

## Parametrização e Viabilidade do Método Heterogêneo de Preenchimento para Impressão 3D.

## Parameterization and Feasibility of the Heterogeneous Infill Method for 3D Printing.

## Parametrización y viabilidad del método de relleno heterogéneo para impresión 3D.

Gabriel Gineis de Vasconcelos<sup>1</sup>  
Tamires de Souza Nossa<sup>2</sup>

**Resumo:** O presente trabalho estuda a viabilidade da produção de peças, por meio da manufatura aditiva por impressão 3D do tipo FFF (do inglês, Fused Filament Fabrication), utilizando diferentes níveis de preenchimento em um mesmo corpo. Este artigo se aprofunda na variação de parâmetros de impressão, uma área com enorme potencial de otimização dentro da impressão 3D, para criar corpos impressos com variações da porcentagem de preenchimento e compará-los nos quesitos tempo de impressão e consumo de material às suas contrapartes homogêneas. Os resultados mostraram que a aplicação da estratégia de variação no preenchimento reduz os tempos de impressão em até 180 segundos e a quantia de material gasto em até 1,7 gramas resultados positivos que podem agir como uma base para os futuros desenvolvimentos nesta área.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Impressão 3D. Preenchimento heterogêneo. Parâmetros de impressão.

**Abstract:** This work studies the feasibility of material production through additive manufacturing, using different infill levels within a single object. This article focuses on varying printing parameters, an area with vast optimization potential in 3D printing, to create printed objects with different infill percentages and compare them in terms of printing time and material consumption to their homogeneous counterparts. The results demonstrated that applying the infill variation strategy reduces printing times by up to 180 seconds and material consumption by up to 1.7 grams, positive outcomes that may serve as a foundation for future developments in this field.

**Keywords:** Additive manufacturing. 3D printing. Heterogeneous infill. Printing parameters

**Resumen:** Este trabajo estudia la viabilidad de la producción de materiales mediante manufatura aditiva, utilizando diferentes niveles de relleno en un mismo objeto. Este artículo se centra en la variación de parámetros de impresión, un área con gran potencial de optimización dentro de la impresión 3D, para crear objetos impresos con diferentes porcentajes de relleno y compararlos en cuanto a tiempo de impresión y consumo de material con sus contrapartes homogêneas. Los resultados demostraron que la aplicación de la estrategia de variación en el relleno reduce los tiempos de impresión hasta en 180 segundos y el consumo de material hasta en 1,7 gramas, resultados positivos que pueden servir como base para futuros desarrollos en esta área.

**Palabras-clave:** Manufatura aditiva. Impresión 3D. Relleno heterogêneo. Parâmetros de impresión

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de São Paulo Campus Itapetininga. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9230-0435>. E-mail: [gabriel.gineis@alunos.ifsp.edu.br](mailto:gabriel.gineis@alunos.ifsp.edu.br)

<sup>2</sup> Pós-doutora em Ciência e Engenharia dos Materiais. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4715-5953>. E-mail: [tamires.nossa@ifsp.edu.br](mailto:tamires.nossa@ifsp.edu.br)

## Considerações Iniciais

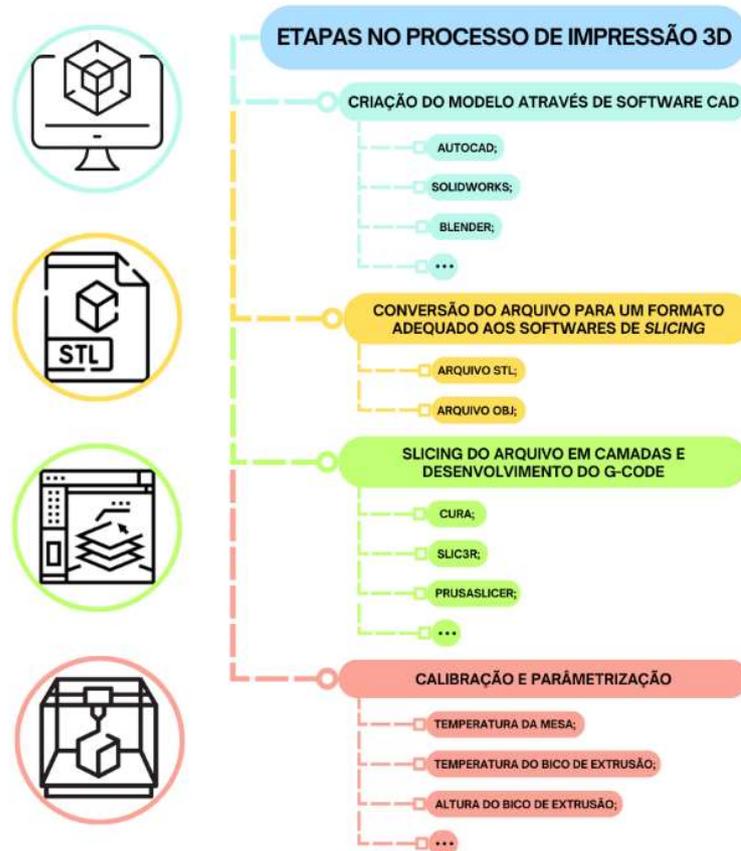
A manufatura aditiva (MA), amplamente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia que permite a criação de objetos com geometrias e estruturas complexas de forma precisa e eficiente (Maia, 2023). Ao contrário dos métodos tradicionais de manufatura subtrativa, onde o material é removido de um bloco sólido, a impressão 3D constrói peças através da adição sucessiva de camadas, oferecendo maior flexibilidade e personalização (Masood; Song, 2004). Essa capacidade de adaptação tem possibilitado avanços significativos em aplicações industriais.

A flexibilidade da impressão 3D, aliada ao uso de modelos digitais gerados por programas CAD (*Computer-Aided Design*), permite a personalização de produtos e a produção sob demanda, reduzindo custos e acelerando o tempo de desenvolvimento (Rodrigues *et al.*, 2017). Essa versatilidade tem impulsionado a adoção da MA em setores diversos, como o aeroespacial, automotivo e médico. No entanto, a qualidade das peças impressas depende de múltiplos fatores, incluindo a escolha dos materiais e a parametrização de variáveis como temperatura, tipo e porcentagem de preenchimento (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Nesse contexto, o preenchimento heterogêneo se apresenta como uma técnica para balancear propriedades mecânicas e eficiência no uso de recursos (Tanveer; Haleem; Suhaib, 2019).

O processo de impressão 3D vai além da simples execução da impressão e abrange etapas detalhadas. Tudo começa com o design concebido por meio de programa CAD, que é convertido em formatos específicos como o arquivo STL (*Stereolithography*), permitindo uma representação tridimensional baseada em facetas triangulares. Esses arquivos são então processados por programas CAM (*Computer-Aided Manufacturing*), que segmentam o modelo em camadas e geram um programa em Código G (*G-code*) contendo as instruções detalhadas para a construção de cada camada. Posteriormente, a configuração da impressora 3D envolve ajustes críticos, como a calibração da temperatura do bico de extrusão, a temperatura da mesa e a altura do bico, garantindo uma execução otimizada (Kamran; Saxena, 2016). Quando combinado com técnicas de preenchimento heterogêneo, esse processo oferece novas possibilidades para atender a demandas específicas de resistência e leveza nas estruturas impressas.

As etapas descritas podem ser vistas na Figura 1, onde o processo geral é ilustrado.

Figura 1 – Etapas do processo de impressão 3D e programas empregados no processo.

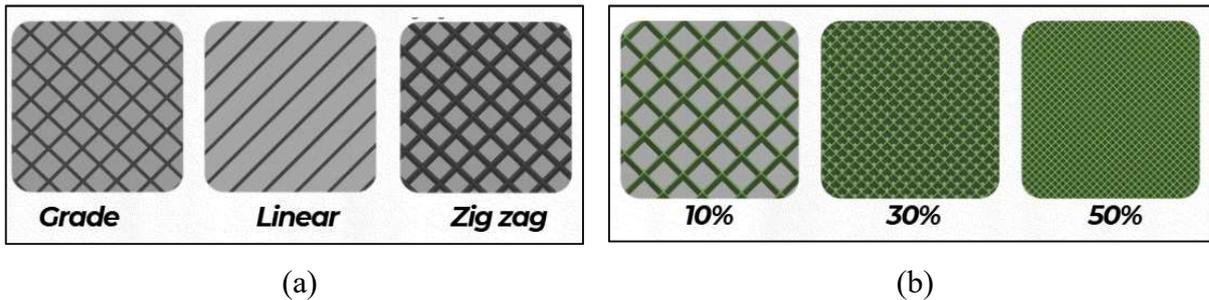


Fonte: Próprio autor, 2025

A otimização dos parâmetros envolvidos nesse processo é uma área amplamente explorada, pois impacta diretamente na eficiência e qualidade das peças produzidas. Estudos abordam variáveis como a temperatura do bico de extrusão, que pode melhorar a adesão entre as camadas e, conseqüentemente, aumentar a resistência mecânica das peças (Ahn *et al.*, 2002), e a variação na porcentagem de preenchimento que afeta tanto a densidade das peças quanto o tempo de impressão e o consumo de material (Gibson *et al.*, 2015). A manipulação dessas e outras variáveis permite otimizar o processo, reduzindo custos e melhorando o desempenho das peças, o que tem sido amplamente discutido na literatura (Rodríguez-Reyna *et al.*, 2022; Suteja; Soesanti, 2020).

Nesse contexto os alvos principais de otimização no quesito parâmetros são a variação de padrão de preenchimento (Figura 2(a)) e variação de porcentagens de preenchimento (Figura 2(b)).

Figura 2 – Variação de padrão de preenchimento.



Fonte: Adaptado de 3D Printing Geek, 2025

No entanto, apesar de tanto foco nestas variáveis, a heterogeneidade do preenchimento é um método mais recente e ainda pouco explorado na literatura. Tradicionalmente, utiliza-se um padrão homogêneo de preenchimento, o que implica em um uso de material mais uniforme, a variação no preenchimento, onde diferentes regiões da peça possuem diferentes densidades de material, é uma abordagem que tem o potencial de reduzir o consumo de material, diminuir o tempo de impressão e impactar a performance das peças em diferentes condições de carga (Tanveer *et al.*, 2020). Estudos recentes sugerem que a heterogeneidade no preenchimento pode, de fato, levar a um desempenho mais eficiente, mantendo a resistência necessária enquanto se varia material e tempo de produção (Drozda *et al.*, 2024).

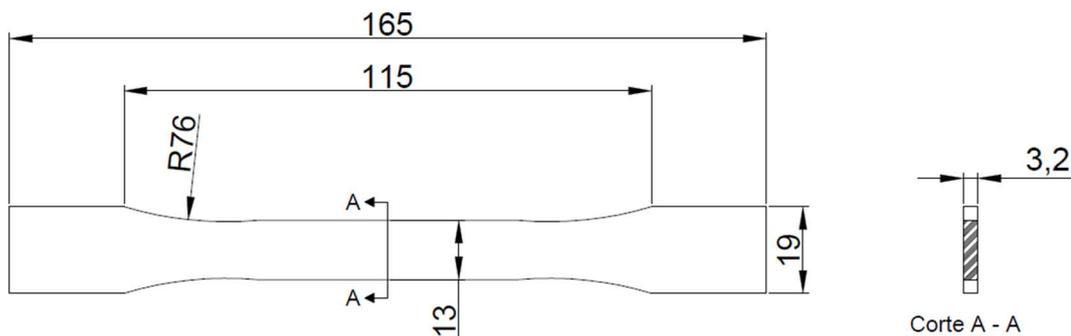
Este trabalho, portanto, se propõe a explorar a heterogeneidade do preenchimento em impressões 3D, com o objetivo de fornecer uma análise detalhada sobre como essa abordagem pode otimizar o processo de fabricação e contribuir para uma maior compreensão dos efeitos dessa variável no desempenho das peças.

## Metodologia

### Projeto da Amostra

Com o objetivo de analisar a viabilidade do preenchimento heterogêneo o estudo optou em construir protótipos avaliando como aplicar a variação de preenchimento e seu impacto no processo de impressão, destacando o tempo decorrido e a quantia de material consumido como principais aspectos. O perfil das amostras construídas foi selecionado como corpos de prova para ensaios de tração, no formato de osso de cachorro (do inglês, *dogbone*), tendo em vista aplicações posteriores, de tal forma que as dimensões do projeto foram baseadas na norma ASTM D638, ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Desenho do corpo de prova de tração em formato de osso de cachorro.



Fonte: Próprio autor, 2025

Os corpos de prova foram projetados e desenvolvidos considerando dois tipos de variações:

- Tipo de preenchimento: Grade; linear; e zig zag.
- Porcentagem de preenchimento: homogêneos de 100%; homogêneos de 50%; heterogêneos de 100%/50%; heterogêneos de 100%/10%; heterogêneos 50%/25% e heterogêneos de 50%/10%.

Os tipos de preenchimento foram selecionados levando em conta padrões que se

conectam mesmo quando expostos a variação, enquanto as porcentagens foram selecionadas primeiramente em uma escala de 2:1 e depois considerando grandes variações a fim de contrastar resultados e avaliar diferenças mais extremas com preenchimento “mínimo”.

Os principais pontos avaliados foram os gastos de matéria-prima e o tempo de produção das partes. As amostras foram nomeadas sendo a primeira letra referente ao tipo da amostra: T para corpos de prova do modelo de tração; a segunda letra o tipo de preenchimento, G para grade L para linear e Z para zig zag seguido do número correspondente a porcentagem de preenchimento.

Os dados dos tempos de impressão são divididos em acordo com os estágios do processo, a etapa de preenchimento (do inglês, *Infill*) equivale a estrutura interna da peça impressa que proporciona estrutura e resistência a mesma, é também a etapa notavelmente afetada pela heterogeneidade do preenchimento. As paredes internas (do inglês, *Inner Walls*) ficam entre o preenchimento as paredes externas (do inglês, *Outer Walls*), e formam a estrutura interna da casca do impresso, ajudando a dar forma a estrutura. Já as paredes externas funcionam com o mesmo propósito, mas formam a superfície visível do objeto. As retrações (do inglês, *Retractions*) são movimentos realizados ao longo da impressão para evitar o vazamento do material enquanto o bico se movimenta sem estar expelindo material. A superfície externa (do inglês, *Skin*) são as camadas superiores e inferiores do material. A saia (do inglês, *Skirt*) é o primeiro “desenho” executado pela impressora ao redor do objeto sem tocá-lo, esse processo funciona para verificar o nivelamento da mesa de impressão assim como garantir uma saída uniforme de material. E, por fim, deslocamento (do inglês, *Travel*) são os movimentos realizados enquanto não se está extrudando material.

### **Parametrização do Preenchimento Heterogêneo**

Uma vez dimensionada e projetada com uso do programa AutoCAD a amostra foi mapeada dentro da plataforma UltiMaker Cura sendo delimitada uma zona onde a variação de preenchimento seria aplicada. A área necessária foi determinada levando em conta o mínimo necessário para que variações fossem visíveis tanto na massa quanto no tempo de impressão, resultando em uma região central de 8 mm de largura ao longo de todo corpo de prova, o equivalente a aproximadamente 60 % do volume do total do corpo de prova.

Os parâmetros para avaliação da amostra no fatiador foram: Altura de camada de 0,2 mm; espessura de parede de 0,8 mm distribuídas em duas camadas; e espessura de base e topo de 0,9 mm distribuídas em cinco camadas para o corpo maciço.

Após realizada a importação do arquivo CAD na plataforma UltiMaker Cura é necessário determinar as zonas com diferença de preenchimento, a delimitação dessas áreas foi realizada utilizando a ferramenta de suportes, adicionando uma nova forma ao programa, como nosso preenchimento tem caráter retangular foram usadas duas formas retangulares como apresentado na Figura 4.

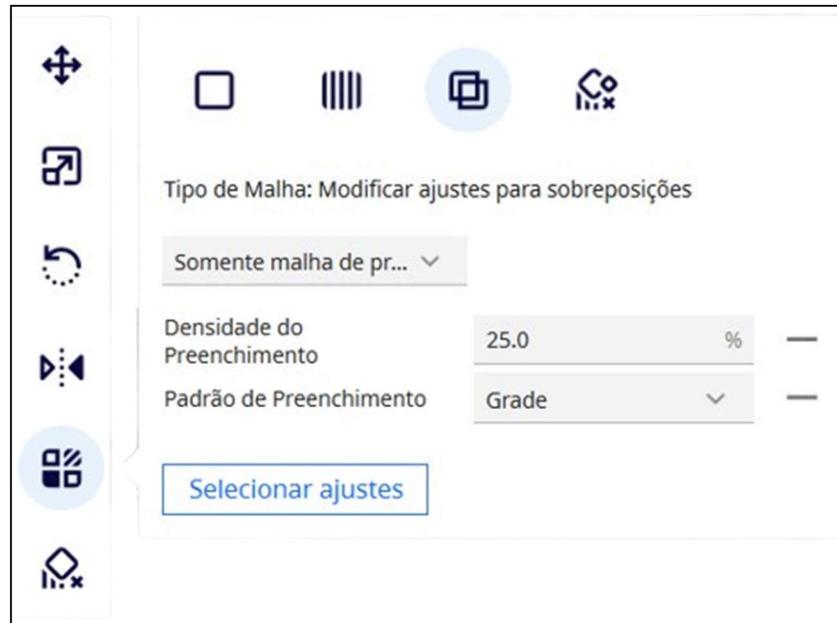
Figura 4 – Projeto com suportes.



Fonte: Próprio autor, 2025

Os corpos adicionados depois foram configurados como suporte de sobreposição através do menu “Ajustes por Modelo” e na opção “Modificar ajustes para sobreposição”. Vale destacar que foi habilitada a opção “Somente malha de preenchimento” uma vez que só desejávamos alterar a porcentagem de preenchimento. Na região sobreposta pelos suportes, foi definida a porcentagem e padrão de preenchimento como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Definições de suporte.



Fonte: Próprio autor, 2025

Os parâmetros dos suportes podem ser definidos independentemente dos parâmetros do corpo impresso principal, dessa forma foi possível alcançar as variações de porcentagem de preenchimento propostas.

### Coleta de Dados

Dentro do programa de fatiamento foram obtidos os dados de material empregado no processo de impressão e de tempo gasto durante cada etapa do processo, as informações ficam disponíveis após realizar o fatiamento da amostra e são ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Dados de impressão.



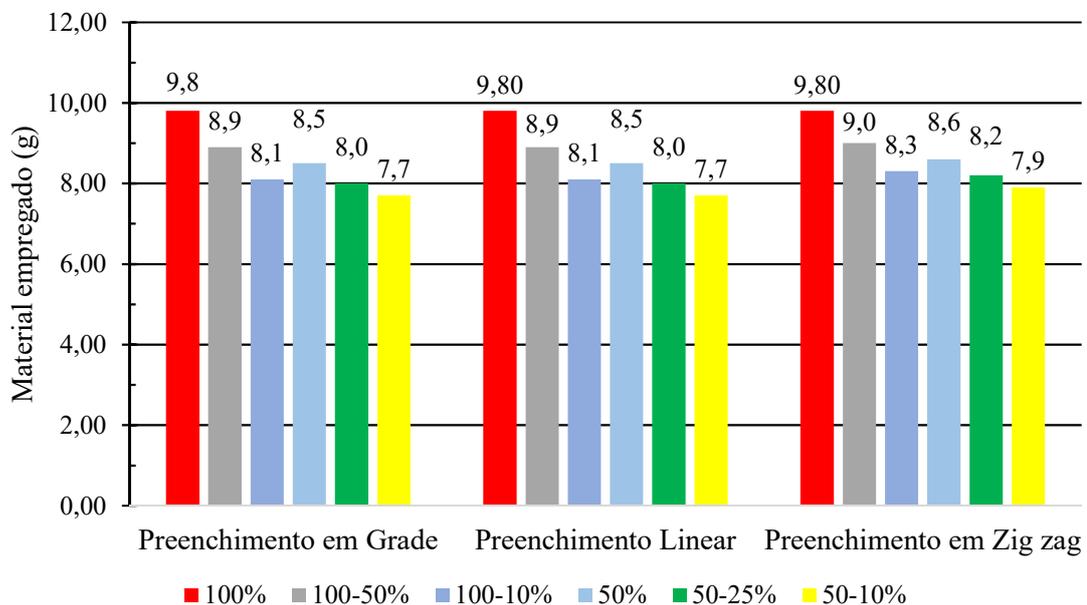
Fonte: Próprio autor, 2025

## Resultados

### Análise do Material Empregado

O Gráfico 1 apresenta os resultados de material empregado (em gramas) para as amostras feitas em formato de osso de cachorro.

Gráfico 1 – Matéria-prima empregada em gramas por amostra de tração.



Fonte: Próprio autor, 2025

Como ilustrado no gráfico existe uma clara redução na quantidade de material empregado na fabricação dos corpos de prova conforme a porcentagem de preenchimento é alterada de homogênea para heterogênea, corpos de prova com preenchimento em grade 100-50% apresentam uma redução de aproximadamente 9% na massa total quando comparados a corpos heterogêneos de 100%, para as amostras 100-10% essa redução é ainda maior chegando a 17%. A mesma comparação é realizada para as amostras de 50% de preenchimento, onde os corpos heterogêneos 50-25% e 50-10% exibem redução aproximada de 5,5% e 9% respectivamente.

Os corpos com preenchimento em zig zag apresentam uma ligeira diferença, comparando o preenchimento homogêneo de 100% com as amostras de 100-50% e 100-10% as reduções aproximadas são de 8% e 15% respectivamente e, ao avaliar o preenchimento de 50% para esse mesmo padrão temos uma diferença de 4,5% e 8% entre os preenchimentos 50-25% e 50-10% para com a amostra homogênea. Ao avaliarmos as amostras com padrão de preenchimento linear temos a mesma porcentagem de redução exibida pelas amostras de preenchimento em grade, uma vez que a quantidade de material empregado se mantém a mesma

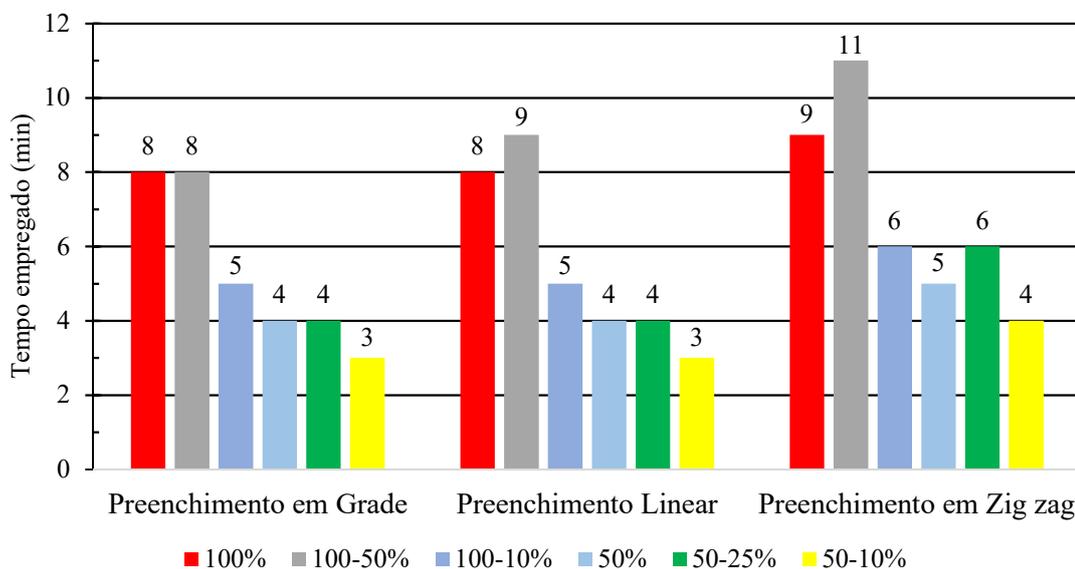
como pode ser visto na Tabela 02 que traz os valores de massa, em gramas, para cada corpo de prova produzido.

Conforme apresentado no Gráfico 1 não existe diferença da massa de material empregado ao produzir as presentes amostras com preenchimento em padrão linear ou em grade, para o preenchimento em zig zag porém existe uma pequena diferença, sendo utilizado mais material no último.

### Análise de Tempo

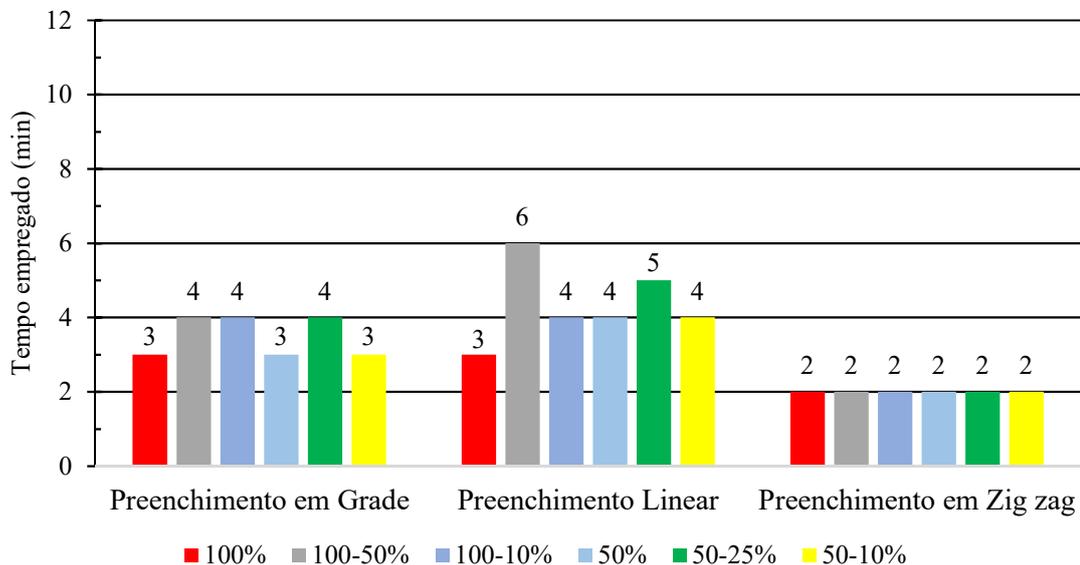
O tempo empregado foi calculado por meio do mesmo programa (UltiMaker Cura). Durante processo de impressão dentre as etapas preenchimento, paredes externas, paredes internas, retrações, superfície externa, saia e deslocamento as únicas visivelmente afetadas pela variação de padrão e porcentagem de preenchimento são as etapas de preenchimento, Gráfico 2 e de deslocamento, Gráfico 3.

Gráfico 2 – Tempo de *preenchimento* por amostra.



Fonte: Próprio autor, 2025

Gráfico 3 – Tempo de *deslocamento* por amostra.



Fonte: Próprio autor, 2025

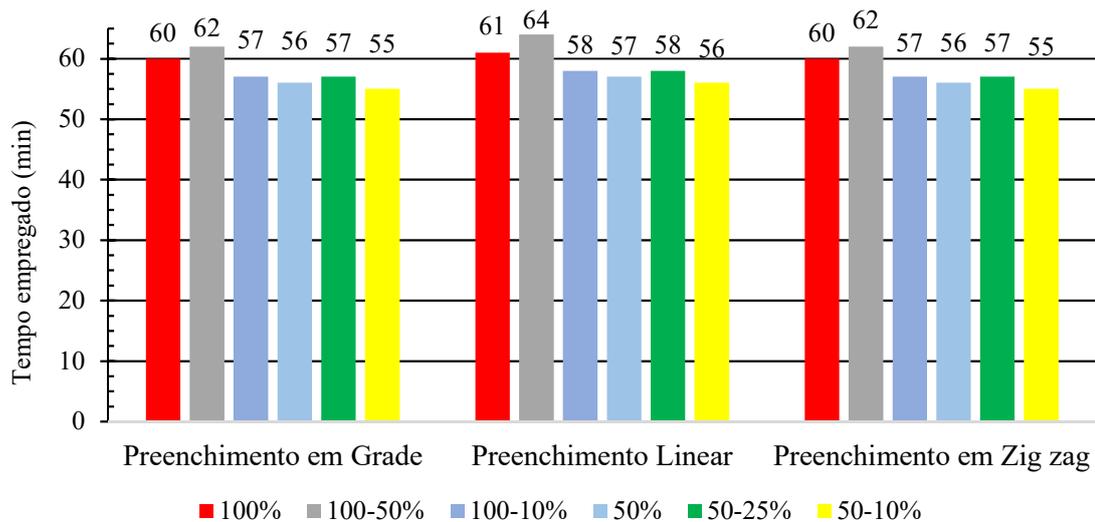
Como apresentado pelo Gráfico 2 a variação do tempo do processo de *Preenchimento* tende a um aumento nas amostras que tem preenchimento no parâmetro 2:1 (TG100-50 e TG50-25), seguido por uma redução para as amostras com maior diferença entre porcentagem de preenchimento (TG100-10 e TG50-10), considerando que ao variar o preenchimento a impressora necessita de realizar ajustes e correções isso responde o aumento no tempo decorrido porém, preenchimentos de menor porcentagem também são mais rápidos de serem concluídos, dessa fora é possível observar que o aumento seguido de redução pode ser justificado pelo peso desses fatores nas diferentes porcentagens de preenchimento, para uma porcentagem maior (padrão 2:1) o impacto da correção da impressora se sobressai, enquanto que aos 10% de porcentagem o impacto da redução de preenchimento é que se destaca.

No Gráfico 3 o tempo de deslocamento apresenta valores diferentes a cada porcentagem de preenchimento, no padrão em grade e linear esse tempo aumenta para corpos heterogêneos, com maior impacto em menores diferenças (padrão 2:1), enquanto para o padrão em zig zag o tempo se mantém devido a característica do padrão de preenchimento de ser contínuo.

Em consideração às diferenças de tempo apresentadas no processo as variações do

tempo total podem ser vistas no Gráfico 4, que traz em minutos o tempo total para produção de uma amostra de cada tipo de padrão e porcentagem de preenchimento.

Gráfico 4 – Tempo total por amostra.



Fonte: Próprio autor, 2025

O tempo total de impressão das amostras mantém a tendência do tempo de *preenchimento* com um ligeiro aumento para as amostras 100-50% e 50-25% seguido de redução para 100-10% e 50-10%. Para os corpos de preenchimento em grade existe um aumento de 3% no tempo decorrido ao compararmos 100% e 100-50% e de 1,5% ao compararmos 50% e 50-25%, enquanto a redução que existe entre as amostras de preenchimento total e as com preenchimento heterogêneo é de 5% e 1,5% para 100-10% e 50-10%.

Para preenchimento em padrão linear o aumento se torna 4,5% entre 100% e 100-50% e se mantém 1,5% para preenchimento entre 50% e 50-25%, a redução que existe entre as amostras homogêneas e heterogêneas de 10% apresenta a mesma proporção de 4,5% e 1,5% para 100-10% e 50-10%, respectivamente.

Corpos impressos seguindo o padrão zig zag apresentam variações no tempo iguais aos de preenchimento linear, contando também com aumento de 3% e 1,5% para amostras 100-50% e 50-25% seguido de redução de 5% e 1,5% para corpos 100-10% e 50-10%.

### Análise por Lote

A critério de comparação as amostras que foram avaliadas em peso de material utilizado e tempo empregado individualmente foram extrapoladas para uma produção em lote sendo considerada a quantia de uma dúzia, que corresponde ao número máximo de amostras que podem ser impressas de uma única vez na área de impressão de 300 mm x 300 mm x 350 mm da impressora Anet A8 Plus, e a quantia de uma centena, sendo considerada a área de impressão de 1000 mm x 610 mm x 610 mm da impressora Stratasys F770, uma impressora de grande porte e uso industrial. Os valores de material empregados na produção individual e nos dois lotes determinados podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de material empregado por lote da amostra de tração.

Amostra	Material gasto (g)	Material gasto por dúzia (g)	Material gasto por centena (g)
TG100	9,80	117,60	980,00
TG100-50	8,90	106,80	890,00
TG100-10	8,10	97,20	810,00
TG50	8,50	102,00	850,00
TG50-25	8,00	96,00	800,00
TG50-10	7,70	92,40	770,00
TL100	9,80	117,60	980,00
TL100-50	8,90	106,80	890,00
TL100-10	8,10	97,20	810,00
TL50	8,50	102,00	850,00
TL50-25	8,00	96,00	800,00
TL50-10	7,70	92,40	770,00
TZ100	9,80	117,60	980,00
TZ100-50	9,00	108,00	900,00
TZ100-10	8,30	99,60	830,00
TZ50	8,60	103,20	860,00
TZ50-25	8,20	98,40	820,00
TZ50-10	7,90	94,80	790,00

Fonte: Próprio autor, 2025

Com o aumento do lote de produção o impacto da redução de material pode ser visto de maneira mais clara. A maior diferença pode ser observada entre o preenchimento homogêneo de 100% e o preenchimento heterogêneo de 100-10%, com pouca variação entre os tipos de

preenchimento. A redução aproximada é de 15%, padrão zig zag, até 17%, padrão linear e em grade em um lote de 100 unidades.

Os valores de tempo empregado na produção individual e nos dois lotes determinados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de tempo decorrido por lote da amostra de tração.

Amostra	Tempo final (h)	Tempo final por dúzia (h)	Tempo final por centena (h)
TG100	01:00	12:00	28:00
TG100-50	01:02	12:24	31:20
TG100-10	00:57	11:24	23:00
TG50	00:56	11:12	21:20
TG50-25	00:57	11:24	23:00
TG50-10	00:55	11:00	19:40
TL100	01:01	12:12	29:40
TL100-50	01:04	12:48	34:40
TL100-10	00:58	11:36	24:40
TL50	00:57	11:24	23:00
TL50-25	00:58	11:36	24:40
TL50-10	00:56	11:12	21:20
TZ100	01:00	12:00	28:00
TZ100-50	01:02	12:24	31:20
TZ100-10	00:57	11:24	23:00
TZ50	00:56	11:12	21:20
TZ50-25	00:57	11:24	23:00
TZ50-10	00:55	11:00	19:40

Fonte: Próprio autor, 2025

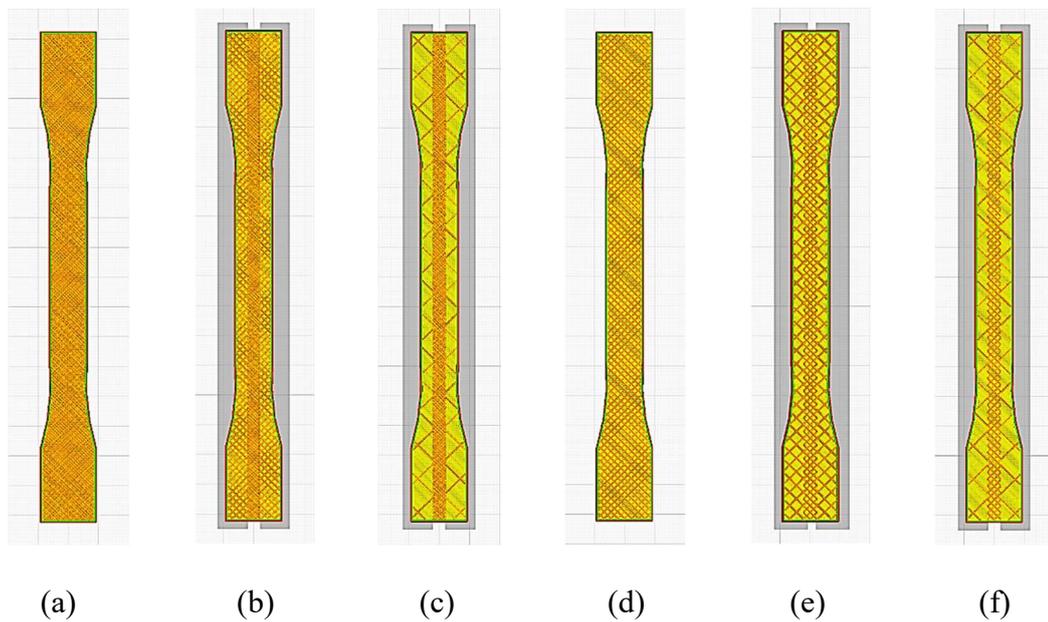
Avaliando o maior impacto, o processo de impressão com padrão linear sofre um aumento de aproximadamente 16,5% no tempo ao passar de um preenchimento homogêneo de 100% para um preenchimento heterogêneo de 100-50% em uma produção por centena. Ao comparar as amostras de 100% com amostras de 100-10%, preenchimento linear, temos uma redução estimada no mesmo valor de 16,5%.

### Análise de Preenchimento

O perfil de preenchimento dos corpos de prova é apresentado na Figura 7, para

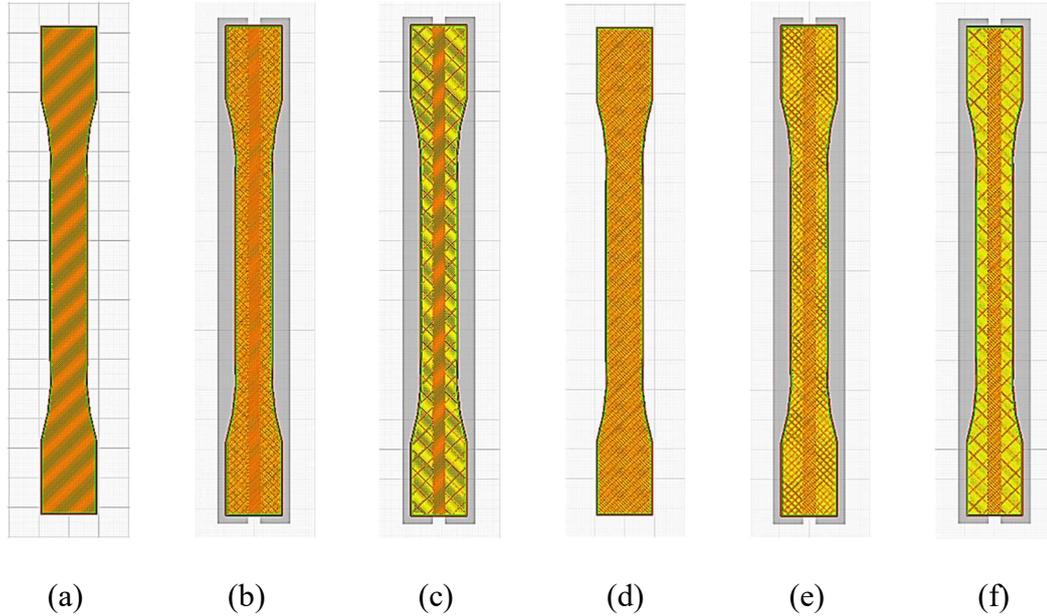
preenchimento tipo grade, Figura 8 para preenchimento tipo linear e Figura 9 para preenchimento tipo zig zag. Nas figuras é possível visualizar as partes onde ocorre a variação de preenchimento, zonas verticais visíveis nas amostras heterogêneas, assim como a representação da diferença marcada por um padrão mais denso em altas porcentagens,

Figura 7 – Perfis dos corpos de prova com preenchimento tipo grade (a) TG100, (b) TG100-50, (c) TG100-10 (d) TG50, (e) TG50-25, (f) TG50-10



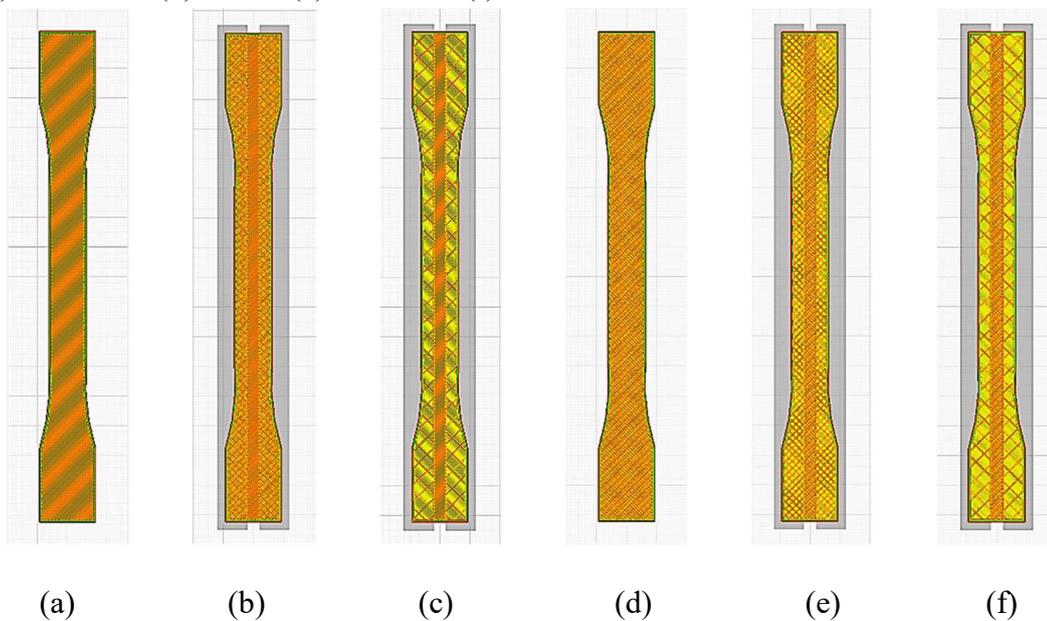
Fonte: Próprio autor, 2025

Figura 8 – Perfis dos corpos de prova com preenchimento tipo linear (a) TL100, (b) TL100-50, (c) TL100-10 (d) TL50, (e) TL50-25, (f) TL50-10



Fonte: Próprio autor, 2025

Figura 9 – Perfis dos corpos de prova com preenchimento tipo zig zag (a) TZ100, (b) TZ100-50, (c) TZ100-10 (d) TZ50, (e) TZ50-25, (f) TZ50-10



Fonte: Próprio autor, 2025

### Perspectivas Experimentais e Propostas Metodológicas

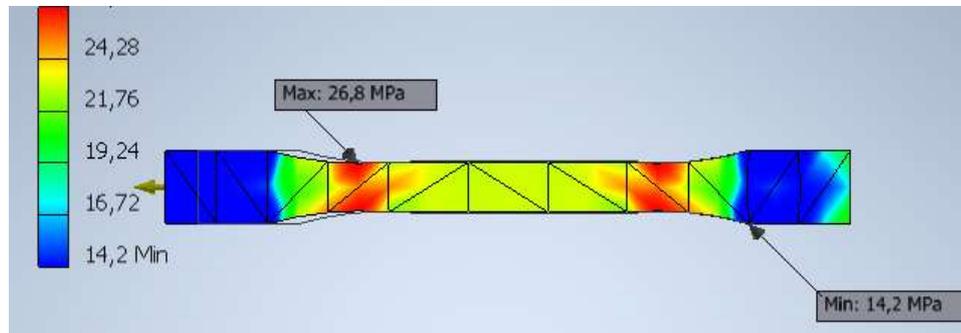
A análise experimental em corpos de prova 3D representa uma etapa fundamental para validar os resultados obtidos e explorar possíveis melhorias na aplicação prática. O uso de impressões 3D para experimentos traz vantagens consideráveis, como a capacidade de produzir geometrias complexas e a possibilidade de ajustar parâmetros diretamente relacionados ao processo de fabricação, como preenchimento, espessura das camadas e orientação de impressão, tais variáveis desempenham um papel crítico na análise da viabilidade mecânica e estrutural dos dados apresentados (Alharbi *et al.*, 2020).

Ensaio mecânicos tradicionais, como testes de tração, compressão e flexão, podem ser realizados em corpos de prova fabricados com os mesmos parâmetros descritos nas análises iniciais, a fim de avaliar os resultados e atestar a viabilidade dos aspectos de redução de massa de material e redução de tempo de impressão ao comparar esses com as limitações impostas pela heterogeneidade na resistência do material.

Simulações por meio de Análise de Elementos Finitos (FEA) podem ser empregadas para prever o comportamento estrutural das peças, a identificação das regiões de concentração de tensões e deformações críticas, trabalhada para definir zonas onde a variação de preenchimento pode ser aplicada ou não. Atualmente, a aplicação de Análise de Elementos Finitos em corpos impressos em 3D apresenta desafios significativos devido à complexidade inerente ao processo de manufatura aditiva, as características únicas das peças, como a estruturação em camadas, diferentes tipos de preenchimento e a anisotropia resultante da orientação de impressão, tornam difícil para os modelos computacionais preparados considerar esses fatores de forma integrada. Como alternativa é realizada criação de modelos 3D detalhados camada por camada em ferramentas de desenho CAD, visando replicar a estrutura interna das peças impressas (Ganeshkumar *et al.*, 2022).

Durante a execução da presente pesquisa, a análise por elementos finitos foi aplicada como ferramenta em corpos maciços (Figura 10), utilizando os parâmetros do ácido polilático, do inglês polylactic acid (PLA), comercial (Alharbi, 2020) e com carga máxima de 1 Kn . A Análise de Elementos Finitos foi utilizada como ferramenta de identificação dos pontos de maior stress que em futuros estudos podem ser avaliados como pontos de preenchimento únicos de maior porcentagem em corpos heterogêneos.

Figura 10 – Análise de Elementos Finitos em corpo de prova de tração



Fonte: Próprio autor, 2025

### Considerações Finais

O presente trabalho destaca o preenchimento heterogêneo como uma ferramenta estratégica para atender às crescentes demandas de personalização e eficiência nos processos de manufatura aditiva, além de oferecer alternativas práticas para tornar os processos de impressão 3D ainda mais sustentáveis e economicamente viáveis.

A análise revelou que, ao variar padrões e proporções de preenchimento, é possível reduzir o consumo de material em até 17,35%, como observado na comparação entre os corpos de prova com preenchimentos homogêneos de 100% e heterogêneos de 100-10% para preenchimento em grade e linear. Além disso, essa redução no material é acompanhada por melhorias no tempo de produção para determinadas proporções, como no preenchimento em grade 100-10%, que conta com uma redução de 5%.

Pesquisas futuras poderiam aprofundar-se na avaliação dos impactos mecânicos dessas configurações heterogêneas, desenvolvendo ensaios de tração, compressão, para validar o comportamento das peças em condições reais de uso. A introdução de testes de flexão, fadiga etc., baseados nos parâmetros explorados neste estudo, permitiria a criação de um banco de dados. Futuros estudos e ensaios poderiam explorar o desempenho de diferentes materiais combinados com preenchimento heterogêneo, como polímeros reforçados e compostos híbridos, ampliando ainda mais o escopo de uso dessa técnica. A continuidade desses estudos também pode contribuir para o desenvolvimento de ferramentas nos próprios *programas* de fatiamento (do inglês, *slicing*) para variação de material e porcentagem de preenchimento por

camada.

Destaca-se também que, independentemente dos valores obtidos em simulações mecânicas, pelo fato da técnica de manufatura aditiva ser aplicada em campos diversos, como a prototipagem rápida e a engenharia reversa (Gibon; Rosen; Stucker, 2015), a adoção de métodos que visam à redução do tempo de produção e do consumo de material é uma decisão relevante e estratégica.

### **Conclusão**

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam que a técnica de preenchimento heterogêneo impacta na otimização de recursos para manufatura aditiva, Estudos continuados na área de preenchimento heterogêneo em impressão 3D podem oferecer uma vasta gama de benefícios para a indústria e para o avanço da ciência dos materiais, abrindo caminho para a exploração de novas estratégias de design orientadas por requisitos específicos de resistência, leveza e custo.

Visto que estudos de variação de preenchimento interno ainda se mostram escassos, e não foram encontrados trabalhos acadêmicos que descrevam a metodologia como alternativa, é esperado que o presente trabalho seja um facilitador na realização de novos estudos. Ao descrever forma detalhada como combinar preenchimentos e parâmetros, pode ser usado como uma ferramenta base no desenvolvimento de novas alternativas e técnicas nessa mesma área otimizando o processo e o uso de matérias primas na impressão 3D.

### **Agradecimentos**

Ao Instituto Politécnico de Bragança - Portugal, pela possibilidade de intercambio de graduação e disponibilização dos laboratórios para realização das análises mecânicas. Ao Prof. Me. Jorge Henrique de Carvalho dos Santos, pela ideação do projeto de trabalho de conclusão de curso, dando todo suporte durante a estadia do autor em Portugal.

## Referências

- ALHARBI, Mohammed; KONG, Ing; PATEL, Vipulkumar Ishvarbhai. **Simulation of uniaxial stress–strain response of 3D-printed polylactic acid by nonlinear finite element analysis**. *Appl Adhes Sci*, v. 8, n. 5, 29 jul. 2020.
- AHN, *Sung-Hoon*; MONTERO, Michael; ODEL, Dan; ROUNDY, Shady; WRIGHT, Paul K. **Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 120, n. 1, p. 314-322, 2002.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- DROZDA, Fabiano Oscar; SILVA, Ricardo Júnior de Oliveira; CHIXARO, Davi Salvini; BRAVO, Dayane Perez Bravo. **Estudo do efeito da combinação de preenchimento na absorção de energia de impacto de peças fabricadas em PLA utilizando fabricação por filamentos fundidos**. *Brazilian Journal of Production Engineering*, v. 10, n. 3, p. 285–295, 2024.
- GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. New York: Springer, 2015. 498 p.
- GANESHKUMAR, S.; KUMAR, S. Dharani; MAGARAJAN, U.; RAJKUMAR, Sivanraju; ARULMURUGAN, Balasubramanian; SHARMA, Shubham; LI, Changhe.; ILYAS, Ahmad R.; BADRAN, Mohamed F. **Investigation of tensile properties of different infill pattern structures of 3D-printed PLA polymers: analysis and validation using finite element analysis in ANSYS**. *Materials 2022*, v. 15, n. 5142, 25 jul. 2022.
- KAMRAN, Medhavi; SAXENA, Abhishek. **A Comprehensive Study on 3D Printing Technology**. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, v. 6, n. 2, p. 63-69, ago. 2016.
- MAIA, Lucas Felipe Aguiar. **Análise da influência dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PETG utilizando método de Taguchi**. 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75198>. Acesso em: 02 de julho de 2024.
- MASOOD, Syed H.; SONG, Wei Q. **Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling**. *Materials and Design*, v. 25, p. 587–594, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306904000378>. Acesso em: 02 de julho de 2024.
- RODRIGUES, Vinícius Picanço, et al. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 12, n. 3, p. 1, 1 set. 2017.

RODRÍGUEZ-REYNA, Sandra; MATA, Cristian; DÍAZ-AGUILERA, Jorge H.; ACEVEDO-PARRA, Hector R.; TAPIA, Fidencio. **Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing.** *Materials Today Communications*, v. 33, 2022.

SUTEJA, Jaya; SOESANTI, Arum. **Mechanical Properties of 3D Printed Polylactic Acid Product for Various Infill Design Parameters: A Review.** *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1569, 2020.

TANVEER, Md. Qamar; HALEEM, Abid; SUHAIB, Mohd. **Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation.** *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 12, p. 1701, 2019.