



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE PRELIMINAR DA UTILIZAÇÃO DE UM PREENCHIMENTO TIPO
“HAT” NAS PROPRIEDADES MECANICAS DE CORPOS IMPRESSOS EM 3D VIA
FDM UTILIZANDO PLA.**

GABRIEL LACERDA SANTIAGO

RECIFE

2025

GABRIEL LACERDA SANTIAGO

**ANÁLISE PRELIMINAR DA UTILIZAÇÃO DE UM PREENCHIMENTO TIPO
“HAT” NAS PROPRIEDADES MECANICAS DE CORPOS IMPRESSOS EM 3D VIA
FDM UTILIZANDO PLA.**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Justo Emilio Alvarez Jacobo

RECIFE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santiago, Gabriel Lacerda.

Análise preliminar da utilização de um preenchimento tipo “hat” nas propriedades mecânicas de corpos impressos em 3d via Fdm utilizando Pla. / Gabriel Lacerda Santiago. - Recife, 2025.

38 : il., tab.

Orientador(a): Justo Emilio Alvarez Jacobo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Impressão 3D. 2. FDM. 3. hat. 4. PLA. 5. Ensaio de tração. 6. ASTM D638-15. I. Alvarez Jacobo, Justo Emilio . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

GABRIEL LACERDA SANTIAGO

**ANÁLISE PRELIMINAR DA UTILIZAÇÃO DE UM PREENCHIMENTO TIPO
“HAT” NAS PROPRIEDADES MECANICAS DE CORPOS IMPRESSOS EM 3D VIA
FDM UTILIZANDO PLA.**

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de
Mecânica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 14/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Justo Emilio Alvarez Jácomo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Antônio Marques Da Costa Soares Junior (Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Laertty Moraes Cavalcante (Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise preliminar do uso de um padrão de preenchimento aperiódico, conhecido como *hat*, nas propriedades mecânicas de corpos de prova em ácido polilático (PLA) produzidos por manufatura aditiva via *Fused Deposition Modeling* (FDM). O polígono *hat*, recentemente descoberto, foi modelado através do *Computer-Aided Design* (CAD) e implementado como padrão interno com diferentes percentuais de preenchimento (35%, 50%, 70% e 100%). Foram impressos corpos de prova conforme a norma ASTM D638-14 e realizados ensaios de tração para determinar módulo de elasticidade, tensão última de resistência (UTS) e deformação na fratura. Os resultados foram comparados com dados da literatura, especialmente com Harpool et al. (2021), que analisaram padrões convencionais como: hexagonal, retangular e diamante. Observou-se que, no preenchimento de 100%, o padrão *hat* apresentou desempenho semelhante ao padrão de linhas longitudinais, porém com maior ductilidade. Já em densidades mais baixas, o desempenho foi inferior aos padrões tradicionais. Uma das possíveis causas seriam as descontinuidades internas na geometria do preenchimento, geradas pela forma como se constrói “artificialmente” o preenchimento. O estudo não é concluinte, e indica que outros testes deverão ser realizados. Acredita-se que padrões aperiódicos, como o do tipo *hat*, tem potencial estrutural, mas requerem algumas otimizações adicionais para aplicações de preenchimento na impressão 3D.

Palavras-chave: impressão 3D, FDM, PLA, manufatura aditiva, preenchimento, ensaio de tração, ASTM D638-14, *hat*.

ABSTRACT

This work presents a preliminary analysis of the use of an aperiodic infill pattern, known as the hat, on the mechanical properties of Polylactic Acid (PLA) specimens produced by additive manufacturing via Fused Deposition Modeling (FDM). The recently discovered hat polygon was modeled with Computer-Aided Design (CAD) and implemented as an internal pattern with different infill percentages (35%, 50%, 70%, and 100%). Specimens were printed in accordance with ASTM D638-14, and tensile tests were carried out to determine the modulus of elasticity, ultimate tensile strength (UTS), and fracture strain. The results were compared with data from the literature, particularly Harpool et al. (2021), who analyzed conventional patterns such as: hexagonal, rectangular, and diamond. It was observed that, at 100% infill, the hat pattern showed performance similar to the longitudinal line pattern, but with greater ductility. At lower densities, however, the performance was inferior to traditional patterns. One possible cause could be the internal discontinuities in the infill geometry, generated by the way the infill is “artificially” constructed. The study is not conclusive and indicates that further testing will be needed. Aperiodic patterns, such as the hat pattern, are believed to have structural potential, but require some additional optimization for infill applications in 3D printing.

Keywords: 3D printing, FDM, PLA, additive manufacturing, infill, tensile testing, ASTM D638-14, hat.

SUMÁRIO

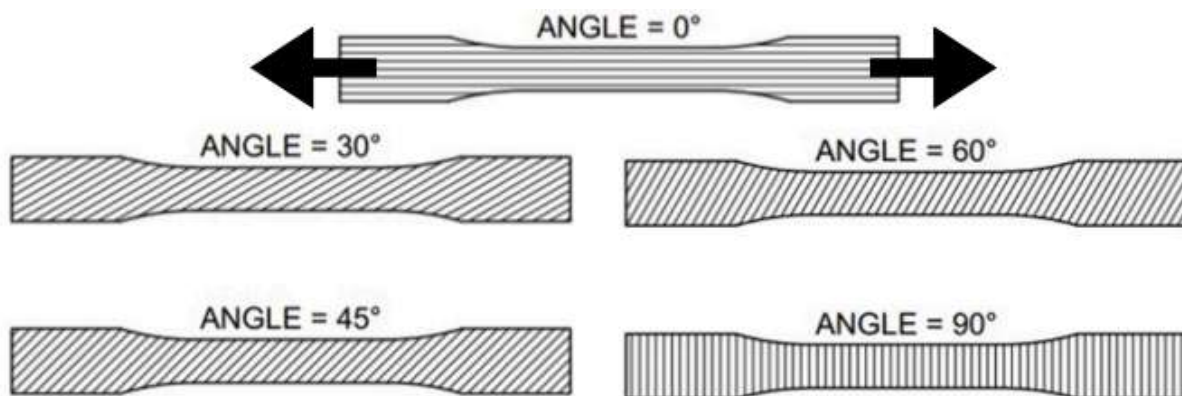
1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	IMPRESSÃO 3D	10
2.2	TÉCNICAS PARA IMPRESSÕES 3D	10
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DE OBJETOS IMPRESSOS EM 3D.	12
2.3.1	Efeito da geometria	12
2.3.2	Material	18
2.3.3	Parâmetros de impressão	18
2.4	DESCOBERTA DE NOVOS POLÍGONOS	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	MODELAGEM EM CAD E FATIAMENTO	22
3.2	ENSAIOS DESTRUTIVOS PARA POLÍMEROS	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	33
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva tem sido amplamente utilizada no desenvolvimento de produtos, permitindo a fabricação de protótipos e peças funcionais com flexibilidade geométrica e uso eficiente de materiais. O mercado global de manufatura aditiva foi avaliado em US\$ 20,37 bilhões em 2023 e está projetado para atingir US\$ 88,2 bilhões até 2030, registrando um crescimento anual acumulado de 23,5% (GRAND VIEW RESEARCH, 2024). Outra projeção estima que o mercado global alcance US\$ 76,17 bilhões até 2030, com um crescimento anual composto de 20,8% (RESEARCH AND MARKETS, 2024). Esses números refletem o quanto as indústrias estão aderindo à impressão 3D em setores como automotivo, aeroespacial e de saúde, reforçando seu papel como tecnologia economicamente estratégica para o futuro da manufatura.

No entanto, apesar dos benefícios mencionados, a manufatura aditiva, em especial a impressão 3D, produz objetos com características anisotrópicas, ou seja, cujas propriedades mecânicas variam conforme a direção de impressão. Além disso, a possibilidade de empregar diferentes padrões e densidades de preenchimento interno influenciam diretamente o desempenho estrutural. Como resultado, esses objetos tendem a apresentar propriedades mecânicas limitadas quando comparados àqueles fabricados por processos de manufatura subtrativa, que geralmente oferecem maior uniformidade e resistência. Assim, torna-se necessário investigar o desenvolvimento de novas estruturas de preenchimento para impressão 3D, visando aprimorar a capacidade das peças de suportar esforços mecânicos. Estudos indicam que a escolha da direção de impressão, do padrão e densidade de preenchimento interno influenciam diretamente a resistência mecânica dos objetos fabricados por manufatura aditiva para as mesmas condições de impressão (material, tipo de impressora, temperatura (*hot-end* e *bed*), etc.). (HARPOOL et al., 2021; JOHNSON et al., 2017). Na Figura 1, podem ser visualizados vários corpos de prova, onde a direção da fibra, que é depositada utilizando a tecnologia de Modelagem por Deposição Fundida ou FDM (*Fused Deposition Modeling*), varia seu ângulo entre perpendicular ($\text{ângulo} = 90^\circ$) ao eixo de esforço até paralelo ao mesmo ($\text{ângulo} = 0^\circ$). Este ângulo irá impactar na resistência do corpo de prova, devido à maior ou menor absorção da carga pelas fibras.

Figure 1 - Direções da fibra ao longo de um corpo de prova.



Fonte – Grant (2021).

Neste contexto, este estudo investiga o comportamento mecânico de corpos de prova impressos em 3D utilizando um preenchimento baseado em um polígono aperiódico, conhecido como “*the hat*” (SMITH et al., 2023). Polígonos aperiódicos possuem a característica de preencher o plano sem apresentar simetria translacional, o que pode resultar em padrões estruturais com novas distribuições de carga e resistência. Desta forma, espera-se também estudar tipos de preenchimentos que “não dependam” da direção da fibra, visto que a estrutura interna não se repete de forma “padronizada”. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver e testar um novo padrão de preenchimento para impressoras 3D, avaliando sua resistência mecânica em comparação com geometrias convencionais.

Portanto, espera-se que após o desenvolvimento dos protótipos e dos testes, as análises apontem se existe algum tipo de ganho (ou diminuição) na resistência mecânica dos corpos de prova, contribuindo para futuros avanços em relação ao entendimento da falha devida ao padrão de preenchimento dentro da impressão 3D.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho se propõe testar um novo tipo de preenchimento para impressão 3D, visando entender a resistência a tração dos corpos de prova frente a modelos convencionais.

Para tanto foram estabelecidos como objetivos específicos:

- a) Investigar a aplicação da prototipagem rápida na fabricação de peças com diferentes padrões de preenchimento;
- b) Verificar e comparar os tipos de preenchimentos convencionais utilizados em impressão 3D e seus efeitos na resistência mecânica em artigos conhecidos;
- c) Explorar o uso de polígonos aperiódicos, especificamente o mono ladrilho *hat*, como alternativa para preenchimentos estruturais em manufatura aditiva;
- c) Modelar corpos de prova em software CAD, implementando padrões baseados no polígono *hat*;
- d) Realizar ensaios mecânicos e comparar os resultados obtidos entre preenchimentos convencionais e o padrão baseado no *hat*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa, iremos abordar pontos chaves para aprofundamento nos estudos relacionados à impressão 3D e aos testes de tração realizados em corpos de prova, entendendo o funcionamento, técnicas comuns, materiais usados e as propriedades conhecidas, com o objetivo de enriquecer o presente estudo por meio da análise comparativa com artigos consolidados no meio acadêmico.

2.1 IMPRESSÃO 3D

A prototipagem rápida revolucionou o desenvolvimento de novos produtos ao facilitar a criação de protótipos diretamente a partir de projetos CAD (*Computer-Aided Design*) e desde sua origem na década de 1980, essa tecnologia evoluiu para se tornar um dos pilares da manufatura aditiva, com impacto direto na redução de tempo em peças customizadas e nos custos, além de permitir a fabricação de geometrias complexas que seriam inviáveis por métodos convencionais (Gibson, Rosen e Stucker, 2015).

Ngo et al. (2018) ressaltam que a possibilidade de fabricar peças sob medida impulsionam a inovação ao mesmo tempo em que favorece ganhos em desempenho mecânico e eficiência de materiais. Farzadi et al. (2014) apontam que parâmetros como temperatura de extrusão, velocidade de impressão e taxa de preenchimento influenciam diretamente as propriedades finais dos componentes fabricados, tanto quanto a seleção dos materiais, onde nesse cenário, o PLA (Poliácido Láctico) destaca-se como um dos mais utilizados na impressão 3D, devido à sua biodegradabilidade, baixo custo e bom desempenho mecânico. A resistência de uma peça impressa pode ser modulada por parâmetros como padrão e densidade de preenchimento, temperatura de extrusão e até mesmo fatores externos como cor do filamento e umidade (Wittbrodt e Pearce, 2015), o que amplia seu uso em aplicações mecânicas e biomédicas. A impressão 3D também tem promovido avanços significativos na área da saúde, permitindo a produção de próteses personalizadas, guias cirúrgicos e modelos anatômicos, Hsieh et al. (2015) evidenciam ganhos em precisão em procedimentos cirúrgicos.

2.2 TÉCNICAS PARA IMPRESSÃO 3D

Atualmente, a manufatura aditiva abrange uma variedade de processos, cada um com características e aplicações específicas. Entre os principais métodos destacam-se a Modelagem por Deposição Fundida (FDM - *Fused Deposition Modeling*) no Brasil também conhecida

como Fabricação por Filamento Fundido (FFF - *Fused Filament Fabrication*), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS - *Selective Laser Sintering*), a Fusão Seletiva a Laser (SLM - *Selective Laser Melting*) e a Estereolitografia (SLA - *Stereolithography*), umas das mais antigas, onde se utiliza um feixe de luz ultravioleta para solidificar uma resina líquida fotossensível, camada por camada, até formar a peça final. Cada uma dessas técnicas destacadas acima oferece vantagens distintas em termos de precisão dimensional, acabamento superficial, velocidade de produção e variedade de materiais processáveis, atendendo desde a prototipagem funcional até a produção de peças finais em setores como automotivo, aeroespacial, biomédico e de bens de consumo.

Dentro do espectro da manufatura aditiva, a FDM/FFF, é a técnica mais amplamente utilizada, especialmente no meio acadêmico, em pequenas indústrias e laboratórios de prototipagem. Seu funcionamento baseia-se na extrusão de um filamento termoplástico aquecido, depositado camada por camada sobre uma base de impressão, seguindo trajetórias determinadas por um modelo digital em CAD.

A popularização da FDM/FFF se deve à sua acessibilidade, baixo custo operacional, simplicidade de operação e à diversidade de materiais disponíveis, como PLA, ABS, PETG e TPU. Embora apresente menor precisão dimensional e qualidade superficial em comparação com métodos como SLA ou SLS, a FDM/FFF oferece grande versatilidade para projetos funcionais, desenvolvimento iterativo e produção personalizada de peças.

O desempenho mecânico das peças fabricadas por FDM é altamente dependente dos parâmetros de impressão, tais como:

- Temperatura de extrusão
- Velocidade de impressão
- Altura de camada
- Padrão e densidade de preenchimento (*infill*)
- Número de perímetros (*walls*)
- Orientação de deposição dos filamentos

Esses parâmetros influenciam diretamente a adesão entre camadas, a resistência mecânica, a tenacidade e o comportamento anisotrópico das peças produzidas. Estudos como os de Zhang et al. (2019) e Spoerk et al. (2018) evidenciam que variações na orientação do preenchimento, na geometria interna e no número de perímetros podem provocar alterações significativas na resistência à tração e no impacto das amostras, algo que será mais explorado adiante deste trabalho. Além disso, a incorporação de reforços, aditivos ou variações estruturais internas permite ajustar o desempenho conforme a aplicação desejada.

Apesar das limitações inerentes à deposição camada por camada, como menor resistência Inter laminar e tendência à delaminação sob certos esforços, a FDM continua sendo a técnica preferida para aplicações que exigem agilidade, personalização e viabilidade econômica. Setores como o biomédico, automotivo e de bens de consumo têm se beneficiado da capacidade dessa tecnologia de produzir peças sob demanda, com geometrias complexas, em curtos espaços de tempo.

Assim, o domínio das variáveis que compõem o processo FDM é essencial para projetar peças que atendam a requisitos funcionais específicos. A pesquisa contínua nesse campo, especialmente envolvendo padrões de preenchimento diferenciados, tem contribuído para otimizar a resistência mecânica, reduzir peso e aumentar a eficiência estrutural, tornando a FDM uma tecnologia estratégica na era da manufatura digital.

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE OBJETOS IMPRESSOS EM 3D

Este tópico aborda como diferentes variáveis do processo de impressão 3D influenciam diretamente o desempenho mecânico das peças fabricadas, com foco na técnica FDM/FFF utilizando PLA. São discutidos fatores como a geometria e a densidade do preenchimento (*infill*), orientação de impressão, ângulo de *raster* e parâmetros operacionais como temperatura de extrusão e altura de camada. Além disso, são apresentados resultados de estudos comparativos que evidenciam o impacto dessas variáveis em propriedades como resistência à tração e módulo de elasticidade. A seção também explora o comportamento anisotrópico típico das peças impressas, a influência da orientação das camadas e as limitações interlaminares, reforçando a importância da personalização dos parâmetros para otimizar a funcionalidade e a resistência mecânica dos componentes.

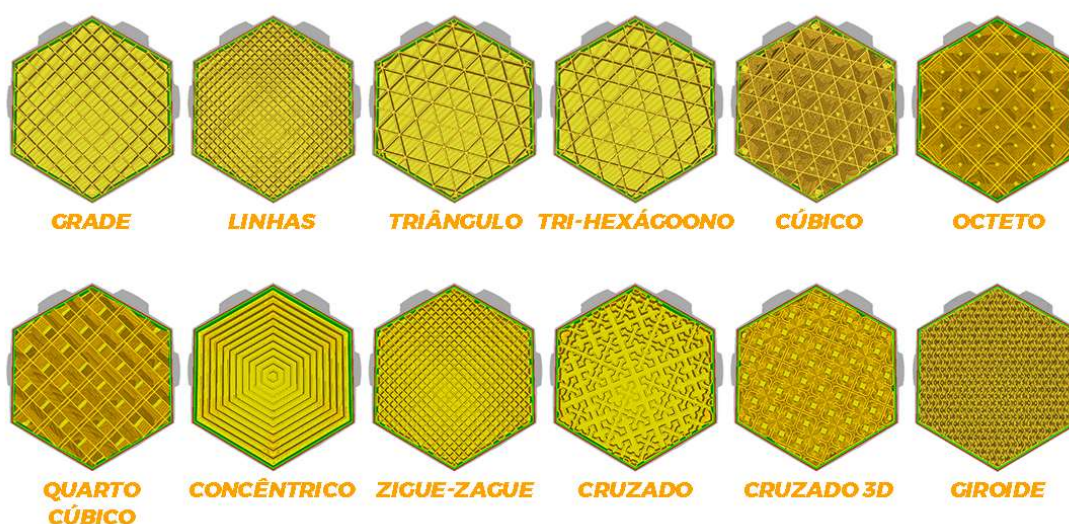
2.3.1 EFEITO DA GEOMETRIA

A geometria do preenchimento é um dos fatores que influenciam o desempenho mecânico de peças impressas por manufatura aditiva. Padrões distintos resultam em diferentes distribuições de vazios, trajetórias de deposição e caminhos de transferência de carga, afetando diretamente a rigidez, a resistência e a estabilidade estrutural das peças. Além disso, a escolha do preenchimento impacta o consumo de material, o tempo de fabricação e o comportamento sob diferentes tipos de solicitação mecânica.

Softwares de fatiamento oferecem diferentes padrões de preenchimento, cada um com características geométricas próprias, como ilustrado na Figura 2. Essas configurações afetam

diretamente a propagação de trincas, a resposta à fadiga e a dissipação de tensões. Harpool et al. (2017) realizaram uma análise comparativa entre quatro padrões de preenchimento: sólido, retangular, hexagonal e diamante, todos aplicados a corpos de prova de PLA com percentual de preenchimento de 15% (exceto o sólido, com 100%). Os ensaios de tração foram conduzidos conforme a norma ASTM D638-14.

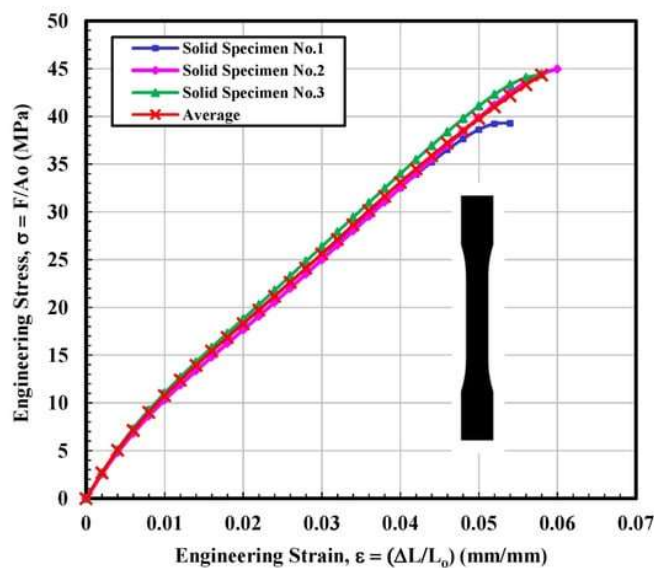
Figura 2 - Tipos de preenchimento para impressoras 3D.



Fonte – Manual do Cura.

O preenchimento sólido, como mostram as curvas de tensão na Figura 3, apresentou comportamento linear-elástico até a ruptura, sem evidência de escoamento. Apesar de garantir boa resistência à tração (UTS de 44,34 MPa), teve o menor módulo de elasticidade (1275,5 MPa) entre os padrões testados, indicando menor rigidez.

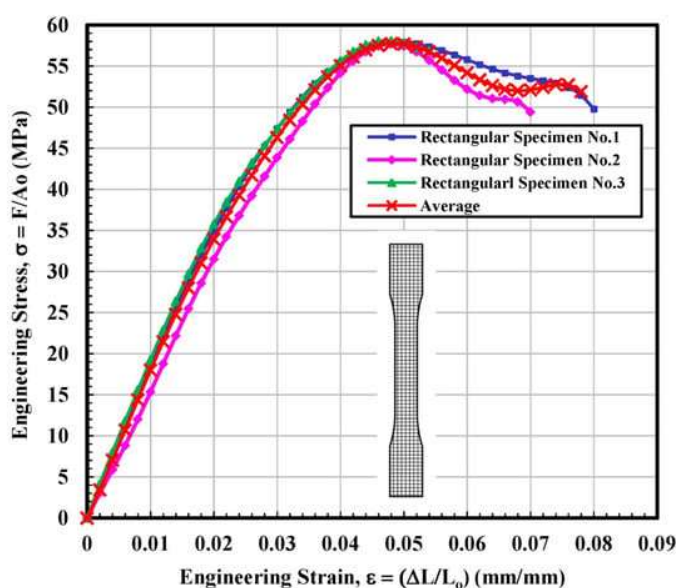
Figura 3 - Curvas tensão-deformação para corpos de prova com preenchimento sólido.



Fonte: HARPOOL, (2017).

O preenchimento retangular (Figura 4) demonstrou um comportamento mais favorável, com melhor redistribuição de tensões internas e retardo na propagação de falhas. Seu módulo de elasticidade (1759,4 MPa) e tensão de escoamento (44,97 MPa) foram superiores ao do padrão sólido, conforme detalhado na Tabela 1, além de apresentar uma UTS elevada (57,74 MPa), mesmo com menor densidade de material.

Figura 4 - Curvas tensão-deformação para corpos de prova com preenchimento retangular.



Fonte: HARPOOL, (2017)

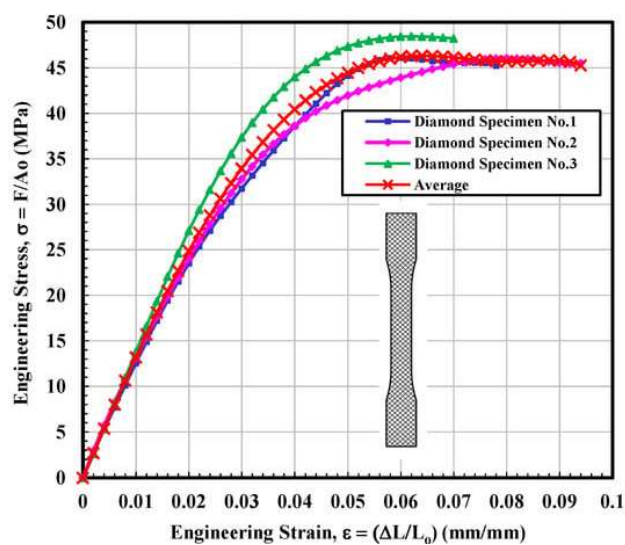
Tabela 1- Propriedades mecânicas.

Propriedade Mecânicas	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Corpos de prova 3	Valores Médios
E (MPa)	1867,4	1509,7	1930,6	1759
$\sigma_y = \sigma_{UTS}$ (MPa)	57,90	57,68	58,09	57,74
ϵ_y (mm/mm)	0,05	0,048	0,048	51,91
ϵ_f (mm/mm)	0,08	0,07	0,054	3,34
M.T (MJ/m ³)	3,51	2,81	2,12	3,34

Fonte: HARPOOL, (2017)

O padrão diamante (Figura 5) apresentou maior variabilidade entre as amostras. A geometria interna menos eficiente resultou em concentrações de tensão e falhas abruptas, como observado na amostra 1. O módulo médio (1300 MPa) e a UTS (46,32 MPa) superaram o preenchimento sólido, mas foram inferiores aos valores do padrão retangular.

Figura 5 - Curvas tensão-deformação para corpos de prova com preenchimento diamante.

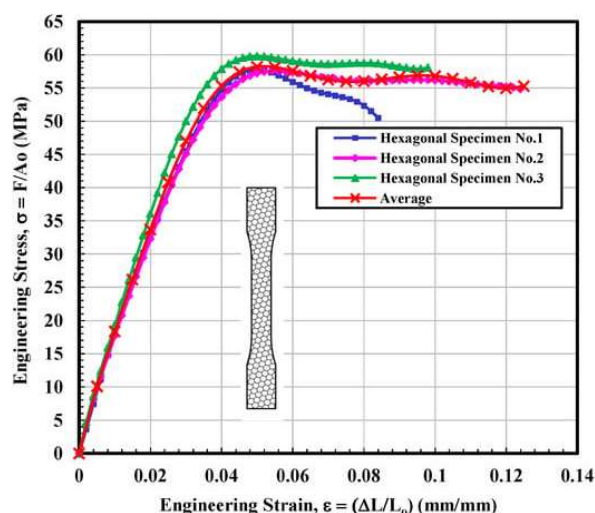


Fonte: HARPOOL, (2017)

O preenchimento hexagonal (Figura 6) apresentou o melhor desempenho mecânico geral, com módulo de elasticidade médio de 2016,8 MPa e UTS de 58,25 MPa. Sua estrutura geométrica favorece a dissipação homogênea das tensões, garantindo rigidez e resistência superiores mesmo em preenchimentos com baixa densidade. A análise comparativa, apresentada na Figura 7, confirma que a geometria do preenchimento exerce influência direta

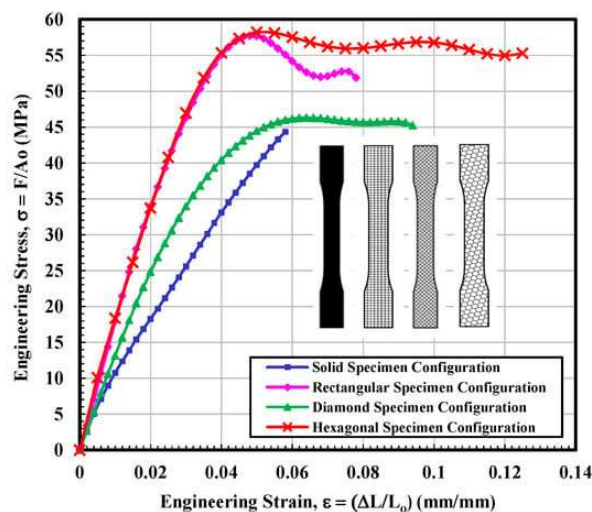
sobre as propriedades mecânicas das peças. O padrão retangular apresenta um bom equilíbrio entre desempenho e eficiência produtiva, enquanto o hexagonal se destaca como o mais resistente entre os padrões analisados. Já o padrão diamante, embora esteticamente complexo, mostrou-se menos eficiente do ponto de vista estrutural.

Figura 6 - Curvas tensão-deformação para corpos de prova com preenchimento hexagonal.



Fonte: HARPOOL, (2017)

Figura 7 - Curvas médias de tensão-deformação para todas as configurações de corpos de prova.



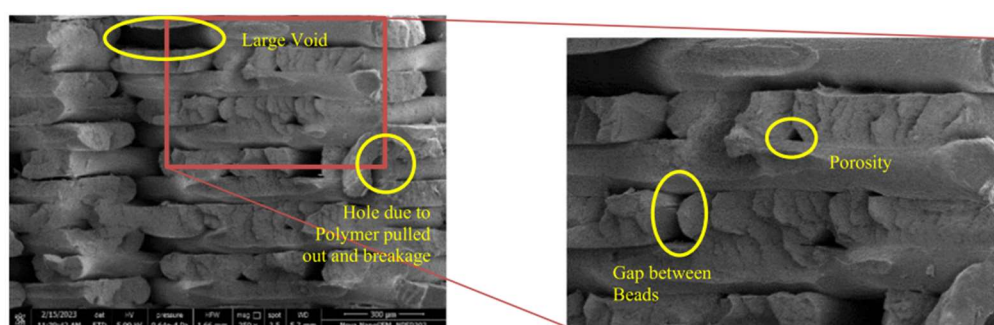
Fonte: HARPOOL, (2017)

A densidade de preenchimento é um dos parâmetros mais influentes no comportamento mecânico de peças produzidas por FDM/FFF, sendo diretamente responsável pela quantidade de material depositado no interior da peça e, conseqüentemente, pela sua capacidade de resistir a esforços mecânicos. Karad et al. (2023) realizaram uma investigação sistemática sobre esse

parâmetro, utilizando corpos de prova de PLA com diferentes percentuais de preenchimento: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os testes de tração revelaram um comportamento crescente das propriedades mecânicas à medida que a densidade aumentava.

De acordo com os resultados, amostras com 20% de preenchimento apresentaram resistência à tração de 25,6 MPa e módulo de elasticidade de 1600 MPa, enquanto aquelas com 100% atingiram valores de 51,2 MPa e 3090 MPa, respectivamente. Essa diferença evidencia que o aumento da densidade proporciona uma maior coesão entre as camadas e uma distribuição de tensões mais eficiente, reduzindo a formação de vazios internos e melhorando a integridade estrutural da peça. Na figura 8 a seguir, podemos avaliar que mesmo com percentual de preenchimento de 100% é possível observar espaços “vazios” na estrutura que “fragilizam” o corpo de prova.

Figura 8 – Foto gerada por SEM (*Scanning Electron Microscope*).



Fonte: Karad et al. (2023)

Além disso, os autores destacam que os maiores ganhos ocorrem entre os níveis intermediários de densidade. A diferença de desempenho entre 80% e 100% de *infill* foi relativamente pequena, indicando a existência de um ponto de saturação, no qual os incrementos de material deixam de trazer benefícios proporcionais em termos de resistência. Esses achados reforçam a necessidade de balancear o uso de material com a exigência mecânica da aplicação, já que *infills* acima de 80% oferecem ganhos marginais, mas com maior tempo de fabricação e custo.

Outro ponto importante a ser considerado na impressão 3D é o papel exercido pelos ângulos de *raster* e de impressão na resistência mecânica das peças. O ângulo de *raster* diz respeito à orientação dos traços de preenchimento realizados em cada camada da peça. Esses traços, chamados de "*rasters*", podem ser dispostos em diferentes direções, por exemplo, 0°, 90° ou $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal da peça, e cada configuração afeta diretamente a maneira como a carga é distribuída internamente. Um *raster* de 0°, por exemplo, posiciona os

filamentos paralelos ao esforço aplicado em um ensaio de tração, favorecendo a resistência. Já um raster de 90° posiciona os filamentos perpendicularmente à carga, resultando em menor resistência, pois a falha tende a ocorrer por delaminação entre as linhas.

Por outro lado, o ângulo de impressão, também chamado de orientação de construção (*build orientation*), refere-se à forma como a peça é posicionada na base da impressora durante a fabricação. Peças impressas na orientação horizontal (*flatwise*) possuem camadas paralelas ao eixo longitudinal, enquanto na orientação vertical (*upright*), as camadas são depositadas perpendicularmente ao eixo da peça. Essa diferença estrutural afeta a adesão entre camadas e a resistência final, sendo que impressões horizontais geralmente apresentam maior desempenho mecânico por favorecerem a integridade dos filamentos ao longo do eixo da carga.

Essa influência foi analisada por Gad et al. (2021), que investigaram a resistência à tração de corpos de prova impressos em PLA com diferentes densidades de preenchimento, ângulos de raster (0°, 45° e 90°) e orientações de impressão (*flatwise*, *on-edge* e *upright*). Os testes mostraram que a configuração com raster em 0° e orientação *flatwise* resultou nos melhores valores de resistência à tração (46,1 MPa) e módulo de elasticidade (3,55 GPa). Já a menor resistência foi observada nas amostras com raster em 90° e orientação *upright*, evidenciando a forte anisotropia induzida pela direção das camadas.

Além disso, o estudo mostrou que a densidade de preenchimento influencia o desempenho, mas os ângulos de raster e impressão têm papel ainda mais relevante quando combinados com geometrias otimizadas. A diferença entre as combinações evidencia que a orientação interna dos filamentos funciona como um mecanismo de reforço estrutural, atuando na dissipação de tensões e na prevenção da propagação de trincas.

2.3.2 MATERIAL

Diversos estudos têm se dedicado a compreender como os parâmetros de impressão influenciam as propriedades mecânicas de peças fabricadas em PLA por meio da técnica de Modelagem por Deposição Fundida (FDM). Zhang et al. (2019) evidenciaram que variáveis como a orientação de deposição dos filamentos e a altura da camada exercem impacto significativo na resistência à tração, reforçando o caráter anisotrópico do material impresso. Spoerk et al. (2018) demonstraram que a inclusão de cargas poliméricas e a escolha adequada do padrão de preenchimento podem elevar substancialmente a tenacidade e a resistência ao impacto das peças, indicando que o desempenho mecânico do PLA pode ser amplamente ajustado.

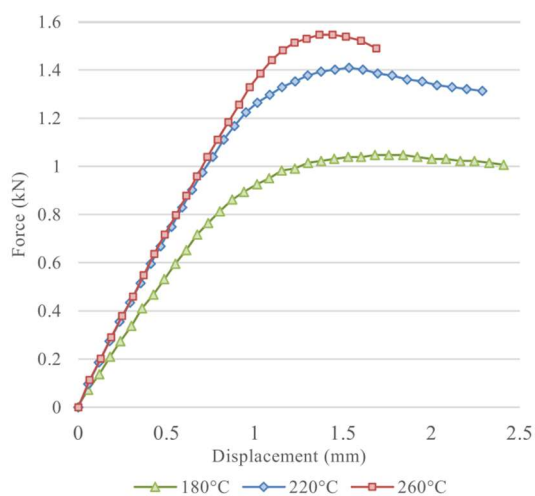
Nesse contexto, o polilático (PLA) tem se consolidado como um dos termoplásticos mais utilizados na impressão 3D, não apenas pela sua biodegradabilidade e viabilidade econômica, mas também pela sua facilidade de processamento e propriedades mecânicas satisfatórias. De acordo com dados de referência, o PLA apresenta densidade média de 1,29 g/cm³, módulo de elasticidade de aproximadamente 3,8 GPa, tensão de escoamento em torno de 44,8 MPa e deformação na ruptura de 23,1%, valores que indicam um comportamento mecânico robusto quando o material é processado adequadamente.

Conforme apontado por Wittbrodt e Pearce (2015), parâmetros como temperatura de extrusão, densidade e geometria de preenchimento são cruciais para otimizar a resistência das peças em PLA, tornando-o aplicável tanto em dispositivos funcionais quanto em soluções biomédicas. Além disso, outros fatores como a cor do filamento, a umidade do ambiente e o uso de tratamentos térmicos pós-impressão têm sido investigados por seu potencial de influenciar diretamente o desempenho final das peças, ampliando ainda mais as possibilidades de uso do material em aplicações que exigem sustentabilidade associada a desempenho técnico.

2.3.3 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

A temperatura de extrusão tem papel fundamental na definição das propriedades mecânicas de peças produzidas por impressão 3D via FDM. No estudo de Zekavat et al. (2018), foram fabricados corpos de prova de PLA variando exclusivamente a temperatura do bico extrusor (180 °C a 260 °C, em intervalos de 10 °C), com todos os demais parâmetros mantidos constantes, incluindo 100% de preenchimento e orientação de camadas alternadas. As curvas força-deslocamento médias apresentadas na Figura 9 do artigo evidenciam diferenças significativas no comportamento mecânico em função da temperatura utilizada. As amostras extrudadas a 260 °C apresentaram maior resistência à tração, mas comportamento mais frágil, com fratura abrupta. Em contraste, as amostras feitas a 180 °C mostraram comportamento mais dúctil, com maior alongamento antes da ruptura, porém com menor resistência final. A condição intermediária (220 °C) combinou razoável resistência com deformação moderada. Esses resultados reforçam que a temperatura de extrusão afeta diretamente a adesão entre camadas e o modo de falha da peça.

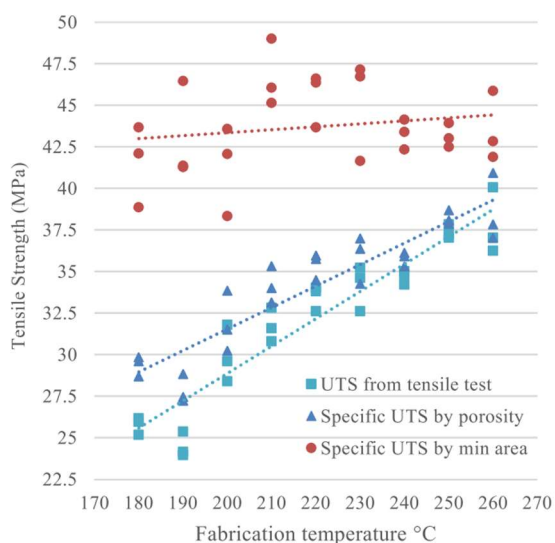
Figure 9 - Curvas força-deslocamento do comportamento em diferentes temperaturas de extrusão.



Fonte: Zekavat et al. (2018)

A microestrutura interna das amostras também foi avaliada no artigo por meio de tomografia computadorizada (CT), conforme apresentado na Figura 10. A análise revelou que as amostras fabricadas em temperaturas mais elevadas apresentam menor porosidade, o que em tese favoreceria a resistência mecânica. No entanto, esse ganho estrutural pode vir acompanhado de um aumento da fragilidade, como observado nas amostras de 260 °C. A figura mostra que a resistência específica (força por unidade de densidade) não cresce linearmente com a redução de porosidade, o que sugere que fatores como tensões residuais e fusão excessiva entre as camadas podem comprometer a tenacidade da peça. A partir disso, conclui-se que o controle da temperatura de extrusão deve considerar o equilíbrio entre resistência e ductilidade, sendo que temperaturas muito altas nem sempre resultam em desempenho global superior.

Figure 10 - Correlação entre porosidade interna e resistência específica.

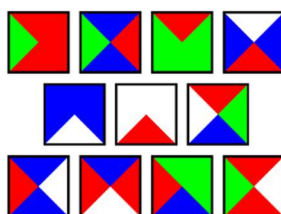


Fonte: Zekavat et al. (2018)

2.4 DESCOBERTA DE NOVOS POLÍGONOS

A busca por um monoladrilho aperiódico, uma única peça capaz de “ladrilhar” o plano exclusivamente de forma não periódica, é um problema que permanece em aberto na matemática e na teoria dos ladrilhamentos há décadas. O estudo dos ladrilhamentos aperiódicos teve início com os ladrilhos de Wang (Figura 11), introduzidos por Hao Wang (1961) no contexto do problema da decisão de Hilbert. Wang formulou a hipótese de que qualquer conjunto de ladrilhos que permitisse um ladrilhamento também admitiria um ladrilhamento periódico, o que tornaria a questão de decidir se um conjunto de ladrilhos pode cobrir o plano um problema definível.

Figura 11 - Ladrilhos de Wang.



Fonte: WANG, (1961).

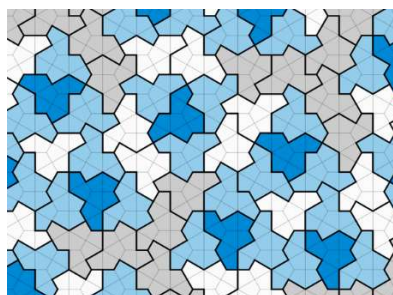
A descoberta de um monoladrilho aperiódico, um único ladrilho capaz de cobrir o plano sem gerar padrões periódicos, ocorreu em novembro de 2022 por David Smith, técnico de impressão aposentado e entusiasta da matemática, residente em Bridlington, Inglaterra conforme descrito na revista *American Scientific*, por Bischoff et al. (2025). Enquanto utilizava o software PolyForm Puzzle Solver para testar diferentes formas geométricas, Smith identificou um polígono de 13 lados que parecia cobrir o plano sem formar padrões repetitivos. Para validar sua observação, ele criou recortes físicos do ladrilho e confirmou que a cobertura do plano era não periódica.

Reconhecendo a relevância de sua descoberta, Smith entrou em contato com Craig S. Kaplan, professor de ciência da computação da Universidade de Waterloo, Canadá, especialista em ladrilhamentos. Para aprofundar a análise, Kaplan convidou o desenvolvedor de software Joseph Samuel Myers e o matemático Chaim Goodman-Strauss para colaborar na investigação das propriedades da nova forma.

No estudo de Smith et al. (2023), essa questão foi abordada com a introdução de um monoladrilho aperiódico, denominado "*hat*" (chapéu) (Figura 12). Esse ladrilho pertence à

classe dos *polykites*, sendo formado pela junção de múltiplos triângulos congruentes. O *hat* apresenta a propriedade de ladrilhar o plano sem permitir padrões periódicos, tornando-se o primeiro monoladrilho aperiódico conhecido. Essa descoberta soluciona um problema aberto na matemática discreta e na teoria dos ladrilhamentos.

Figura 12 - Ladrilhamento com o formato *The Hat*.

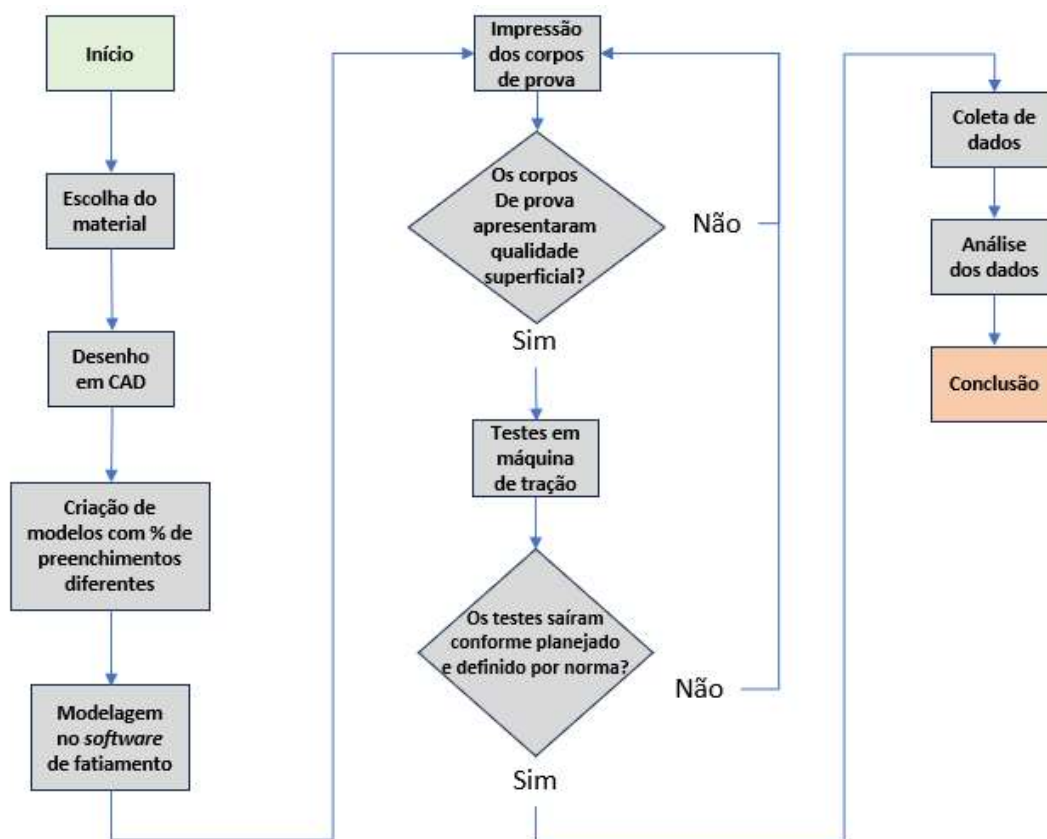


Fonte: SMITH, (2023).

3. METODOLOGIA

Nos tópicos a seguir, será apresentada, de forma estruturada, a condução do projeto, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 13. Este abrange desde a seleção do material a ser utilizado na impressora 3D, passando pela concepção do modelo em software CAD, realização das simulações no software de fatiamento, processo de impressão e execução dos ensaios de tração para cada corpo de prova. Adicionalmente, serão discutidos os resultados obtidos, bem como as observações relevantes e as limitações identificadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Figura 13 - Etapas de desenvolvimento e análise do projeto.



Fonte: Autoria própria.

3.1 MODELAGEM EM CAD E FATIAMENTO

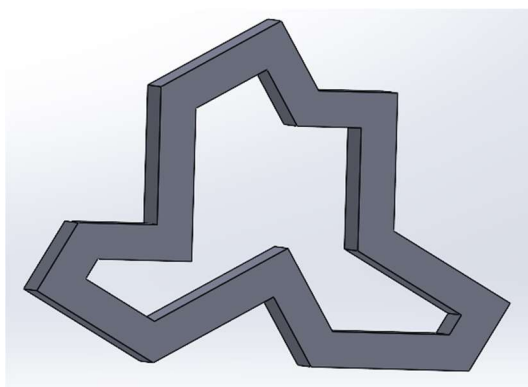
Como falado na seção 2.4 deste trabalho, a forma do polígono que iremos usar como preenchimento nos corpos de prova desse estudo não estão presentes em nenhum software comercial para fatiamento. Um dos mais conhecidos comercialmente é o *UltiMaker Cura*, com algumas versões de atualizações, nele é possível encontrar alguns tipos de preenchimento comumente conhecido linhas, triângulos, cúbicos, *zig zag*, giróide e entre outros. Porém, para utilizarmos esse novo *infill*, fez-se necessário o desenvolvimento através do CAD.

Uma vez concebido em CAD, o software de fatiamento que é responsável por transformar um modelo tridimensional em instruções detalhadas para execução pela impressora. Nesse processo, a ferramenta analisa a geometria do objeto e o divide em múltiplas camadas horizontais extremamente finas, calculando para cada uma delas o trajeto exato que o bico extrusor deverá seguir de forma automática. Essa análise considera parâmetros como altura de camada, padrões e densidade de preenchimento, velocidade de deposição e necessidade de

estruturas de suporte. O fatiamento também define movimentos de deslocamento sem extrusão, otimiza o percurso para reduzir o tempo de impressão e garante que a deposição do material ocorra de forma precisa e consistente, resultando em peças com qualidade dimensional e resistência adequadas ao projeto.

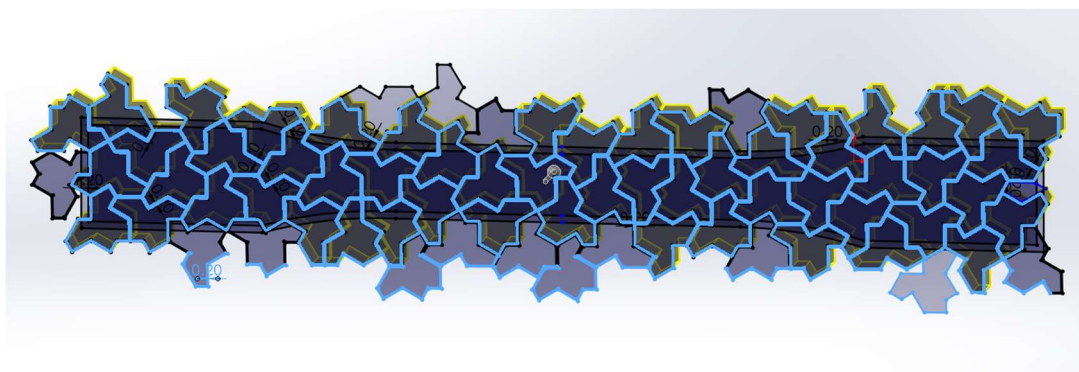
Para a reprodução do padrão *hat*, foi consultado algumas fontes da internet e através de um vídeo no YouTube de Mistercorzi (2023) ensinando como reproduzi-lo em um *software* chamado *Inkscape*, porém foi possível reproduzir em CAD que permitiu exportar em STL, formato para leitura do *UltiMaker Cura*. Após o desenho de um único padrão *hat*, figura 14, se realiza a “montagem” geral do padrão *hat*, onde literalmente foi preciso montar um quebra cabeça, tentando encaixar todas as “peças” em uma área de preenchimento que neste caso foi definida pelas dimensões do corpo de prova, figura 15, previamente definido baseado na ASTM D638-14 conforme abordado posteriormente.

Figura 14 - CAD do padrão tipo *hat*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Montagem do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez com a peça toda preenchida e extrusada, para atender as variações de preenchimento estabelecidos, foi proposto variar a espessura da parede de cada padrão *hat*

(chapéu) do corpo de prova, uma vez que esse parâmetro configurável não estaria disponível dentro do *software* de fatiamento por se tratar de um preenchimento personalizado, dessa forma pode-se chegar na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Variação de preenchimento pela espessura da parede.

Percentual de preenchimento (%)	Espessura da parede do padrão <i>hat</i> (mm)
35	0,22
50	0,53
70	1,00
100	1,25

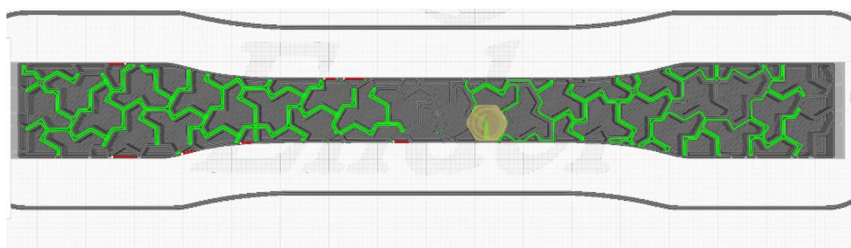
Fonte: Autoria própria.

Com todos os corpos de prova prontos com o percentual ajustado de acordo com o previamente definido, eles foram salvos em formato STL e abertos no *software* de fatiamento, *UltiMaker Cura*, os parâmetros de impressão para os corpos de prova foram da seguinte forma:

- Temperatura de extrusão: 220°C
- Temperatura da cama: 60°C
- Velocidade de impressão: 50mm/s
- Altura de camada: 0,12mm
- Padrão e densidade de preenchimento (*infill*): 35%, 50%, 70% e 100%
- Número de perímetros (*walls*): 3
- Espessura do bico: 0,4mm

Além dos parâmetros já definidos, foi necessário estabelecer, antes da etapa de fatiamento e envio para a impressora, o padrão de preenchimento mais adequado para acompanhar o contorno das paredes de cada “chapéu” projetado. Optou-se pelo padrão do tipo *Linhas*, por permitir que o bico extrusor seguisse de forma contínua as bordas da figura geométrica, garantindo a conexão correta de ponta a ponta do corpo de prova. No entanto, o resultado obtido não correspondeu ao esperado. Na figura 16 abaixo, podemos ver a linha verde o caminho que o bico injetor está realizando para depositar o material e claramente vemos que ele começa por um lado, segue para o outro deixando o meio para uma terceira etapa e assim conectando as extremidades do corpo de prova.

Tabela 16 – Descontinuidade do material depositado.



Fonte: Autoria própria.

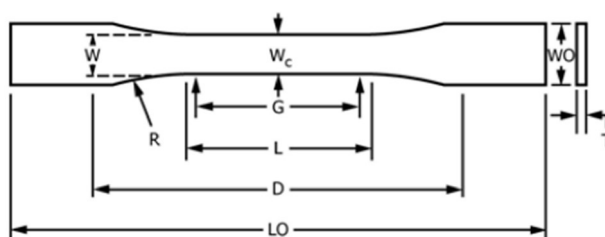
As impressões foram realizadas através de duas impressoras que estavam disponíveis no laboratório de prototipagem dos modelos *Creality Ender 3 S1* e *5 S1*, seguindo os padrões estabelecidos anteriormente.

3.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS PARA POLÍMEROS

A norma ASTM D638-14 estabelece o método padrão para a determinação das propriedades mecânicas de materiais plásticos submetidos a ensaios de tração. Especificamente voltada para polímeros moldados ou usinados, ela descreve os procedimentos necessários para avaliar parâmetros como a resistência máxima à tração (UTS), tensão de escoamento, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura. O ensaio consiste em submeter corpos de prova padronizados a um esforço de tração uniaxial em uma máquina de ensaios universal, até que ocorra a fratura do material.

A norma define diferentes tipos de corpos de prova (tipos I a V, ilustrados na Fig. 17 e Tabela 3), sendo o tipo I o mais utilizado para plásticos rígidos, mas que pelas características desse estudo, foi escolhido o tipo I, pois é o que mais se adequaria a proposta dos testes por se tratar de um material considerado rígido e possuir espessura menor que 7mm.

Figura 17 - Padrão de corpo de prova tipo 1, 2 e 3.



Fonte: ASTM D638-14.

Tabela 3 - Tabela com os tipos de corpos de provas e suas dimensões.

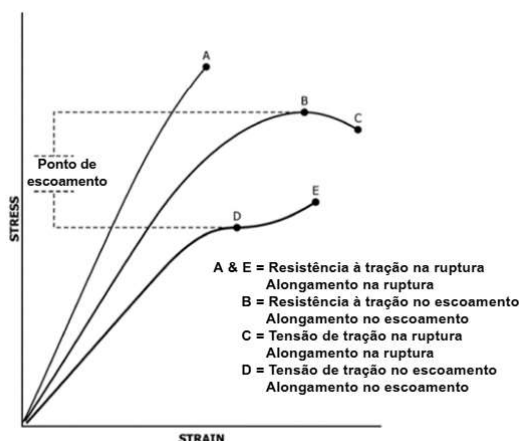
Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl
	Type I	Type II	Type III
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)
WO—Width overall, min ^G	...	...	...
LO—Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)
G—Gage length ^I	...	...	...
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...

Fonte: ASTM D638-14.

As amostras devem ser previamente condicionadas em temperatura e umidade controladas (23 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ UR por 40 horas) para garantir a repetibilidade dos resultados. Durante o teste, a velocidade de aplicação da carga deve ser controlada conforme as características do material, normalmente variando entre 5 mm/min e 50 mm/min. Um extensômetro é utilizado para medir com precisão a deformação na região elástica.

Os resultados obtidos por meio da curva tensão-deformação permitem calcular as propriedades mecânicas fundamentais do material e essas curvas possuem perfis semelhantes à da Fig. 18 e nela podemos observar também os pontos mais importantes, como tensão de escoamento, tensão de ruptura e alongamento.

Figure 18 - Designação de cada tensão.



Fonte: ASTM D638-14 (adaptado).

A tensão máxima representa o limite de resistência antes da fratura; o módulo de elasticidade é obtido pela inclinação da curva na região linear; e o alongamento na ruptura expressa a ductilidade do material. Esses dados são essenciais para a caracterização de plásticos utilizados em aplicações estruturais, incluindo peças impressas em 3D.

Uma vez estudado as normas que regem os ensaios destrutivos, deve-se avançar para a realização deles. Os ensaios foram realizados na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

no laboratório de ensaios mecânicos do INTM (Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais), a máquina utilizada foi a EMIC com capacidade de até 100kN que é utilizada para testes de materiais metálicos, porém ela atende as especificidades requeridas em norma e servirá para realizar os testes iniciais deste estudo.

A Figura 19 apresenta a montagem inicial do ensaio de tração, em conformidade com a norma ASTM D638-14. Os corpos de prova foram fixados nas garras da máquina de ensaio, e em seguida foi acoplado o extensômetro. O teste foi conduzido com uma velocidade de tração de 50 mm/min.

Figure 19 - Configuração dos testes de tração



Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as informações anteriores desse estudo, fez-se necessário para estabelecimento de premissas dos testes a seguir, onde os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração uniaxial em uma máquina universal de ensaios como mostrado na sessão anterior. Durante os testes, foram avaliados parâmetros como o módulo de elasticidade (MPa), tensão última de resistência (UTS, MPa) e a deformação na fratura. O módulo de elasticidade, expresso em MPa, representa a rigidez do material e é determinado pela inclinação da região linear da curva tensão-deformação, sua fórmula é descrita na equação 1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

A tensão última de resistência (UTS) corresponde ao maior valor de tensão suportado pelo corpo de prova antes de iniciar o processo de ruptura, sendo um indicativo da resistência máxima à tração. Já a deformação na fratura é a medida do alongamento relativo que a amostra sofre até o ponto de ruptura, expressa em porcentagem, e reflete a ductilidade do material: materiais mais frágeis apresentam baixa deformação, enquanto os mais dúcteis suportam maiores alongamentos antes da falha.

Na Tabela 4 abaixo, temos a denominação dos corpos de prova (em triplicata para garantir a confiabilidade dos resultados) organizados pelo percentual de preenchimento, direcional esse que utilizaremos para nos guiar nas análises a seguir. Cada corpo de prova foi submetido a uma força crescente até o ponto de ruptura, registrando-se a tensão máxima suportada por cada amostra.

Tabela 4 - Denominação dos corpos de prova.

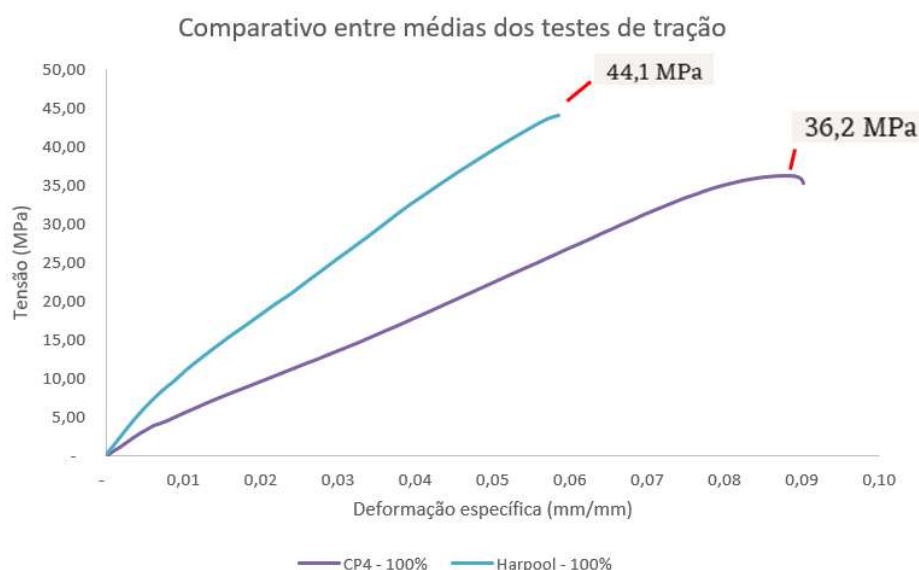
Corpo de prova	% de preenchimento
CP1	35%
CP2	50%
CP3	70%
CP4	100%

Fonte: Autoria própria.

O primeiro ensaio a ser observado e comparado foi o do Corpo de Prova 4 (CP4), pois ele servirá de base inicial de comparação dos resultados. Observando a figura 20 abaixo, podemos verificar que com a configuração de preenchimento 100% sólido com o

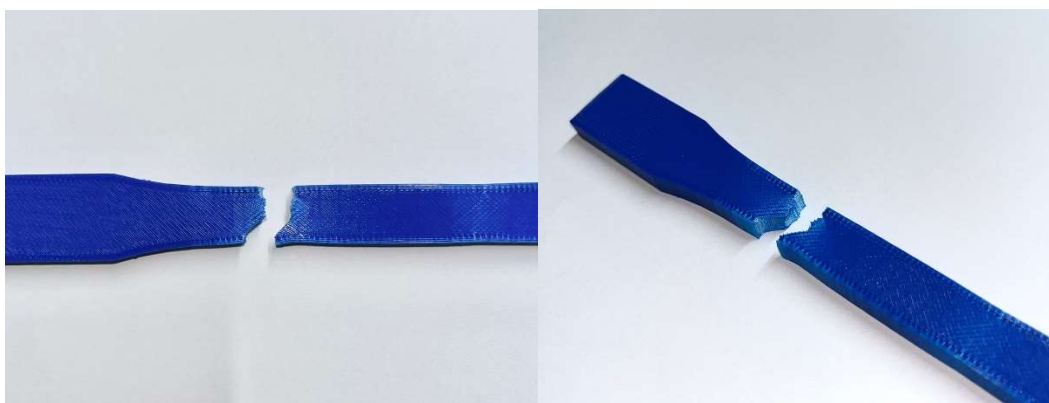
preenchimento tipo “*hat*”, se aproximou do que foi apresentado por Harpool et al (2021) usando um corpo de prova também com o mesmo percentual de preenchimento (100%), porém com o padrão de *infill* do tipo linhas na longitudinal. Além das tensões máximas semelhantes (44,1MPa – Harpool e 36,2MPa – *Hat*), o novo tipo de preenchimento se mostrou mais dúctil, como podemos observar na figura 21, onde o PLA azul ficou mais claro com forte indícios de alongamento.

Figura 20 – Comparação entre testes de tração realizados com corpos de prova com preenchimento 100%.



Fonte: Autoria própria, *Microsoft Excel*.

Figura 21 – Quebra dúctil do CP4, preenchimento 100%.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida observou-se que houve uma resposta no comportamento da tensão máxima na medida que o percentual de preenchimento aumentou nos demais corpos de prova (CP1, CP2 e CP3), como ilustrado na Figura 22. Nele, podemos observar uma anomalia, pois observamos

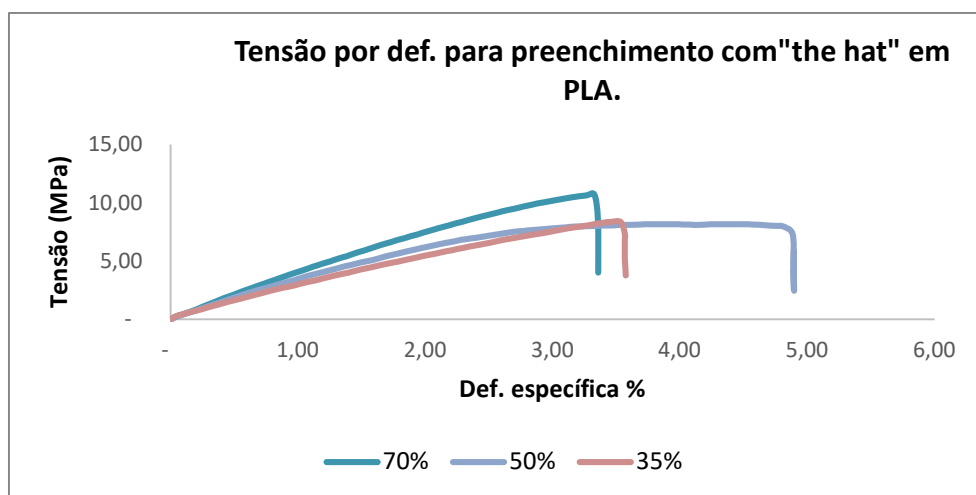
que as amostras com 35% e 70% possuem curva com o mesmo comportamento enquanto a amostra com 50% ficou com tensão máxima abaixo mesmo do corpo com 35%, indicando alguma falha na construção do preenchimento no CAD. Porém, com a variação do preenchimento, a comparação com outros resultados nos mostra uma grande divergência. Em Pandzic et al (2019), foram realizados testes mostrando a relação da variação de preenchimento para diversos tipos de padrões. Na tabela 5, podemos observar esses resultados para os padrões Linhas e Triângulos, o que nos mostra que os testes realizados não ficaram tão distantes.

Tabela 5 – Ensaio de tração em PLA para padrão Linhas e Triângulos variando percentual de preenchimento.

Resultados apresentados por Pandzic (2019)			
Preenchimento (%)	Linhas (MPa)	Triângulo (MPa)	“Hat” (MPa)
20	17,5	16,5	-
30	17,4	18,9	8,36
40	18,1	19,3	-
50	19,5	19,3	8,15
60	19,8	20,8	-
70	22,7	21,4	10,69
80	23,3	22,5	-

Fonte: Pandzic (2019).

Figura 22 - Tensão Máxima Suportada Por Corpo De Prova

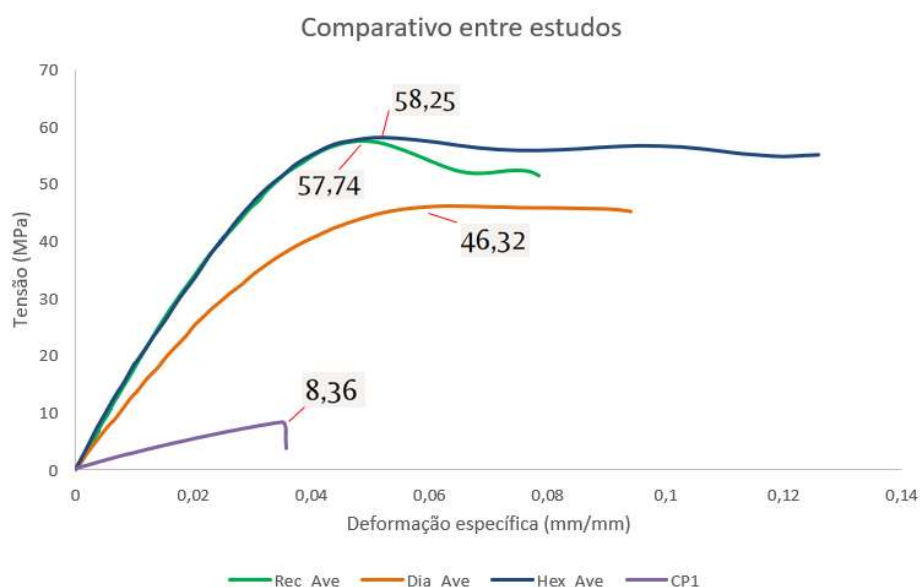


Fonte: Autoria própria, *Microsoft Excel*.

Em Harpool et al (2021), foram realizados também testes em corpo de prova com preenchimento a 15% do tipo retangular, hexagonal e no formato diamante com intuito de comparar, entre si, mas usaremos os resultados apresentados por ele para comprar com os

demais corpos de prova, CP1, CP2 e CP3 com 35% de preenchimento. Na figura 23, mostramos em um mesmo gráfico os diferentes resultados encontrados entre CP1 com 35% de preenchimento por mais se aproximar dos estudos comparados, e os demais sendo apresentadas como as médias onde “Rec_Ave” apresenta os resultados do médio do tipo retangular, “Hex_Ave”, média do tipo hexagonal e “Dia_Ave” como média dos testes com o tipo diamante.

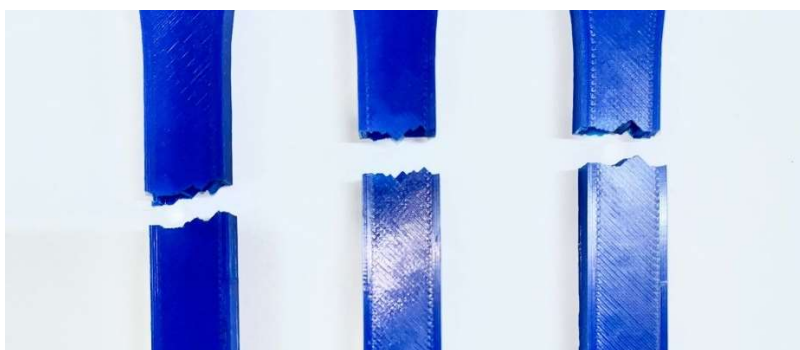
Figura 23 – Curvas de tensão de corpos de prova com 15% para preenchimentos do tipo retangular, diamante e hexagonal e 35% tipo *hat*.



Fonte: Autoria própria, *Microsoft Excel*.

Comparando as curvas acima, vemos uma diferença muito grande entre os resultados apresentados entre o CP1 (35%) e os testes realizados por Harpool et al (2021). Além das tensões de escoamento muito baixas, os corpos de prova se mostraram frágeis, com pouca resistência ao escoamento até a fratura como podemos observar na Figura 24 abaixo.

Figura 24 – Fratura frágil dos CP1



Fonte: Autoria própria.

A comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e os de Harpool et al. (2021) evidencia abordagens complementares no estudo da influência de padrões de preenchimento nas propriedades mecânicas de peças impressas em PLA. Enquanto o presente estudo concentra-se na análise de um padrão aperiódico, o polígono *hat*, aplicado em diferentes densidades de preenchimento, o trabalho de Harpool explora geometrias clássicas e bem estabelecidas, como os padrões sólido, retangular, diamante e hexagonal.

Nos corpos de prova com preenchimentos parciais (35% a 70%) utilizando o padrão *hat*, observou-se desempenho mecânico bastante inferior em comparação com os padrões retangular e hexagonal avaliados por Harpool. Essa diferença pode estar relacionada à distribuição interna menos otimizada do padrão *hat* em baixas densidades, o que pode ter resultado em regiões com menor continuidade estrutural ou maior concentração de vazios.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo visou fazer uma análise preliminar do desempenho mecânico (teste de tração) de corpos de prova em PLA impressos via FDM com um padrão de preenchimento não convencional, baseado no polígono aperiódico *hat*. Os ensaios de tração, realizados conforme a norma ASTM D638-14, permitiram comparar o comportamento deste padrão com resultados de padrões convencionais reportados na literatura.

Os resultados mostraram que, para preenchimento de 100%, o padrão *hat* apresentou desempenho próximo ao do preenchimento tipo linhas longitudinais, com destaque para a maior ductilidade observada na fratura. No entanto, para densidades mais baixas (35%, 50% e 70%), o padrão apresentou desempenho mecânico inferior aos padrões retangular e hexagonal, possivelmente devido à descontinuidade no trajeto de deposição do filamento e à concentração de vazios internos, conforme mostrado na seção 3.1 deste trabalho.

Os valores de UTS dos corpos de prova em PLA com 100%, estão dentro da variação observada na literatura. Como os corpos de prova foram impressos utilizando impressoras 3D da marca Ender abertas, as temperaturas de *hotend* e de *bed* possivelmente não foram mantidas corretamente (ar-condicionado no laboratório). Existiram também dois tempos mortos: o primeiro durante a impressão de todos os corpos de prova; e o segundo na espera pela realização dos testes destrutivos no INTM. Esta demora pode ter deteriorado o material, absorvendo grande umidade (época de chuvas na região) fazendo com que a estrutura seja comprometida. Existem poucos estudos, na literatura, relacionados ao impacto da absorção de umidade na resistência mecânica de estruturas impressas em 3D.

Apesar das limitações identificadas, este estudo preliminar demonstra que padrões aperiódicos podem ser aplicados à manufatura aditiva, abrindo espaço para novas geometrias de preenchimento que conciliem desempenho mecânico e uso eficiente de material. Neste sentido é importante propor estudos que relacionem a falha mecânica estrutural com o tipo de preenchimento, buscando entender como é que “fratura” se espalha neste tipo de estrutura. Levando em consideração que parte do esforço de ruptura é absorvida pela “carcaça” da estrutura impressa (100% impressa), e a outra parte pela estrutura interna (variação de *infill* %).

Para ampliar os resultados obtidos neste estudo, recomenda-se: (1) a otimização do desenho do padrão *hat* no software CAD; (2) desenvolvimento de um algoritmo para geração

do preenchimento tipo *hat* (seguindo a lógica dos preenchimentos convencionais: diminuição geométrica do padrão para maior densidade de preenchimento). Buscando minimizar descontinuidades, aprimorar um processo de deposição contínua do filamento. Também se sugere a implementação direta desse padrão no software de fatiamento, evitando adaptações por preenchimentos convencionais, de modo a preservar a fidelidade geométrica do projeto original.

A futuro, também se espera avaliar o desempenho do padrão *hat* utilizando diferentes materiais, como ABS, PETG ou compósitos de PLA, explorando o potencial de ganho em resistência e rigidez. Ensaio mecânicos complementares, como testes de flexão, impacto e fadiga, podem oferecer uma compreensão mais abrangente do comportamento estrutural do padrão *hat*.

Finalmente, se sugere o estudo de outros polígonos aperiódicos para construção de estruturas internas em impressão 3D.

REFERÊNCIAS

BISCHOFF, M.; PARSHALL, A. Newfound Mathematical ‘Einstein’ Shape Creates a Never-Repeating Pattern. Scientific American, 2023. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/newfound-mathematical-einstein-shape-creates-a-never-repeating-pattern/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

FARZADI, A. et al. Effect of layer thickness and printing orientation on mechanical properties of 3D printed PLA structures. Materials Science and Engineering: C, v. 35, p. 191-197, 2014.

GRAND VIEW RESEARCH. *3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report*. 2024. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>. Acesso em: 9 ago. 2025

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2014. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Additive_Manufacturing_Technologies.html?id=OPGbBQAAQBAJ. Acesso em: 02 jan. 2025.

GAD, A.; SHARMA, A.; MOKHTAR, M.; NG, T. C. Mechanical properties of 3D-printed polymers based on raster orientation, infill density and printing orientation. *Polymers*, [S.l.], v. 13, n. 9, p. 1-15, 2021. DOI: 10.3390/polym13092387. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/9/2387>. Acesso em: 5 ago. 2025.

HSIEH, T. M. et al. Application of 3D printing in medicine: Current and future perspectives. BioMed Research International, v. 2015, p. 1-9, 2015.

HARPOOL, D. et al. Evaluation of the Infill Design on the Tensile Response of 3D Printed Polylactic Acid Polymer. Materials, v. 14, n. 9, 2195, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/9/2195>. Acesso em: 01 fev. 2025.

JOHNSON, G. A.; FRENCH, J. J. Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3D printing materials. *Advances in Technology Innovation*, v. 3, n. 4, p. 179-184, 2018. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/228834597.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

KARAD, M. H. et al. Effect of 3D printing process parameters on mechanical properties of PLA parts. *Discover Mechanical Engineering*, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 1-12, 2023. DOI: 10.1007/s44147-023-00273-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44147-023-00273-x>. Acesso em: 5 ago. 2025.

KARAD, B.; KURTULUŞ, H.; YAZICI, A. Experimental investigation of the effects of 3D printing parameters on mechanical properties of PLA material. *Journal of Materials: Design and Applications*, [S. l.], v. 237, n. 6, p. 1246–1260, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/14644207221150129>

MISTERCORZI. Einstein Tile - How to Construct an Aperiodic Monotile Using Inkscape (The Hat Tile). YouTube, 30 mar. 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=BirP2U5l0j0>. Acesso em: 17 maio 2025.

NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 172-196, 2018.

PANDZIC, Adi; HODZIC, Damir; MILOVANOVIC, Aleksa. Effect of infill type and density on tensile properties of PLA material for FDM process. In: KATALINIC, B. (Ed.). *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. Vienna: DAAAM International, 2019. p. 545-554. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.074. ISBN 978-3-902734-22-8. ISSN 1726-9679.

RESEARCH AND MARKETS. *3D Printing Market Size, Share and Trends Analysis Report*. 2024. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4375433/3d-printing-market-size-share-and-trends-analysis>. Acesso em: 9 ago. 2025.

RENGIER, F. et al. 3D printing based on imaging data: Review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, v. 5, p. 335-341, 2010.