



O IMPACTO DA COMBINAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS DE IMPRESSÃO NO CONSUMO DE INSUMO E TEMPO DE MÁQUINA EM MANUFATURA ADITIVA

KAUANY IASMIM ALVES COSTA - kauany.costa18727@alunos.funepe.edu.br
FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE PENÁPOLIS - FUNEPE

ANA BEATRIZ CAVALCANTI DE ALMEIDA - ana.almeida14483@alunos.funepe.edu.br
FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE PENÁPOLIS - FUNEPE

RENAN APARECIDO INACIO DA SILVA - renan.silva15629@alunos.funepe.edu.br
FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE PENÁPOLIS - FUNEPE

NATHAN PORTO - nathan.porto13940@alunos.funepe.edu.br
FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE PENÁPOLIS - FUNEPE

THIAGO GLISSOI LOPES - thiago.lopes@funepe.edu.br
FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE PENÁPOLIS - FUNEPE

ÁREA: 05. ENGENHARIA DO PRODUTO

SUBÁREA: 5.1 - GESTÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

RESUMO: ESTE TRABALHO INVESTIGA O IMPACTO DA COMBINAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS DE IMPRESSÃO SOBRE O CONSUMO DE INSUMO E O TEMPO DE MÁQUINA NA MANUFATURA ADITIVA POR FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF), COM FOCO NA APLICAÇÃO DESSES CONHECIMENTOS NA ENGENHARIA DO PRODUTO. O ESTUDO FOI CONDUZIDO EM DUAS FRENTES: PARÂMETROS GERAIS) E PARÂMETROS APLICADOS ÀS ESTRUTURAS DE SUPORTE, UTILIZANDO O SOFTWARE KIRI:MOTO E MODELOS DE REFERÊNCIA AMPLAMENTE RECONHECIDOS. OS RESULTADOS MOSTRARAM QUE O AUMENTO DA FRAÇÃO DE PREENCHIMENTO DE 10% PARA 20% ELEVOU O CONSUMO DE FILAMENTO DE 13,57 GRAMAS PARA ATÉ 17,23 GRAMAS, ENQUANTO O TEMPO DE IMPRESSÃO AUMENTOU DE 1H30MIN PARA ATÉ 1H49MIN. JÁ NAS ESTRUTURAS DE SUPORTE, A ELEVAÇÃO DA DENSIDADE PARA 0,5 COM PILARES ESTREITOS RESULTOU EM ATÉ 28H08MIN DE IMPRESSÃO E 139,46 GRAMAS DE FILAMENTO, ENQUANTO A COMBINAÇÃO COM PILARES LARGOS REDUZIU ESSES VALORES PARA 15H01MIN E 94,76 GRAMAS. CONCLUI-SE QUE A ESCOLHA CRITERIOSA DOS PARÂMETROS DE FATIAMENTO É FUNDAMENTAL PARA OTIMIZAR O DESEMPENHO EM IMPRESSÃO 3D, PERMITINDO O EQUILÍBRIO ENTRE CUSTO, TEMPO E QUALIDADE. OS ACHADOS REFORÇAM O PAPEL ESTRATÉGICO DO FATIAMENTO NA ENGENHARIA DO PRODUTO, COM IMPACTO DIRETO NA EFICIÊNCIA, SUSTENTABILIDADE E VIABILIDADE DE SOLUÇÕES EM MANUFATURA ADITIVA.

PALAVRAS-CHAVES: MANUFATURA ADITIVA; IMPRESSÃO 3D; FATIADOR; OTIMIZAÇÃO; PARÂMETROS DE IMPRESSÃO.

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA) tem transformado significativamente a indústria ao possibilitar a fabricação econômica e eficiente de produtos com geometrias complexas, especialmente em pequenos lotes (VOLPATO, 2017). Entre as diversas tecnologias de MA, destaca-se o processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), amplamente difundido tanto no setor industrial quanto no meio acadêmico (SOLOMON *et al.*, 2020). Criado na década de 1980 por S. Scott Crump, cofundador da Stratasys®, o FDM baseia-se na extrusão de filamentos termoplásticos fundidos por um bico aquecido, que deposita o material camada por camada até formar o objeto tridimensional desejado (CRUMP, 1992). Após a expiração da patente da tecnologia em 2009, os termos *Fused Filament Fabrication* (FFF) e impressão 3D passaram a ser utilizados de forma intercambiável para descrever o mesmo processo.

O funcionamento básico da impressão 3D envolve o deslocamento do cabeçote de extrusão ou da mesa de impressão visando o posicionamento do bocal para que ocorra a extrusão controlada do filamento, como ilustrado por Volpato (2017) na Figura 1. As peças obtidas por esse processo têm aplicação em diversos setores, como aponta Singh et al. (2020). Schniederjans (2017) exemplifica o uso em áreas como a aviação e defesa (para fuselagens leves), construção civil (modelos topográficos) e indústria automotiva (carrocerias aerodinâmicas). O setor médico também se beneficia dessa tecnologia, incluindo aplicações ortopédicas, ortodônticas e em diagnósticos médicos.

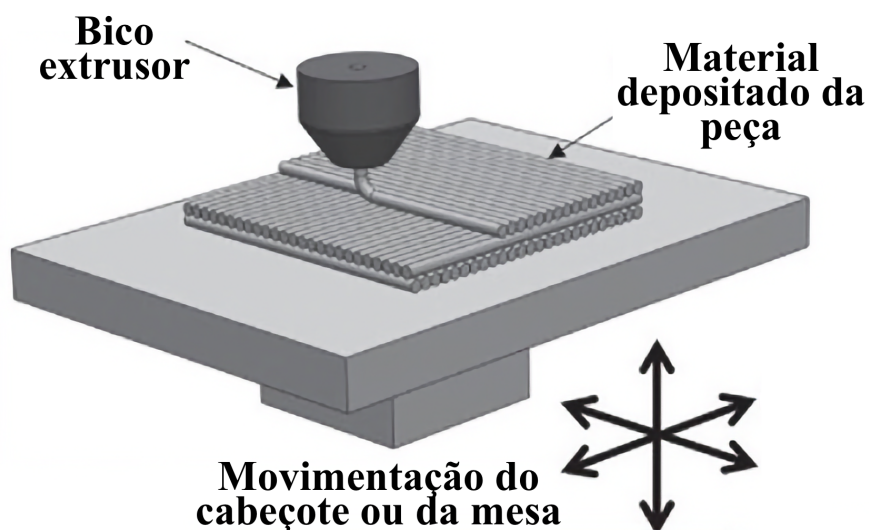


Figura 1. Processo de impressão 3D (VOLPATO, 2017)

A crescente adoção da impressão 3D em substituição a métodos tradicionais de produção e prototipagem rápida é fruto de sua compatibilidade com diferentes processos, facilidade de operação e capacidade de melhorar o desempenho industrial (SCHNIEDERJANS, 2017). Singh

et al. (2020) apresentam dados sobre a distribuição de sua aplicação nos principais setores industriais: 35% nos ramos automotivo e aeroespacial, 28% em serviços ao consumidor, 17% na biomedicina, 12% na educação e 8% em outras áreas.

Para garantir a qualidade do produto final, Mellor et al. (2014) descrevem oito etapas fundamentais da impressão 3D, que vão desde a obtenção do modelo digital até a aplicação final do objeto: (1) modelagem em CAD ou escaneamento de um objeto físico, (2) conversão do modelo para um formato de malha (como STL), (3) definição dos parâmetros de impressão e processamento no software de fatiamento, (4) configuração da impressora, (5) fabricação, (6) remoção e limpeza, (7) acabamento e (8) uso final da peça.

Na primeira etapa, quando o modelo tridimensional é criado por escaneamento, é comum que falhas na geometria exigem ajustes em software CAD. Após validado, o modelo é convertido para o formato de malha e importado no software de fatiamento. Nesse ambiente, são definidos os diversos parâmetros de impressão. Essas configurações impactam diretamente o tempo de impressão, a qualidade da peça e o consumo de filamento. O fatiador então gera o G-code, linguagem que orienta os movimentos da impressora durante a fabricação, e fornece estimativas de tempo de produção e uso de material (VOLPATO, 2017).

Na fabricação por FFF é comum a necessidade de empregar-se estruturas específicas, conhecidas como estruturas de suporte, para permitir a impressão de peças com geometrias que não possuam bases. Estas estruturas de suporte podem ser adicionadas manualmente pelo operador do processo no software fatiador, ou, o que é mais comum, serem geradas automaticamente no software fatiador por algoritmos que avaliam os parâmetros de impressão definidos e definem em que posição da peça será necessário adicionar estruturas de suporte (TELES *et al.*, 2022).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da combinação de diferentes parâmetros de impressão sobre o consumo de insumo e o tempo de máquina no processo de manufatura aditiva por Fused Filament Fabrication (FFF). Para isso, o estudo será estruturado em duas frentes: a análise de parâmetros gerais de impressão, que afetam o processo como um todo, e a análise de parâmetros específicos aplicados às estruturas de suporte. Essa divisão metodológica visa comparar os efeitos de configurações que influenciam globalmente o modelo impresso com aquelas que incidem apenas sobre os suportes, possibilitando uma compreensão mais precisa sobre as contribuições individuais de cada ajuste na eficiência do processo. Um outro diferencial do estudo está no uso do Kiri:Moto, um software/plataforma fatiador de código aberto que permite o fatiamento de peças diretamente em um navegador de internet.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. A MANUFATURA ADITIVA EM ENGENHARIA DO PRODUTO

A Manufatura Aditiva (MA) tem ampliado significativamente seu papel na engenharia do produto, especialmente ao transformar a prototipagem rápida em uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento ágil e funcional de produtos. Inicialmente voltada à verificação de forma e encaixe, a prototipagem rápida passou a incluir testes de desempenho e funcionalidade, como demonstrado por Czyzewski et al. (2009), que propuseram a fabricação de componentes eletricamente condutivos por impressão 3D com nanofibras de carbono. Essa abordagem evidencia que a prototipagem pode antecipar a validação funcional, reduzindo o tempo de desenvolvimento e aprimorando o ciclo iterativo de projetos.

O avanço das tecnologias de MA não se limita mais à fase de prototipagem, como revelam Gisario et al. (2019), ao destacarem sua aplicação na produção de peças finais em setores exigentes como o aeroespacial e o biomédico. Tais setores se beneficiam da capacidade da MA em produzir componentes customizados e com geometrias complexas, que seriam inviáveis por métodos convencionais. Com isso, a manufatura aditiva integra-se aos fluxos produtivos digitais e contribui para práticas como a engenharia simultânea, fortalecendo a capacidade de inovação nas fases iniciais de desenvolvimento de produtos.

Os processos de MA, especialmente por meio da impressão 3D, tem revolucionado a engenharia do produto ao permitir a criação de geometrias complexas com economia de material e maior liberdade de design. No entanto, a eficiência desses processos está diretamente ligada à configuração dos parâmetros de impressão durante a etapa de fatiamento, que define como o modelo será construído camada por camada. Estudos como o de Karadayi-Usta (2024) destacam que, para alcançar um desempenho sustentável na cadeia de suprimentos da manufatura aditiva, é essencial considerar o impacto das decisões de fatiamento sobre o consumo de insumos e energia.

Outros autores reforçam que a etapa de fatiamento, além de técnica, é também estratégica para a engenharia do produto em MA. Praveena et al. (2022) apontam que a correta definição dos parâmetros pode minimizar o uso de insumos e otimizar o tempo de operação sem comprometer as propriedades funcionais das peças. Isso se mostra particularmente relevante em aplicações biomédicas, onde o equilíbrio entre tempo de fabricação e qualidade estrutural é sensível. A otimização paramétrica, portanto, contribui não apenas para reduzir o custo unitário da peça, mas também para viabilizar a produção sob demanda em contextos de alta customização.

Por outro lado, Zhang et al. (2018) exploram o conceito de design bioinspirado aplicado à manufatura aditiva, mostrando que a integração entre modelagem computacional e parametrização do fatiamento pode aumentar a sustentabilidade do processo. Nesse cenário, o conhecimento técnico sobre os efeitos de cada parâmetro permite decisões mais precisas e alinhadas com os objetivos do projeto, seja em termos de desempenho estrutural, redução de resíduos ou eficiência energética.

2.2. O IMPACTO DO FATIAMENTO EM MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva tem sido impulsionada por avanços em softwares fatiadores, responsáveis por converter modelos tridimensionais em instruções no formato G-code para fabricação. O estudo de Suryatal et al. (2023). demonstrou que, ao utilizar estereolitografia com controle de fatiamento digital por meio de um código MATLAB, foi possível obter redução de custo na fabricação de componentes de médio porte, comparado aos softwares de fatiamento tradicionais. Esse ganho foi possível graças à melhoria na cura controlada de material, promovendo camadas mais finas e posicionamento mais preciso, que reduziram falhas de impressão e retrabalho.

O processo de fatiamento em manufatura aditiva exerce papel determinante na definição do tempo de impressão e na qualidade do produto final. Segundo Teles et al. (2022), a simples variação no posicionamento do modelo tridimensional para o fatiamento resultou em diferenças de até 100% no tempo total de fabricação e na massa de uma mesma peça, mesmo sem qualquer alteração geométrica. Essa evidência empírica destaca a importância de estratégias de orientação do modelo antes do fatiamento, uma vez que tais ajustes impactam diretamente o planejamento do processo e os custos associados à produção.

Além do tempo de impressão, o fatiamento influencia o consumo de material e a complexidade das estruturas de suporte. Damasceno et al. (2022) demonstraram que a alteração do parâmetro de impressão densidade de preenchimento de 10% para 100% pode elevar o tempo de fabricação em até 50%, bem como a massa da peça final em quase 100%. Essa relação proporcional evidencia que decisões tomadas ainda na etapa de fatiamento têm implicações diretas sobre o desempenho econômico e funcional do processo, o que torna a simulação prévia e o uso criterioso de parâmetros indispensáveis na engenharia do produto.

O impacto do fatiamento vai além da economia, afetando também o desempenho mecânico das peças impressas. Wendt et al. (2016). exploraram como variações nos parâmetros de fatiamento, como espessura de camada e orientação, influenciam na resistência de peças fabricadas pelo processo FFF. A pesquisa mostrou que ajustes finos no fatiamento resultaram

em peças com maior resistência mecânica em testes de tração, com pouca variação no tempo de impressão, o que evidencia o potencial do fatiamento para aprimorar simultaneamente custo e qualidade.

Desta forma, fica demonstrado que a escolha criteriosa dos parâmetros de impressão utilizados no fatiamento não é apenas uma exigência operacional, mas uma prática de engenharia do produto que alinha inovação, sustentabilidade e competitividade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos serão discutidos em subtópicos específicos, dados as especificidades de cada estudo. Todavia, para executar os testes de combinação de parâmetros de impressão gerais e os relativos ao suporte utilizou-se o software/plataforma Kiri:Moto em versão 4.1.10 acessada através do navegador Google Chrome em versão 138.0.7204.49/50. No Kiri:Moto, definiu-se como equipamento de referência a impressora Creality modelo Ender 3, com filamento PLA (ácido polilático). O programa foi utilizado conforme seus parâmetros padrão.

A escolha do Kiri:Moto se deu por este ser um software/plataforma fatiador de código aberto que permite o fatiamento de peças diretamente em um navegador de internet, o que permite a ampla reprodutibilidade dos testes aqui expostos. O PLA foi selecionado em razão de sua ampla utilização e compatibilidade com impressoras tanto abertas quanto fechadas, além de apresentar boa versatilidade, enquanto a impressora Creality Ender 3 reflete um modelo de impressora amplamente vendido globalmente.

3.1. COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS GERAIS DE IMPRESSÃO

Inicialmente, uma investigação foi conduzida com o propósito de avaliar o impacto da combinação de diferentes parâmetros gerais de impressão sobre o tempo de impressão e o consumo de material.

Para isso, foi selecionado o modelo *3DBenchy*, obtido do repositório Thingiverse (CREATIVETOOLS.SE, 2015). O modelo, o qual pode ser observado na Figura 2, foi escolhido por ser um modelo padrão enviado pela maioria dos fabricantes de impressoras 3D FFF como primeiro teste de impressão. Ademais, o modelo não requer suporte para impressão, o que permitirá analisar de forma adequada o impacto de combinações de parâmetros gerais de impressão.

No que se refere aos parâmetros gerais de impressão, partindo dos valores padrão no Kiri:Moto para a Creality Ender 3 com filamento PLA, foram propostas sete combinações que

envolvessem: camadas de topo, camadas de base e fração do preenchimento. A hipótese era que esses parâmetros, relacionados à formação das superfícies (camadas de topo e de base) e à estrutura interna (preenchimento), seriam os principais fatores a influenciar a qualidade e a integridade das peças impressas.

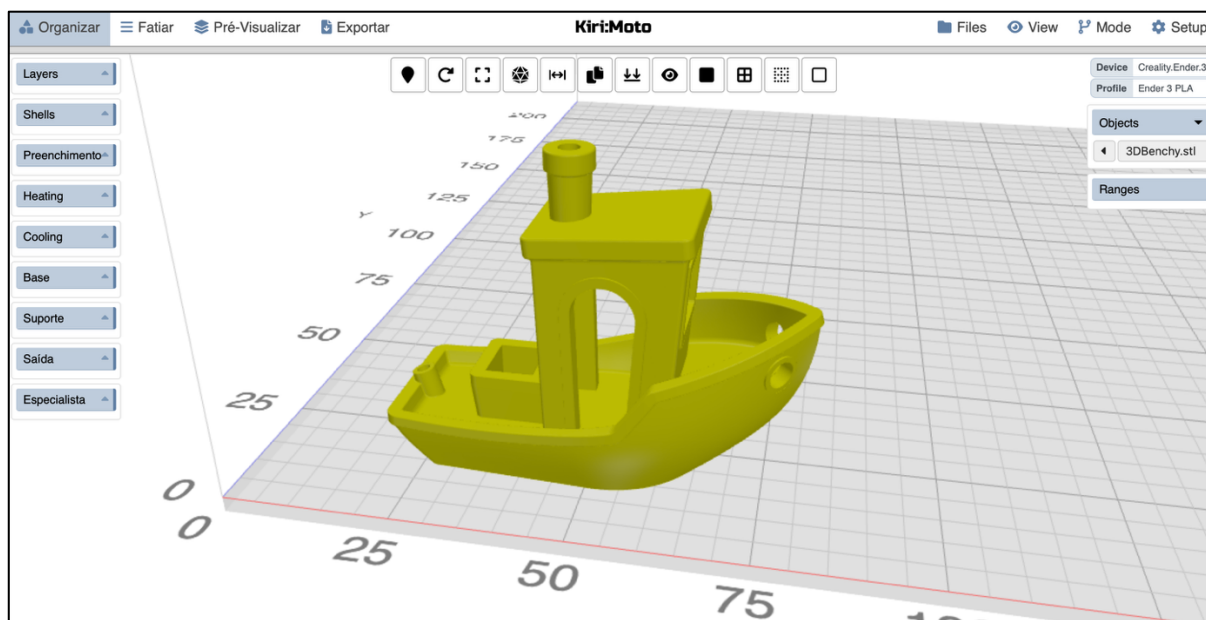


Figura 2. Peça para teste de combinação de parâmetros gerais posicionada no software fatiador

3.2. COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS RELATIVOS AO SUPORTE

Em seguida, uma investigação foi conduzida com o propósito de avaliar o impacto da combinação de diferentes parâmetros de impressão relativos ao suporte sobre o tempo de impressão e o consumo de material.

Para isso, foi selecionado o modelo *WoodBridge*, obtido do repositório Thingiverse (DYNAMOSAURUS, 2022). O modelo, o qual pode ser observado na Figura 3, foi escolhido por apresentar diversas regiões que não apresentam base, o que permitirá analisar de forma adequada o impacto de combinações de parâmetros relativos ao suporte.

A escala do modelo foi alterado para que apresentasse as dimensões de 150 x 51,67 x 44,44 mm, com o objetivo de aumentar os espaços das regiões que não apresentam base, incrementando a necessidade de suporte, o que permitirá analisar de forma adequada o impacto de combinações de parâmetros relativos ao suporte.

No que se refere aos parâmetros de impressão relativos ao suporte, partindo dos valores padrão no Kiri:Moto para a Creativity Ender 3 com filamento PLA, foram propostas combinações que envolvessem: densidade, tamanho do pilar e ângulo máximo. A hipótese era que esses parâmetros, relacionados à formação dos pilares de suporte seriam os principais fatores a

influenciar a quantidade de suportes necessários para garantir a qualidade e a integridade das peças impressas.

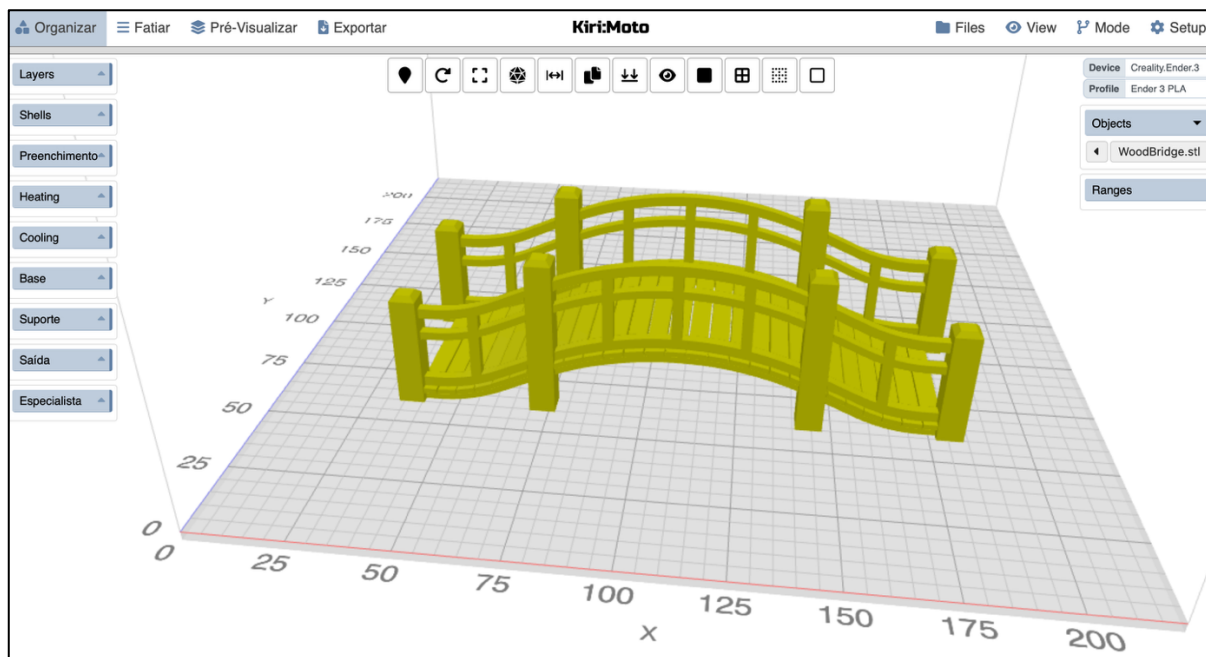


Figura 3. Peça para teste de combinação de parâmetros relativos ao suporte posicionada no software fatiador

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS GERAIS DE IMPRESSÃO

Os resultados obtidos com as diferentes combinações de parâmetros gerais de impressão, apresentados na Tabela 1, evidenciam variações relevantes tanto no tempo de impressão quanto no consumo de filamento. As composições 1 a 3, projetadas para isolar o efeito individual de cada parâmetro, indicaram que a duplicação das camadas de topo (de 3 para 6) elevou o tempo de impressão de 1h30min54s para 1h38min09s, um acréscimo de aproximadamente 7 minutos. Já o aumento na fração de preenchimento de 10% para 20% (com os demais parâmetros constantes) elevou o gasto de filamento de 13,57 g para 15,57 g, demonstrando ser o fator mais influente sobre o consumo de insumo.

Nas composições 4 a 6, que avaliam o impacto combinado de dois parâmetros por vez, observa-se que a junção de camadas de topo e base elevadas (com 6 camadas de topo e 4 de base) gerou o maior tempo de impressão entre as combinações duplas, atingindo 1h44min36s. Por outro lado, a combinação de topo elevado com preenchimento aumentado para 20% levou o consumo de filamento para 16,49 g, superando em quase 3 g a configuração original. Esses dados reforçam a influência cumulativa de parâmetros voltados à estrutura externa e densidade interna da peça.

Tabela 1. Métricas de impressão obtidas em relação a combinação de parâmetros gerais de impressão

Parâmetro	Valor original	Combinação n°						
		1	2	3	4	5	6	7
Camadas de topo	3	6	3	3	6	6	3	6
Camadas de base	2	2	4	2	4	2	4	4
Fração do preenchimento	0.1 10%	0.1 10%	0.1 10%	0.2 20%	0.1 10%	0.2 20%	0.2 20%	0.2 20%
Tempo de impressão	1h30m54s	1h38m09s	1h37m42s	1h36m44s	1h44m36s	1h43m26s	1h43m09s	1h49m31s
Gasto de filamento (g)	13,57 g	14,69 g	14,49 g	15,57 g	15,57 g	16,49	16,35 g	17,23 g

Comparando diretamente as combinações múltiplas com as isoladas, observa-se que os efeitos dos parâmetros não são simplesmente aditivos, mas interativos. Por exemplo, enquanto a combinação 1 (somente topo) aumentou o tempo em 7 minutos e 15 segundos, a combinação 4 (topo + base) resultou em um acréscimo de mais de 13 minutos, sugerindo que a presença conjunta de camadas superiores e inferiores potencializa o tempo necessário para a impressão. Isto também se aplica ao consumo de filamento: a combinação 3 (apenas preenchimento) teve um aumento de 2 g, enquanto a combinação 6 (topo + preenchimento) chegou a 16,49 g, evidenciando que camadas adicionais amplificam o efeito do maior preenchimento.

A combinação 7, por outro lado, incorpora simultaneamente os três parâmetros em níveis elevados e apresentou os maiores valores observados: 1h49min31s de tempo de impressão e 17,23 g de filamento consumido. Em comparação à configuração base, isso representa um acréscimo de aproximadamente 19 minutos e 3,66 g. Tais interações indicam que a otimização de parâmetros na impressão 3D deve considerar não apenas o impacto individual de cada fator, mas também como eles se influenciam mutuamente no desempenho global do processo.

A Figura 4 ilustra a peça após o processo de fatiamento, com parâmetros originais de impressão. Na visualização completa Figura 4(a), é possível observar o modelo tridimensional da embarcação com a estrutura característica da peça de teste “3DBenchy”, amplamente utilizada para avaliar precisão dimensional, resolução e comportamento de preenchimento. Já a ampliação de uma região específica Figura 4(b) revela com maior clareza a aparência tubular das camadas fatiadas, uma característica típica do processo FFF.

Nota-se que as camadas são depositadas em trajetórias concêntricas e sobrepostas, formando um contorno contínuo nas paredes externas e um preenchimento interno em padrão retilíneo. A coloração verde, visível nas regiões planas superiores e internas, representa o preenchimento sólido (solid fill), enquanto as camadas azuis evidenciam as conchas (shells)

externas da peça. A espessura de 0,2 mm por camada permite equilibrar resolução e velocidade de fabricação, resultando em um bom nível de detalhamento visual, especialmente nas curvas e bordas superiores da estrutura.

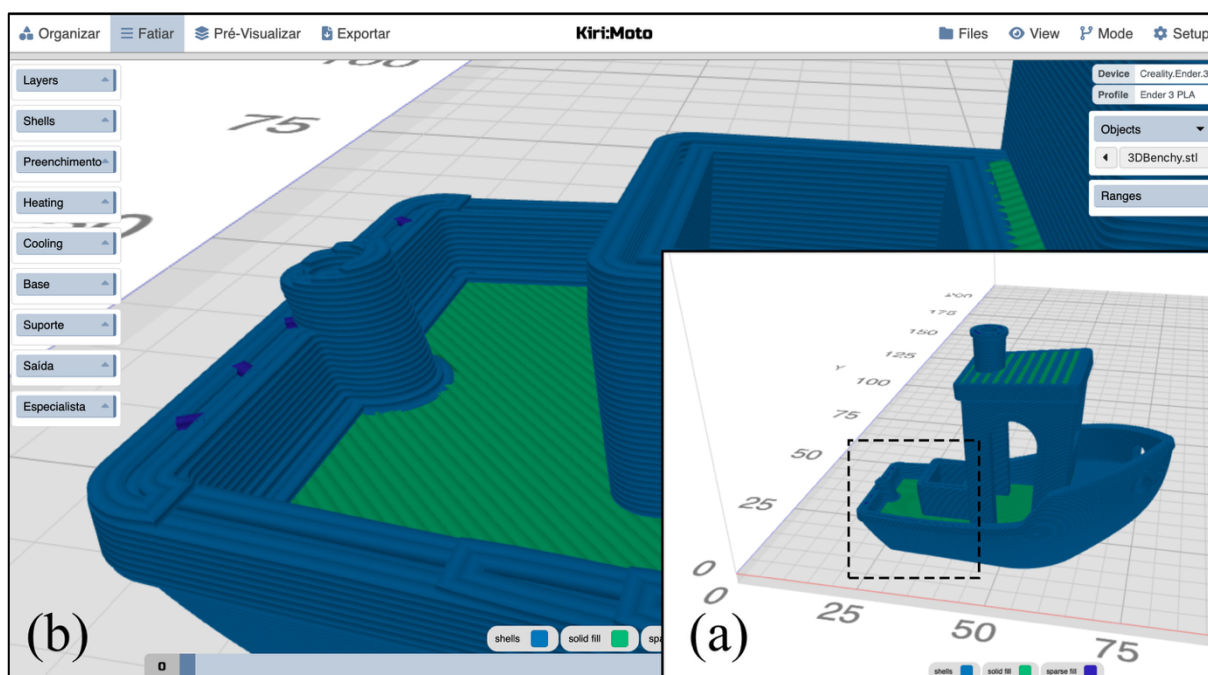


Figura 4. Peça para teste de combinação de parâmetros gerais após fatiamento em valores originais. (a) Peça em visualização completa. (b) Aproximação em região específica da peça.

A análise visual da Figura 4 reforça como os parâmetros de camadas e preenchimento influenciam diretamente a estrutura física da peça impressa. O aumento do número de camadas de topo, por exemplo, resultaria em uma cobertura mais espessa e visualmente mais densa nas regiões planas superiores. Da mesma forma, uma fração de preenchimento maior tornaria as áreas verdes mais compactas e resistentes, ao custo de maior consumo de material e tempo de impressão. Assim, o fatiamento se confirma como etapa fundamental para a antecipação dos efeitos práticos das decisões paramétricas na manufatura aditiva.

4.2. COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS RELATIVOS AO SUPORTE

Os resultados obtidos com as diferentes combinações de parâmetros de impressão relativos ao suporte, apresentados na Tabela 2, evidenciam variações relevantes tanto no tempo de impressão quanto no consumo de filamento. Tomando como referência a configuração original (densidade 0,25, pilar de 6 mm e ângulo de 1 grau), observa-se que alterações em cada um dos parâmetros provocam impactos distintos no desempenho da impressão 3D. A combinação padrão resultou em um tempo de 26h37min e um consumo de 109,18 g de filamento, servindo como base comparativa para as demais variações.

Tabela 2. Métricas de impressão obtidas em relação a combinação de parâmetros de impressão relativos ao suporte

Parâmetro	Valor original	Combinação n°						
		1	2	3	4	5	6	7
Densidade	0,25	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5
Tamanho do pilar	6	6	12	6	6	12	12	12
Ângulo máximo	1	1	1	2	2	2	1	2
Tempo de impressão	26h37m	28h01m	15h2m13s	26h30m15s	28h08m39s	15h01m40s	16h33m30s	16h33m40s
Gasto de filamento (g)	109,18 g	139,46g	94,81g	109,03g	139,30g	94,76g	128,32g	128,30g

A elevação da densidade para 0,5 mostrou-se um dos fatores mais impactantes na ampliação do tempo de fabricação e do gasto de material. Essa tendência é intensificada quando associada a ângulos maiores. Nas combinações 1 e 4, que utilizam densidade de 0,5 com pilares estreitos (6 mm), os tempos de impressão ultrapassaram 28 horas, e o consumo superou 139 g, sendo os maiores valores entre todas as combinações analisadas. Isso sugere que a combinação entre alta densidade e ângulo mais aberto contribui para estruturas de suporte mais complexas e custosas em termos operacionais.

Em contraste, as combinações 2 e 5, que mantêm densidade de 0,25 e adotam pilares mais largos (12 mm), apresentaram o melhor desempenho em termos de eficiência. Ambas resultaram em tempos de impressão em torno de 15 horas e consumo inferior a 95 g, indicando uma expressiva economia de tempo e material. Esses dados indicam que o aumento do diâmetro dos pilares, quando a densidade é mantida baixa, favorece a formação de suportes mais econômicos sem comprometer sua funcionalidade.

As combinações 6 e 7 apresentam uma combinação de densidade elevada (0,5) e pilares largos (12 mm), situando-se como opções intermediárias. O tempo de impressão nessas configurações ficou em torno de 16h33min e o consumo em aproximadamente 128 g. Ainda que mais onerosas do que as de densidade baixa, essas composições demonstraram ser mais eficientes do que aquelas com pilares estreitos e mesma densidade, sugerindo que o uso de pilares robustos pode compensar, em parte, os efeitos negativos da maior densidade.

Por fim, os dados analisados indicam que a seleção dos parâmetros de suporte deve considerar o equilíbrio entre robustez estrutural e eficiência de impressão. Para situações em que o tempo e o custo são fatores prioritários, a combinação de baixa densidade e pilares largos se mostra mais vantajosa. Já em contextos que exigem maior resistência dos suportes, o uso de densidade elevada pode ser necessário, mas deve ser acompanhado de ajustes no tamanho dos pilares para mitigar o aumento de tempo e consumo de material. O ângulo máximo, por sua

vez, deve ser utilizado com cautela, pois sua ampliação tende a elevar os custos operacionais, especialmente quando combinada com suportes densos e estreitos.

A Figura 5 apresenta a visualização da peça de teste após o fatiamento com os parâmetros de suporte originais (densidade 0,25, pilar de 6 mm, ângulo de 1 grau), permitindo observar características importantes que ajudam a interpretar os resultados quantitativos. Na vista geral (a), é possível perceber a distribuição uniforme dos suportes ao longo das superfícies curvas da peça, destacando-se a regularidade geométrica e a função estrutural de sustentação. Na aproximação (b), nota-se a característica tubular das camadas fatiadas, resultante do padrão de deposição helicoidal típico de suportes com baixa densidade e pilares estreitos. Essa configuração, embora estável, requer maior quantidade de percursos de extrusão para preencher o volume, contribuindo para o tempo de impressão observado de 26h37min.

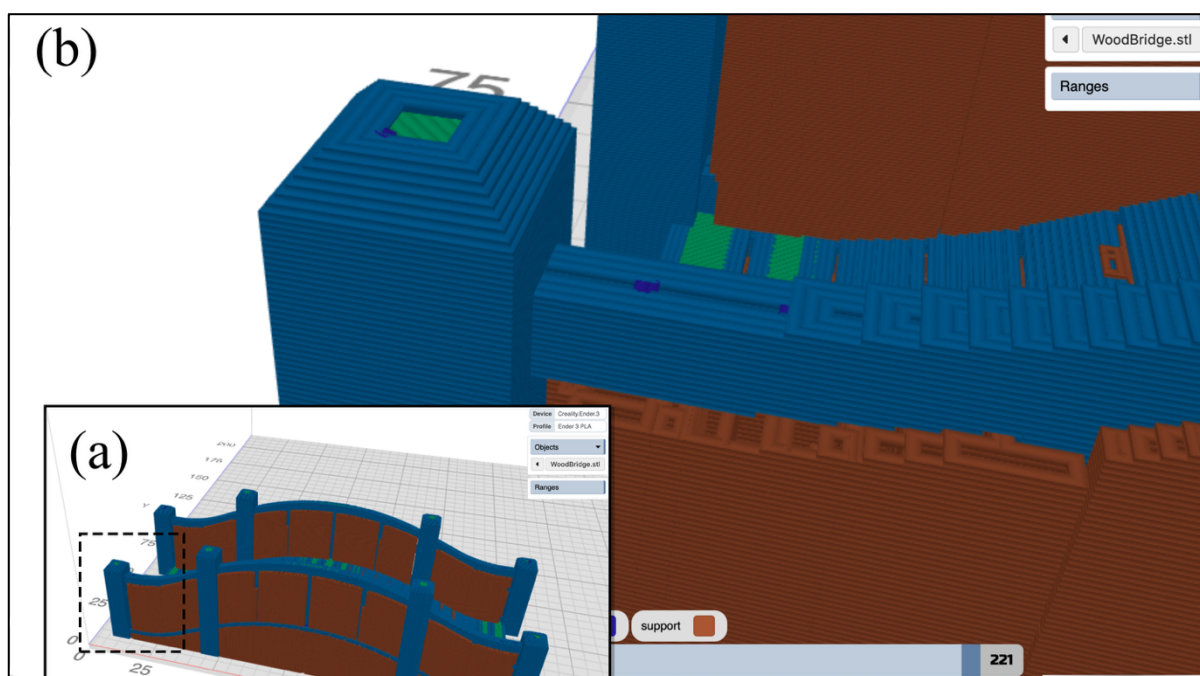


Figura 5. Peça para teste de combinação de parâmetros de suporte após fatiamento em valores originais. (a) Peça em visualização completa. (b) Aproximação em região específica da peça.

Outro aspecto relevante observado na Figura 5 é a espessura das camadas, definida em 0,2 mm no processo de fatiamento. Essa espessura influencia diretamente a resolução vertical da peça. Ainda que camadas mais finas promovam melhor detalhamento, elas também aumentam o tempo total de fabricação. No caso da composição original, o equilíbrio entre resolução e desempenho foi mantido, mas ao comparar com composições que usam pilares mais largos, é evidente que uma menor complexidade geométrica nas regiões de suporte poderia reduzir significativamente a sobreposição de camadas tubulares. Essa observação reforça a relação entre os padrões visuais do fatiamento e os dados de desempenho analisados

anteriormente, evidenciando como ajustes nos parâmetros influenciam não apenas valores numéricos, mas também a forma como a peça será construída camada por camada.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da combinação de diferentes parâmetros de impressão no consumo de insumo e no tempo de máquina, com foco em aplicações de manufatura aditiva na engenharia do produto. Para isso, foram realizados testes simulados com variações em parâmetros gerais de impressão e parâmetros relativos ao suporte, utilizando o software Kiri:Moto. A metodologia adotada permitiu isolar os efeitos individuais e conjuntos de cada parâmetro sobre as métricas de desempenho do processo.

Os resultados obtidos evidenciaram que o aumento da fração de preenchimento foi o fator mais significativo para o consumo de filamento, enquanto o número de camadas de topo e base influenciou diretamente o tempo de impressão. A combinação simultânea de todos os parâmetros em níveis elevados resultou nos maiores valores de tempo (1h49min31s) e consumo (17,23 g), reforçando a importância de uma abordagem integrada na definição dos parâmetros.

Nas variações dos parâmetros de suporte, observou-se que a densidade elevada associada a pilares estreitos levou ao maior tempo (28h08min39s) e maior consumo (139,46 g). Por outro lado, configurações com baixa densidade e pilares largos reduziram significativamente essas métricas. Esses achados indicam que o aumento da robustez dos suportes pode ser alcançado de forma mais eficiente por meio da geometria dos pilares, e não apenas pela densidade.

Conclui-se que o processo de fatiamento não deve ser tratado como uma etapa puramente operacional, mas sim como uma decisão estratégica de engenharia do produto. A parametrização adequada possibilita ganhos expressivos em eficiência, economia de material e redução de tempo, o que é fundamental em contextos de prototipagem rápida e produção sob demanda. Além disso, os padrões visuais observados nas camadas fatiadas evidenciam como os ajustes de parâmetros influenciam diretamente a construção das peças, sendo indispensável considerar essas relações para alcançar um equilíbrio ideal entre qualidade e desempenho.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Penápolis (FAFIPE), por meio de sua mantenedora, a Fundação Educacional de Penápolis (FUNPEPE), pelo apoio institucional e pela concessão da bolsa de Iniciação Científica e pelo auxílio de incentivo à pesquisa docente. Agradecem também aos integrantes do grupo de pesquisa *Gestão e Tecnologias Aplicadas à Manufatura Aditiva* da FUNPEPE, pelo suporte técnico e científico contínuo durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CREATIVETOOLS.SE. **3DBenchy – The jolly 3D printing torture-test**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:763622>. .
- CRUMP, S. S. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. 5,121,329. Depósito: 1992. Concessão: 1992.
- CZYZEWSKI, J.; BURZYŃSKI, P.; GAWEL, K.; MEISNER, J. Rapid prototyping of electrically conductive components using 3D printing technology. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 12–13, p. 5281–5285, 2009.
- DAMASCENO, A. B.; PANEQUE, T. N.; TELES, V. C. F.; MORAES, M. A. A. T. F.; LOPES, T. G. O Efeito do Parâmetro Densidade de Preenchimento na Obtenção de Peças pelo Processo FFF. *Em: V CONGRESSO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA | VII WORKSHOP DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA*, 2022, Lins. **Anais [...]**. Lins: Fatec Lins, 2022.
- DYNAMOSAURUS. **Wooden Bridge**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:5601517>. .
- GISARIO, A.; KAZARIAN, M.; MARTINA, F.; MEHRPOUYA, M. **Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2019.
- KARADAYI-USTA, S. Sustainable additive manufacturing supply chains with a plithogenic stakeholder analysis: Waste reduction through digital transformation. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 55, p. 261–271, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581724001585>.
- MELLOR, S.; HAO, L.; ZHANG, D. Additive manufacturing: A framework for implementation. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 149, p. 194–201, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527313003204>.
- PRAVEENA, B. A.; LOKESH, N.; BURADI, A.; SANTHOSH, N.; PRAVEENA, B. L.; VIGNESH, R. A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Em: MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS*, 2022, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2022. p. 1309–1313.
- SCHNIEDERJANS, D. G. Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 183, n. November 2016, p. 287–298, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.008>.
- SINGH, S.; SINGH, G.; PRAKASH, C.; RAMAKRISHNA, S. Current status and future directions of fused filament fabrication. **Journal of Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 55, n. April, p. 288–306, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.049>.
- SOLOMON, I. J.; SEVVEL, P.; GUNASEKARAN, J. A review on the various processing parameters in FDM. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], n. xxxx, p. 10–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>.

SURYATAL, B. K.; SARAWADE, S. S.; DESHMUKH, S. P. Fabrication of medium scale 3D components using a stereolithography system for rapid prototyping. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 40–52, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1018363921000350>.

TELES, V. C. F.; DAMASCENO, A. B.; PANEQUE, T. N.; MORAES, M. A. A. T. F.; LOPES, T. G. O efeito do Posicionamento do Modelo Tridimensional para o Fatiamento na Obtenção de Peças pelo Processo FFF. *Em: V CONGRESSO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA | VII WORKSHOP DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA*, 2022, Lins. **Anais [...]**. Lins: Fatec Lins, 2022.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017. 2017.v. 1.

WENDT, C.; FERNÁNDEZ-VIDAL, S. R.; GÓMEZ-PARRA, Á.; BATISTA, M.; MARCOS, M. Processing and Quality Evaluation of Additive Manufacturing Monolayer Specimens. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2016, p. 1–8, 2016. Disponível em: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2016/5780693/>.

ZHANG, H.; NAGEL, J. K.; AL-QAS, A.; GIBBONS, E.; LEE, J. J.-Y. Additive Manufacturing with Bioinspired Sustainable Product Design: A Conceptual Model. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 26, p. 880–891, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978918307844>.