditiva nas propriedades mecânicas do poli(ácido láctico)

Influence of the infill orientation of additive manufacturing on the mechanical properties of poly(lactic acid)

Lucas Henrique Jankovski[1], Cleide Vieira[1], Evandro Dematte[2], Alexandre Borges Fagundes[1], Carlos Vinicios Opelt[2], Kamila Kazmierczak[1]

[1]Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Tecnologia Industrial. São Bento do Sul, SC, Brasil.

[2]Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Joinville, SC, Brasil.

e-mail: lucasjankovski@hotmail.com, cleide.vieira@udesc.br, evandro.dematte@udesc.br, alexandre.fagundes@udesc.br, carlos.opelt@udesc.br, kamilakaz@hotmail.com

RESUMO

A manufatura aditiva tem se destacado no cenário industrial por sua flexibilidade de projeto e capacidade de produzir componentes com geometrias complexas. Paralelamente, a demanda por soluções de menor impacto ambiental tem impulsionado o uso de biopolímeros, como o poli(ácido láctico) (PLA), amplamente empregado em processos de modelagem por fusão e deposição (FDM). Este trabalho avaliou a influência da orientação de preenchimento nas propriedades mecânicas de amostras de PLA produzidas por FDM. Corpos de prova com orientações de 0°, 90° e 0°/90° foram submetidos a ensaios de tração e flexão em três pontos, conforme as normas ASTM D638-14 e ASTM D790-17. A altura de camada foi selecionada com base em uma avaliação preliminar da formação de vazios por microscopia óptica. Nas condições estudadas, a orientação de 90° apresentou as maiores médias de resistência nos ensaios de tração e flexão e maior deformação em flexão. Como não foi realizada análise inferencial, as diferenças entre as orientações são interpretadas como tendências descritivas. As micrografias evidenciaram vazios e descontinuidades intercamadas capazes de atuar como concentradores de tensão. Os resultados reforçam que a seleção da orientação deve considerar simultaneamente resistência, rigidez e capacidade de deformação exigidas pela aplicação.

Palavras-chave: Modelagem por fusão e deposição; Poli(ácido láctico); Propriedades mecânicas; Orientação de preenchimento.

ABSTRACT

Additive manufacturing has gained industrial relevance because of its design flexibility and ability to produce complex geometries. At the same time, interest in lower-impact materials has encouraged the use of biopolymers such as poly(lactic acid) (PLA), which is widely processed by fused deposition modeling (FDM). This study evaluated the influence of infill orientation on the mechanical Properties of FDM-printed PLA specimens. Specimens with 0°, 90°, and 0°/90° infill orientations were tested in tension and three-point bending according to ASTM D638-14 and ASTM D790-17. Layer height was selected from a preliminary optical-microscopy assessment of void formation. Under the investigated conditions, the 90° orientation showed the highest mean tensile and flexural strengths and the greatest flexural strain. Because no inferential statistical analysis was performed, differences among orientations are interpreted as descriptive trends. Micrographs revealed voids and interlayer discontinuities that may act as stress concentrators. The results indicate that infill orientation should be selected according to the strength, stiffness, and deformation requirements of the intended application.

Keywords: Fused deposition modeling; Poly(lactic acid); Mechanical properties; Infill orientation.

Autor Responsável: Kamila Kazmierczak Data de envio 24/04/2026 Data de aceite 25/08/2026

DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2026-0339

(cc) BY

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros constituem uma tecnologia química ubíqua na sociedade do século XXI, sendo que o seu domínio está em ascensão no mercado, principalmente pelos aspectos sociais e a necessidade em substituir os materiais tradicionais [1]. O uso dos polímeros quando comparado às cerâmicas e metais oferecem amplas aplicações com custo reduzido, menor densidade e maior durabilidade [2]. Nas últimas décadas ocorreu um enorme aumento na produção de polímeros, sendo que em 2018 foi totalizado uma produção de 359 milhões de metros cúbicos de plásticos no mundo, 79,5% a mais quando comparado com o ano de 2002 [3].

O Brasil em 2018 foi responsável por aproximadamente 3,4% da produção mundial de plástico, reciclando somente 1,3% em relação ao valor produzido [4]. A maior parte do plástico consiste de fontes não renováveis oriundos do petróleo, sendo eles: polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno) (PET), poliuretano (PUR), poli(cloreto de vinila) (PVC), poliestireno (PS), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) [5].

1.1. Poli(ácido láctico)

O poli(ácido láctico) – PLA é classificado como um poliéster termoplástico alifático, suas principais características consistem em ser biodegradável, biocompatível, compostável, renovável e com excelentes propriedades mecânicas, tornando-o um possível substituto aos polímeros à base de petróleo [6–8]. A Figura 1 ilustra a estrutura química do PLA.

O monômero utilizado na produção do PLA pode ser obtido por síntese química ou pela fermentação de carboidratos provenientes de recursos renováveis, como amido e cana-de-açúcar [9, 10]. Atualmente, grande parte do ácido láctico comercial é produzida por fermentação bacteriana de carboidratos, e o sistema enzimático empregado influencia a proporção dos enantiômeros L e D [9, 10].

De forma geral, o PLA pode ser produzido por desidratação azeotrópica, policondensação direta ou polimerização por abertura de anel do lactídeo [9, 11]. A policondensação direta apresenta menor complexidade de processo, mas a obtenção de PLA de elevada massa molar pode exigir agentes de acoplamento ou extensores de cadeia [12, 13]. A Figura 2 apresenta rotas de síntese a partir dos isômeros do ácido láctico.

A proporção dos enantiômeros L e D influencia a cristalinidade, as temperaturas de transição vítrea e de fusão e as propriedades mecânicas do PLA [15]. O grau de cristalinidade também depende da massa molar e do histórico térmico do material [16–18]. A preocupação com a sustentabilidade é uma realidade que vem sendo levada em consideração, visto que nos últimos anos houve um aumento crescente na demanda de produtos naturais em aplicações industriais, em virtude das implicações ambientais resultantes da utilização de recursos não renováveis e limitados [19–22].

Os recursos renováveis podem fornecer matérias-primas para substituir parcial ou totalmente polímeros derivados do petróleo. O desempenho e o impacto ambiental desses biopolímeros, entretanto, devem ser avaliados para cada aplicação e ao longo do ciclo de vida [23]. O PLA apresenta boas propriedades mecânicas em relação aos polímeros derivados do petróleo, podendo ser comparado ao poli(tereftalato de etileno) em questões de módulo de elasticidade e resistência à tração [11].

A Tabela 1 apresenta faixas típicas de propriedades do PLA e de termoplásticos comerciais, compiladas das referências [10, 15, 24]. Os valores não foram obtidos experimentalmente neste trabalho e não representam comparação estatística direta, pois correspondem a diferentes graus comerciais, históricos de processamento e condições de ensaio. Portanto, não se aplicam desvios-padrão às faixas compiladas. As propriedades no escoamento e na ruptura foram apresentadas separadamente, e as informações ausentes nas fontes foram identificadas como não reportadas (NR).

O poli(ácido láctico) apresenta temperaturas de fusão e de transição vítrea próximas de 175 °C e 55 °C, respectivamente [10]. O processamento em temperaturas próximas ou superiores a 200 °C pode promover despolimerização e cisão aleatória da cadeia principal, levando à redução da massa molar e à degradação térmica [10, 25]. Entre os mecanismos relatados estão degradação oxidativa, eliminação cis e transesterificações intra e intermoleculares [26–28].

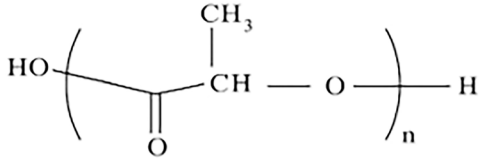


Figura 1: Estrutura química do PLA, elaborada pelos autores.

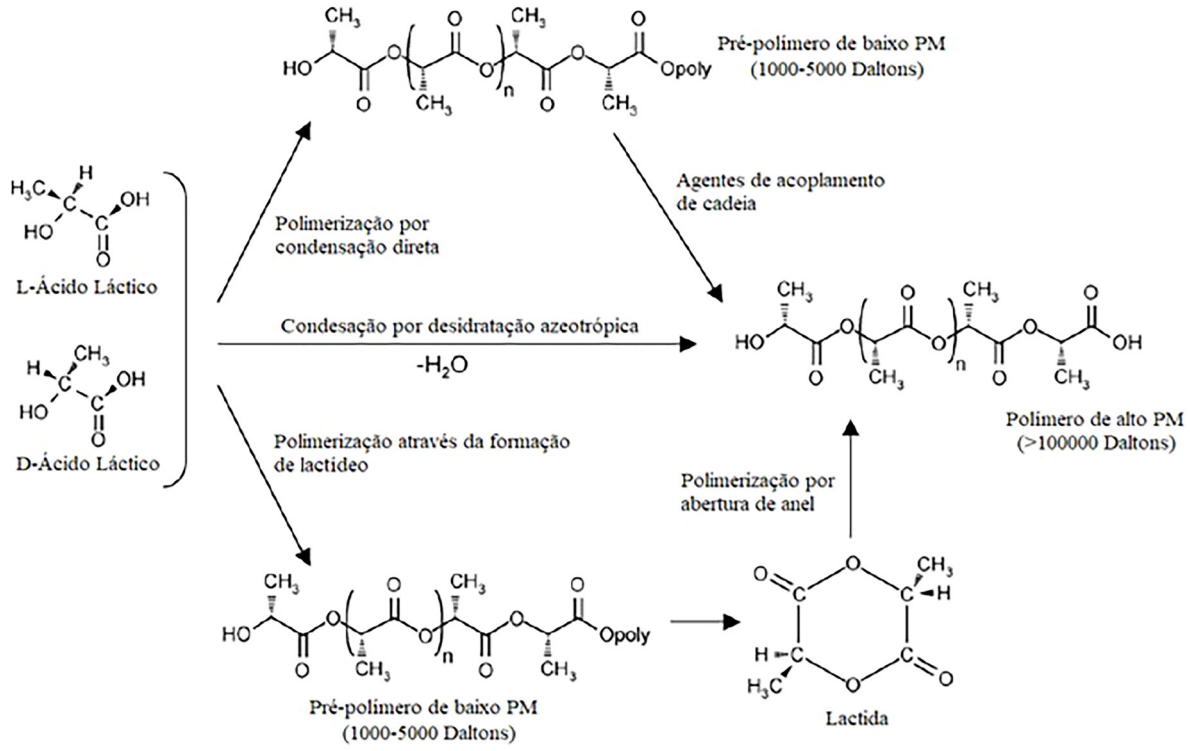


Figura 2: Síntese do PLA a partir do L-Ácido Láctico e D-Ácido Láctico [14].

Tabela 1: Faixas típicas de propriedades físicas, mecânicas e térmicas do PLA e de termoplásticos comerciais [10,15,24].

PROPRIEDADE	PLA	i-PP	PVC-U	PET	sPS
Densidade relativa[1]	1,24	0,91	1,38–1,40	1,37	1,02
Módulo de tração (GPa)[2]	3,5–3,8	1,1–1,5	2–5	3,1	3,2
Tensão no escoamento (MPa)[2]	48–110	21–37	45–55	47	45
Tensão na ruptura (MPa)[2]	NR	NR	NR	NR	NR
Alongamento no escoamento (%)[2]	NR	NR	NR	NR	NR
Alongamento na ruptura (%)[2]	2,5–100	20–800	20–100	50–300	5–20
Impacto Izod entalhado (J/m)[3]	13	72	20–100	79	60–70
Temperatura de transição vítrea, Tg (°C)[4]	55–60	≈ 0	≈ 80	≈ 75	≈ 100
Temperatura de fusão, Tm (°C)[4]	153–175	≈ 163	170–180*	≈ 250	≈ 270

Notas: valores compilados da literatura e apresentados como faixas típicas; não constituem resultados experimentais deste estudo. [1] Densidade relativa determinada por métodos equivalentes à ASTM D792, quando informados nas fontes. [2] As condições de tração (geometria, velocidade, temperatura e condicionamento) variam entre as fontes; por isso, os valores não devem ser comparados estatisticamente. [3] Ensaio Izod entalhado; as condições específicas variam entre as fontes. [4] Valores de Tg e Tm obtidos por análise térmica nas fontes consultadas. NR: não reportado. O símbolo ≈ indica valor aproximado. Não foram encontrados desvios-padrão associados às faixas compiladas.

As condições de processamento determinam quais mecanismos de degradação tendem a predominar. Acima de aproximadamente 205 °C, a transesterificação intramolecular pode favorecer a formação de oligômeros cíclicos [29]. Estruturas ramificadas e de maior massa molar, obtidas com extensores de cadeia, podem contribuir para controlar a degradação do PLA [27, 30–33].

As primeiras áreas que utilizaram o PLA foram a biomédica e farmacêutica. Porém, com o surgimento de novas tecnologias o custo de produção diminuiu, ampliando o campo de aplicação, como a área de embalagens [33–35]. Entretanto, a baixa resistência à fusão e baixa tenacidade em temperatura ambiente são fatores que

limitam a sua aplicação em processos de larga escala, como por exemplo extrusão de filme soprado, espumação e moldagem por sopro [36, 37].

O PLA tem sido investigado em diferentes áreas [38–46], sobretudo por sua origem renovável e por suas propriedades adequadas a diversas aplicações. Na manufatura aditiva, destaca-se pela temperatura de processamento relativamente baixa, baixa toxicidade e possibilidade de uso sem pós-processamento complexo. Uma das tecnologias mais difundidas para seu processamento é a fused deposition modeling (FDM; modelagem por fusão e deposição), também denominada fused filament fabrication (FFF; fabricação por filamento fundido) [47].

1.2. Manufatura aditiva

A manufatura aditiva compreende tecnologias que transformam um modelo de computer-aided design (CAD; projeto assistido por computador) em um objeto tridimensional pela deposição ou consolidação sucessiva de material em camadas [48–51]. Em relação a processos subtrativos e formativos, pode reduzir desperdício e etapas de fabricação e montagem ao produzir geometrias integradas diretamente a partir do modelo digital [50, 52, 53].

O emprego de modelos CAD viabiliza a fabricação de geometrias complexas e a customização de componentes. A manufatura aditiva também permite produzir protótipos para identificar problemas de projeto durante a validação, antes de etapas mais onerosas do desenvolvimento [54, 55].

A manufatura aditiva é empregada nos setores químico, farmacêutico, automobilístico, alimentício, robótico, elétrico, biomédico, aeroespacial e educacional [56–65]. Entre os principais processos estão fused deposition modeling (FDM; modelagem por fusão e deposição), selective laser sintering (SLS; sinterização seletiva a laser), selective laser melting (SLM; fusão seletiva a laser), stereolithography (SLA; estereolitografia), directed energy deposition (DED; deposição com energia direcionada) e laminated object manufacturing (LOM; fabricação de objetos laminados) [50]. O Quadro 1 apresenta materiais, aplicações e faixas de resolução características desses processos.

Quadro 1: Exemplos de materiais, aplicações e resoluções características dos principais processos de manufatura aditiva [50].

PROCESSO	MATERIAL	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS	RESOLUÇÃO DE IMPRESSÃO
FDM/FFF	PLA, ABS, PETG, PA e termoplásticos reforçados	Protótipos e componentes funcionais	Equipamentos de bancada; processamento direto de filamentos	Anisotropia, linhas de camada e necessidade de suportes	50–200 µm
SLS/SLM	PA11/PA12 (SLS); aços, Ti e Al (SLM)	Biomédica, aeroespacial e componentes funcionais	Geometrias complexas; o leito de pó sustenta a peça	Manuseio de pó, atmosfera controlada e acabamento	80–250 µm
SLA	Resinas acrílicas e epoxídicas fotocuráveis	Prototipagem e modelos biomédicos	Resolução fina e boa reprodução de detalhes	Lavagem, pós-cura e gama restrita de resinas	≈10 µm
DED	Aços, ligas de Ti e Ni, em pó ou arame	Reparo, revestimento e fabricação de grandes componentes	Adição localizada e possibilidade de reparar peças	Acabamento e precisão inferiores aos processos em leito de pó	≈250 µm
LOM	Papel, folhas poliméricas, compósitos e lâminas metálicas	Modelos e estruturas laminadas	Ampla seleção de folhas e baixa geração de calor	Resolução limitada pela espessura da lâmina	Igual à espessura da lâmina
Extrusão de concreto	Concreto, argamassas e solos estabilizados	Elementos construtivos	Deposição em grande escala	Resolução milimétrica e controle reológico	25–40 mm

(cc) BY

No processo FDM/FFF, um filamento termoplástico contínuo é aquecido, extrudado pelo bico e depositado sobre a mesa ou sobre camadas previamente formadas. A qualidade da união entre filamentos depende da história térmica e do contato entre as estradas depositadas; resfriamento excessivo antes da deposição subsequente pode reduzir a adesão intercamadas e afetar o desempenho final [66].

Os parâmetros de processamento influenciam diretamente as propriedades mecânicas do componente [50, 57]. Entre os fatores relevantes estão altura de camada, ângulo de deposição, orientação de construção, densidade e padrão de preenchimento, temperatura de extrusão, velocidade de impressão, largura de extrusão, diâmetro do bico, espessura da parede externa, espaçamento entre filamentos e número de perímetros [67–75].

O parâmetro da orientação de preenchimento para o PLA produzido a partir da manufatura aditiva foi estudado por alguns pesquisadores. SOMIREDDY *et al.* [76] desenvolveram um modelo constitutivo para avaliar a influência da orientação de preenchimento e espessura da camada no comportamento mecânico dos materiais obtidos a partir da manufatura aditiva.

Embora a influência dos parâmetros de FDM/FFF sobre o PLA seja amplamente reconhecida, estudos recentes mostram que os efeitos da orientação, do padrão de preenchimento, da temperatura e dos vazios dependem das condições de fabricação e do modo de carregamento [77–80]. Nesse contexto, este trabalho avalia, sob um conjunto fixo de parâmetros e 100% de preenchimento, como as orientações de 0°, 90° e 0°/90° se relacionam com as respostas em tração e flexão e com as feições observadas nas superfícies de fratura. A contribuição do estudo consiste na análise conjunta dessas respostas e da mesoestrutura para subsidiar a seleção da orientação conforme os requisitos da aplicação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Material

Foi utilizado um filamento comercial de PLA Ingeo Biopolymer 3D850, doado pela NatureWorks. A NatureWorks é a fabricante da resina; o material foi recebido na forma de filamento para impressão. A Tabela 2 apresenta propriedades típicas declaradas na ficha técnica do fabricante [82].

2.2. Corpos de prova

Os corpos de prova de tração e flexão foram baseados, respectivamente, nas normas ASTM D638-14 e ASTM D790-17 [81, 83] e fabricados em uma impressora GTMax3D. Para a tração, adotou-se a geometria do corpo de prova Tipo I da ASTM D638, com espessura nominal de 4 mm. Os corpos de prova de flexão apresentaram dimensões nominais de 127 mm × 12,7 mm × 4 mm. As velocidades de ensaio foram 5 mm/min para tração e 1,2 mm/min para flexão. A Figura 3 apresenta as geometrias, respectivamente.

2.3. Impressora 3D

As geometrias foram elaboradas em ambiente tridimensional de computer-aided design (CAD; projeto assistido por computador), convertidas para o formato Standard Tessellation Language (STL) e fatiadas no software Ultimaker Cura, versão 4.8.0. Os parâmetros de parede/perímetro foram mantidos conforme o perfil empregado no Cura. O número de linhas de parede e a espessura total correspondente não foram registrados e não puderam ser recuperados retrospectivamente; essa ausência constitui uma limitação de reprodutibilidade do estudo.

As demais configurações foram definidas a partir de estudos preliminares. A mesoestrutura das amostras impressas com diferentes parâmetros de processamento foi avaliada por microscopia óptica. As superfícies observadas foram obtidas por fratura das amostras e não receberam lixamento, polimento ou outro preparo superficial posterior.

Tabela 2: Propriedades físicas do Ingeo Biopolymer 3D850 [81].

	INGEO BIOPOLYMER 3D850	NORMA
Propriedades Físicas		
Densidade relativa	1,24	ASTM D792
Viscosidade relativa	4	ASTM D5225
Temperatura de fusão (°C)	165–180	ASTM D3418
Temperatura de transição vítrea (°C)	55–60	ASTM D3418

Nota: valores típicos informados pelo fabricante, não medidos neste estudo. Densidade relativa: ASTM D792; viscosidade relativa: ASTM D5225; temperaturas de fusão e de transição vítrea: ASTM D3418. A ficha técnica não apresenta desvios-padrão para esses valores.

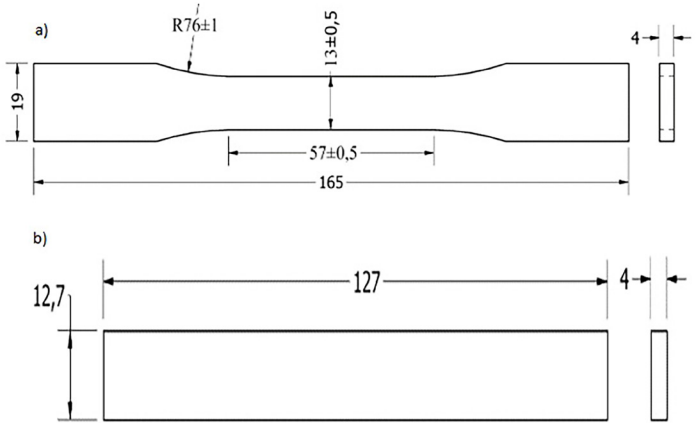


Figura 3: Geometria dos corpos de prova [mm] de (a) tração e (b) flexão.

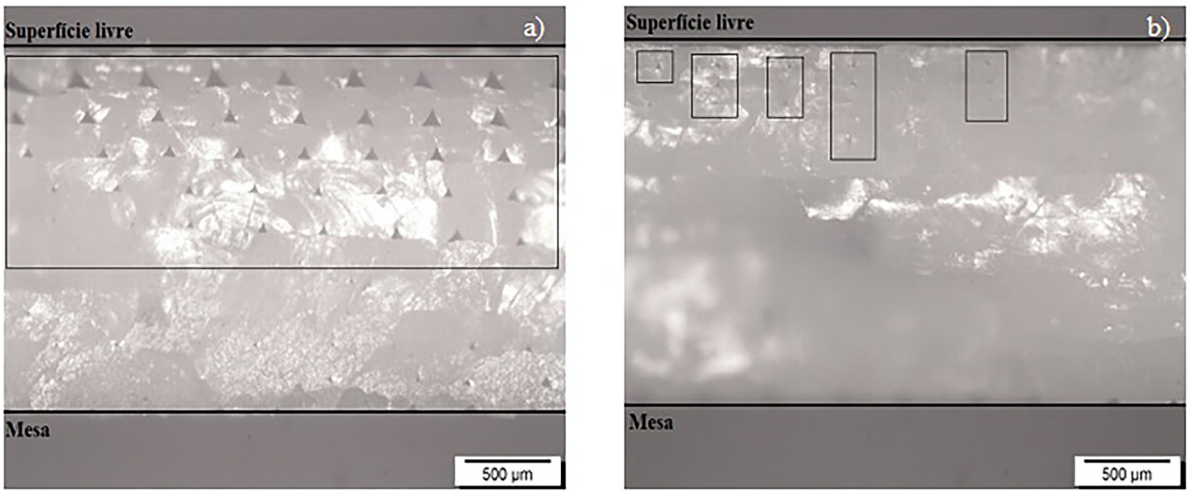


Figura 4: Micrografias ópticas das seções transversais obtidas por fratura, sem preparação superficial posterior: (a) altura de camada de 0,2 mm; (b) altura de camada de 0,1 mm. Os retângulos delimitam regiões com vazios entre filamentos/camadas. A posição da mesa e a superfície livre estão indicadas nas imagens.

A Figura 4 apresenta micrografias das seções transversais de duas amostras impressas com orientação de preenchimento longitudinal em relação ao comprimento do corpo de prova. As amostras foram produzidas com alturas de camada de 0,2 mm (Figura 4a) e 0,1 mm (Figura 4b), possibilitando a comparação da quantidade e das dimensões dos vazios.

Observou-se que a formação de vazios variou ao longo da espessura das amostras. Nas regiões próximas à mesa aquecida, os vazios apresentaram menores dimensões ou não foram identificados. À medida que aumentou a distância em relação à mesa, verificou-se maior quantidade e maiores dimensões dos vazios. Esse comportamento pode estar relacionado ao maior tempo de permanência das camadas inferiores em temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea, o que favorece a difusão das cadeias poliméricas e a adesão entre as camadas depositadas. Nas camadas superiores, o menor tempo de exposição a essas temperaturas pode ter reduzido a adesão intercamadas, favorecendo a formação de vazios [84–86].

Como os vazios atuam como concentradores de tensão e afetam negativamente a resistência e a rigidez do material, os parâmetros de impressão devem ser definidos de modo a minimizar sua quantidade e suas dimensões. A quantidade, a geometria e a distribuição dos vazios estão diretamente relacionadas aos parâmetros de impressão e à orientação de preenchimento [87,88]. Além disso, durante a manufatura aditiva, o material deve permanecer acima da temperatura de transição vítrea por tempo suficiente para favorecer a difusão das cadeias poliméricas e a adesão entre as camadas depositadas, contribuindo para a redução dos vazios [84]. Neste trabalho, adotou-se uma altura de camada de 0,1 mm com o objetivo de reduzir sua formação.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de impressão avaliados por microscopia óptica e os valores associados à menor presença aparente de vazios. Os parâmetros não listados permaneceram no perfil empregado no software Cura 4.8.0; por isso, a interpretação deve considerar a limitação relativa às configurações não registradas.

Tabela 3: Parâmetros de impressão dos corpos de prova.

Diâmetro do bico (mm)	0,4
Largura de Extrusão (mm)	0,4
Altura da camada (mm)	0,1
Densidade do preenchimento (%)	100
Velocidade da primeira camada (mm/s)	32,5
Velocidade da impressão (mm/s)	65
Velocidade do preenchimento (mm/s)	65
Temperatura de impressão (°C)	200
Temperatura da mesa (°C)	60

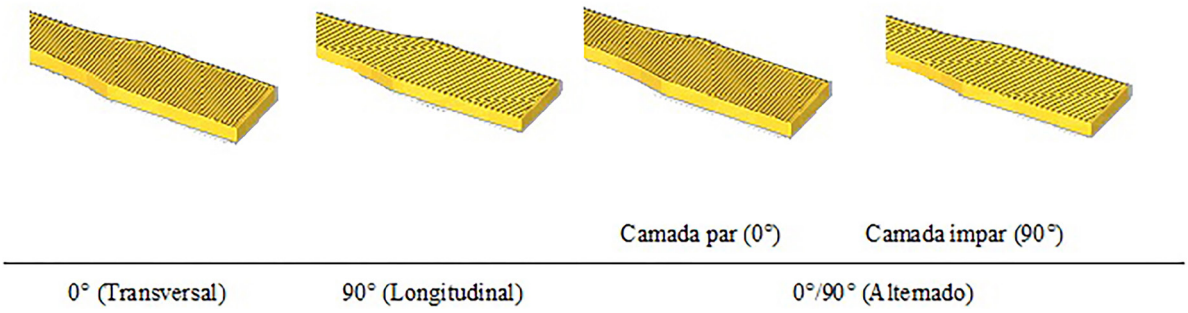


Figura 5: Orientações de preenchimento empregadas nos corpos de prova. O eixo X coincide com o comprimento do corpo de prova, Y é transversal no plano da mesa e Z corresponde à direção de construção. As linhas representadas indicam o sentido de deposição em cada camada.

Foram adotadas três orientações de preenchimento: 0° (transversal), 90° (longitudinal) e 0°/90° (alternada), conforme a Figura 5. Em correlação com o sistema de coordenadas da ISO/ASTM 52921:2013(E) [89], o eixo X foi definido ao longo do comprimento do corpo de prova, o eixo Y no plano da mesa e transversal ao comprimento, e o eixo Z normal à mesa, correspondente à direção de construção. Como a espessura nominal dos corpos de prova foi de 4 mm e a altura de camada foi de 0,1 mm, cada corpo de prova foi constituído nominalmente por 40 camadas.

2.4. Equipamentos de ensaio

Os ensaios de tração e flexão em três pontos foram realizados em uma máquina universal de ensaios DL-30000 (EMIC), no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LABEM) do Centro Multiusuário CCT, segundo as normas ASTM D638-14 e ASTM D790-17 [81, 83], respectivamente. Para cada orientação, foram ensaiados cinco corpos de prova (n = 5). Na tração, utilizou-se célula de carga de 300 kN e velocidade de 5 mm/min; na flexão, célula de carga de 5 kN e velocidade de 1,2 mm/min. Todos os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente.

O módulo de elasticidade em tração foi obtido pela inclinação da região linear inicial da curva tensão–deformação. O módulo de flexão foi calculado pela inclinação inicial da curva carga–deflexão, conforme a relação $E_f = L^3m/(4bd^3)$, em que L é o vão entre apoios, m é a inclinação da região linear, b é a largura e d é a espessura do corpo de prova. Os intervalos numéricos exatos empregados nas regressões não foram preservados nos registros do estudo e não puderam ser reconstruídos retrospectivamente.

Os resultados são apresentados como média ± desvio-padrão de cinco repetições. Como os valores individuais dos ensaios não estavam disponíveis na etapa de revisão, não foi possível realizar de forma confiável uma análise inferencial retrospectiva. Assim, as comparações entre orientações são estritamente descritivas e qualquer diferença observada é tratada como tendência, sem afirmação de significância estatística.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaio de tração

A Figura 6 apresenta as curvas tensão–deformação das cinco repetições de cada orientação. A orientação de 90° (longitudinal) mostrou as maiores médias de tensão máxima, deformação na ruptura e módulo de elasticidade. Essa tendência é compatível com o alinhamento dos filamentos em relação à direção de carregamento. As curvas

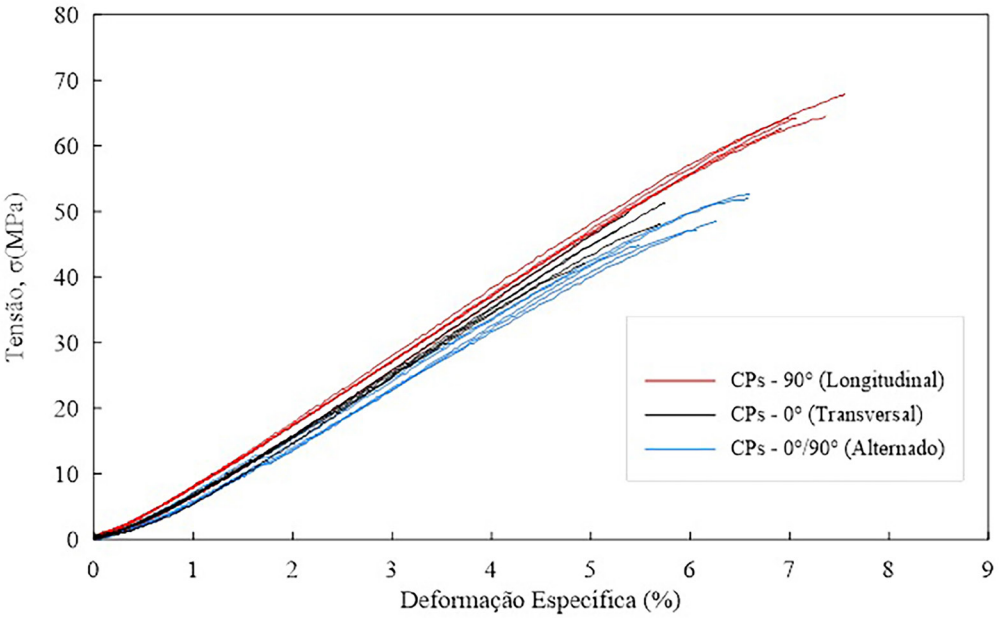


Figura 6: Curvas tensão-deformação do ensaio de tração para cada orientação de preenchimento.

individuais foram mantidas para evidenciar a dispersão; a inexistência dos dados brutos impediu a seleção retrospectiva, por critério quantitativo, de uma única curva representativa por grupo.

As orientações 0° e 0°/90° apresentaram menores médias de resistência e deformação que a orientação longitudinal. Entretanto, a seleção da orientação não deve se basear apenas na resistência máxima: rigidez, deformação admissível, modo de carregamento, estabilidade dimensional e variabilidade também devem ser considerados conforme a aplicação [74, 77].

A Tabela 4 apresenta as médias e os desvios-padrão das propriedades obtidas em tração, além de valores da literatura. Nas condições estudadas, a orientação de 90° apresentou as maiores médias de módulo, alongamento na ruptura e tensão máxima. Essas diferenças são tratadas como tendências descritivas, pois não foi realizada análise inferencial.

A orientação de 90° apresentou menor dispersão para algumas propriedades. As médias das orientações 0° e 0°/90° foram próximas para o módulo e a tensão máxima, enquanto o alongamento médio da orientação alternada foi aproximadamente 16% superior ao da orientação transversal. Essa diferença percentual não implica significância estatística.

Os valores da literatura apresentam ampla variação em relação aos resultados deste estudo. Essa comparação é apenas contextual, pois os trabalhos diferem quanto ao grau de PLA, geometria, condicionamento, orientação, temperatura, velocidade, presença de paredes e vazios e procedimento de ensaio. A diversidade de condições reforça a necessidade de relatar integralmente os parâmetros de processamento e caracterização.

A análise por microscopia eletrônica de emissão de campo (field-emission gun scanning electron microscopy, FEG-SEM; microscopia eletrônica de varredura com canhão de emissão de campo) evidenciou vazios, interfaces entre filamentos e regiões de separação intercamadas na superfície de fratura (Figura 7). A pequena deformação macroscópica observada é compatível com ruptura de baixa ductilidade, mas não foi adotado um limiar quantitativo para classificação como fratura frágil.

Essas descontinuidades atuam como concentradores de tensão e podem facilitar a nucleação e a propagação de trincas, conforme discutido por SUN *et al.* [85] e BELLEHUMEUR *et al.* [86]. Em regiões localizadas, foram observadas microfibrilas poliméricas associadas à deformação plástica localizada, indicando mecanismos pontuais de dissipação de energia antes da ruptura.

3.2. Ensaio de flexão

As curvas tensão–deformação do ensaio de flexão em três pontos estão apresentadas na Figura 8. A orientação de 90° apresentou maior deformação média e não atingiu ruptura completa no intervalo ensaiado, enquanto as orientações 0° e 0°/90° romperam com menores deformações. Evitou-se o termo “elastoplástico” porque as curvas e os registros disponíveis não permitem estabelecer de modo inequívoco o ponto de escoamento.

(cc) BY

Tabela 4: Propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração para o PLA.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO	ORIENTAÇÃO DE PREENCHIMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	ALONGAMENTO (%)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)
FDM	0° (Transversal)	0,85 ± 0,12	5,41 ± 0,33	47,69 ± 3,47
FDM	90° (Longitudinal)	0,96 ± 0,01	7,18 ± 0,24	64,69 ± 1,68
FDM	0°/90° (Alternado)	0,85 ± 0,01	6,25 ± 0,47	49,02 ± 2,97
FDM [81]	–	2,31	3,31	50,00
FDM [90]	–	2,49	5,67	96,30
FDM [91]	–	–	–	157,28
FDM [92]	90°	0,77	3,70	24,60
Injeção [92]	–	1,47	5,50	47,40
– [93]	–	2,50	–	51,00
FDM [84]	Retilínea	1,61	–	44,11
FDM [84]	Triangular	1,67	–	42,52

Nota: resultados deste estudo apresentados como média ± desvio-padrão (n = 5). Os valores da literatura são apresentados conforme disponibilizados nas respectivas referências; "–" indica informação não reportada.

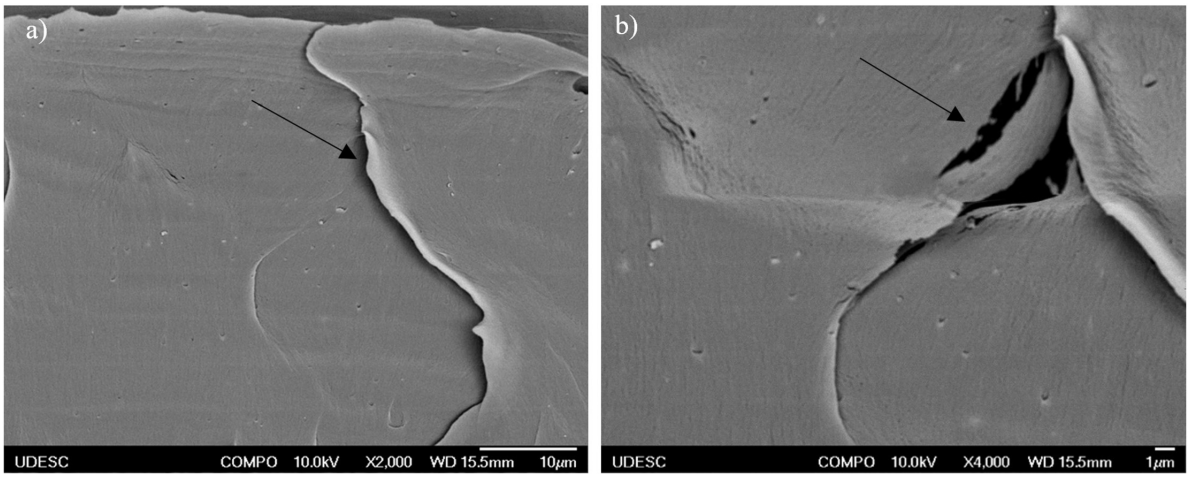


Figura 7: Micrografia por FEG-SEM da superfície de fratura de PLA produzido por FDM/FFF. A interpretação considera vazios interfilamentos, interfaces entre camadas e regiões de separação intercamadas observadas na imagem.

As orientações 0° e 0°/90° apresentaram ruptura completa no ensaio, enquanto os corpos de prova longitudinais não romperam completamente, indicando maior capacidade de deformação nas condições avaliadas. A influência da orientação sobre a resposta em flexão também foi observada por MOTAPARTI *et al.* [94].

Os dados da Tabela 5 mostram que a orientação de 90° apresentou as maiores médias de módulo de flexão, tensão normal máxima, deformação máxima e tensão cisalhante máxima. Essa tendência é compatível com a continuidade dos filamentos na direção de maior solicitação, mas não deve ser interpretada como diferença estatisticamente comprovada [71].

A análise microestrutural, Figura 9, evidenciou regiões distintas de tração e compressão. Nas regiões comprimidas, observou-se maior compactação das camadas, enquanto nas regiões tracionadas foram identificadas falhas intercamadas, vazios e separação entre filamentos. Esses resultados corroboram estudos que indicam que a falha em materiais produzidos por FDM ocorre preferencialmente nas interfaces entre camadas, devido à menor resistência dessas regiões [95].

Além disso, a presença de vazios e falhas de adesão pode favorecer a concentração de tensões e reduzir a resistência mecânica, conforme relatado por MACEDO e FERREIRA [84], que discutiram a influência da fração volumétrica de vazios sobre as propriedades mecânicas de materiais produzidos por FFF.

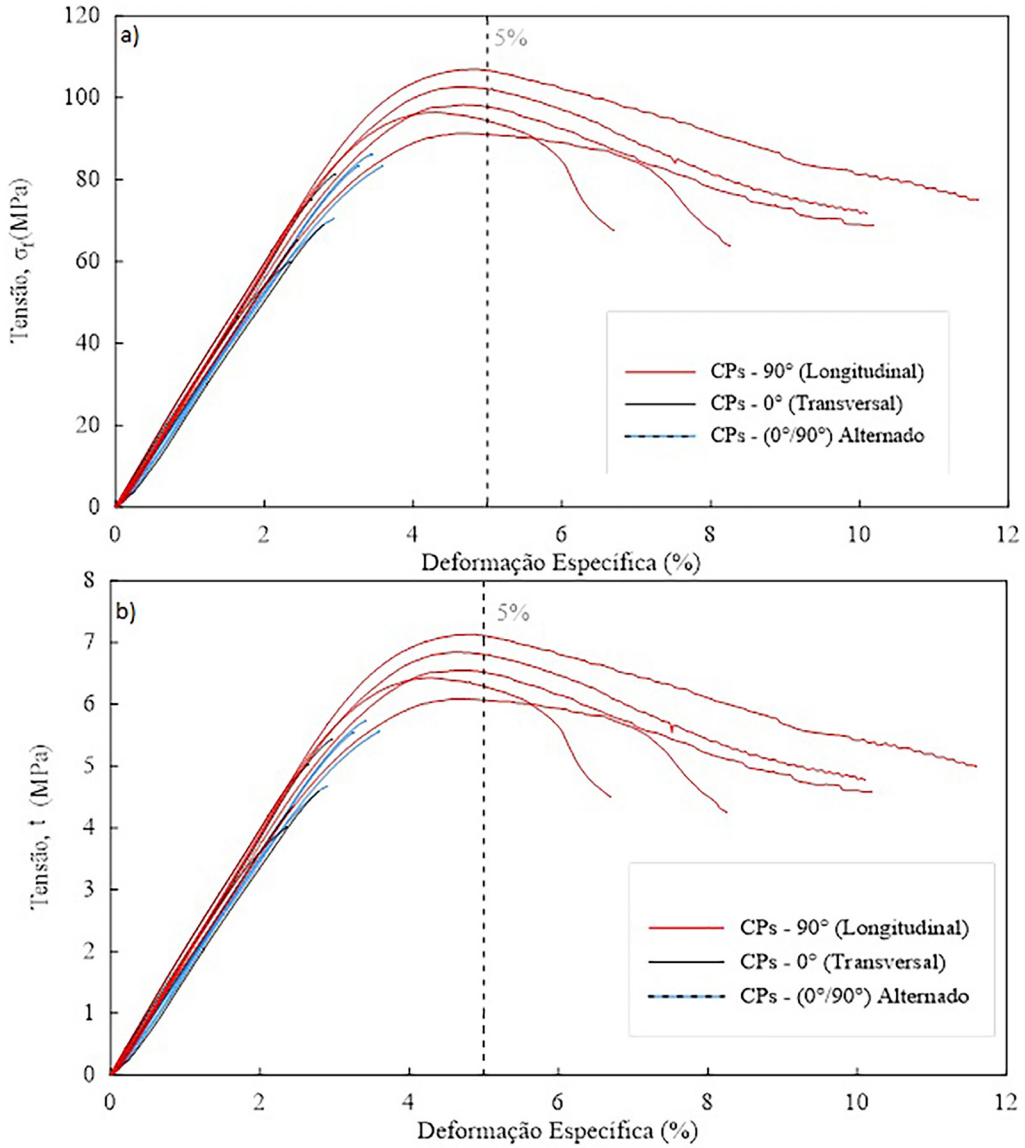


Figura 8: Curvas de tensão normal e cisalhante em função da deformação no ensaio de flexão, para as cinco repetições de cada orientação. As curvas individuais foram mantidas porque os dados brutos necessários à seleção quantitativa de uma curva representativa não estavam disponíveis.

Tabela 5: Propriedades mecânicas normais e cisalhantes do PLA.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO	ORIENTAÇÃO DE PREENCHIMENTO	MÓDULO DE FLEXÃO (GPa)	TENSÃO MÁXIMA NORMAL (MPa)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (%)	TENSÃO MÁXIMA CISALHANTE (MPa)
FDM	0° (Transversal)	2,76 ± 0,27	70,10 ± 8,42	2,65 ± 0,25	4,67 ± 0,56
FDM	90° (Longitudinal)	2,87 ± 0,16	98,35 ± 6,20	9,37 ± 1,91	6,61 ± 0,40
FDM	0°/90° (Alternado)	2,54 ± 0,07	80,88 ± 6,26	3,39 ± 0,24	5,37 ± 0,47
FDM [91]	–	3,11	48,66	–	–
FDM [84]	Retilínea	2,58	65,61	–	–
FDM [84]	Triangular	2,65	68,30	–	–
FDM [85]	–	1,20	43,60	–	–

Nota: resultados deste estudo apresentados como média ± desvio-padrão (n = 5). Os valores da literatura são apresentados conforme disponibilizados nas respectivas referências; "–" indica informação não reportada.

(cc) BY

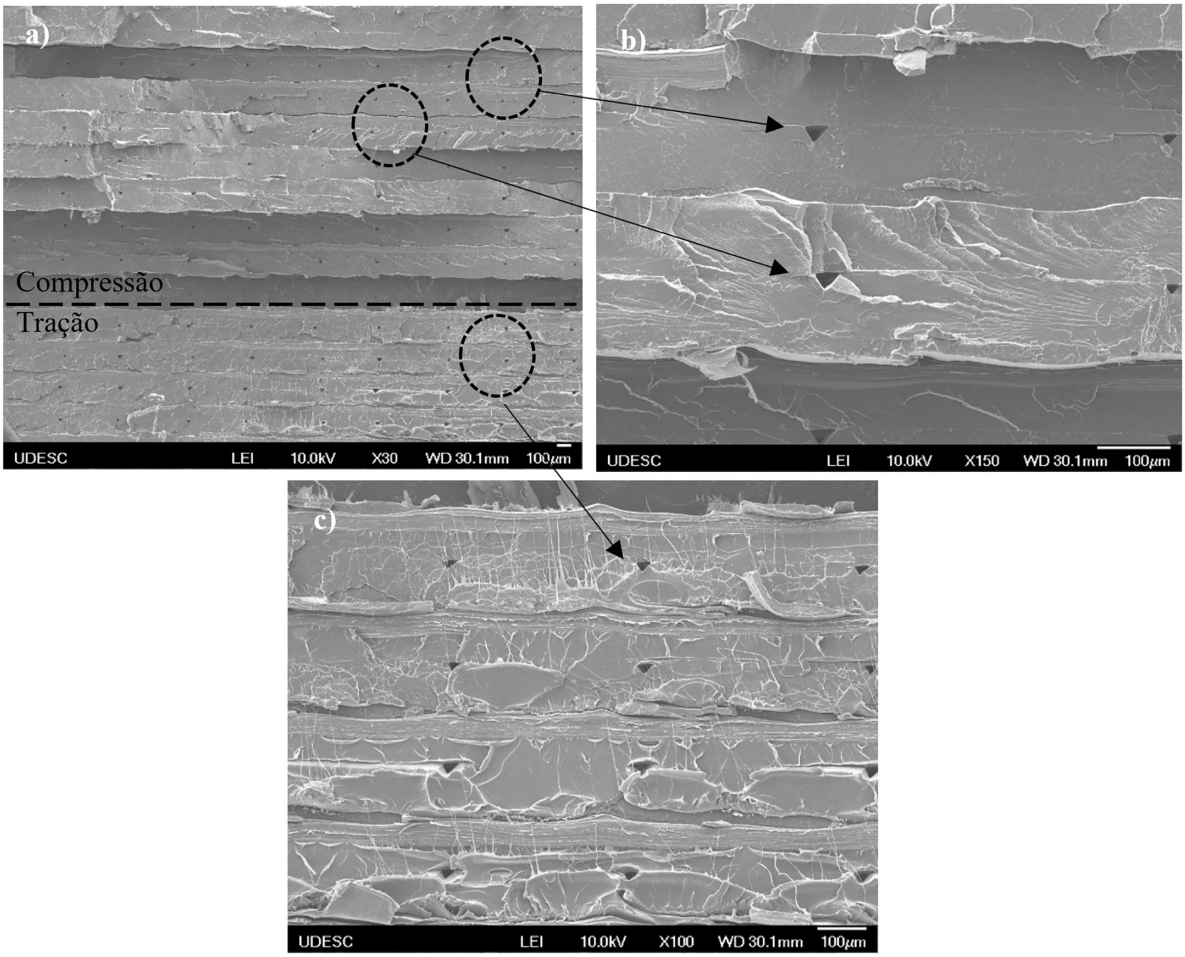


Figura 9: Micrografias obtidas após ensaio de flexão em três pontos: (a) região de transição entre compressão e tração, com presença de delaminações e início de propagação de trincas ao longo das interfaces intercamadas. (b) região submetida à compressão e (c) região submetida à tração.

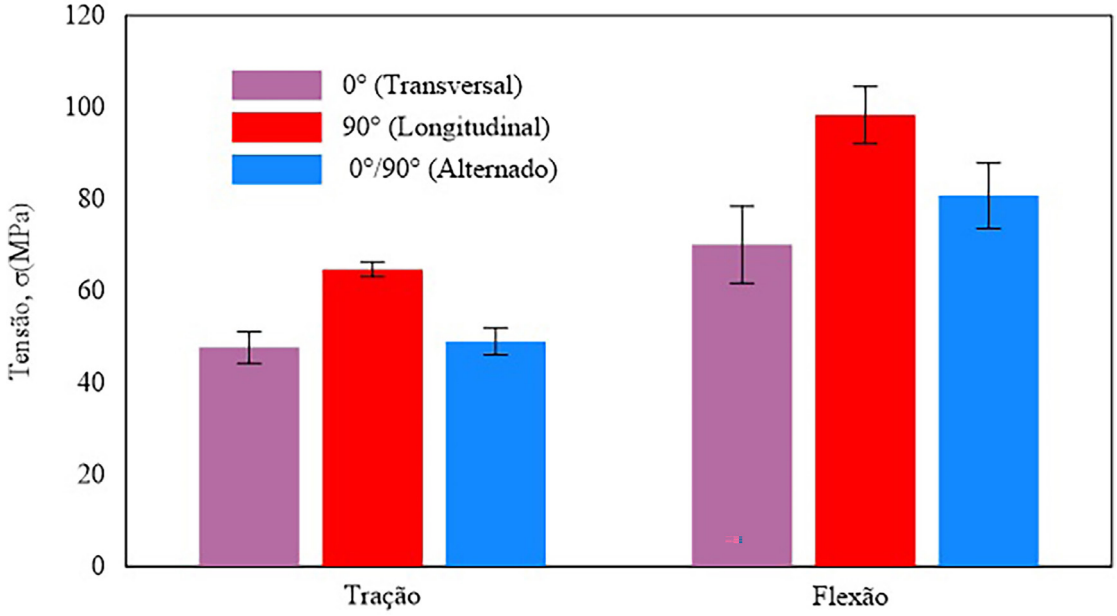


Figura 10: Comparativo entre as tensões máximas normais do ensaio de tração e flexão para cada orientação de preenchimento.

(cc) BY

A Figura 10 apresenta uma comparação descritiva entre as tensões máximas médias obtidas nos ensaios de tração e flexão. Nas condições avaliadas, a orientação de 90° apresentou as maiores médias e menor dispersão para algumas propriedades. Entretanto, como não foi realizada análise estatística inferencial, não é possível afirmar que as diferenças entre as orientações sejam estatisticamente significativas.

As diferenças observadas podem estar relacionadas à orientação dos filamentos em relação ao carregamento, à presença de vazios e à qualidade da adesão entre filamentos e camadas. RODRIGUEZ *et al.* [88] também discutiram a influência da mesoestrutura sobre as propriedades de materiais produzidos por deposição de material fundido.

Dessa forma, os resultados indicam tendências de associação entre os parâmetros de impressão, a orientação de preenchimento, a mesoestrutura e as respostas mecânicas do PLA. A seleção da orientação mais adequada deve considerar os requisitos específicos da aplicação, incluindo resistência, rigidez, deformação admissível, modo de carregamento e variabilidade.

4. CONCLUSÃO

Nas condições avaliadas, a orientação de preenchimento influenciou as respostas mecânicas do PLA processado por FDM/FFF. A orientação de 90° apresentou as maiores médias de tensão máxima nos ensaios de tração e flexão e a maior deformação em flexão. Como não foi realizada análise estatística inferencial, essas diferenças devem ser interpretadas como tendências descritivas, e não como diferenças estatisticamente comprovadas.

As orientações 0° e 0°/90° apresentaram menores médias de resistência e deformação. Entretanto, a seleção da orientação não deve considerar apenas a resistência máxima, mas também rigidez, deformação admissível, modo de carregamento, estabilidade dimensional e variabilidade, conforme os requisitos da aplicação.

A análise microestrutural por microscopia eletrônica de emissão de campo evidenciou a presença de vazios, interfaces entre filamentos e descontinuidades intercamadas, que podem atuar como concentradores de tensão e contribuir para os mecanismos de falha. A ocorrência de fratura preferencialmente nas interfaces entre filamentos indica que a qualidade da adesão intercamadas constitui um fator relevante para o desempenho mecânico do material.

Além disso, a discrepância observada entre os resultados experimentais e os dados da literatura reforça a necessidade de padronização dos parâmetros de processamento e dos procedimentos de caracterização em manufatura aditiva. Nesse sentido, os resultados deste trabalho contribuem para o entendimento da relação entre processamento, microestrutura e propriedades mecânicas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de critérios mais confiáveis no projeto e na aplicação de componentes produzidos por FDM.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a infraestrutura do Laboratório de Ensaios Mecânicos (CEPLAN) vinculado ao Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC).

6. DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os resultados consolidados que fundamentam este estudo estão apresentados no artigo. Os dados brutos individuais dos ensaios não estão disponíveis publicamente.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] FELDMAN, D., "Polymer history", *Designed Monomers and Polymers*, v. 11, n. 1, pp. 1–15, Apr. 2012. doi: https://doi.org/10.1163/156855508X292383.

[2] SANDHU, R.S., SHAKYA, M., DURGAVATI VISHWAVIDYALAYA, R., "Comparative study of synthetic plastics and biodegradable plastics", *Global Journal of Bio-Science and Biotechnology*, v. 8, n. 1, pp. 107–112, 2019.

[3] GARSIDE, M., https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950, acessado em novembro de 2020.

[4] KAZA, S., YAO, L.C., BHADA-TATA, P., *et al.*, *What a Waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*, Washington, World Bank Group, 2018. doi: https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0.

[5] PLASTICSEUROPE, https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf, acessado em novembro de 2020.

(cc) BY

[6] GU, S.Y., ZHANG, K., REN, J., *et al.*, "Melt rheology of polylactide/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends", *Carbohydrate Polymers*, v. 74, n. 1, pp. 79–85, Jan. 2008. doi: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.01.017.

[7] LIN, S., GUO, W., CHEN, C., *et al.*, "Mechanical properties and morphology of biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends compatibilized by transesterification", *Materials & Design*, v. 36, pp. 604-608, Nov. 2012. doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.036.

[8] LEE, B.K., YUN, Y., PARK, K., "PLA micro-and nano-particles", *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 107, pp. 176–191, Jun. 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.05.020. PubMed PMID: 27262925.

[9] LIM, L.T., AURAS, R., RUBINO, M., "Processing technologies for poly (lactic acid)", *Progress in Polymer Science*, v. 33, n. 8, pp. 820–852, Jun. 2008. doi: https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004.

[10] GARLOTTA, D., "A literature review of poly (lactic acid)", *Journal of Polymers and the Environment*, v. 9, n. 2, pp. 63–84, Apr. 2001. doi: https://doi.org/10.1023/A:1020200822435.

[11] AURAS, R., HARTE, B., SELKE, S., "An overview of polylactides as packaging materials", *Macromolecular Bioscience*, v. 4, n. 9, pp. 835–864, Jun. 2004. doi: https://doi.org/10.1002/mabi.200400043. PubMed PMID: 15468294.

[12] ZHAO, Y., WANG, Z., WANG, J., *et al.*, "Direct synthesis of poly (D, L-lactic acid) by melt polycondensation and its application in drug delivery", *Journal of Applied Polymer Science*, v. 91, n. 4, pp. 2143–2150, Jul. 2004. doi: https://doi.org/10.1002/app.13354.

[13] KRICHELDORF, H.R., KREISER-SAUNDERS, I., JÜRGENS, C., *et al.*, "Polylactides-synthesis, characterization and medical application", *Macromolecular Symposia*, v. 103, n. 1, pp. 85–102, 1996. doi: https://doi.org/10.1002/masy.19961030110.

[14] HARTMANN, M.H., "High molecular weight polylactic acid polymers", In: Kaplan, D.L. (ed), *Biopolymers from Renewable Resources*, Berlin, Springer, pp. 367–411, 1998. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-03680-8_15.

[15] CARRASCO, F., PAGÈS, P., GÁMEZ-PÉREZ, J., *et al.*, "Processing of poly (lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties", *Polymer Degradation & Stability*, v. 95, n. 2, pp. 116–125, Dec. 2010. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.045.

[16] SUNDAR, N., KUMAR, S.A., PAVITHRA, A., *et al.*, "Studies on semi-crystalline Poly Lactic Acid (PLA) as a hydrophobic coating material on kraft paper for imparting barrier properties in coated abrasive applications", *Progress in Organic Coatings*, v. 145, pp. 105682, Apr. 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105682.

[17] ZHANG, L., GOH, S.H., LEE, S.Y., "Miscibility and crystallization behaviour of poly (L-lactide)/poly (p-vinylphenol) blends", *Polymer*, v. 39, n. 20, pp. 4841–4847, Sep. 1998. doi: https://doi.org/10.1016/S0032-3861(97)10167-7.

[18] DI LORENZO, M.L., "Crystallization behavior of poly (L-lactic acid)", *European Polymer Journal*, v. 41, n. 3, pp. 569–575, Dec. 2005. doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.020.

[19] KÜMMERER, K., "Sustainable from the very beginning: rational design of molecules by life cycle engineering as an important approach for green pharmacy and green chemistry", *Green Chemistry*, v. 9, n. 8, pp. 899–907, Apr. 2007. doi: https://doi.org/10.1039/b618298b.

[20] RAQUEZ, J.M., NABAR, Y., NARAYAN, R., *et al.*, "New developments in biodegradable starch-based nanocomposites", *International Polymer Processing*, v. 22, n. 5, pp. 463–470, May. 2007. doi: https://doi.org/10.3139/217.2076.

[21] RASTON, C., „Renewables and green chemistry", *Green Chemistry*, v. 7, n. 2, pp. 57, 2005. doi: https://doi.org/10.1039/b500769k.

[22] JENCK, J.F., AGTERBERG, F., DROESCHER, M.J., "Products and processes for a sustainable chemical industry: a review of achievements and prospects", *Green Chemistry*, v. 6, n. 11, pp. 544–556, Oct. 2004. doi: https://doi.org/10.1039/b406854h.

[23] STEWART, R., "Going green: eco-friendly materials and recycling on growth paths", *Plastics Engineering*, v. 64, n. 1, pp. 16–24, Jan. 2008. doi: https://doi.org/10.1002/j.1941-9635.2008.tb00275.x.

[24] SASTRI, V.R., "Commodity Thermoplastics: Polyvinyl Chloride, Polyolefins, and Polystyrene", In: Sastri, V.R. (ed), *Plastics in Medical Devices*, 1 ed., chapter 6, Chadds Ford, USA, Elsevier, 2014. doi: https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3201-2.00006-9.

[25] SPINU, M., JACKSON, C., KEATING, M.Y., *et al.*, "Material design in poly (lactic acid) systems: block copolymers, star homo-and copolymers, and stereocomplexes", *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, v. 33, n. 10, pp. 1497–1530, Dec. 1996. doi: https://doi.org/10.1080/10601329608014922.

[26] AL-ITRY, R., LAMNAWAR, K., MAAZOUZ, A., "Abderrahim. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy", *Polymer Degradation & Stability*, v. 97, n. 10, pp. 1898–1914, Jul. 2012. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.06.028.

[27] TAUBNER, V., SHISHOO, R., "Influence of processing parameters on the degradation of poly (L-lactide) during extrusion", *Journal of Applied Polymer Science*, v. 79, n. 12, pp. 2128–2135, Mar. 2001. doi: https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010321)79:12<2128::AID-APP1020>3.0.CO,2-#.

[28] ARRUDA, L.C., MAGATON, M., BRETAS, R.E.S., *et al.*, "Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends", *Polymer Testing*, v. 43, pp. 27–37, Feb. 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.02.005.

[29] WACHSEN, O., PLATKOWSKI, K., REICHERT, K.H., "Thermal degradation of poly-l-lactide—studies on kinetics, modelling and melt stabilisation", *Polymer Degradation & Stability*, v. 57, n. 1, pp. 87–94, Oct. 1997. doi: https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00226-1.

[30] PALADE, L., LEHERMEIER, H.J., DORGAN, J.R., "Melt rheology of high L-content poly (lactic acid)", *Macromolecules*, v. 34, n. 5, pp. 1384–1390, Nov. 2001. doi: https://doi.org/10.1021/ma001173b.

[31] KOPINKE, F.D., REMMLER, M., MACKENZIE, K., *et al.*, "Thermal decomposition of biodegradable polyesters—II. Poly (lactic acid)", *Polymer Degradation & Stability*, v. 53, n. 3, pp. 329–342, Mar. 1996. doi: https://doi.org/10.1016/0141-3910(96)00102-4.

[32] ZAHARESCU, T., RÂPĂ, M., MARINESCU, V., "Chemiluminescence kinetic analysis on the oxidative degradation of poly (lactic acid)", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 128, n. 1, pp. 185–191, Nov. 2017. doi: https://doi.org/10.1007/s10973-016-5944-2.

[33] SIGNORI, F., COLTELLI, M., BRONCO, S., "Thermal degradation of poly (lactic acid)(PLA) and poly (butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT) and their blends upon melt processing", *Polymer Degradation & Stability*, v. 94, n. 1, pp. 74–82, 2009. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.10.004.

[34] NAJAFI, N., HEUZEY, M.C., CARREAU, P.J., *et al.*, "Control of thermal degradation of polylactide (PLA)-clay nanocomposites using chain extenders", *Polymer Degradation & Stability*, v. 97, n. 4, pp. 554–565, Jan. 2012. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.01.016.

[35] DRUMRIGHT, R.E., GRUBER, P.R., HENTON, D.E., "Polylactic acid technology", *Advanced Materials*, v. 12, n. 23, pp. 1841–1846, Dec. 2000. doi: https://doi.org/10.1002/1521-4095(200012)12:23<1841::AID-ADMA1841>3.0.CO,2-E.

[36] AL-ITRY, R., LAMNAWAR, K., MAAZOUZ, A., "Reactive extrusion of PLA, PBAT with a multi-functional epoxide: Physico-chemical and rheological properties", *European Polymer Journal*, v. 58, pp. 90–102, Jun. 2014. doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.06.013.

[37] ZHANG, N., WANG, Q., REN, J., *et al.*, "Preparation and properties of biodegradable poly (lactic acid)/ poly (butylene adipate-co-terephthalate) blend with glycidyl methacrylate as reactive processing agent", *Journal of Materials Science*, v. 44, n. 1, pp. 250–256, Nov. 2009. doi: https://doi.org/10.1007/s10853-008-3049-4.

[38] WANG, M., FAVI, P., CHENG, X., *et al.*, "Cold atmospheric plasma (CAP) surface nanomodified 3D printed polylactic acid (PLA) scaffolds for bone regeneration", *Acta Biomaterialia*, v. 46, pp. 256–265, Sep. 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.09.030. PubMed PMID: 27667017.

[39] TURALIJA, M., BISCHOF, S., BUDIMIR, A., *et al.*, "Antimicrobial PLA films from environment friendly additives", *Composites. Part B, Engineering*, v. 102, pp. 94–99, Jul. 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.07.017.

[40] CICALA, G., GIORDANO, D., TOSTO, C., *et al.*, "Polylactide (PLA) filaments a biobased solution for additive manufacturing: Correlating rheology and thermomechanical properties with printing quality", *Materials (Basel)*, v. 11, n. 7, pp. 1191, Jul. 2018. doi: https://doi.org/10.3390/ma11071191. PubMed PMID: 29997365.

[41] DA SILVA, D., KADURI, M., POLEY, M., *et al.*, "Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems", *Chemical Engineering Journal*, v. 340, pp. 9–14, Jan. 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.010. PubMed PMID: 31384170.

(cc) BY

[42] KIM, M.Y., KIM, C., MOON, J., *et al.*, "Polymer film-based screening and isolation of polylactic acid (PLA)-degrading microorganisms", *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 27, n. 2, pp. 342–349, Nov. 2017. doi: https://doi.org/10.4014/jmb.1610.10015. PubMed PMID: 27840398.

[43] SONG, J.J., CHANG, H.H., NAGUIB, H.E., "Biocompatible shape memory polymer actuators with high force capabilities", *European Polymer Journal*, v. 67, pp. 186–198, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.03.067.

[44] WACH, R.A., WOLSZCZAK, P., ADAMUS-WLODARCZYK, A., "Enhancement of mechanical properties of FDM-PLA parts via thermal annealing", *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 303, n. 9, pp. 1800169, 2018. doi: https://doi.org/10.1002/mame.201800169.

[45] PILLIN, I., MONTRELAY, N., GROHENS, Y., "Thermo-mechanical characterization of plasticized PLA: Is the miscibility the only significant factor?", *Polymer*, v. 47, n. 13, pp. 4676–4682, May. 2006. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.04.013.

[46] VALERGA, A.P., BATISTA, M., SALGUERO, J., *et al.*, "Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts", *Materials*, v. 11, n. 8, pp. 1322, Jul. 2018. doi: https://doi.org/10.3390/ma11081322. PubMed PMID: 30065153.

[47] YAO, T., YE, J., DENG, Z., *et al.*, "Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses", *Composites. Part B, Engineering*, v. 188, pp. 107894, Feb. 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107894.

[48] CHUA, C.K., LEONG, K.F., AN, J., "Introduction to rapid prototyping of biomaterials", In: Narayan, E. (ed), *Rapid Prototyping of Biomaterials*, Sawston, Woodhead Publishing, pp. 1–15, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00001-0.

[49] GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., *et al.*, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering", *Computer Aided Design*, v. 69, pp. 65–89, 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001.

[50] NGO, T.D., KASHANI, A., IMBALZANO, G., *et al.*, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Composites. Part B, Engineering*, v. 143, pp. 172–196, Feb. 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

[51] BHUSHAN, B., CASPERS, M., "An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication", *Microsystem Technologies*, v. 23, n. 4, pp. 1117–1124, Mar. 2017. doi: https://doi.org/10.1007/s00542-017-3342-8.

[52] WELLER, C., KLEER, R., PILLER, F.T., "Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited", *International Journal of Production Economics*, v. 164, pp. 43–56, Mar. 2015. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020.

[53] MELLOR, S., HAO, L., ZHANG, D., "Additive manufacturing: A framework for implementation", *International Journal of Production Economics*, v. 149, pp. 194–201, Jul. 2014. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008.

[54] DILBEROGLU, U.M., GHAREHPAPAGH, B., YAMAN, U., *et al.*, "The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, v. 11, pp. 545–554, Jun. 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148.

[55] FICKO, M., DRSTVENŠEK, I., BREZOČNIK, M., *et al.*, "Prediction of total manufacturing costs for stamping tool on the basis of CAD-model of finished product", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 164, pp. 1327–1335, May. 2005. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.013.

[56] GUL, J.Z., SAJID, M., REHMAN, M.M., *et al.*, "3D printing for soft robotics-a review", *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 19, n. 1, pp. 243–262, Mar. 2018. doi: https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1431862. PubMed PMID: 29707065.

[57] ZHANG, F., WEI, M., VISWANATHAN, V.V., *et al.*, "3D printing technologies for electrochemical energy storage", *Nano Energy*, v. 40, pp. 418–431, Aug. 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.037.

[58] GROSS, B., LOCKWOOD, S.Y., SPENCE, D.M., "Recent advances in analytical chemistry by 3D printing", *Analytical Chemistry*, v. 89, n. 1, pp. 57–70, Nov. 2017. doi: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b04344. PubMed PMID: 28105825.

[59] TRENFIELD, S.J., AWAD, A., GOYANES, A., *et al.*, "3D printing pharmaceuticals: drug development to frontline care", *Trends in Pharmacological Sciences*, v. 39, n. 5, pp. 440–451, May. 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.tips.2018.02.006. PubMed PMID: 29534837.

[60] SAVASTANO, M., AMENDOLA, C., D'ASCENZO, F., *et al.*, "3-D printing in the spare parts supply chain: an explorative study in the automotive industry", In: Caporarello, L., Cesaroni, F., Giesecke, R., Missikoff, M. (eds), *Digitally Supported Innovation*, Cham, Springer, pp. 153–170, 2016. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-40265-9_11.

[61] GODOI, F.C., PRAKASH, S., BHANDARI, B.R., "3d printing technologies applied for food design: Status and prospects", *Journal of Food Engineering*, v. 179, pp. 44–54, Feb. 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025.

[62] LERMAN, M.J., LEMBONG, J., GILLEN, G., *et al.*, "3D printing in cell culture systems and medical applications", *Applied Physics Reviews*, v. 5, n. 4, pp. 041109, Dec. 2018. doi: https://doi.org/10.1063/1.5046087. PubMed PMID: 32550961.

[63] PLACONE, J.K., ENGLER, A.J., "Recent advances in extrusion-based 3D printing for biomedical applications", *Advanced Healthcare Materials*, v. 7, n. 8, pp. e1701161, Jan. 2018. doi: https://doi.org/10.1002/adhm.201701161. PubMed PMID: 29283220.

[64] MURR, L.E., "Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication", *Journal of Materials Science and Technology*, v. 32, n. 10, pp. 987–995, May. 2016. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.08.011.

[65] ROSSI, S., BENAGLIA, M., BRENNA, D., *et al.*, "Three dimensional (3D) printing: A straightforward, user-friendly protocol to convert virtual chemical models to real-life objects", *Journal of Chemical Education*, v. 92, n. 8, pp. 1398–1401, Jul. 2015. doi: https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00168.

[66] SOLOMON, I.J., SEVVEL, P., GUNASEKARAN, J., "A review on the various processing parameters in FDM", *Materials Today: Proceedings*, v. 37, pp. 509–514, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484.

[67] DEY, A., YODO, N., "A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 3, n. 3, pp. 64, Jul. 2019. doi: https://doi.org/10.3390/jmmp3030064.

[68] FENG, L., WANG, Y., WEI, Q., "PA12 powder recycled from SLS for FDM", *Polymers*, v. 11, n. 4, pp. 727, Apr. 2019. doi: https://doi.org/10.3390/polym11040727. PubMed PMID: 31013575.

[69] ASHTANKAR, K.M., KUTHE, A.M., RATHOUR, B.S., "Effect of build orientation on mechanical properties of rapid prototyping (fused deposition modelling) made acrylonitrile butadiene styrene (abs) parts", In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Diego, California, 15–21 November 2013. doi: https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63146.

[70] DE TORO, E., SOBRINO, J.C., MARTÍNEZ, A.M., *et al.*, "Analysis of the influence of the variables of the Fused Deposition Modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide", *Procedia Manufacturing*, v. 41, pp. 731–738, Mar. 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.064.

[71] WU, W., GENG, P., LI, G., *et al.*, "Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS", *Materials*, v. 8, n. 9, pp. 5834–5846, Sep. 2015. doi: https://doi.org/10.3390/ma8095271. PubMed PMID: 28793537.

[72] 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, pp. 107–122, Apr. 2000. doi: https://doi.org/10.1080/10426910008912976.

[73] KAČERGIS, L., MITKUS, R., SINAPIUS, M., "Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures", *Smart Materials and Structures*, v. 28, n. 10, pp. 105042, Sep. 2019. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab3d18.

[74] DAVE, H.K., PATADIYA, N.H., PRAJAPATI, A.R., *et al.*, "Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 235, n. 10, pp. 1811–1827, 2019. doi: https://doi.org/10.1177/0954406219856383.

[75] GEBISA, A.W., LEMU, H.G., "Investigating effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment", *Materials*, v. 11, n. 4, pp. 500, Mar. 2018. doi: https://doi.org/10.3390/ma11040500. PubMed PMID: 29584674.

[76] SOMIREDDY, M., CZEKANSKI, A., SINGH, C.V., "Development of Constitutive Material Model of 3D Printed Structure via FDM", *Materials Today. Communications*, v. 15, pp. 143–152, Mar. 2018. doi: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.03.004.

[77] LIMA, L.F.M., SHIMANO, V.A.S., MASSAO, M., "Influência da temperatura ambiente no comportamento mecânico do PLA utilizado em manufatura aditiva", *Matéria*, v. 27, n. 4, pp. e20220177, 2022. doi: https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0177.

[78] JACQUES, R.C., LESSA, C.R.L., "Avaliação da resistência à flexão de peças de PLA produzidas por manufatura aditiva", *Matéria*, v. 29, n. 4, pp. e20240532, 2024. doi: https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0532.

[79] PARK, S., ANDREU, A., KIM, I., *et al.*, "Continuously varied infill pattern (ConVIP): improvement of mechanical properties and printing speed of fused filament fabrication (FFF) 3D printing", *Journal of Materials Research and Technology*, v. 18, pp. 1055–1069, 2022. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.133.

[80] CHOWDHURY, S., MANDAL, A., BANIK, A., "Process parameter optimisation and characterisation of fused deposition modelling-polylactic acid (FDM-PLA) parts", *Plastics, Rubber and Composites*, v. 53, n. 5–7, pp. 125–136, 2024. doi: https://doi.org/10.1177/14658011241263214.

[81] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, West Conshohocken, ASTM International, 2014. doi: https://doi.org/10.1520/D0638-14.

[82] NATUREWORKSLLC, https://www.natureworksllc.com/~/media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_3D850_monofilament_pdf.pdf?la=en, acessado em março de 2021.

[83] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, West Conshohocken, ASTM International, 2017. doi: https://doi.org/10.1520/D0790-17.

[84] MACEDO, R.Q., FERREIRA, R.T.L., "Determination of mechanical properties of FFF 3D printed material by assessing void volume fraction, cooling rate and residual thermal stresses", *Rapid Prototyping Journal*, v. 25, n. 10, pp. 1661–1683, Nov. 2019. doi: https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2018-0192.

[85] SUN, Q., RIZVI, G.M., BELLEHUMEUR, C.T., *et al.*, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments", *Rapid Prototyping Journal*, v. 14, n. 2, pp. 72–80, Mar. 2008. doi: https://doi.org/10.1108/13552540810862028.

[86] BELLEHUMEUR, C., LI, L., SUN, Q., *et al.*, "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process", *Journal of Manufacturing Processes*, v. 6, n. 2, pp. 170–178, Nov. 2004. doi: https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7.

[87] ZHANG, W., WU, A.S., SUN, J., *et al.*, "Characterization of residual stress and deformation in additively manufactured ABS polymer and composite specimens", *Composites Science and Technology*, v. 150, n. 1, pp. 102–110, Jul. 2017. doi: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.017.

[88] RODRIGUEZ, J.F., THOMAS, J.P., RENAUD, J.E., "Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadienestyrene materials", *Rapid Prototyping Journal*, v. 6, n. 3, pp. 175–186, 2000. doi: https://doi.org/10.1108/13552540010337056.

[89] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *ISO/ASTM 52921:2013(E), Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies*, Geneva, ISO, 2013.

[90] LAY, M., THAJUDIN, N.L.N., HAMID, Z.A.A., *et al.*, "Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding", *Composites. Part B, Engineering*, v. 176, pp. 107341, Aug. 2019. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107341.

[91] VAN DE VELDE, K., KIEKENS, P., "Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications", *Polymer Testing*, v. 21, n. 4, pp. 433–442, Sep. 2001. doi: https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00107-6.

[92] PRIYA, M.S., NARESH, K., JAYAGANTHAN, R., *et al.*, "A comparative study between in-house 3D printed and injection molded ABS and PLA polymers for low-frequency applications", *Materials Research Express*, v. 6, n. 8, pp. 085345, Jun. 2019. doi: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2776.

[93] NUGROHO, A., ARDIANSYAH, R., RUSITA, L., *et al.*, "Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing", *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1130, pp. 012017, Nov. 2018. doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012017.

(cc) BY

[94] MOTAPARTI, K.P., TAYLOR, G., LEU, M.C., *et al.*, "Experimental investigation of effects of build parameters on flexural properties in fused deposition modelling parts", *Virtual and Physical Prototyping*, v. 12, n. 3, pp. 207–220, Apr. 2017. doi: https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1314117.

[95] AHN, S.H., MONTERO, M., ODELL, D., *et al.*, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", *Rapid Prototyping Journal*, v. 8, n. 4, pp. 248–257, 2020. doi: https://doi.org/10.1108/13552540210441166.