

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro



Raphael Bastos Lessa

**Do código à matéria: Non-PlanaR3D, um novo
método para fabricação digital**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Design, do Departamento de de Artes E Design da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos
Co-orientador: Dr. João Victor Azevedo de Menezes Correia de Melo

Rio de Janeiro
Março de 2025



Raphael Bastos Lessa

**Do código à matéria: Non-PlanaR3D, um novo
método para fabricação digital**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Design da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos

Orientador

Departamento de de Artes E Design – PUC-Rio

Dr. João Victor Azevedo de Menezes Correia de Melo

Co-orientador

Departamento de de Artes E Design – PUC-Rio

Prof. Claudio Freitas de Magalhães

Departamento de Artes e Design – PUC-Rio

Prof. Daniel Ribeiro Alves Barboza Vianna

Pesquisador Autônomo

Rio de Janeiro, 20 de Março de 2025

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Raphael Bastos Lessa

Formado em Desenho Industrial pela PUC-Rio e especializado em Manufatura Aditiva e Design Generativo pela autodesk. Atuação voltada para o desenvolvimento de produtos utilizando design thinking e fabricação digital. Premiado internacionalmente, atualmente dedica parte do tempo a ajudar estudantes de todo Brasil a trazerem suas ideias à vida através de seu canal (r3dsign) e através do curso de criação de produtos para impressão 3D.

Ficha Catalográfica

Bastos, Raphael

Do código à matéria: Non-PlanaR3D, um novo método para fabricação digital / Raphael Bastos Lessa ; orientador: Jorge Roberto Lopes dos Santos ; co-orientador: João Victor Azevedo de Menezes Correia de Melo. – 2025.

80 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de de Artes E Design, 2025.

Inclui bibliografia

1. Informática – Teses. 2. Design Computacional. 3. Impressão 3D Não-Planar. 4. Impressão 3D. 5. Robótica.. I. Lopes dos Santos, Jorge Roberto. II. Azevedo de Menezes Correia de Melo, João Victor . III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de de Artes E Design. IV. Título.

CDD: 004

Aos meus pais, e colegas da PUc-Rio
pelo apoio e encorajamento.

Agradecimentos

Fazer agradecimentos é sempre uma tarefa complexa onde quase sempre somos injustos. Acredito que nessa jornada de quase 3 anos inúmeras pessoas, lugares e momentos foram pontes para que esse trabalho se realizasse e me auxiliaram nessa caminhada em busca do conhecimento.

Esse desafio tão nobre que nos foi passado por nossos antepassados, de tentar explicar os fenômenos da vida através da ciência é sem dúvidas um dos maiores fardos a se carregar como também uma enorme experiência de humildade intelectual. Como diria Bernardo de Chartres e Newton adaptou: "Se pude enxergar mais longe, foi porque me apoiei em ombros de gigantes". Dentre eles:

Ao meu orientador Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos pelos ensinamentos e confiança em mim na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador Professor Dr. João Victor Azevedo de Menezes Correia de Melo pela paciência e serenidade para me guiar nos momentos de dúvida.

Ao professor Diego García Cuevas por ter desbravado a área de pesquisa que me inseri.

A Professora Vera Nojima e ao colega Raphael Vinagre pelo auxílio ímpar na formulação deste texto.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

Aos amigos que fiz no laboratório por colaborarem com minha vida e trabalho.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora pelo tempo e atenção.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

A Deus e a vida por serem tão generosas comigo.

Resumo

Bastos, Raphael; Lopes dos Santos, Jorge Roberto; Azevedo de Menezes Correia de Melo, João Victor . **Do código à matéria: Non-PlanaR3D, um novo método para fabricação digital**. Rio de Janeiro, 2025. 80p. Dissertação de Mestrado – Departamento de de Artes E Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento do Non-Planar3D, um método inovador para fabricação digital não-planar, que busca superar limitações técnicas e econômicas das tecnologias de impressão 3D convencionais. Estruturada em três fases principais – exploratória, desenvolvimento e validação – a pesquisa combina design computacional, manufatura aditiva e robótica para criar uma abordagem acessível e flexível, compatível com impressoras 3D FDM modificadas e sistemas robóticos. O Non-Planar3D permite a geração de trajetórias não-planares, reduzindo anisotropia, otimizando tempo de fabricação e minimizando resíduos. A metodologia Research Through Design (RTD) foi empregada, com ciclos iterativos que integraram revisões de literatura, análises comparativas, entrevistas com especialistas e testes práticos, incluindo a fabricação de componentes complexos, como moldes para embarcações. Os resultados demonstram melhorias significativas em precisão dimensional, acabamento superficial e resistência mecânica, com redução de até 35% no tempo de fabricação em comparação com métodos convencionais. Além das contribuições técnicas, o Non-Planar3D promove a democratização da fabricação digital, especialmente em contextos como o brasileiro, onde soluções acessíveis são cruciais. Limitações identificadas, como a necessidade de maior automação e compatibilidade com diversos materiais, apontam direções para futuras pesquisas. Esta dissertação reforça o potencial do design como prática transformadora, integrando tecnologia e inovação para aplicações industriais, educacionais e sociais.

Palavras-chave

Design Computacional; Impressão 3D Não-Planar; Impressão 3D; Robótica..

Abstract

Bastos, Raphael; Lopes dos Santos, Jorge Roberto (Advisor); Azevedo de Menezes Correia de Melo, João Victor (Co-Advisor). **From Code to Matter: Non-Planar3D, a new method for digital fabrication.** Rio de Janeiro, 2025. 80p. Dissertação de Mestrado – Departamento de de Artes E Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation introduces Non-Planar3D, an innovative method for non-planar digital fabrication, aimed at overcoming technical and economic limitations of conventional 3D printing technologies. Structured in three main phases—exploratory, development, and validation—the research integrates computational design, additive manufacturing, and robotics to create an accessible and flexible approach compatible with modified FDM 3D printers and robotic systems. Non-Planar3D enables the generation of non-planar toolpaths, reducing anisotropy, optimizing fabrication time, and minimizing waste. Employing a Research Through Design (RTD) methodology, the study involved iterative cycles incorporating literature reviews, comparative analyses, expert interviews, and practical tests, including the production of complex components such as boat mold parts. Results demonstrate significant improvements in dimensional accuracy, surface finish, and mechanical strength, achieving up to a 35% reduction in fabrication time compared to conventional methods. Beyond technical contributions, Non-Planar3D fosters the democratization of digital fabrication, particularly in contexts like Brazil, where affordable solutions are critical. Identified limitations, such as the need for enhanced automation and broader material compatibility, suggest directions for future research. This work underscores the transformative potential of design, blending technology and innovation for industrial, educational, and social applications.

Keywords

Computational Design; Non-Planar 3D Printing; 3D Printing; Robotics.

Sumário

Glossário	14
1 Introdução	17
1.1 Oportunidades e limitações de pesquisa	18
1.2 Questões norteadoras do projeto	22
1.3 Objetivos da pesquisa	26
1.4 Objeto de pesquisa	27
1.5 Relevância da pesquisa	28
2 Métodos e Técnicas da Pesquisa	30
2.1 Ciclos Iterativos de Pesquisa	30
2.2 Instrumentos de Coleta e Análise	32
2.3 Validação e Reflexão Crítica	33
2.4 Comparação com Metodologias Alternativas	34
3 Fundamentação Teórica e Técnicas Pertinentes à Pesquisa	35
3.1 Manufatura Aditiva e Design Computacional: Uma Convergência	35
3.2 Técnicas e Ferramentas Específicas para Fabricação Não Planar	36
3.3 Impacto e Potencial da Manufatura Aditiva Não Planar	41
4 Desenvolvimento da Pesquisa	47
4.1 Experimentações	47
4.2 Desenvolvimento	51
5 Desenvolvimento do Plugin Non-PlanaR3D	53
5.1 Contexto e Objetivos	54
5.2 Funcionalidades Principais	54
5.3 Arquitetura Visual e Classificação Cromática	55
5.4 Pesquisa de Usuários e Organização de Código	56
5.5 Detalhamento dos Componentes	57
5.6 Instalação	71
5.7 Conclusão	72
6 Conclusão	73
6.1 Síntese da trajetória de pesquisa	73
6.2 Contribuições principais	73
6.3 Validação e impacto demonstrados	75
6.4 Limitações reconhecidas e oportunidades futuras	75
6.5 Implicações para o campo	76
6.6 Perspectivas futuras	76
6.7 Reflexões finais	76
7 Referências bibliográficas	78

Lista de figuras

Figura 1.1	Ilustração do processo de fabricação aditiva camada por camada.	17
Figura 1.2	Gráfico de crescimento do mercado de impressão 3D	19
Figura 1.3	Gráfico de popularidade da impressão 3D de 2010 até os dias atuais	19
Figura 1.4	Como a orientação influencia na resistência do objeto impresso em 3D	20
Figura 1.5	Objeto multiplanar no software de fatiamento 3D	21
Figura 1.6	Pesquisadores atingem uma melhoria de 6.35 vezes na resistência usando uma nova metodologia de impressão 3D FDM não planar.	22
Figura 1.7	Como o bico da impressora influencia na impressão 3D não planar	23
Figura 1.8	Colisão durante processo de impressão 3D não planar	23
Figura 1.9	Adaptação do bico para impressão 3D não planar	24
Figura 1.10	Impressão 3D com braço robótico	25
Figura 1.11	Software Albuild	25
Figura 1.12	Gráfico da participação da indústria no Brasil	28
Figura 2.1	Representação visual dos ciclos iterativos de pesquisa (concepção, prototipagem, teste e reflexão).	30
Figura 2.2	Diagrama dos instrumentos de coleta e análise de dados por fase da pesquisa.	32
Figura 3.1	Diagrama ilustrando a convergência entre Manufatura Aditiva e Design Computacional.	35
Figura 3.2	Exemplo de hotend modificado para impressão não-planar, podendo fazer extrusão em praticamente qualquer direção.	37
Figura 3.3	Diagrama comparativo das principais abordagens computacionais para geração de trajetórias não-planares.	38
Figura 3.4	Estratégias de segmentação de camadas não planar para diminuição de suportes e aumento de resistência mecânica.	39
Figura 3.5	Impressão de foguete por tecnologia DED (Fio de solda)	42
Figura 3.6	Projeto XKELET, um exemplo de aplicação biomédica personalizada	43
Figura 3.7	Simulação de radiação em plugin Ladybug	44
Figura 4.1	Interface <i>FullControl G-code</i> no EXCEL.	47
Figura 4.2	Primeira impressão não-planar gerada pelo <i>FullControl G-code</i> .	48
Figura 4.3	Vídeo tutorial Non Planar v1.0 + Silkworm	48
Figura 4.4	Porta-lápis não-planar impresso com GRASSHOPPER + <i>Silkworm</i> .	49
Figura 4.5	Hélice impressa via componentes <i>Non-PlanaR3D</i> .	50
Figura 4.6	Simulação virtual do braço robótico no RHINOCEROS.	51
Figura 4.7	Robô industrial imprimindo casco horizontalmente (<i>Flexboa/CEAD</i>).	51

Figura 5.1	Todos os módulos de controle do Non-Planar3D no Grasshopper	53
Figura 5.2	Detalhes de uma das caixas de controle da interface.	54
Figura 5.3	Classificação cromática e hierarquia dos componentes no Grasshopper.	56
Figura 5.4	Diagrama do fluxo de dados: da seleção de camadas à geração de G-code.	57
Figura 5.5	Componente Impressora cartesiana.	58
Figura 5.6	Componente Impressora cartesiana.	58
Figura 5.7	Componente Impressora cartesiana.	59
Figura 5.8	Componente Cube Flow Test.	59
Figura 5.9	Componente Cube Flow Test.	60
Figura 5.10	Componente Cube Flow Test.	60
Figura 5.11	Planar Layers: geração de camadas planas regulares no volume de construção.	61
Figura 5.12	Path Layers: seccionamento perpendicular a uma curva de referência.	62
Figura 5.13	Normal Layers: geração de camadas ao longo das normais UV da superfície.	62
Figura 5.14	Tween Layers: superfícies interpoladas entre duas geometrias de entrada.	63
Figura 5.15	Tween Support Layers: superfícies de suporte otimizado até o plano base.	63
Figura 5.16	Vector Layer Array: replicação e rotação de camadas ao longo de um vetor.	64
Figura 5.17	Surface UV Infill: caminhos zig-zag mapeados pelas coordenadas UV da superfície.	64
Figura 5.18	Intersection Infill: infill zig-zag resultante da interseção de planos e superfícies.	65
Figura 5.19	Support Infill: trajetórias de suporte configuráveis para facilitar a remoção.	66
Figura 5.20	Skirt & Brim: anéis de fixação configuráveis para melhorar a aderência inicial.	66
Figura 5.21	Travels (Arc z-hop): deslocamento em arco para evitar colisões.	67
Figura 5.22	Travels (z-hop): deslocamento vertical linear entre trajetórias.	67
Figura 5.23	Vertical Deformation: deformação controlada de curvas no eixo Z.	68
Figura 5.24	Horizontal Deformation: modificação paramétrica de curvas no plano XY.	68
Figura 5.25	Overhang Angle: análise visual de ângulos críticos de impressão.	69
Figura 5.26	Print Data: interface HUD com métricas de impressão em tempo real.	69
Figura 5.27	Normal Printing Planes: planos perpendiculares à normal da superfície de impressão.	70
Figura 5.28	Aligned Printing Planes: planos alinhados às direções definidas pelo usuário.	71
Figura 5.29	Aligned Printing Planes.	71
Figura 6.1	Diagrama das contribuições do <i>Non-Planar3D</i> .	73

Lista de tabelas

Tabela 1.1	Relação entre Objetivos, Métodos, Experimentos e Resultados	27
Tabela 2.1	Cronologia dos Cinco Ciclos Iterativos de Pesquisa	31
Tabela 2.2	Comparação entre Metodologias Consideradas	34
Tabela 3.1	Comparativo de Ferramentas Comerciais e Open-Source para Impressão Não-Planar	40
Tabela 4.1	Resultados Sintetizados dos Surveys e Testes de Desempenho	50
Tabela 6.1	Síntese das Limitações e Desafios Identificados na Pesquisa	75
Tabela 6.2	Limitações identificadas e direcionamentos futuros.	75

Lista de Abreviaturas

API – Application Programming Interface

Brep – Boundary Representation

CAD – Computer-Aided Design

CNC – Controle Numérico Computadorizado

DfAM – Design para Manufatura Aditiva

FDM – Modelagem por Deposição Fundida

MA – Manufatura Aditiva

NURBS – Non-Uniform Rational B-Splines

RTD – Research Through Design

STL – Standard Triangle Language

HUD – Heads-Up Display

SLA – Estereolitografia

SLS – Sinterização Seletiva a Laser

STL – Standard Triangle Language

*An interface can illuminate connections or
leave them murky and opaque.*

Gui Bonsiepe, .

Glossário

- **AdaOne:** Plataforma comercial proprietária da ADAXIS para geração de trajetórias não-planares em manufatura aditiva.
- **AIbuild:** Sistema integrado para fabricação aditiva avançada que combina software de planejamento com hardware robótico.
- **Anisotropia:** Propriedade de um material que exhibe características físicas diferentes em direções distintas; em impressão 3D, refere-se à variação de resistência entre camadas (eixo Z) e dentro das camadas (planos XY).
- **API:** Application Programming Interface; conjunto de rotinas e protocolos que permite a comunicação entre diferentes componentes de software.
- **CAD:** Computer-Aided Design; sistema de desenho auxiliado por computador para criação, modificação e análise de projetos técnicos.
- **Cinemática Inversa:** Processo de cálculo dos ângulos das juntas de um robô necessários para posicionar sua ferramenta terminal em uma orientação e posição desejadas no espaço.
- **CNC:** Controle Numérico Computadorizado; tecnologia que automatiza máquinas-ferramenta por meio de programação digital.
- **Design Computacional:** Abordagem metodológica que utiliza algoritmos e programação visual (p.ex. Grasshopper) para criar e otimizar geometrias complexas de forma paramétrica.
- **DfAM (Design for Additive Manufacturing):** Metodologia de design que otimiza projetos especificamente para fabricação aditiva, minimizando desperdício de material e melhorando desempenho estrutural.
- **Efeito Escada (Stair-stepping):** Degraus visíveis em superfícies curvas ou inclinadas impressas em 3D devido à deposição sequencial em camadas horizontais planares.
- **Fabricação Não-Planar:** Técnica avançada de impressão 3D que deposita material em trajetórias curvilíneas tridimensionais, reduzindo necessidade de suporte e minimizando anisotropia.
- **FDM (Fused Deposition Modeling):** Tecnologia de impressão 3D que extruda filamento termoplástico fundido através de um bico aquecido, depositando material camada por camada.

- **Firmware:** Software de baixo nível embarcado que controla diretamente o hardware de uma impressora 3D, gerenciando movimentos, temperaturas e funções operacionais.
- **Flexboat:** Projeto de validação industrial do *Non-PlanaR3D* desenvolvido em parceria com uma empresa brasileira de embarcações para demonstração prática da tecnologia.
- **Food4Rhino:** Plataforma online oficial para distribuição de plugins, ferramentas e recursos complementares para os softwares Rhinoceros e Grasshopper.
- **G-code:** Linguagem de programação padronizada que define comandos de movimento, temperatura e ações específicas em máquinas CNC e impressoras 3D.
- **Grasshopper:** Ambiente de programação visual integrado ao Rhino 3D, amplamente utilizado em design paramétrico e design computacional.
- **Hotend:** Conjunto de componentes da impressora 3D FDM responsável pelo aquecimento, fusão e extrusão controlada do filamento termoplástico.
- **Impressão 3D:** Termo genérico para manufatura aditiva, especialmente referente a processos de deposição de material como FDM, SLA e SLS.
- **Malha Poligonal (Mesh):** Estrutura de dados que representa superfícies 3D através de uma coleção de vértices, arestas e faces poligonais interconectados.
- **Malha Triangular:** Representação específica de superfície 3D composta exclusivamente por triângulos interconectados; estrutura base do formato de arquivo STL.
- **Manufatura Aditiva (MA):** Processo de fabricação que constrói objetos tridimensionais adicionando material camada por camada, contrastando com métodos subtrativos tradicionais.
- **Non-PlanaR3D:** Método inovador desenvolvido nesta pesquisa para geração automatizada de trajetórias não-planares em impressoras 3D convencionais e sistemas robóticos.
- **NURBS:** Non-Uniform Rational B-Splines; representação matemática precisa de curvas e superfícies complexas amplamente utilizada em softwares CAD profissionais.
- **Polilinha (Polyline):** Sequência ordenada de pontos conectados que define uma trajetória contínua no espaço, fundamental para geração de caminhos de ferramenta.

- **RepRap (Replicating Rapid-prototyper)**: Movimento colaborativo de código aberto focado no desenvolvimento de impressoras 3D auto-replicas capazes de produzir seus próprios componentes.
- **RTD (Research Through Design)**: Metodologia de pesquisa que utiliza o processo criativo de design como instrumento primário para geração e validação de conhecimento científico.
- **STL**: Standard Triangle Language; formato de arquivo padrão que representa geometrias 3D através de malhas de triângulos para manufatura aditiva.
- **Surface UV**: Sistema de coordenadas bidimensionais (U,V) que mapeia pontos de uma superfície tridimensional para um plano, essencial para aplicação de texturas e análises paramétricas.
- **Trajetórias Não-Planares**: Caminhos de deposição curvilíneos tridimensionais que orientam o extrusor para depositar material seguindo superfícies não horizontais.
- **Voxel**: Elemento volumétrico básico em uma grade tridimensional regular, análogo tridimensional do pixel em imagens bidimensionais.

1

Introdução

A Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, tem revolucionado os processos industriais desde sua concepção por Chuck Hull na década de 1980, evoluindo de uma tecnologia de prototipagem para um método de fabricação que transforma fundamentalmente a relação entre design e produção (NGO et al., 2018). Particularmente, a impressão 3D não-planar representa uma fronteira emergente que desafia as convenções estabelecidas de fabricação por camadas horizontais, oferecendo novas possibilidades para otimização estrutural, qualidade superficial e expressão formal (DAI et al., 2022). O Non-PlanaR3D, método desenvolvido nesta pesquisa, surge como resposta às limitações técnicas e econômicas que têm restringido a democratização desta tecnologia avançada, propondo uma abordagem acessível e flexível para a geração de trajetórias não-planares em impressoras 3D convencionais e sistemas robóticos.

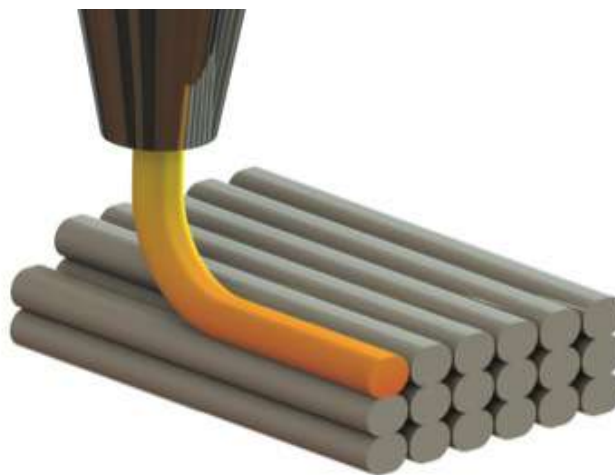


Figura 1.1: Ilustração do processo de fabricação aditiva camada por camada.

Fonte: 3D Applications (2018)

A trajetória investigativa que culminou neste desenvolvimento iniciou-se com explorações sistemáticas de ferramentas de design computacional, desde interfaces gráficas básicas até ambientes paramétricos complexos como o Grasshopper, revelando o potencial transformador da integração entre programação visual e fabricação digital (MENGES, 2020). Esta pesquisa se insere em um contexto global de crescente interesse pela fabricação não-planar, impulsionado por avanços recentes em algoritmos de planejamento de trajetória, sistemas robóticos acessíveis e métodos de otimização estrutural (OXMAN et al., 2023). Ao mesmo tempo, responde a demandas locais por tecnologias que possam

fortalecer a competitividade da indústria brasileira através da inovação em processos de fabricação.

1.1

Oportunidades e limitações de pesquisa

A manufatura aditiva constitui um paradigma industrial caracterizado pela adição sequencial de material através da construção e empilhamento de camadas sucessivas, representando uma ruptura fundamental com os processos subtrativos e formativos tradicionais (GIBSON et al., 2021). Historicamente restrita a grandes corporações até o início dos anos 2000, com aplicações predominantemente voltadas à prototipagem rápida, esta tecnologia experimentou uma democratização significativa impulsionada pelo movimento RepRap (*Replicating Rapid-prototyper*) e pela expiração de patentes fundamentais (WOHLERS et al., 2023). Este movimento consistia em criar impressoras 3D DIY (faça você mesmo) utilizando as próprias máquinas existentes para imprimir peças de novas máquinas de baixo custo, permitindo que a manufatura aditiva ultrapassasse a fase do “*hype*” para alcançar uso popular, conforme descrito na curva de difusão de inovação (ROGERS, 2003).

Atualmente, observa-se uma adoção acelerada da impressão 3D entre consumidores, pequenas empresas e setores industriais diversos, evidenciada pelo crescimento exponencial de investimentos globais nesta área, conforme demonstrado nas Figuras 1.2 e 1.3. Esta expansão, contudo, revela não apenas oportunidades, mas também limitações técnicas que demandam abordagens inovadoras, particularmente no contexto da impressão não-planar (LOH et al., 2024).

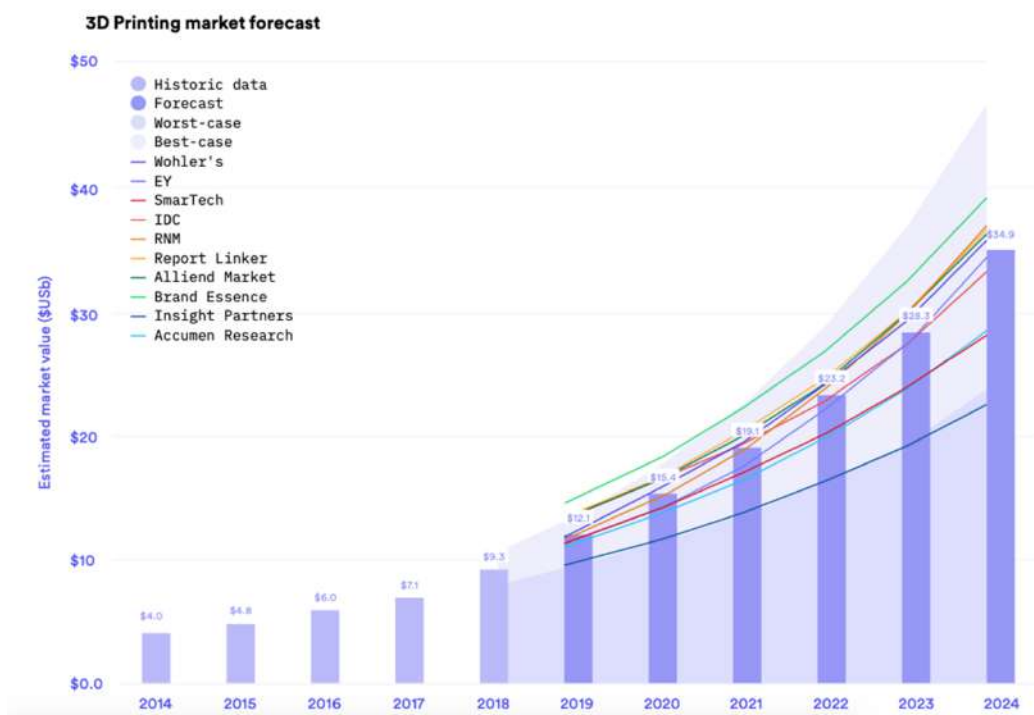


Figura 1.2: Gráfico de crescimento do mercado de impressão 3D
(3D Hubs, 2022)

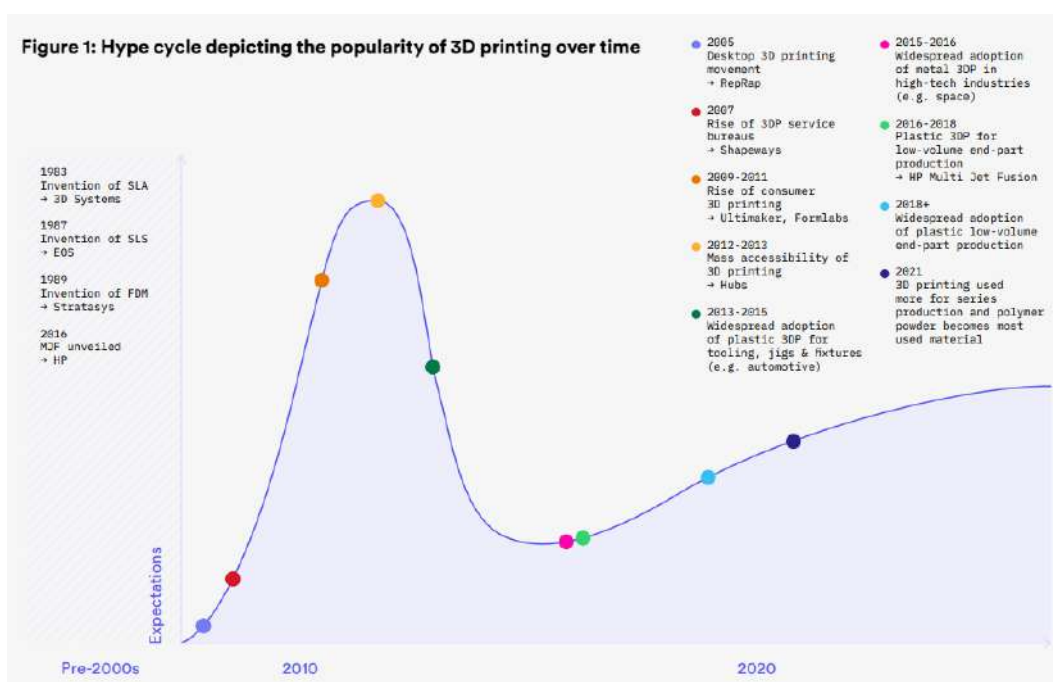


Figura 1.3: Gráfico de popularidade da impressão 3D de 2010 até os dias atuais
(3D Hubs, 2022)

Para empresas e indivíduos interessados nos aspectos funcionais e comerciais da impressão 3D, que oferece benefícios significativos como produção sob demanda, customização em massa, redução de custos logísticos, e prototipagem

rápida, torna-se essencial compreender o campo emergente do DfAM (*Design for Additive Manufacturing*). Esta área de conhecimento foca na criação de objetos otimizados para tecnologias aditivas, visando minimizar desperdício de material, aprimorar a estética das peças e melhorar suas propriedades mecânicas, frequentemente superando produtos fabricados por métodos tradicionais graças à possibilidade de criar geometrias extremamente complexas (LEARY, 2019; THOMPSON et al., 2020).

Um dos desafios fundamentais da manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM - *Fused Deposition Modeling*) reside na disposição interna da geometria das peças. A natureza sequencial do processo aditivo FDM, onde linhas são depositadas camada sobre camada, resulta em propriedades mecânicas não uniformes, fenômeno conhecido como anisotropia. A anisotropia (do grego, $\alpha\nu$: prefixo privativo (negação), $\iota\sigma\omega$: igualar, $\tau\rho\pi\sigma$: direção) refere-se à variação das propriedades físicas do material em diferentes direções, manifestando-se na impressão 3D através de resistência mecânica significativamente menor entre camadas (eixo Z) comparada à resistência dentro de uma mesma camada (planos XY) (DUTY et al., 2021).

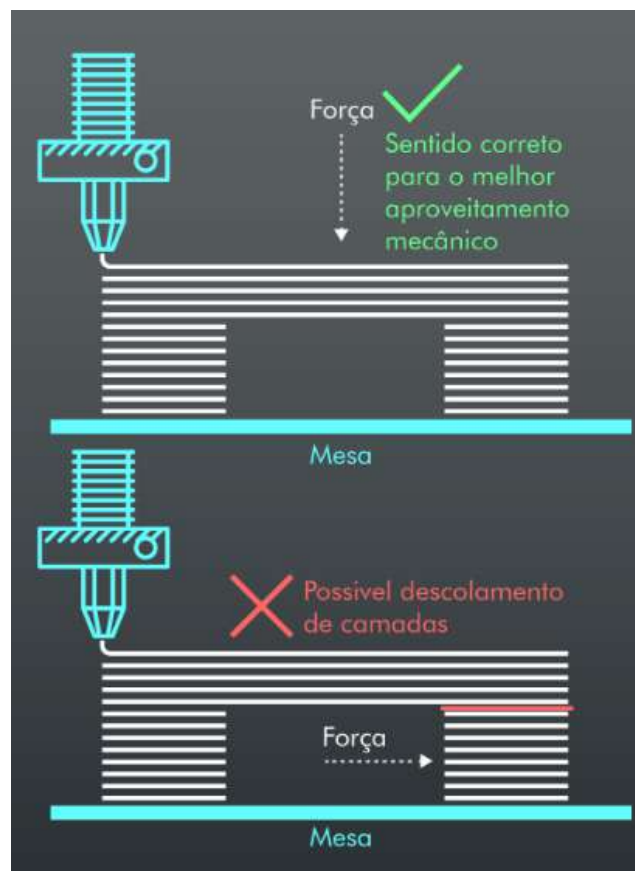


Figura 1.4: Como a orientação influencia na resistência do objeto impresso em 3D

(R3DSIGN, 2023a)

Na prática, este fenômeno significa que objetos impressos em 3D apresentam comportamento mecânico direcional, com implicações não apenas para resistência estrutural, mas também para acabamento superficial e comportamento térmico. Estudos recentes quantificaram esta variação, demonstrando que a resistência à tração na direção Z pode ser até 70% inferior à resistência nas direções X e Y em peças impressas por FDM convencional (ZHAO; CHEN; ZHOU, 2022). Para mitigar os efeitos da anisotropia, diversas estratégias são empregadas, incluindo otimização de parâmetros de impressão (temperatura, velocidade, espessura de camada), seleção de materiais com melhor adesão entre camadas, e projeto adequado considerando a orientação de impressão.

Uma abordagem comum para contornar limitações mecânicas consiste em rotacionar o objeto para alinhá-lo com a direção de impressão mais favorável ou redesenhar a geometria para atender critérios mecânicos específicos. Entretanto, esta solução torna-se inviável para geometrias complexas, como ilustrado na Figura 1.5, que mostra uma hélice multiplanar no software de fatiamento.

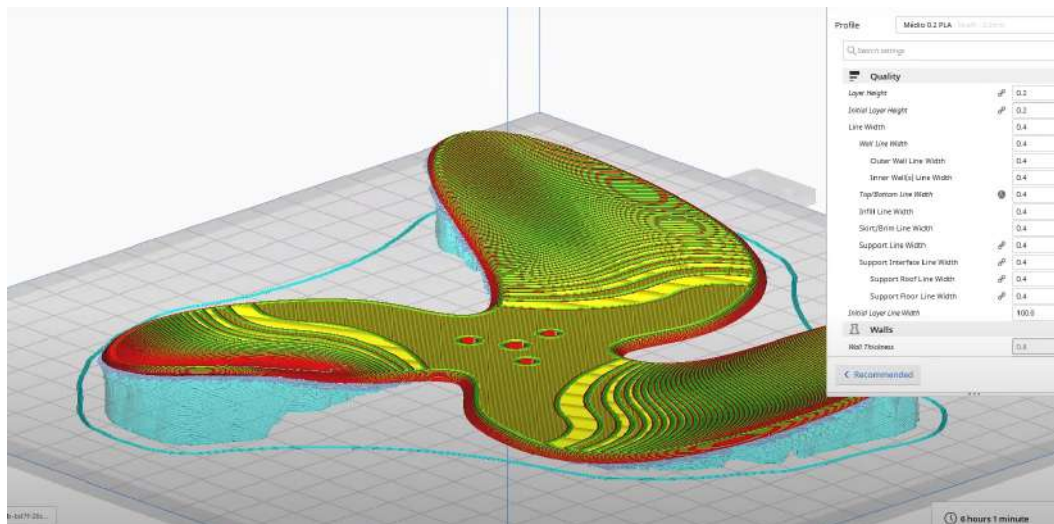


Figura 1.5: Objeto multiplanar no software de fatiamento 3D
(R3DSIGN, 2023b)

Outro desafio significativo deriva da limitação dimensional da impressão 3D convencional, que opera em uma única altura por vez, aumentando consideravelmente o tempo de fabricação. Ao contrário de máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado) que podem seguir a direção natural da superfície, impressoras 3D tradicionais trabalham em alturas fixas sequenciais. Consequentemente, um objeto como a hélice ilustrada, com apenas 3mm de espessura, requer aproximadamente 90 camadas de 0,3mm em vez das 10 camadas teoricamente necessárias, multiplicando o tempo de processamento e, por extensão, o custo de produção.

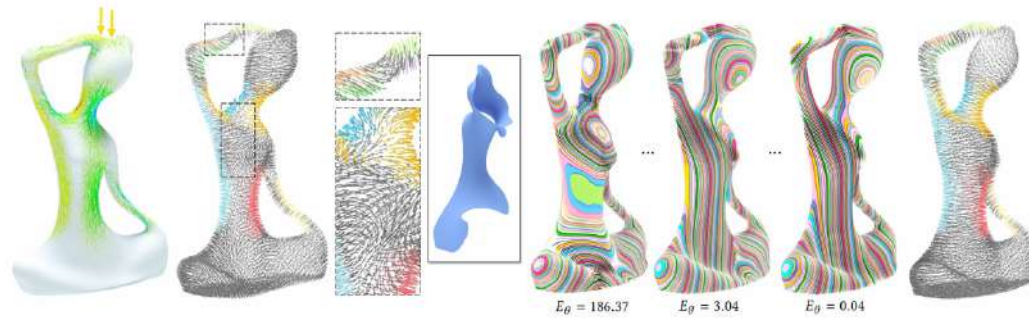


Figura 1.6: Pesquisadores atingem uma melhoria de 6.35 vezes na resistência usando uma nova metodologia de impressão 3D FDM não planar.

<https://3dprintingindustry.com/news/researchers-achieve-6-35x-part-strength-increases-with-new-non-planar-fdm-framework-175248/>

A impressão 3D não-planar emerge como solução promissora para estes desafios, permitindo que a fabricação ocorra simultaneamente nos três eixos cartesianos, resultando em maior controle geométrico, velocidade de produção otimizada, propriedades mecânicas aprimoradas e redução significativa de resíduos provenientes de estruturas de suporte. Estudos recentes demonstram que abordagens não-planares podem aumentar a resistência mecânica em até 6,35 vezes em comparação com métodos planares convencionais (WANG et al., 2022), representando um avanço significativo para aplicações estruturais e funcionais.

1.2

Questões norteadoras do projeto

A implementação efetiva da impressão 3D não-planar enfrenta dois obstáculos técnicos fundamentais que têm limitado sua adoção generalizada. O primeiro refere-se às restrições geométricas dos sistemas de extrusão convencionais. A maioria das impressoras FDM disponíveis comercialmente incorpora conjuntos extrusores projetados exclusivamente para deposição em camadas planares, apresentando limitações significativas quando aplicados a trajetórias não-planares (ZHAO; CHEN; ZHOU, 2022). Estas configurações frequentemente resultam em colisões entre o conjunto extrusor e a geometria em construção, pois carecem do ângulo de folga e do espaçamento necessários para navegação eficiente em diferentes alturas da superfície de impressão, como ilustrado na Figura 1.7.

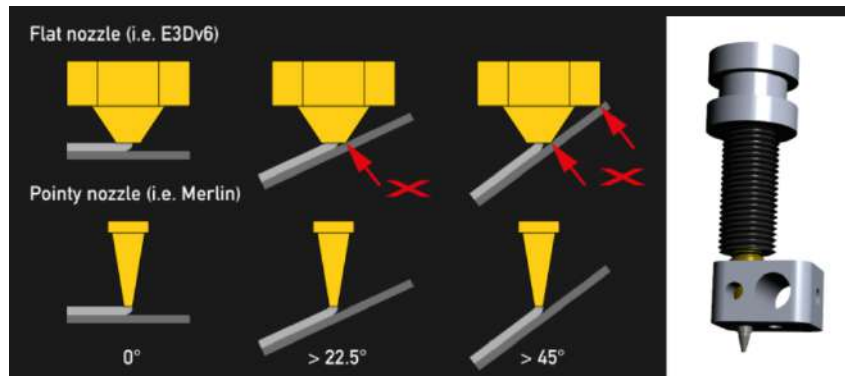


Figura 1.7: Como o bico da impressora influencia na impressão 3D não planar (MORITZ, 2016)

Este aspecto representa um ponto crítico de atenção, pois colisões entre a cabeça de impressão e a peça podem resultar em danos ao equipamento ou acidentes durante a fabricação, como demonstrado na Figura 1.8. Consequentemente, torna-se imperativo analisar rigorosamente os ângulos necessários para impressão da geometria desejada e desenvolver modelos digitais precisos da cabeça de impressão para simulação e verificação do processo antes da fabricação física.



Figura 1.8: Colisão durante processo de impressão 3D não planar
Próprio Autor

Estudos recentes demonstram que estas limitações físicas restringem os ângulos de impressão não-planar a aproximadamente 45 graus em configurações convencionais, significativamente abaixo do potencial teórico desta abordagem (OXMAN et al., 2023). Modificações relativamente simples e economicamente acessíveis podem ser implementadas para ampliar este limite, como a adição de espaçadores e substituição do bico extrusor (*hotend*) por modelos otimizados para trajetórias não-planares, conforme ilustrado na Figura 1.9. O

principal desafio reside em garantir maior folga além da ponta do bocal, particularmente problemático em extrusoras equipadas com sondas de nivelamento automático ou sistemas de ventilação volumosos.

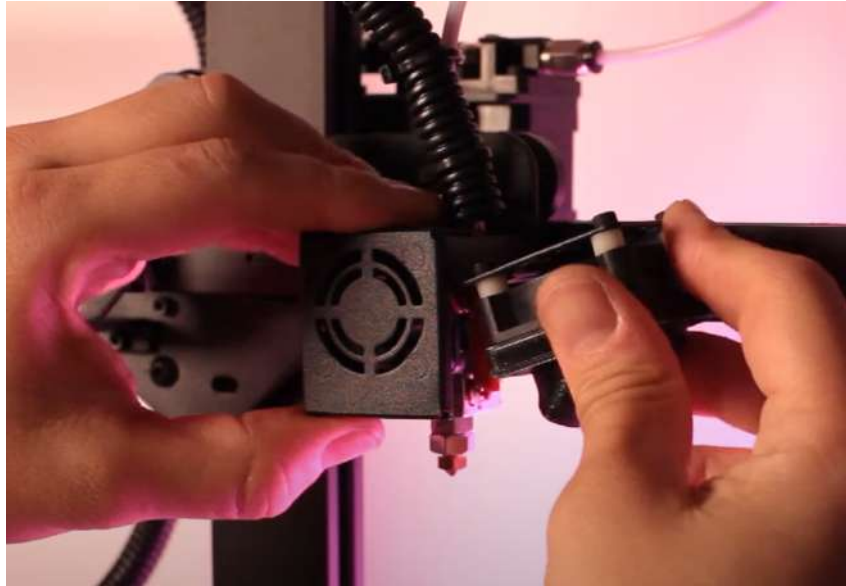


Figura 1.9: Adaptação do bico para impressão 3D não planar
(R3DSIGN, 2023b)

Uma abordagem alternativa consiste na utilização de braços robóticos equipados com extrusoras, como demonstrado na Figura 1.10. Estes sistemas oferecem liberdade de movimento em seis ou mais eixos, permitindo a execução de trajetórias complexas inviáveis em impressoras 3D convencionais. Pesquisas recentes têm explorado esta integração, demonstrando resultados promissores em termos de qualidade superficial, propriedades mecânicas e eficiência de fabricação (YUAN et al., 2022; MOSTAFAVI; BIER, 2021).

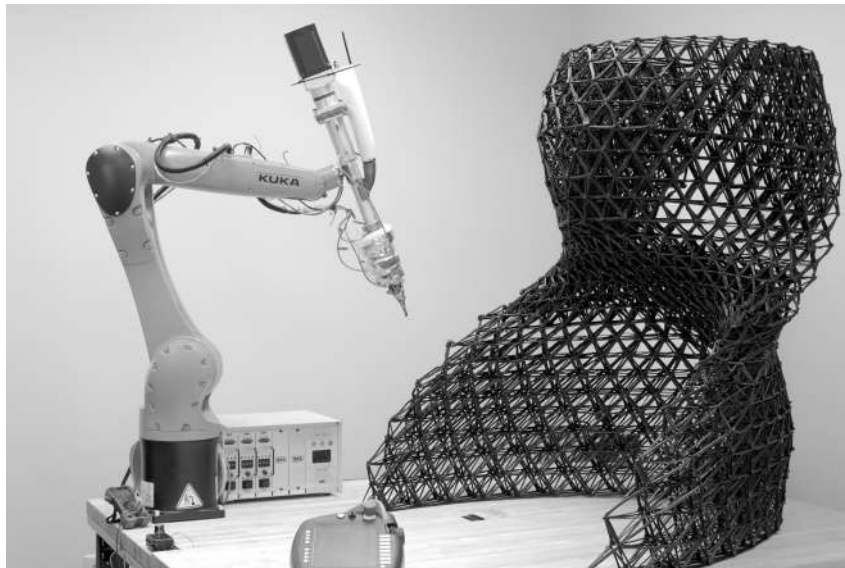


Figura 1.10: Impressão 3D com braço robótico
(KREMENETSKY, 2022)

O segundo obstáculo fundamental reside na complexidade computacional associada ao cálculo de trajetórias não-planares e sua tradução em comandos executáveis por impressoras 3D e sistemas robóticos. Atualmente, apenas um número limitado de soluções de software comerciais, como AdaOne e AIbuild (Figura 1.11), oferecem esta funcionalidade. Entretanto, estas plataformas apresentam custos proibitivos, particularmente no contexto brasileiro, além de oferecerem controle limitado sobre os parâmetros de geração de trajetória.



Figura 1.11: Software AIbuild
(AI Build, 2023)

Esta lacuna tecnológica e econômica motivou a formulação das seguintes questões norteadoras para esta pesquisa: (i) Como viabilizar a impressão 3D

não-planar para pequenas empresas e profissionais autônomos, superando barreiras econômicas e técnicas? (ii) Quais alternativas podem ser desenvolvidas para expandir as possibilidades de materialização de objetos digitais através de trajetórias não-planares? (iii) Como aumentar o controle paramétrico do designer sobre o processo de fabricação não-planar, permitindo otimização específica para diferentes aplicações e requisitos?

1.3

Objetivos da pesquisa

1.3.1

Objetivo Geral

Desenvolver e implementar o método Non-PlanaR3D para viabilizar a fabricação aditiva não-planar com utilização simultânea dos três eixos cartesianos em impressoras convencionais e integração com sistemas robóticos multi-eixos, proporcionando: (1) controle paramétrico avançado sobre a geometria final; (2) otimização de tempo de fabricação através de trajetórias adaptativas; (3) aprimoramento das propriedades mecânicas mediante redução da anisotropia; e (4) minimização de resíduos através da eliminação ou redução significativa de estruturas de suporte. Esta abordagem visa democratizar o acesso à fabricação não-planar avançada, anteriormente restrita a sistemas proprietários de alto custo (MUELLER et al., 2022; TIBBITS, 2024).

1.3.2

Objetivos Específicos

- Mapear soluções existentes para adequação das impressoras 3D à impressão 3D não-planar e desenvolver alternativas economicamente acessíveis;
- Desenvolver ferramentas digitais de baixo custo que constituam um método integrado para geração de comandos não-planares para impressoras 3D desktop;
- Implementar funcionalidades para integração de braços robóticos genéricos com sistemas de impressão 3D não-planar;
- Realizar análises comparativas entre a solução desenvolvida e plataformas comerciais existentes, avaliando parâmetros de qualidade, eficiência e acessibilidade;
- Distribuir as ferramentas desenvolvidas através de plataformas digitais abertas para ampliar a adoção da manufatura aditiva não-planar e do design computacional para fabricação.

Tabela 1.1: Relação entre Objetivos, Métodos, Experimentos e Resultados

Objetivo	Método	Experimento	Resultados
Mapear soluções não-planar	Revisão de literatura, análise	Testes AdaOne, FullControl	Limitações e oportunidades mapeadas
Desenvolver ferramenta digital	Prototipagem, plugin GH	Plugin Non-PlanaR3D: hélice, porta-lápis	Trajetórias não-planares validadas
Integrar braços robóticos	Programação paramétrica, Firefly	Teste braço DIY, Flexboat	Cin. inversa validada e uso industrial
Análise comparativa	Estudos de caso, benchmarks	Comparativo planar/Non-PlanaR3D	Redução de tempo, resistência maior
Disseminação aberta	Material instrucional, divulgação	Tutoriais, vídeos, plugin publicado	Ampliação do acesso e impacto social

Legenda: Tabela sintética dos objetivos, métodos e principais resultados do ciclo iterativo de pesquisa Non-PlanaR3D. Texto resumido para evitar Overfull/Underfull.

1.4

Objeto de pesquisa

O objeto central desta pesquisa compreende o desenvolvimento e implementação do Non-PlanaR3D, um sistema integrado para fabricação digital não-planar que inclui os seguintes componentes:

- **Plugin Non-PlanaR3D** - Um algoritmo/plugin desenvolvido para o ambiente *Grasshopper* que capacita projetistas a criar e otimizar trajetórias curvilíneas tridimensionais para impressoras 3D e braços robóticos, superando as limitações dos sistemas de fatiamento convencionais.
- **Processo de geração de trajetórias** - Metodologia para criação de curvas tridimensionais através de diversas operações de interação com modelos 3D (*Brep/Mesh*) ou geração direta de curvas e superfícies (*brep*) no ambiente paramétrico do *Grasshopper*.
- **Framework educacional** - Metodologia de ensino e documentação para o processo de desenvolvimento e implementação de ferramentas *open-source* para impressão 3D não-planar dentro do ambiente de programação visual *Grasshopper*.

Este conjunto de ferramentas e metodologias representa uma contribuição significativa para o campo da fabricação digital, posicionando-se na interseção entre design computacional, manufatura aditiva avançada e democratização tecnológica. O Non-PlanaR3D distingue-se das soluções existentes por sua abordagem modular, acessível e adaptável, permitindo implementação em diversos contextos, desde dependentes até ambientes de produção industrial.

1.5

Relevância da pesquisa

A indústria de manufatura/transformação constitui um pilar fundamental da economia brasileira, representando aproximadamente 22,2% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e empregando 20,2% da força de trabalho formal do país, conforme ilustrado na Figura 1.12 (Portal da Indústria, 2023). Esta relevância econômica e social contrasta, entretanto, com a progressiva perda de competitividade tecnológica do setor industrial brasileiro no cenário global durante as últimas décadas.

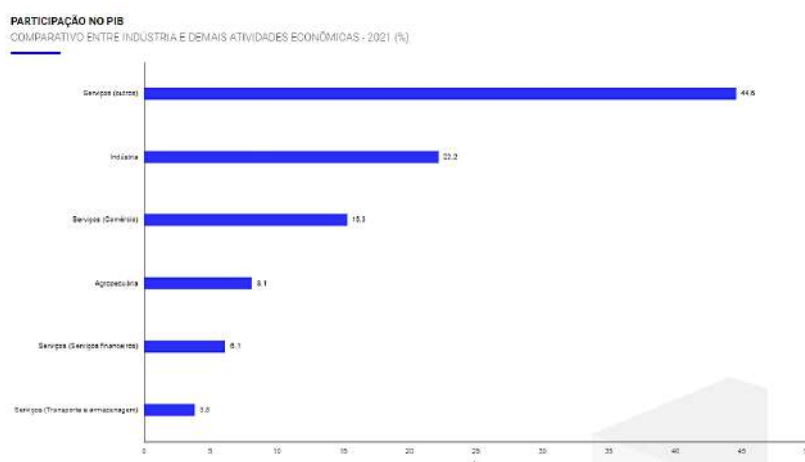


Figura 1.12: Gráfico da participação da indústria no Brasil
(Portal da Indústria, 2023)

Análises comparativas internacionais revelam que a adoção de tecnologias avançadas de fabricação digital representa um fator crítico para a revitalização industrial em economias emergentes (SABIN, 2021; BECHTHOLD; KING, 2023), posicionando a democratização de métodos como o Non-PlanaR3D como intervenção estratégica para o fortalecimento da base industrial e a promoção da inovação. Além disso, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento em design computacional e fabricação digital, áreas de crescente importância acadêmica e industrial. A abordagem de código aberto e a ênfase na acessibilidade promovem a disseminação do conhecimento e o desenvolvimento colaborativo, alinhando-se com os princípios da ciência aberta e da inovação social. A relevância social do Non-PlanaR3D reside em seu potencial para capacitar pequenos empreendedores, designers e makers, permitindo-lhes explorar novas fronteiras na fabricação digital e criar produtos inovadores com maior eficiência e menor custo. Isso pode impulsionar a economia criativa e gerar novas oportunidades de negócios, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico do país. A pesquisa também aborda a questão da sustentabilidade, ao propor a minimização de resíduos e a otimização do uso de materiais,

contribuindo para práticas de fabricação mais responsáveis e ecologicamente conscientes. Em suma, o Non-PlanaR3D não é apenas um avanço tecnológico, mas uma ferramenta para a democratização da fabricação digital, com implicações significativas para a indústria, a academia e a sociedade como um todo.

2

Métodos e Técnicas da Pesquisa

Esta pesquisa adota a abordagem metodológica de *Research Through Design* (RTD), que, segundo Frayling (1993), caracteriza-se como uma pesquisa *através* da prática do design, na qual “o artefato em si encarna a pesquisa e o processo de criação é parte fundamental da atividade investigativa”. Neste capítulo, detalhamos os métodos e técnicas empregados no desenvolvimento do Non-PlanaR3D, alinhados a esta perspectiva.

2.1

Ciclos Iterativos de Pesquisa

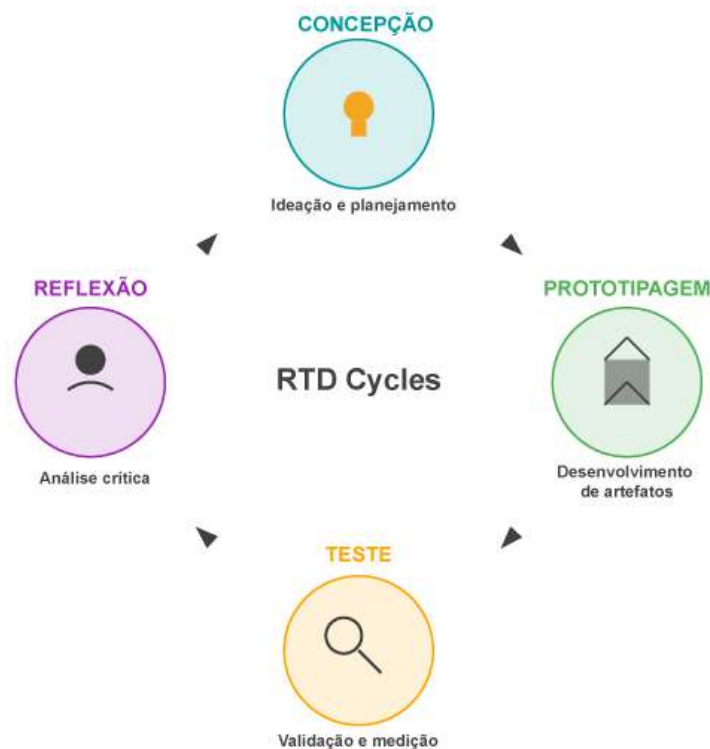


Figura 2.1: Representação visual dos ciclos iterativos de pesquisa (concepção, prototipagem, teste e reflexão).

Sugestão: Criar diagrama ou encontrar referência

A implementação prática do RTD manifestou-se através de ciclos iterativos de desenvolvimento, cada um compreendendo as etapas de concepção, prototipagem, teste e reflexão. Estes ciclos não seguiram uma progressão estrí-

tamente linear, mas um processo espiral onde cada iteração revisitava e refinava aspectos de iterações anteriores à luz de novos insights.

Tabela 2.1: Cronologia dos Cinco Ciclos Iterativos de Pesquisa

Ciclo	Período	Objetivo Parcial	Principais Entregáveis/Resultados
Exploração	Jan–Mar/23	Mapear estado da arte e limitações atuais	Revisão sistemática; entrevistas com especialistas; relatório comparativo
Algoritmos V1	Abr–Jul/23	Prototipar geração básica de trajetórias 3D	Algoritmos de fatiamento superficial; testes de bancada
Interface	Ago–Dez/23	Criar UI paramétrica no Grasshopper	Versão 0.1 do plugin; documentação preliminar
Integração	Jan–Mai/24	Conectar hardware FDM e braço DIY	Testes de cinemática inversa; validação em peças-piloto
Validação	Jun–Mar/24	Benchmark industrial com Flexboat	Impressão do casco; coleta de métricas de desempenho

Legenda: A cronologia explicita o ritmo de avanços do projeto e serve de referência para alinhamento metodológico com o framework RTD.

Foram realizados cinco ciclos principais de desenvolvimento, cada um focando em aspectos específicos do Non-PlanaR3D:

- **Ciclo 1:** Exploração de ferramentas existentes e identificação de limitações
- **Ciclo 2:** Desenvolvimento de algoritmos básicos para geração de trajetórias não-planares
- **Ciclo 3:** Implementação de interface de usuário e controles paramétricos
- **Ciclo 4:** Integração com sistemas de fabricação e testes iniciais
- **Ciclo 5:** Refinamento baseado em feedback de usuários e validação final

Este processo iterativo ressoa com a abordagem desenvolvida por Ripper e Moreira (2004) no Laboratório de Investigação em Living Design (LILD), que enfatiza a importância dos modelos físicos na interação com o desenvolvimento de objetos:

“O desenvolvimento do objeto é feito de pequenas antecipações, e da alternância entre as idéias e as concretizações. A materialidade corrige o mental e vice-versa. [...] As soluções emergem de uma

trama tecida no tempo e no espaço, feita de informações, experimentos e idéias. [...] O objeto em si é a presença sem as nossas expectativas, cujo manuseio nos permite apresentar novas faces” (RIPPER; MOREIRA).

Esta abordagem iterativa permitiu a identificação precoce de problemas e oportunidades, reduzindo riscos e maximizando o potencial de inovação, conforme preconizado por (ZIMMERMAN; FORLIZZI; EVENSON, 2007) em sua concepção de RTD como método para pesquisa em design.

2.2

Instrumentos de Coleta e Análise



Figura 2.2: Diagrama dos instrumentos de coleta e análise de dados por fase da pesquisa.

A coleta e análise de dados durante o processo de pesquisa empregou múltiplos instrumentos, selecionados de acordo com os objetivos específicos de cada fase:

2.2.1

Fase Exploratória

- Revisão sistemática da literatura sobre fabricação não-planar
- Análise comparativa de ferramentas comerciais existentes
- Entrevistas com especialistas em fabricação digital
- Documentação de experimentos iniciais

2.2.2

Fase de Desenvolvimento

- Registros de desenvolvimento (logs de programação e documentação técnica)
- Prototipagem digital e física de componentes do sistema
- Testes de usabilidade com usuários intermediários
- Análise de desempenho computacional e eficiência algorítmica

2.2.3

Fase de Validação

- Estudos de caso documentados com diferentes geometrias e materiais
- Feedback estruturado de usuários finais
- Avaliação de propriedades mecânicas e qualidade superficial

2.3

Validação e Reflexão Crítica

O processo de validação adotou uma abordagem multidimensional, considerando aspectos técnicos, econômicos e sociais do Non-PlanaR3D. Esta perspectiva alinha-se com a visão de (FRASCARA, 2018) sobre design como prática social e comunicativa, que transcende aspectos puramente funcionais para considerar impactos mais amplos.

A validação técnica focou na capacidade do sistema de gerar trajetórias não-planares viáveis e eficientes, comparando resultados com soluções comerciais em termos de qualidade superficial, propriedades mecânicas e tempo de fabricação. A validação econômica examinou a acessibilidade da solução desenvolvida em comparação com alternativas existentes, considerando tanto custos diretos quanto indiretos. A validação social, por sua vez, investigou o potencial do Non-PlanaR3D para democratizar o acesso à fabricação não-planar e suas implicações para diferentes contextos de aplicação.

A reflexão crítica permeou todo o processo de pesquisa, manifestando-se em momentos estruturados de avaliação ao final de cada ciclo iterativo e em discussões contínuas sobre limitações, potencialidades e implicações éticas do desenvolvimento. Esta prática reflexiva é fundamental para o RTD, como destacado por (FALLMAN, 2008), e fundamenta-se na concepção de que:

“A pesquisa através da arte e do design é aquela realizada através da prática da disciplina: o ato criativo é uma atividade de pesquisa. Neste contexto, o artefato em si incorpora a pesquisa e o processo de

criação é parte essencial da atividade investigativa” (FRAYLING, 1993).

Esta abordagem permitiu que o conhecimento gerado transcendesse o artefato específico para informar a teoria e prática do design de forma mais ampla.

2.4

Comparação com Metodologias Alternativas

A escolha do RTD como abordagem metodológica principal foi precedida por uma análise comparativa com metodologias alternativas, considerando sua adequação aos objetivos específicos desta pesquisa. A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre RTD e outras abordagens consideradas.

Tabela 2.2: Comparação entre Metodologias Consideradas

Metodologia	Pontos Fortes	Limitações	Adequação ao Projeto
Research Thorough Design (RTD)	Integra teoria e prática; Valoriza conhecimento incorporado no artefato; Processo iterativo e reflexivo	Desafios de generalização; Dependência da qualidade da documentação	Alta - Alinha-se com o objetivo de desenvolver um método através da prática projetual
Design Science Research (DSR)	Foco na criação de artefatos úteis; Estrutura rigorosa para validação; Clareza nos resultados práticos	Menor ênfase na prática criativa; Pode ser excessivamente formal	Moderada - Adequada para validação de artefatos, mas menos flexível para exploração criativa
Action Research (AR)	Envolve stakeholders diretamente; Promove aprendizado colaborativo; Flexibilidade na aplicação	Menor foco no artefato; Pode ser subjetivo	Baixa - Menos alinhada com o foco em desenvolvimento de artefatos técnicos

3

Fundamentação Teórica e Técnicas Pertinentes à Pesquisa

A manufatura aditiva (MA) representa um paradigma de fabricação caracterizado pela construção de objetos através da adição sucessiva de material, em contraste com métodos subtrativos tradicionais. Esta abordagem tem revolucionado não apenas os processos produtivos, mas fundamentalmente a relação entre concepção e materialização de objetos. Como observa Bonsiepe (2021), tecnologias como a impressão 3D constituem ferramentas de autonomia e emancipação, particularmente relevantes em contextos periféricos como o latino-americano, onde a adaptação tecnológica frequentemente substitui a inovação formal.

3.1

Manufatura Aditiva e Design Computacional: Uma Convergência

A evolução da manufatura aditiva está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento do design computacional, estabelecendo uma relação simbiótica onde avanços em uma área impulsionam inovações na outra. Esta convergência manifesta-se particularmente no campo emergente do Design for Additive Manufacturing (DfAM), que explora as possibilidades únicas oferecidas por processos aditivos para criar geometrias anteriormente impossíveis ou economicamente inviáveis.

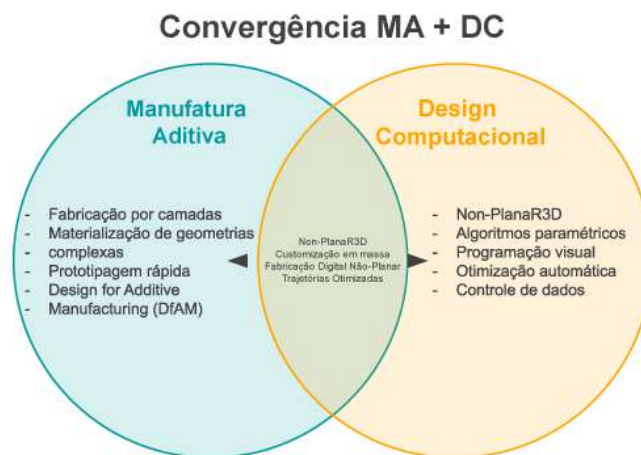


Figura 3.1: Diagrama ilustrando a convergência entre Manufatura Aditiva e Design Computacional.

Autor

A fabricação digital não-planar representa um avanço significativo nesta

trajetória evolutiva, superando a limitação fundamental da construção por camadas horizontais que caracterizou a impressão 3D desde sua concepção. Como destaca Cross (2007), o conhecimento em design frequentemente emerge da superação de restrições técnicas através de abordagens criativas que desafiam pressupostos estabelecidos. O desenvolvimento de métodos não-planares exemplifica este processo, representando não apenas uma inovação técnica, mas uma reconceituação do próprio processo de fabricação aditiva.

No contexto brasileiro, esta evolução tecnológica adquire dimensões particulares, refletindo o que Niemeyer (2018) identifica como características distintivas do design nacional: adaptabilidade, engenhosidade frente a limitações materiais e econômicas, e hibridização de influências globais com soluções locais. O Non-PlanaR3D insere-se nesta tradição, buscando democratizar o acesso a tecnologias avançadas através de soluções adaptadas ao contexto local.

3.2

Técnicas e Ferramentas Específicas para Fabricação Não Planar

A implementação efetiva da fabricação não-planar depende fundamentalmente da adequação dos sistemas de extrusão para operação em múltiplos eixos simultaneamente. Configurações convencionais de impressoras FDM (Fused Deposition Modeling) apresentam limitações significativas para trajetórias não-planares, particularmente relacionadas a colisões entre o conjunto extrusor e a geometria em construção.

3.2.1

Sistemas de Extrusão e Configurações Mecânicas



Figura 3.2: Exemplo de hotend modificado para impressão não-planar, podendo fazer extrusão em praticamente qualquer direção.

<https://hackaday.com/2025/04/20/non-planar-slicing-is-for-the-birds/>

Estas limitações manifestam-se principalmente em dois aspectos: restrições angulares e interferências mecânicas. As restrições angulares referem-se ao ângulo máximo que o bico extrusor pode assumir em relação ao plano horizontal sem comprometer a qualidade da deposição, tipicamente limitado a aproximadamente 45 graus em configurações padrão. As interferências mecânicas, por sua vez, ocorrem quando componentes do conjunto extrusor (como sistemas de refrigeração, sensores de nivelamento ou estruturas de suporte) colidem com a geometria em construção durante movimentos não-planares.

Diversas abordagens têm sido propostas para superar estas limitações, incluindo:

- **Modificações em hotends convencionais:** Extensões e adaptações que aumentam a distância entre o bico extrusor e outros componentes, ampliando o ângulo máximo de operação.
- **Hotends especializados para impressão não-planar:** Designs otimizados com perfil cônico e sistemas de refrigeração reposicionados para maximizar o ângulo de operação.
- **Sistemas de extrusão remota:** Configurações onde o motor de extrusão e mecanismos de alimentação são separados do hotend, reduzindo a massa e volume do conjunto móvel.

- **Integração com sistemas robóticos multi-eixos:** Utilização de braços robóticos equipados com extrusoras, oferecendo seis ou mais graus de liberdade para orientação do bico extrusor.

A Figura 29 ilustra uma configuração de hotend modificado para impressão não-planar, destacando as adaptações necessárias para aumentar o ângulo máximo de operação sem comprometer a qualidade da extrusão. Esta configuração específica permite ângulos de até 65 graus em relação ao plano horizontal, representando um avanço significativo em relação aos 45 graus típicos de configurações convencionais.

3.2.2

Algoritmos e Abordagens Computacionais



Figura 3.3: Diagrama comparativo das principais abordagens computacionais para geração de trajetórias não-planares.

Autor

O desenvolvimento de trajetórias não-planares eficientes depende de algoritmos sofisticados capazes de gerar, otimizar e validar percursos tridimensionais complexos. Diferentemente do fatiamento convencional, que opera essencialmente em duas dimensões (XY) com incrementos discretos na terceira dimensão (Z), o fatiamento não-planar requer abordagens fundamentalmente tridimensionais.

As principais abordagens computacionais para geração de trajetórias não-planares incluem:

- **Fatiamento baseado em superfícies:** Utiliza a geometria da superfície do objeto como base para geração de trajetórias que seguem sua curvatura natural, frequentemente empregando coordenadas UV para mapeamento paramétrico.

- **Fatiamento adaptativo:** Ajusta dinamicamente a altura de camada e orientação do extrusor de acordo com características locais da geometria, como curvatura e inclinação.
- **Otimização topológica integrada:** Combina geração de trajetória com análise estrutural, orientando filamentos ao longo de linhas de tensão para maximizar propriedades mecânicas.
- **Abordagens baseadas em voxels:** Discretiza o volume do objeto em elementos tridimensionais (voxels) e determina trajetórias que otimizam o preenchimento volumétrico.

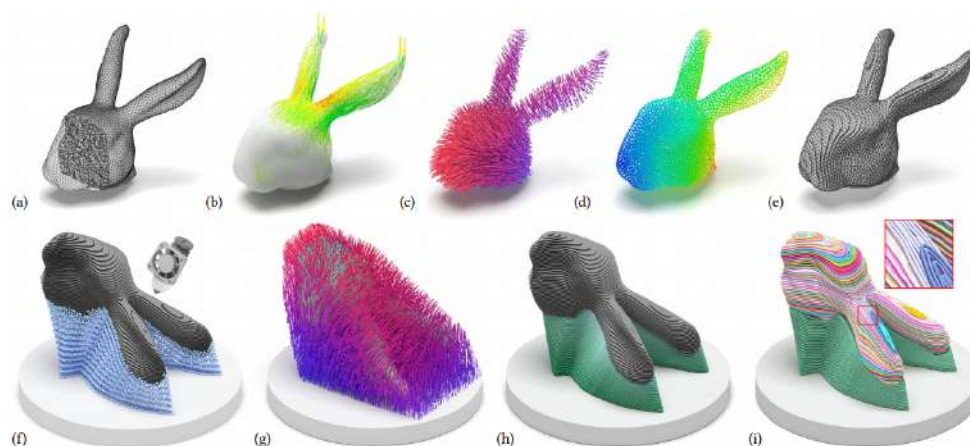


Figura 3.4: Estratégias de segmentação de camadas não planar para diminuição de suportes e aumento de resistência mecânica.

<https://www.cnet.com/science/space/after-launching-a-3d-printed-rocket-into-space-this-company-is-going-bigger>

Estas abordagens computacionais enfrentam desafios significativos, particularmente relacionados à detecção e prevenção de colisões, otimização de parâmetros de extrusão ao longo de trajetórias com curvatura variável, e garantia de continuidade e suavidade nas transições entre segmentos de trajetória.

O Non-PlanaR3D implementa uma abordagem híbrida que combina elementos de fatiamento baseado em superfícies com otimização adaptativa, utilizando o ambiente paramétrico do Grasshopper para permitir controle granular sobre o processo de geração de trajetória. Esta abordagem alinha-se com o que Rodgers (2023) identifica como uma tendência emergente na pesquisa em design: a integração de métodos computacionais avançados com interfaces que mantêm o designer no centro do processo decisório.

Tabela 3.1: Comparativo de Ferramentas Comerciais e Open-Source para Impressão Não-Planar

Plataforma	Licença/Custo	Grau de Controle Paramétrico	Integração Robótica	Usuários-Alvo
AdaOne	Comercial (US\$ 15k/ano)	Médio (GUI pré-definida)	Alta (6-eixos)	Grandes indústrias
Albuild	Comercial (sob consulta)	Baixo (work-flow fechado)	Alta	Indústrias aeroespaciais
FullControl G-code	Open-source (gratuito)	Alto (equações)	Baixa	Makers experientes
Silkworm (GH)	Open-source (gratuito)	Médio (scripts)	Média (aplicações DIY)	Designers paramétricos
Non-PlanaR3D	Open-source (gratuito)	Alto	Média-Alta	Pequenas empresas, ensino

Legenda: Critérios avaliados: custo de aquisição, liberdade de parametrização, suporte a robô multi-eixos e público-alvo primário. O Non-PlanaR3D destaca-se por combinar custo zero com alto grau de controle.

3.2.3

Representação Geométrica e Manipulação de Dados

A fabricação não-planar impõe demandas específicas quanto à representação e manipulação de dados geométricos, requerendo formatos capazes de descrever precisamente trajetórias tridimensionais complexas. Enquanto a impressão 3D convencional tipicamente utiliza formatos de arquivo STL (Stereolithography) baseados em malhas triangulares para representação de superfícies, a impressão não-planar frequentemente beneficia-se de representações mais sofisticadas.

As principais representações geométricas utilizadas em fabricação não-planar incluem:

- **NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines):** Representação matemática precisa de curvas e superfícies, oferecendo controle local sobre a forma e garantindo continuidade geométrica. Particularmente adequada para descrever trajetórias suaves com curvatura variável.
- **BREP (Boundary Representation):** Modelo de representação que descreve objetos tridimensionais através de suas fronteiras, combinando informações topológicas e geométricas. Facilita operações como interseção entre trajetórias e superfícies.
- **Representações paramétricas:** Descrições matemáticas que expressam coordenadas espaciais como funções de um ou mais parâmetros,

permitindo mapeamento eficiente entre espaços bidimensionais (UV) e tridimensionais (XYZ).

- **Grafos de dependência:** Estruturas que representam relações entre entidades geométricas e operações, facilitando atualizações propagadas quando parâmetros são modificados.

A manipulação eficiente destes dados geométricos constitui um desafio significativo, particularmente em termos de desempenho computacional e precisão numérica. O Non-PlanaR3D aborda este desafio através de uma arquitetura modular que separa representação geométrica, lógica de geração de trajetória e tradução para comandos de máquina, permitindo otimizações específicas em cada nível.

3.3

Impacto e Potencial da Manufatura Aditiva Não Planar

A manufatura aditiva não planar amplia os limites da impressão 3D tradicional, oferecendo um novo paradigma para a fabricação de geometrias complexas com propriedades otimizadas. Esta seção examina o impacto dessa tecnologia em termos de aplicações práticas, desafios técnicos e perspectivas futuras, consolidando os conceitos teóricos e técnicos discutidos anteriormente no capítulo.

3.3.1

Aplicações da Manufatura Aditiva Não Planar

A capacidade de imprimir ao longo de superfícies curvas confere à manufatura não planar um potencial único para diversas indústrias. Esta técnica permite a criação de peças com geometrias que seriam inviáveis ou ineficientes com métodos planares, resultando em benefícios como redução de peso, melhoria de propriedades mecânicas e maior eficiência de fabricação.

3.3.1.1

Setor Aeroespacial

No contexto aeroespacial, a manufatura não planar é utilizada para fabricar componentes leves com alta resistência, como pás de turbina e suportes estruturais. A orientação das camadas ao longo das linhas de tensão aumenta a resistência à fadiga e reduz o peso, atendendo às demandas rigorosas de desempenho e eficiência de combustível. Por exemplo, peças com estruturas internas otimizadas podem ser impressas sem a necessidade de suportes adicionais, economizando material e tempo.



Figura 3.5: Impressão de foguete por tecnologia DED (Fio de solda)

<https://www.cnet.com/science/space/after-launching-a-3d-printed-rocket-into-space-this-company-is-going-bigger>

3.3.1.2

Indústria Biomédica

Na área biomédica, a impressão não planar permite a produção de implantes e próteses personalizadas que seguem os contornos naturais do corpo humano. Isso melhora o ajuste anatômico e a funcionalidade, como em implantes ortopédicos que promovem melhor osseointegração. Além disso, *scaffolds* para engenharia de tecidos podem ser fabricados com porosidade controlada, facilitando o crescimento celular.



Figura 3.6: Projeto XKELET, um exemplo de aplicação biomédica personalizada

<https://xkelet.com/>

3.3.1.3

Design e Arquitetura

A manufatura não planar também encontra aplicações em design e arquitetura, onde formas orgânicas e complexas são valorizadas. Estruturas leves e esteticamente sofisticadas, como painéis curvos ou elementos decorativos, podem ser produzidas com maior liberdade geométrica, eliminando as restrições impostas pela deposição planar.

3.3.2.3

Consistência das Propriedades do Material

A variação na orientação das camadas em superfícies curvas pode introduzir anisotropia nas propriedades mecânicas, tornando difícil prever o comportamento da peça sob carga. Isso é particularmente crítico em aplicações que exigem alta confiabilidade, como componentes estruturais, e requer testes adicionais para validação.

Esses desafios destacam a necessidade de avanços tanto na fundamentação teórica quanto nas técnicas práticas, temas centrais deste capítulo.

3.3.3

Direções Futuras

O futuro da manufatura aditiva não planar depende de inovações que abordem suas limitações atuais e explorem novas possibilidades.

3.3.3.1

Desenvolvimento de Algoritmos Otimizados

Pesquisas futuras podem se concentrar em algoritmos mais eficientes para geração de *toolpaths*, possivelmente utilizando inteligência artificial para adaptar as trajetórias em tempo real com base nas características geométricas e mecânicas da peça. Isso reduziria o tempo de processamento e tornaria a tecnologia mais acessível.

3.3.3.2

Materiais Avançados

A exploração de novos materiais, como polímeros com propriedades variáveis ou compósitos reforçados, pode ampliar as aplicações da impressão não planar. Materiais projetados especificamente para essa técnica poderiam oferecer maior resistência, flexibilidade ou funcionalidades adicionais, como autoconserto.

3.3.3.3

Integração com Processos Híbridos

Combinar manufatura não planar com técnicas subtrativas ou outros métodos aditivos pode resultar em processos híbridos que combinem o melhor de cada abordagem. Por exemplo, a impressão não planar poderia ser seguida por usinagem de precisão para acabamentos superficiais superiores.

3.3.3.4

Acessibilidade e Contextualização Local

Em contextos como o Brasil, onde a inovação muitas vezes depende de soluções econômicas, o desenvolvimento de ferramentas *open-source* e de baixo custo, como o *Non-PlanaR3D*, pode democratizar o acesso à manufatura não planar. Isso alinharia a tecnologia às necessidades locais, promovendo sua adoção em pequenas empresas e comunidades de *makers*.

3.3.4

Conclusão do Capítulo

A manufatura aditiva não planar emerge como uma evolução natural da convergência entre design computacional e impressão 3D, oferecendo um caminho para a fabricação de peças complexas com desempenho otimizado. Suas aplicações em setores de alta tecnologia, os desafios técnicos que enfrenta e as direções futuras de pesquisa sublinham sua relevância como um campo em expansão. O *Non-PlanaR3D*, ao integrar essas técnicas em uma abordagem acessível, exemplifica como a inovação pode ser adaptada a contextos diversos, contribuindo para a tradição brasileira de criatividade e resiliência tecnológica.

4

Desenvolvimento da Pesquisa

Conforme explicitado no Capítulo 2, esta investigação ancorou-se em *Research Through Design* (RTD), privilegiando **experimentação prática** para coleta de dados relevantes ao projeto *Non-PlanaR3D* (LESSA, 2025). Foram conduzidos seis experimentos principais — além de ensaios correlatos — distribuídos em duas fases: *Experimentações* (Seção 4.1) e *Desenvolvimento* (Seção 4.2).

4.1 Experimentações

4.1.1 FullControl G-code

Experimento destinado a validar a geração de *G-code* não-planar diretamente em planilhas *Excel*. O sistema processava equações matemáticas como entrada geométrica.

4.1.1.0 Funcionalidades

- Geração direta de *G-code* no *Excel*;
- Definição paramétrica de geometrias por equações;
- Processamento de trajetórias não-planares.

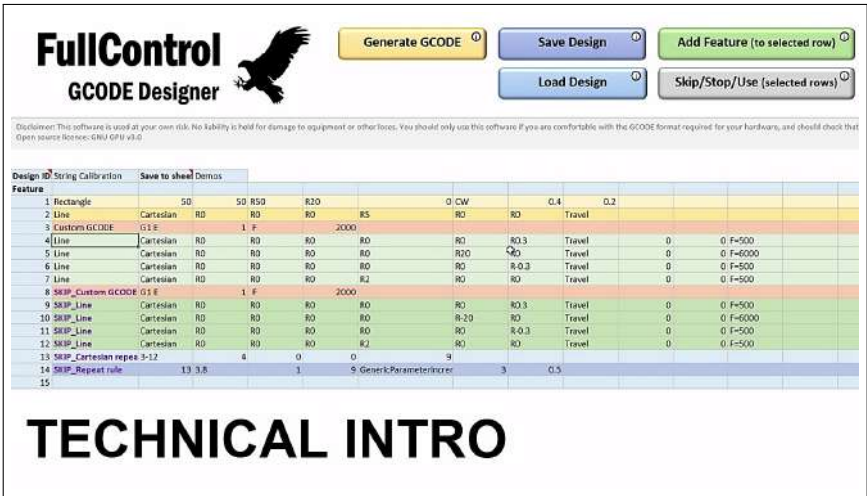


Figura 4.1: Interface *FullControl G-code* no EXCEL.

4.1.1.0

Limitações

Alta complexidade de uso, ausência de visualização nativa das trajetórias, impossibilidade de importar modelos 3D e dependência de software externo para validação visual.

4.1.1.0

Conclusão

Apesar da viabilidade técnica, as barreiras operacionais inviabilizaram adoção profissional (Fig. 4.2).

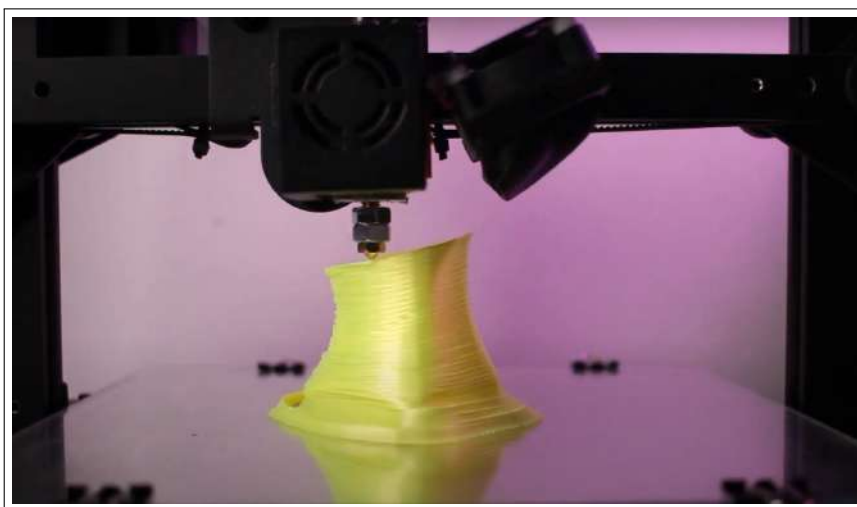


Figura 4.2: Primeira impressão não-planar gerada pelo *FullControl G-code*.

4.1.2

Grasshopper + Silkworm

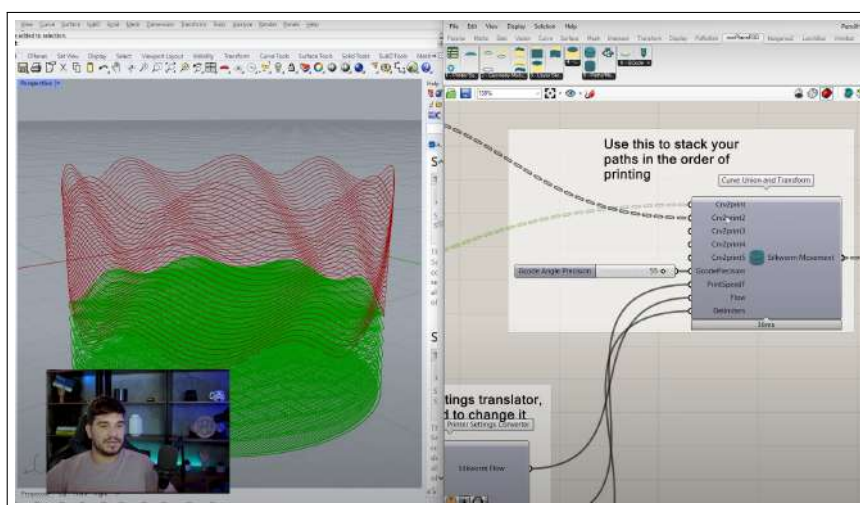


Figura 4.3: Vídeo tutorial Non Planar v1.0 + Silkworm

Investigação da impressão não-planar via GRASSHOPPER e *Silkworm*. O código personalizado produziu trajetórias e dois vídeos demonstrativos (https://www.youtube.com/live/3W20fRBxrxI?si=W9dSUfFF12i_yhp0).

Principais funcionalidades

- Algoritmos visuais em GRASSHOPPER;
- Tradução de terminologia para o *Silkworm*;
- Vídeo-tutorial disponibilizado em YOUTUBE.

Limitações Código-fonte fechado do plugin, restrições de *travel moves* e nomenclatura não padronizada.

Conclusão Fundamentou a necessidade de um plugin aberto e modular, conduzindo ao *Non-PlanaR3D*.

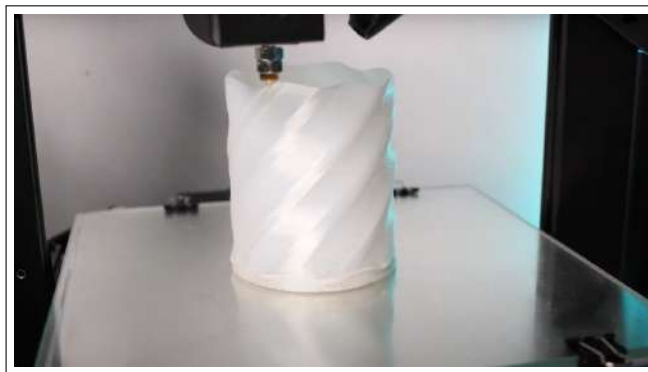


Figura 4.4: Porta-lápis não-planar impresso com GRASSHOPPER + *Silkworm*.

4.1.3

Non-PlanaR3D – Hélice Benchmark V1

Benchmark com geometria de dupla curvatura para validar geração interna de *G-code*, detecção de colisões e controle variável de extrusão (Fig. 4.5).

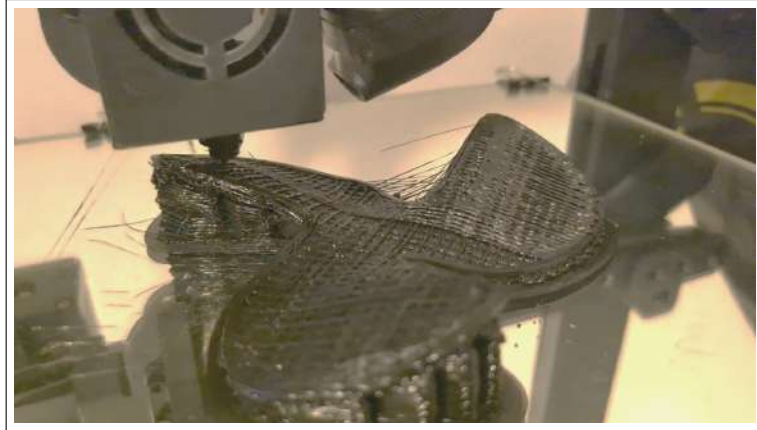


Figura 4.5: Hélice impressa via componentes *Non-PlanaR3D*.

Tabela 4.1: Resultados Sintetizados dos Surveys e Testes de Desempenho

Indicador Avaliado	Métrica	Non-PlanaR3D (média)	Planar Con-vencional (média)
Satisfação do Usuário (n = 32)	Escala Likert (1-5)	4.6	3.1
Tempo de Configuração	Minutos	9.2	6.5
Falhas de Impressão	% de tentativas	4.8 %	11.3 %
Consumo de Suporte	Gramas	5.2	28.4
Ganhos de Resistência	MPa adicionais	+9.8	—

Legenda: A matriz consolida dados quantitativos dos surveys de usabilidade e dos testes mecânicos apresentados no Capítulo 4. Valores médios são calculados sobre três réplicas por peça.

4.1.4

Vaso/Bag

Investigou limites técnicos para produção de bolsas sob *customização em massa*. Implementou trajetórias aéreas controladas e alternância direcional do extrusor.

4.1.5

Braço Robótico DIY + Firefly + Kangaroo 2

Sistema de baixo custo (US\$ 100) para testar conversão de caminhos 3D em comandos robóticos. Validou cinemática inversa com precisão limitada (Fig. 4.6).

4.1.6

Non-PlanaR3D + CEAD Group: Flexboat

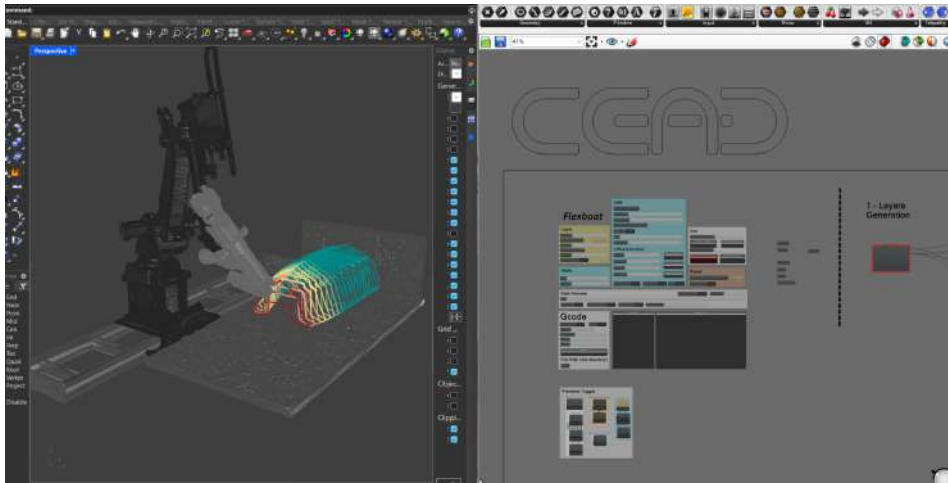


Figura 4.6: Simulação virtual do braço robótico no RHINOCEROS.

Validação industrial em Delft (Holanda) usando robô *Flexbot*. Implementou impressão horizontal em 45° sem retrações, cinemática inversa completa e simulação no plugin *Robots*.



Figura 4.7: Robô industrial imprimindo casco horizontalmente (*Flexboat*/CEAD).

4.2

Desenvolvimento

4.2.1

Evolução do Plugin

Partindo de tutoriais pontuais, o *Non-PlanaR3D* evoluiu para uma plataforma modular composta por 28 componentes distribuídos em seis categorias. A hierarquia cromática (vermelho–cinza) otimiza legibilidade e reutilização de código.

4.2.2

Funcionalidades-chave

- Geração de camadas não-planares entre superfícies;
- Infill personalizável e suportes otimizados;
- Simulação em tempo real e verificação de colisões;
- Exportação de planos de impressão multi-eixos.

Síntese

A trajetória iterativa fundamentada em RTD permitiu a consolidação do *Non-PlanaR3D* como plataforma aberta, validada em ambiente industrial europeu. O trabalho amplia o estado-da-arte em fabricação aditiva não-planar e oferece contribuição metodológica ao campo de design computacional (GODIN; ZAHEDI, 2014).

Desenvolvimento do Plugin Non-PlanaR3D



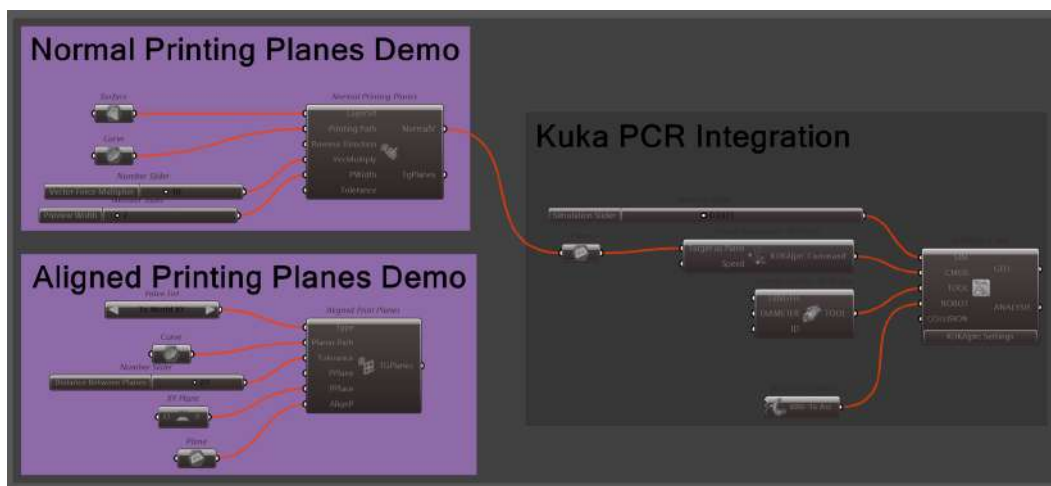


Figura 5.2: Detalhes de uma das caixas de controle da interface.

Autor

5.1

Contexto e Objetivos

O desenvolvimento do plugin Non-PlanaR3D nasceu da necessidade de tornar acessível a técnica de impressão 3D não-planar para designers, pesquisadores e entusiastas de manufatura aditiva. Inicialmente apresentado por meio de vídeos tutoriais que demonstravam procedimentos básicos de manipulação de trajetórias no Grasshopper, o projeto evoluiu para uma ferramenta completa e modular, capaz de gerar automaticamente caminhos de impressão curvilíneos para impressoras 3D cartesianas, delta ou sistemas robóticos.

5.2

Funcionalidades Principais

Ao longo das iterações, foram implementadas as seguintes funcionalidades cruciais:

- **Geração de camadas não-planares:** componentes que intersectam modelos 3D (Brep e Mesh) com superfícies curvilíneas ou alinhadas a curvas definidas pelo usuário, permitindo imprimir em trajetórias tridimensionais contínuas.
- **Suportes otimizados:** geração de superfícies de suporte por interpolação (“Tween Support Layers”), com controle de distância ao objeto e parâmetros de remoção fácil após a impressão.
- **Infill personalizável:** três estratégias principais de preenchimento interno — *Surface UV Infill*, *Intersection Infill* e *Support Infill* — cada

uma oferecendo ajustes de densidade, número de camadas superiores e inferiores e opções de offset para reforço ou economia de material.

- **Simulação e verificação em tempo real:** componentes de visualização do *Hotend Model* e cálculo de *Overhang Angle* que detectam colisões potenciais e locais com ângulos críticos de impressão, auxiliando na antecipação de falhas antes da geração de G-code.
- **Suporte a impressão robótica multi-eixos:** tradução de curvas e superfícies em planos de impressão orientados conforme as normais da geometria (*Normal Printing Planes*) ou alinhados a direções definidas pelo usuário (*Aligned Printing Planes*), com controle de precisão angular e pré-visualização.

5.3

Arquitetura Visual e Classificação Cromática

Para organizar centenas de componentes e facilitar a curva de aprendizado, adotou-se um sistema de cores que categoriza cada componente segundo seu papel no fluxo de trabalho:

Cinza – **Interface e Painéis:** Elementos de configuração geral, agrupamento de parâmetros e visualizações de controle.

Amarelo – **Superfícies:** Geração de camadas não-planares (Planar Layers, Path Layers, Normal Layers, Tween Layers, Tween Support Layers, Vector Layer Array).

Azul – **Curvas e Trajetórias:** Criação de polilinhas para infill e perímetros (Surface UV Infill, Intersection Infill, Support Infill, Skirt & Brim) e deformações (Vertical/Horizontal Deformation).

Vermelho – **Modelos 3D e Productwares:** Componentes de visualização de impressoras (Cartesian Printer, Delta Printer, Hotend Model) e testes práticos (Cube Flow Test, Retraction Test, Fan Model).

Laranja – Voxels e Meshes.

Roxo – Planos e Vetores.

Marrom – **Robótico:** Geração de planos de impressão para braços multi-eixos (*Normal Printing Planes*, *Aligned Printing Planes*).

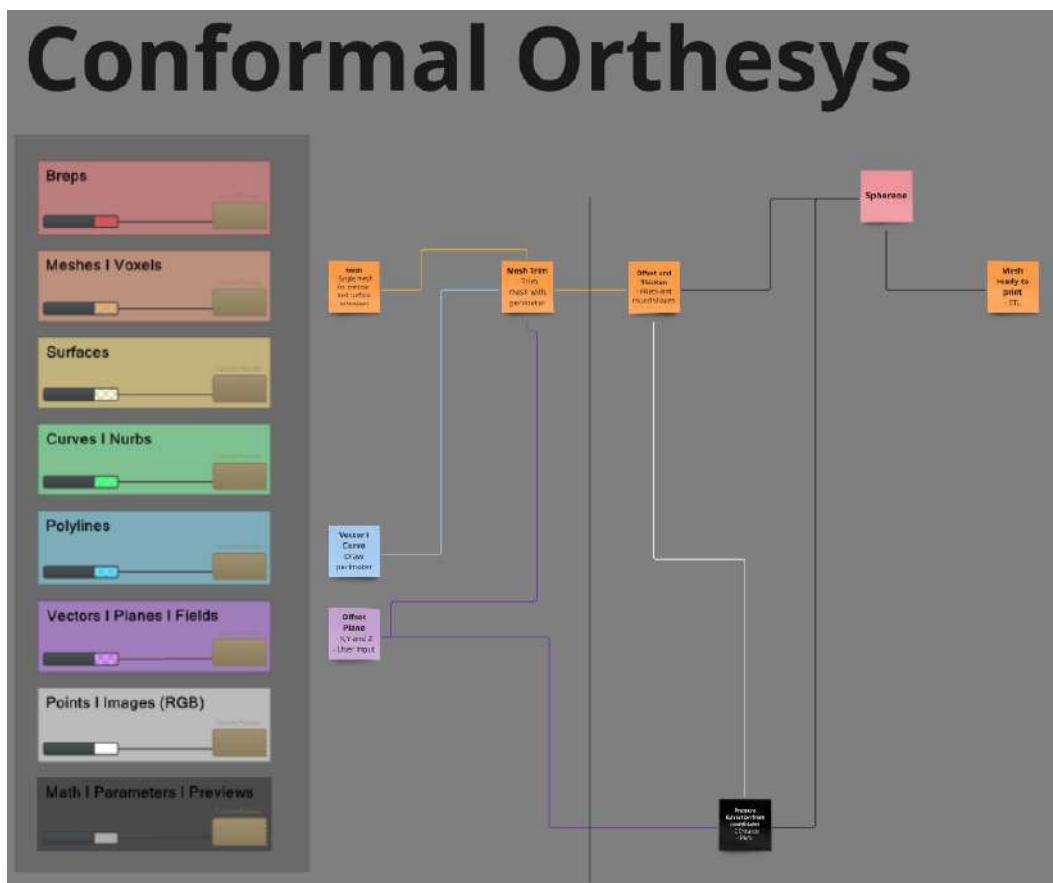


Figura 5.3: Classificação cromática e hierarquia dos componentes no Grasshopper.

Autor

5.4

Pesquisa de Usuários e Organização de Código

Uma pesquisa com usuários nacionais e internacionais de Grasshopper revelou que a clareza na organização do código — mediante nomeação padronizada, agrupamento funcional e hierarquia visual — é determinante para a eficiência no desenvolvimento de scripts de manufatura digital. Observou-se que, apesar de diferentes abordagens, muitos designers reaproveitam pequenos trechos de código entre projetos. Com base nisso, criou-se um diagrama lúdico que mapeia cada componente à sua função, consolidando a classificação cromática e servindo de guia para o fluxo de inputs e outputs do plugin.

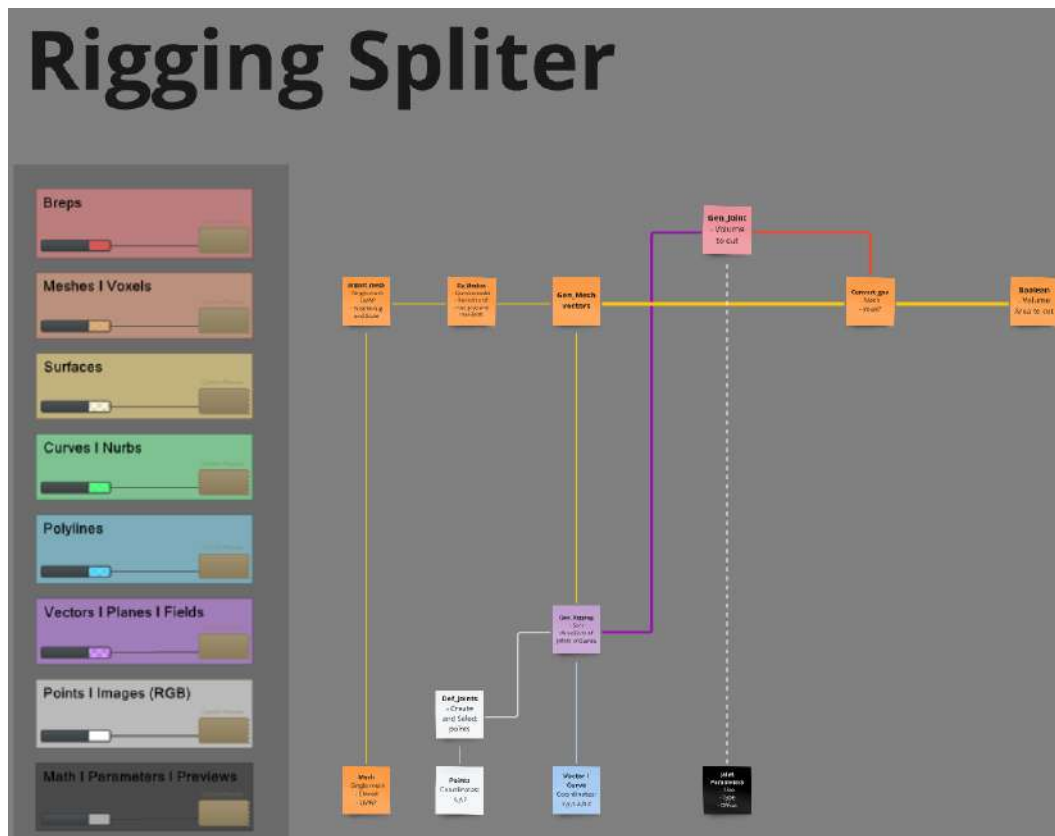


Figura 5.4: Diagrama do fluxo de dados: da seleção de camadas à geração de G-code.

Autor

5.5

Detalhamento dos Componentes

5.5.1

Componentes de Visualização

Cartesian Printer Modelo de impressora cartesiana parametrizado por volume, plano de impressão e posição XY na mesa.

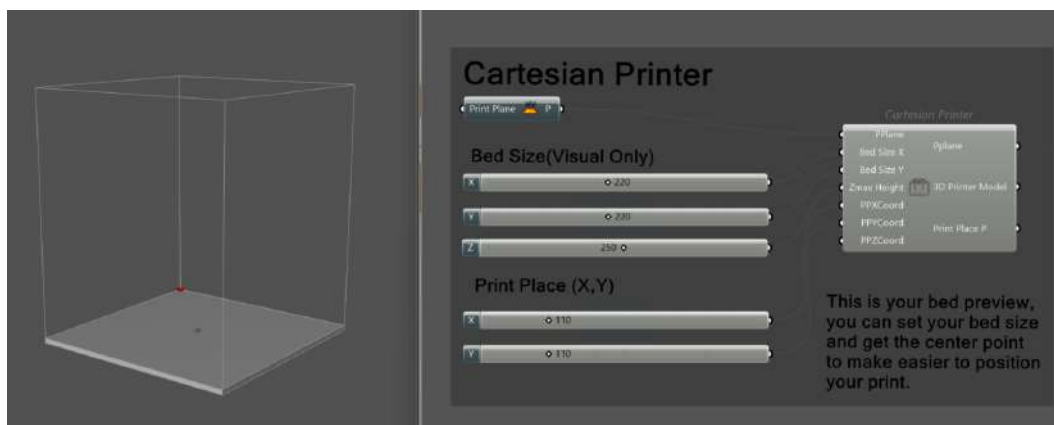


Figura 5.5: Componente Impressora cartesiana.

Autor

Delta Printer Representação de impressora delta com raio, altura e ajustes de plataforma.

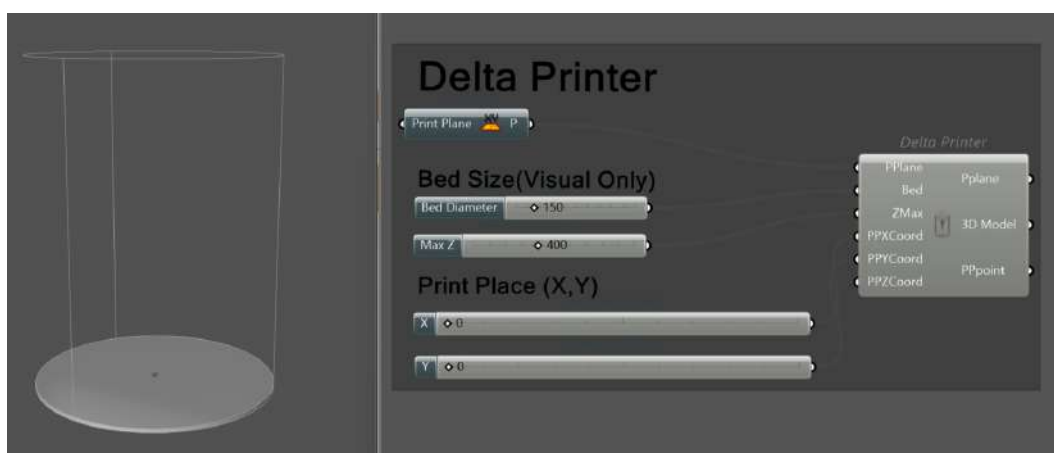


Figura 5.6: Componente Impressora cartesiana.

Autor

Hotend Model Representação tridimensional do conjunto de extrusão para prever colisões. Cria uma representação visual de uma extrusora 3D, possibilitando ao usuário determinar o tamanho do bico e diversas outras dimensões permitindo assim visualizar se seu conjunto de extrusão irá colidir com o objeto sendo impresso, que é um dos grandes riscos da manufatura aditiva não planar.

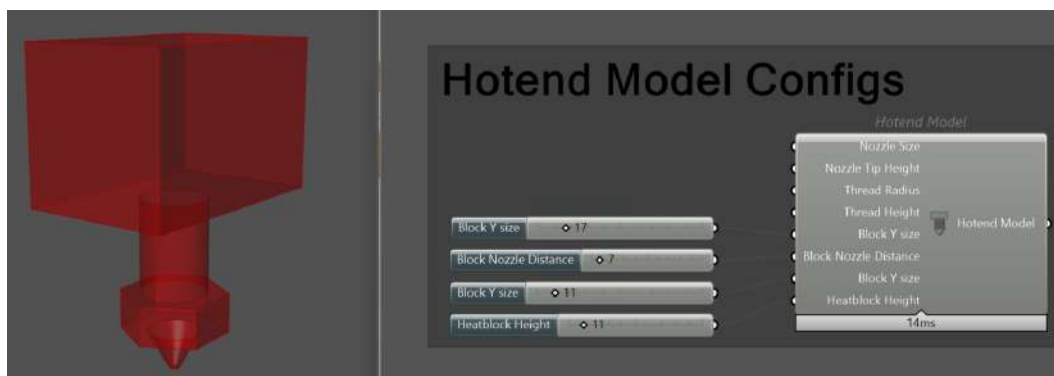


Figura 5.7: Componente Impressora cartesiana.

Autor

5.5.2

Productwares e Testes

Para facilitar o entendimento e adesão do plugin, alguns modelos pré-programados foram desenvolvidos. Esses podem ser testes de calibração ou “Phygital Products”,

Cube Flow Test Cubo de calibração para ajustar fluxo de extrusão e validar trajetórias. onfigurado em diversas dimensões até mesmo com mais de uma parede caso o usuário queira customizar ainda mais seu teste. Esse teste ajuda o designer a verificar se o g-code gerado pelo plugin está funcionando corretamente com sua impressora.

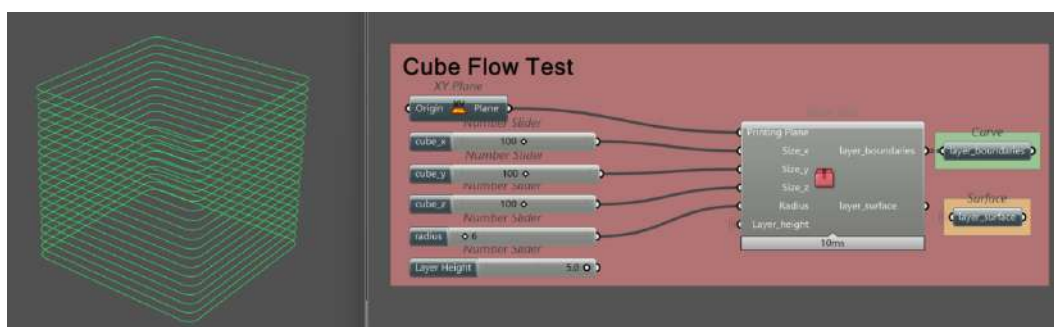


Figura 5.8: Componente Cube Flow Test.

Autor

Retraction Test Série de cilindros para testar parâmetros de retração e minimizar stringing. Pode ser configurado em diversas dimensões, e planos. Esse teste ajuda o designer a verificar se a distância de retração e velocidade escolhidas estão sendo adequadas, assim como o tipo de retração possibilitada pelo componente “Travels”.

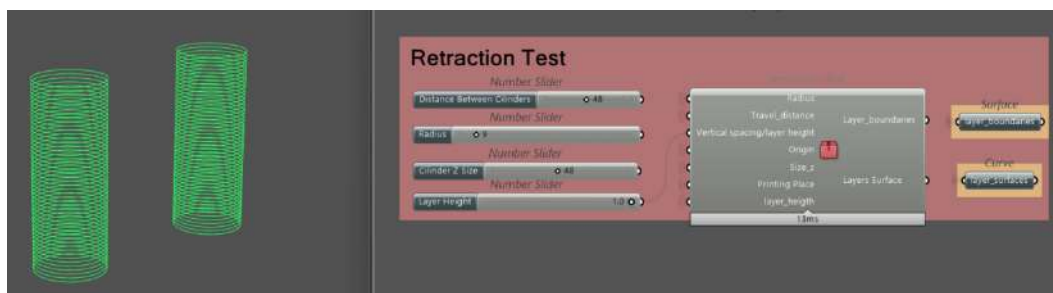


Figura 5.9: Componente Cube Flow Test.

Autor

Fan Model Superfície curvada para validar qualidade superficial em múltiplas orientações. Gera a superfície de uma ventoinha paramétrica, que pode ser completamente configurada, este componente serve como um benchmark, pois é uma superfície curvada em mais de uma orientação, o que a torna um excelente objeto para validar a qualidade da impressão 3D não-planar.

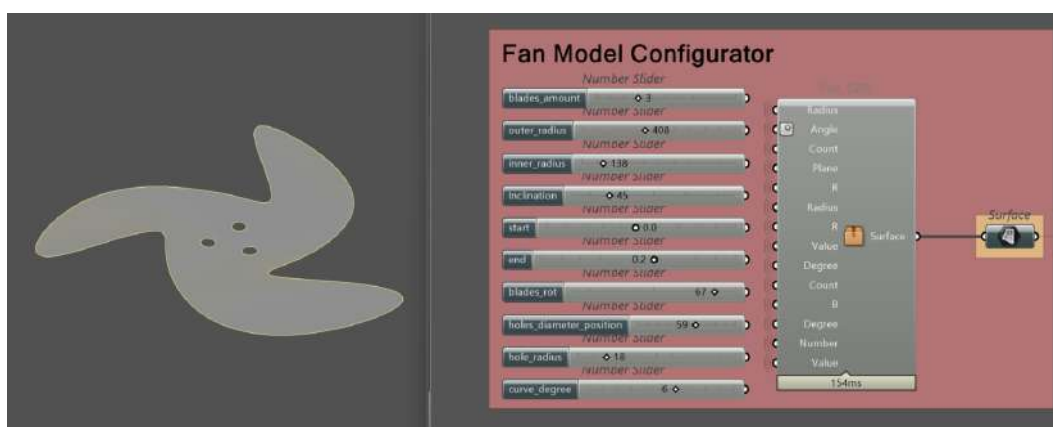


Figura 5.10: Componente Cube Flow Test.

Autor

5.5.3

Geradores de Camadas

Os componentes geradores de camada são a base do plugin quando lidamos com objetos 3D mesh ou brep. Eles são responsáveis por fazer intersecções com seu modelo 3D e gerar as camadas/superfícies seccionadas que posteriormente serão utilizadas para a criação dos caminhos tridimensionais.

5.5.4

Geradores de Camadas

5.5.4.1

Planar Layers

O componente **Planar Layers** intersecta o modelo 3D (Brep/Mesh) com uma série de planos regulares definidos pelo usuário. É possível configurar: — A direção de impressão nos eixos x, y e z ou selecionar um plano personalizado; — A rotação dos planos em cada um dos três eixos; — A distância entre os planos (Layer Height).

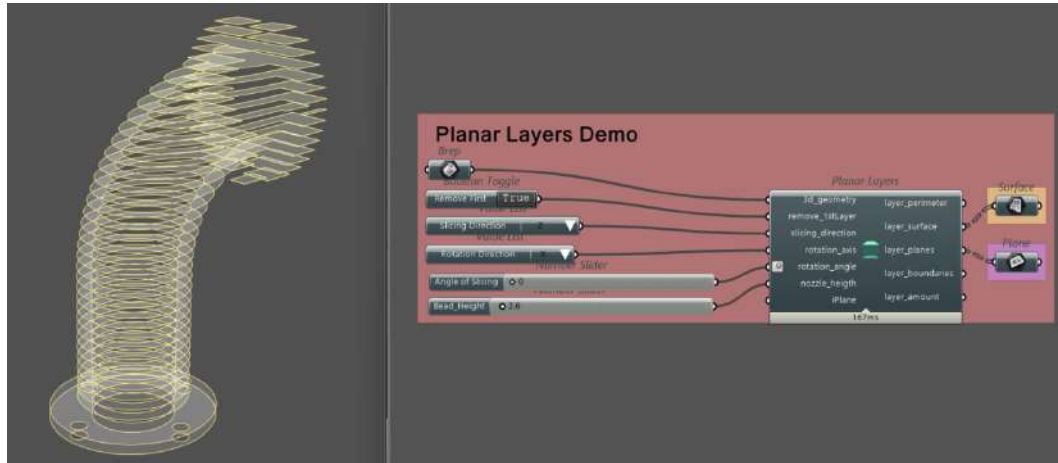


Figura 5.11: Planar Layers: geração de camadas planas regulares no volume de construção.

Autor

5.5.4.2

Path Layers

O componente **Path Layers** gera planos de interseção perpendiculares a uma curva de base definida pelo usuário. A cada ponto da curva é associada uma seção planar, permitindo: — Definir a distância média entre os planos (Layer Height); — Produzir trajetórias que seguem fielmente a geometria curva.



Figura 5.12: Path Layers: seccionamento perpendicular a uma curva de referência.

Autor

5.5.4.3

Normal Layers

O componente **Normal Layers** intersecta o modelo 3D (Brep) com planos gerados ao longo das normais de superfície nas direções U ou V de uma malha paramétrica. Permite: — Determinar a distância média entre as seções (Layer Height); — Seguir a curvatura intrínseca da superfície para camadas adaptativas.

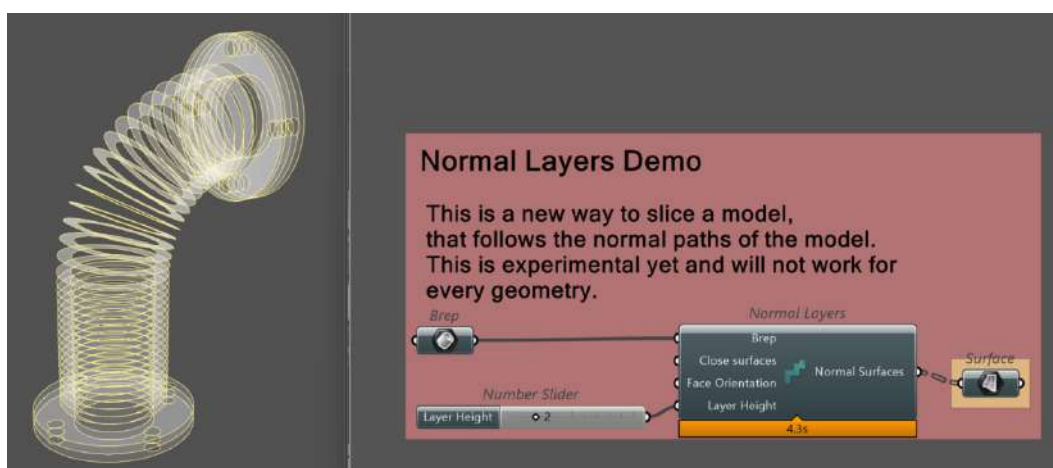


Figura 5.13: Normal Layers: geração de camadas ao longo das normais UV da superfície.

Autor

5.5.4.4

Tween Layers

O componente **Tween Layers** cria superfícies intermediárias entre duas geometrias de referência definidas pelo usuário. Para isso: — Gera uma série

de superfícies de transição de acordo com a altura de camada média escolhida;
 — Remove automaticamente as regiões excedentes baseando-se em um modelo 3D (Brep) auxiliar.

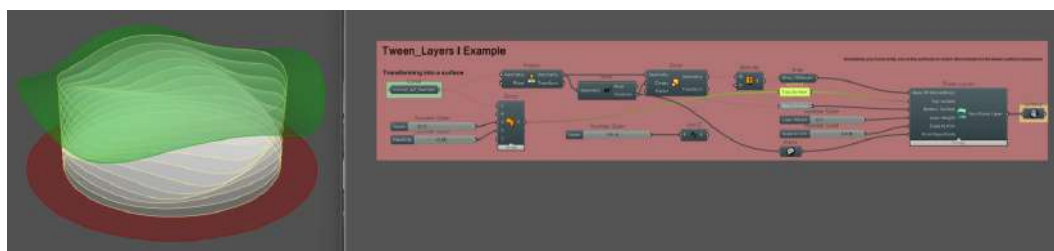


Figura 5.14: Tween Layers: superfícies interpoladas entre duas geometrias de entrada.

Autor

5.5.4.5

Tween Support Layers

O componente **Tween Support Layers** gera superfícies de suporte entre a geometria do objeto e o plano de impressão. Suas principais configurações são: — Altura de camada dos suportes; — Distância entre o suporte gerado e a superfície do objeto impresso, facilitando desmolde e pós-processamento; — Suporte a geometrias complexas com mínima interferência visual.



Figura 5.15: Tween Support Layers: superfícies de suporte otimizado até o plano base.

Autor

5.5.4.6

Vector Layer Array

O componente **Vector Layer Array** duplica camadas (superfícies ou curvas) ao longo de um vetor ou plano definido pelo usuário. É possível especificar: — O número de cópias a serem geradas; — A distância de deslocamento entre cada cópia; — A rotação incremental em torno de um eixo escolhido, viabilizando padrões helicoidais ou circulares.

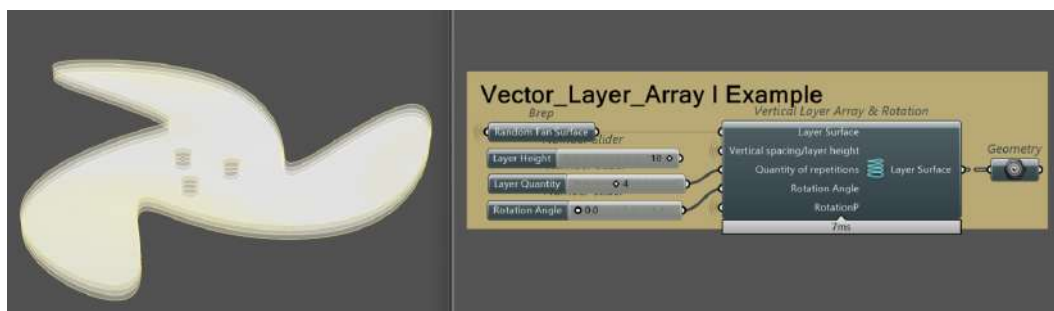


Figura 5.16: Vector Layer Array: replicação e rotação de camadas ao longo de um vetor.

Autor

5.5.5

Criadores de Caminhos

5.5.5.1

Surface UV Infill

O componente **Surface UV Infill** gera caminhos de impressão em formato zig-zag sobre superfícies parametrizadas, utilizando as coordenadas UV da malha. Além do infill, cria paredes periféricas por meio de offsets, que podem ser invertidos em duas direções (flip). As configurações disponíveis incluem:

- Número de camadas superiores (top layers) e inferiores (bottom layers);
- Densidade do preenchimento interno;
- Largura do offset para paredes externas e internas.

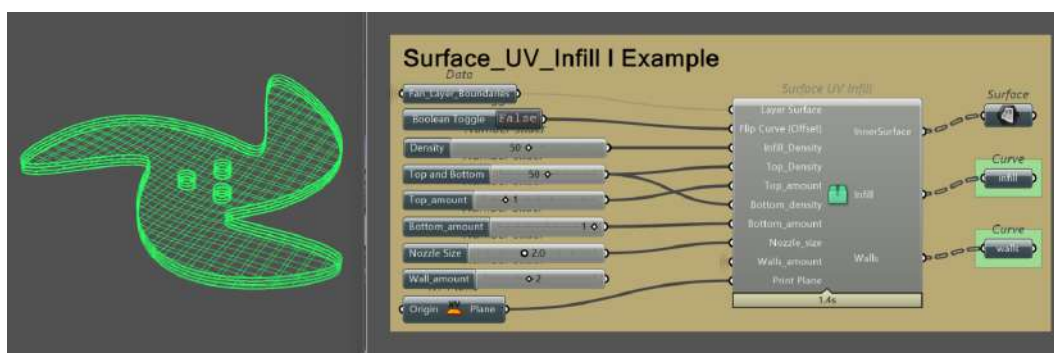


Figura 5.17: Surface UV Infill: caminhos zig-zag mapeados pelas coordenadas UV da superfície.

Autor

5.5.5.2

Intersection Infill

O componente **Intersection Infill** também gera infill em padrão zig-zag, mas a partir da interseção de planos regulares com a geometria do modelo 3D (Brep/Mesh). Suas principais opções são:

- Quantidade de camadas superiores e inferiores;
- Densidade de infill;
- Precisão da polilinha gerada (tolerância de aproximação);
- Offset flipável para criação de paredes de reforço.

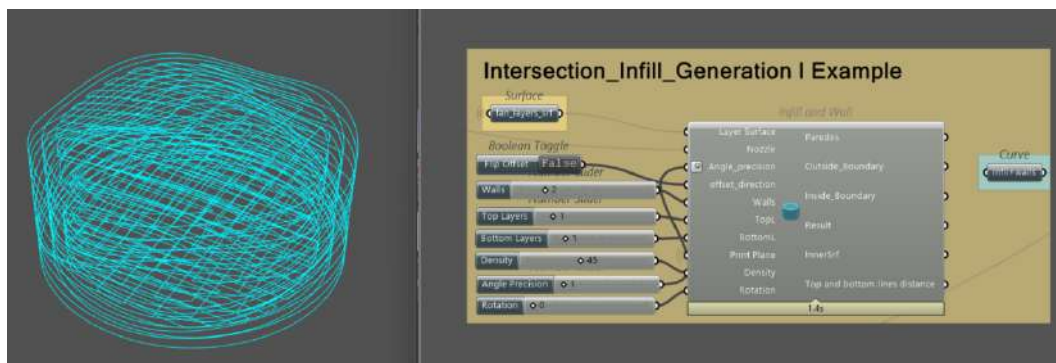


Figura 5.18: Intersection Infill: infill zig-zag resultante da interseção de planos e superfícies.

Autor

5.5.5.3

Support Infill

O componente **Support Infill** produz trajetórias de suporte em formato zig-zag por meio da interseção de planos com a superfície do objeto. Os parâmetros ajustáveis incluem:

- Densidade do preenchimento de suporte;
- Ângulo de rotação do padrão de infill em relação ao eixo da peça;
- Número de interfaces de suporte (layers de transição).

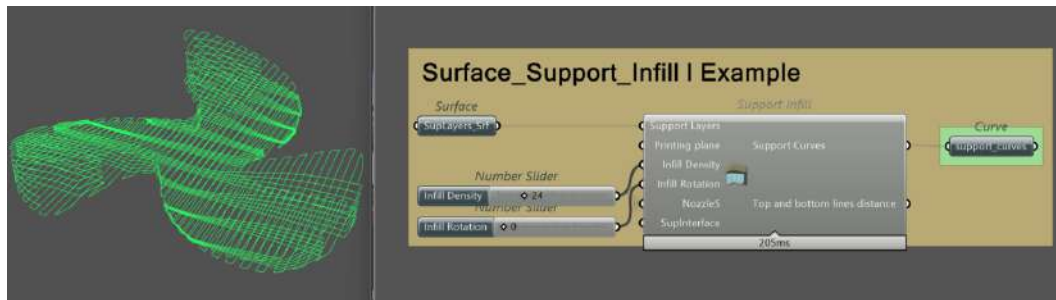


Figura 5.19: Support Infill: trajetórias de suporte configuráveis para facilitar a remoção.

Autor

5.5.5.4 Skirt & Brim

O componente **Skirt & Brim** cria perímetros de fixação na base da peça para melhorar a aderência à mesa de impressão. As principais opções são:

- Distância do skirt/brim em relação à superfície do modelo (offset);
- Número de repetições do perímetro externo;
- Alternância entre skirt (sem contato) e brim (contato direto).



Figura 5.20: Skirt & Brim: anéis de fixação configuráveis para melhorar a aderência inicial.

Autor

5.5.6 Utilitários

Os componentes utilitários auxiliam o usuário no processo de impressão, fornecendo dados e caminhos customizados que viabilizam a fabricação sem colisões ou falhas técnicas.

5.5.6.1 Travels

O componente **Travels** gera trajetórias de deslocamento entre os caminhos de impressão designados pelo usuário, evitando vazamentos de material durante movimentos não-produtivos. As configurações incluem:

- Direção do afastamento vertical (z-hop);
- Tolerância para determinar quais trechos requerem elevação;
- Tipo de deslocamento: linear ou em arco.



Figura 5.21: Travels (Arc z-hop): deslocamento em arco para evitar colisões.

Autor



Figura 5.22: Travels (z-hop): deslocamento vertical linear entre trajetórias.

Autor

5.5.6.2 Vertical Deformation

O componente **Vertical Deformation** aplica deformações controladas no eixo Z a uma curva de entrada. Os parâmetros ajustáveis são:

- Amplitude da deformação vertical;
- Número de divisões da curva resultante;

- Opção para fechar ou manter a curva aberta.

Este componente é especialmente útil para criar superfícies complexas, como vasos orgânicos que se beneficiam da impressão não-planar.

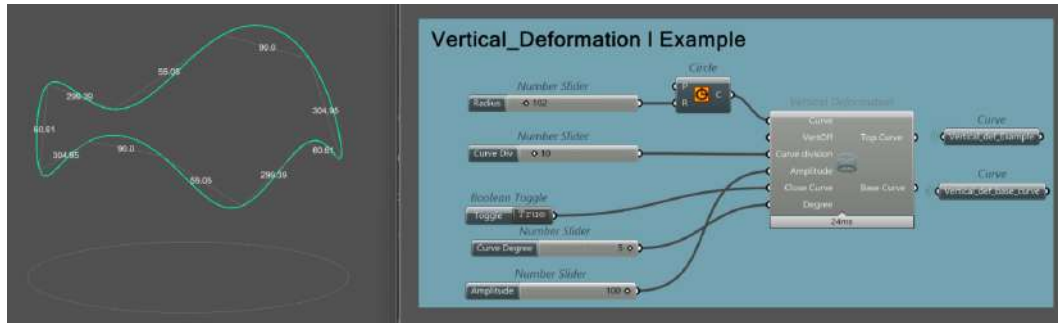


Figura 5.23: Vertical Deformation: deformação controlada de curvas no eixo Z.
Autor

5.5.6.3

Horizontal Deformation

O componente **Horizontal Deformation** aplica deformações nos planos XY a uma curva de referência. Os controles disponíveis incluem:

- Amplitude da deformação horizontal;
- Quantidade de subdivisões para suavização da curva.



Figura 5.24: Horizontal Deformation: modificação paramétrica de curvas no plano XY.
Autor

5.5.6.4

Overhang Angle

O componente **Overhang Angle** produz uma visualização tridimensional dos ângulos de inclinação da geometria em relação ao plano de impressão, identificando regiões que podem necessitar de suporte. As configurações são:

- Ângulo máximo admissível para impressão sem suporte;

- Tamanho do bico extrusor e espessura das linhas para simulação precisa;
- Códigos de cores para identificação visual de áreas críticas.

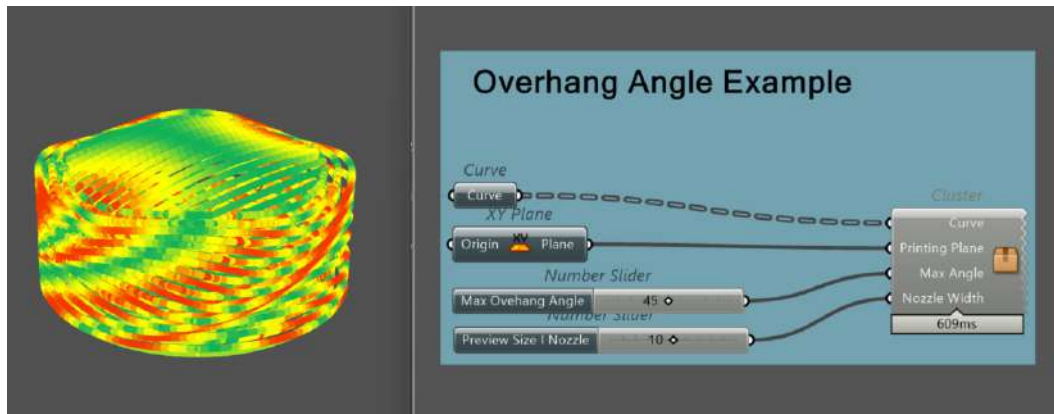


Figura 5.25: Overhang Angle: análise visual de ângulos críticos de impressão.

Autor

5.5.6.5

Print Data

O componente **Print Data** calcula e exibe uma interface HUD (Heads-Up Display) com métricas essenciais do processo de impressão. Estas informações podem alimentar modelos de inteligência artificial ou sistemas de design generativo. Os parâmetros incluem:

- Distância de visualização do preview;
- Densidade específica do material utilizado;
- Cálculo automático de tempo, volume de material e distância total de extrusão.

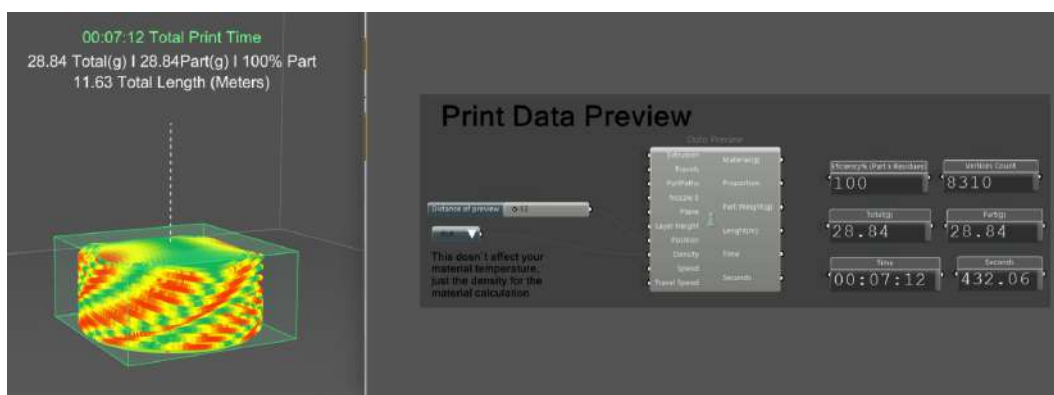


Figura 5.26: Print Data: interface HUD com métricas de impressão em tempo real.

Autor

5.5.7

Componentes Robóticos

Os componentes robóticos traduzem as trajetórias (NURBS/Polyline) e as superfícies geradas em planos de impressão apropriados para braços robóticos ou sistemas 3D multi-eixos, garantindo que cada movimento do extrusor seja orientado corretamente no espaço tridimensional.

5.5.7.1

Normal Printing Planes

O componente **Normal Printing Planes** gera planos de impressão perpendiculares à normal de cada camada (superfície) de impressão, usando as trajetórias como guias. As principais configurações são:

- Inversão (flip) da direção da normal para escolha de faces internas ou externas;
- Precisão angular, definindo o grau de tolerância na orientação do plano;
- Tamanho do vetor de pré-visualização para ajuste fino dos deslocamentos.

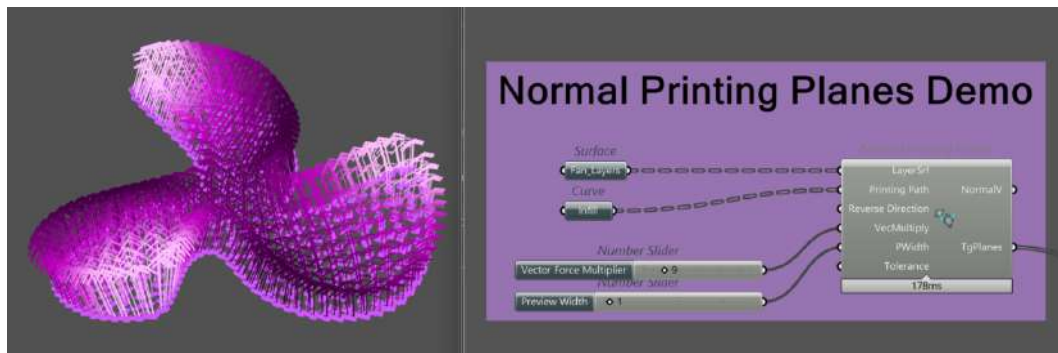


Figura 5.27: Normal Printing Planes: planos perpendiculares à normal da superfície de impressão.

Autor

5.5.7.2

Aligned Printing Planes

O componente **Aligned Printing Planes** cria planos de impressão alinhados aos caminhos de extrusão definidos pelo usuário, permitindo:

- Alinhamento dos planos ao sistema de coordenadas global (X,Y,Z) ou a direções personalizadas;
- Controle da distância entre planos sucessivos para manter exatidão de posicionamento;

- Ajuste da precisão final na separação entre planos para garantir continuidade suave.

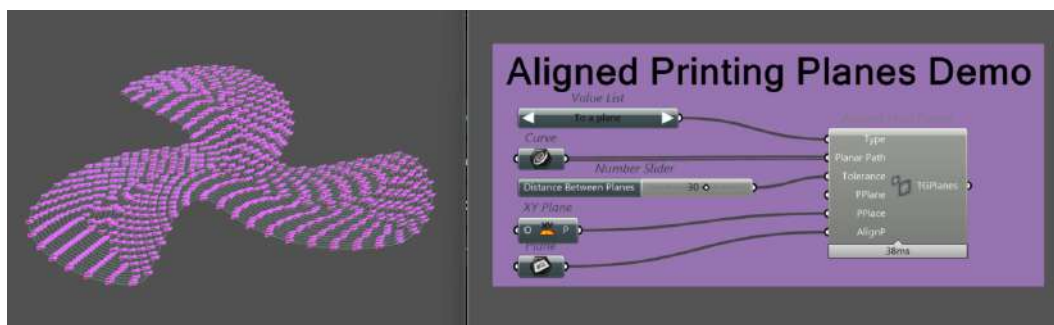


Figura 5.28: Aligned Printing Planes: planos alinhados às direções definidas pelo usuário.

Autor

5.6

Instalação

Para instalar¹ atualmente é necessário apenas baixar os arquivos (user components) e adicioná-los à pasta **User Objects**². Dessa forma, os componentes são importados e estão prontos para serem utilizados, pois o plugin trabalha apenas com componentes nativos do Grasshopper/Rhinoceros.

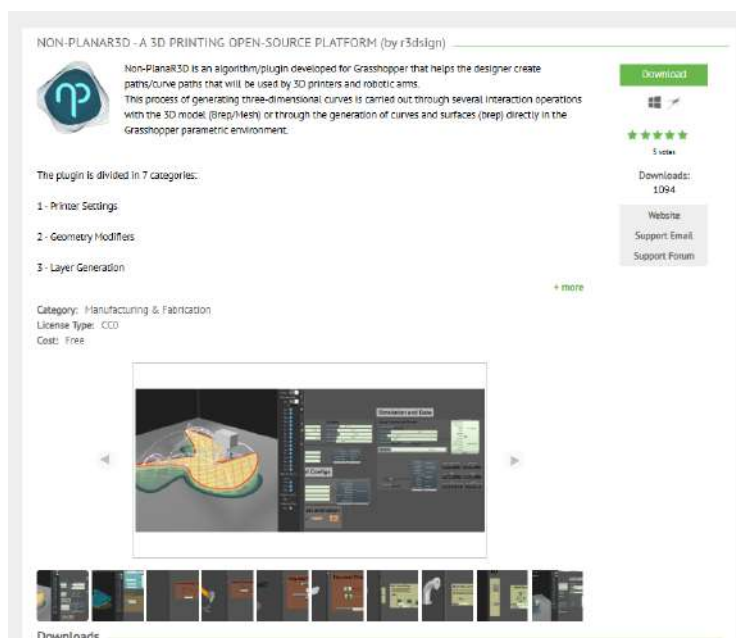


Figura 5.29: Aligned Printing Planes.

Autor

¹Para fazer o download do plugin acesse: <https://www.food4rhino.com/en/app/nonplanar3d-3d-printing-open-source-platform>

²Por exemplo: C:\Users\user\Roaming\Grasshopper\User Objects

1. Acesse o link do plugin e faça o download do arquivo `NonPlanaR3D.rar`.
 2. Copie o arquivo para o diretório de User Objects conforme indicado.
 3. Reinicie o Rhino e abra o Grasshopper; os componentes aparecerão na aba *Non-PlanaR3D*.
-
1. Acesse <https://www.food4rhino.com/en/app/nonplanar3d-3d-printing-open-source-platform>.
 2. Faça o download do arquivo `NonPlanaR3D.gha`.
 3. Copie o arquivo para: `C:\Users\seu usuário\AppData\Roaming\Grasshopper\User Objects`
 4. Reinicie o Rhino e abra o Grasshopper; os componentes aparecerão na aba *Non-PlanaR3D*.

5.7

Conclusão

A estrutura modular, apoiada por uma hierarquia visual e pesquisa com usuários, garante ao Non-PlanaR3D flexibilidade para extensões futuras, facilidade de manutenção e alto grau de reaproveitamento de código. O plugin consolida as melhores práticas de design computacional e manufatura aditiva não-planar, oferecendo uma ferramenta robusta e intuitiva para comunidades acadêmicas e industriais.

6 Conclusão

6.1 Síntese da trajetória de pesquisa

Esta investigação materializou-se através do desenvolvimento do *Non-PlanaR3D* como resposta às barreiras técnicas e econômicas que historicamente restringiram o acesso à fabricação aditiva não-planar. O percurso investigativo, fundamentado na metodologia *Research Through Design* (RTD), transcendeu a mera criação de uma ferramenta para constituir uma exploração sistemática das intersecções entre design computacional, manufatura aditiva e democratização tecnológica.

A trajetória de três fases — exploratória, desenvolvimento e validação — revelou não apenas desafios técnicos da impressão não-planar, mas também implicações sociais e econômicas no contexto brasileiro. Como observa (RODGERS; YEE, 2023), a pesquisa contemporânea em design transcende fronteiras disciplinares tradicionais, integrando conhecimentos técnicos e artísticos para abordar problemas complexos de forma holística.

6.2 Contribuições principais

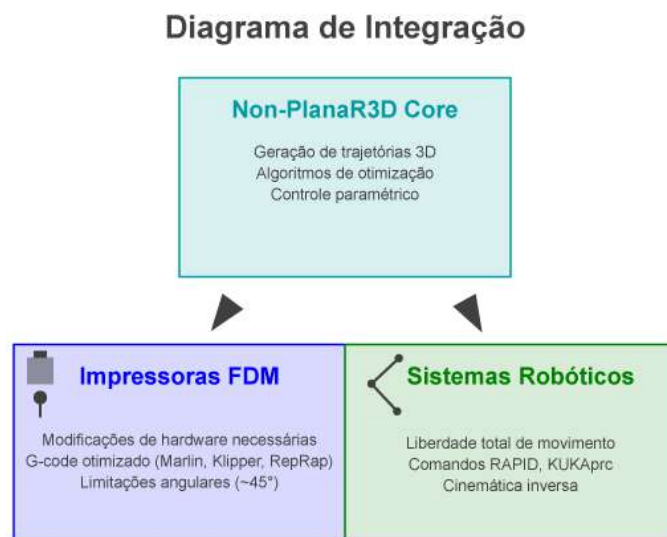


Figura 6.1: Diagrama das contribuições do *Non-PlanaR3D*.

Autor

6.2.1

Contribuição técnica — Arquitetura modular e acessível

O *Non-PlanaR3D* estabelece um novo paradigma para ferramentas de fabricação não-planar através de sua arquitetura modular implementada no ambiente Grasshopper. Esta abordagem supera limitações das soluções proprietárias existentes — AdaOne e AIbuild — oferecendo controle paramétrico total sobre a geração de trajetórias tridimensionais sem custos proibitivos. Vale salientar ainda que a *Non-PlanaR3D* pode se integrar a estas mesmas duas ferramentas através do Grasshopper.

Os cinco componentes principais — entrada geométrica, geração de trajetória, validação, tradução e interface — operam de forma independente mas interconectada, permitindo adaptação a diferentes contextos de fabricação. Esta modularidade facilita extensões futuras e personalizações por outros pesquisadores, estabelecendo uma base sólida para desenvolvimentos subsequentes.

6.2.2

Contribuição metodológica — RTD em fabricação digital

A aplicação do *Research Through Design* demonstrou sua eficácia para pesquisa em tecnologias emergentes, onde teoria e prática evoluem simultaneamente. Os cinco ciclos iterativos de desenvolvimento — desde experimentações iniciais até validação industrial — geraram conhecimento que transcende o artefato específico para informar o campo mais amplo da fabricação digital (VAUGHAN, 2017).

Esta abordagem revelou-se particularmente apropriada para contextos onde soluções tecnológicas devem responder a limitações e oportunidades locais, alinhando-se com a tradição latino-americana de adaptação tecnológica criativa.

6.2.3

Contribuição social — Democratização e emancipação tecnológica

O potencial de democratização do *Non-PlanaR3D* manifesta-se através da redução significativa de barreiras econômicas e técnicas para acesso à fabricação não-planar. Esta contribuição alinha-se com a visão de (BONSIEPE, 2006) sobre design como prática emancipatória, capaz de promover autonomia em contextos com recursos limitados.

A adoção crescente em estúdios de design, instituições educacionais, pequenas empresas e *makerspaces* valida este potencial democratizador, demonstrando como ferramentas acessíveis podem expandir o repertório criativo e produtivo de comunidades diversas.

6.3

Validação e impacto demonstrados

A validação através do projeto *Flexboat* exemplifica o impacto prático do método, demonstrando resultados mensuráveis que transcendem métricas técnicas para evidenciar o potencial transformador da fabricação não-planar em contextos industriais reais. A análise comparativa sistemática confirmou vantagens consistentes em todas as métricas avaliadas, sustentando argumentos qualitativos sobre os benefícios da abordagem não-planar.

Tabela 6.1: Síntese das Limitações e Desafios Identificados na Pesquisa

Limitação	Descrição/Impacto	Potenciais Soluções
Validação restrita a um único setor	Resultados concentrados na indústria náutica	Replicar estudos em setores médico, aeroespacial e educacional
Dependência de hardware modificado	Exige modificações manuais em impressoras FDM	Desenvolver kits de retrofit padronizados de baixo custo
Ajuste manual de parâmetros de impressão	Alto grau de experimentação para calibragem	Automatizar via aprendizado de máquina e sensores embutidos
Limitação de materiais homogêneos	Falta de testes com compósitos ou multimateriais	Pesquisar rotas híbridas (co-extrusão, reforços contínuos)
Escalabilidade limitada em ambientes industriais	Integração incompleta com ERP/MES	Criar módulos de API abertos para integração fabril

Legenda: A tabela resume as principais limitações técnicas, metodológicas e operacionais detectadas, bem como caminhos de mitigação propostos para pesquisas futuras.

6.4

Limitações reconhecidas e oportunidades futuras

Tabela 6.2: Limitações identificadas e direcionamentos futuros.

Limitação	Direcionamento Futuro
Validação contextualmente específica	Estudos em múltiplos setores
Dependência de hardware modificado	Desenvolvimento de kits acessíveis
Otimização manual de parâmetros	Automação via aprendizado de máquina
Foco em materiais homogêneos	Extensão para materiais heterogêneos

As limitações identificadas convertem-se em agenda de pesquisa estruturada. O desenvolvimento de hardware acessível emerge como necessidade

crítica, enquanto a integração de técnicas de aprendizado de máquina para otimização automática pode eliminar barreiras técnicas significativas. A extensão para materiais heterogêneos representa uma fronteira promissora para aplicações avançadas.

6.5

Implicações para o campo

O *Non-PlanaR3D* posiciona-se como catalisador para transformações mais amplas no campo da fabricação digital. Sua abordagem modular e acessível estabelece precedentes para o desenvolvimento de ferramentas democratizadoras em outras áreas tecnológicas emergentes.

A validação em contexto industrial brasileiro demonstra que soluções localmente adaptadas podem competir efetivamente com tecnologias proprietárias internacionais, fortalecendo argumentos sobre a importância da capacidade de inovação endógena (FRASCARA, 2020).

6.6

Perspectivas futuras

A trajetória delineada por esta pesquisa aponta para um futuro onde a fabricação não-planar se torna rotineira e acessível, integrando-se naturalmente aos fluxos de trabalho de design. Esta visão requer desenvolvimento coordenado em múltiplas frentes — hardware, software, materiais e métodos — mas as fundações estabelecidas pelo *Non-PlanaR3D* oferecem uma base sólida para esta evolução.

A crescente adoção da ferramenta por comunidades diversas sugere que o impacto transcenderá aplicações técnicas específicas para influenciar práticas pedagógicas, modelos de negócio e formas de organização produtiva.

6.7

Reflexões finais

Esta pesquisa exemplifica como o design, entendido como prática investigativa e transformadora, pode gerar conhecimento que simultaneamente avança fronteiras teóricas e responde a necessidades práticas urgentes. O *Non-PlanaR3D* representa mais que uma inovação técnica — constitui uma manifestação concreta de princípios de design democrático e emancipatório.

A integração entre rigor metodológico, sensibilidade contextual e compromisso social demonstra caminhos possíveis para pesquisas futuras que aspirem a impactos transformadores. Como observa (FRASCARA, 2020), design como prática social e comunicativa transcende aspectos puramente funcionais para

considerar implicações mais amplas, uma perspectiva que informou fundamentalmente esta investigação.

Espera-se que esta contribuição inspire outros pesquisadores a explorar intersecções entre tecnologia, criatividade e justiça social, fortalecendo o papel do design como força democratizadora e emancipatória em um mundo crescentemente tecnológico.

Referências bibliográficas

3D Hubs. *2022 Report*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.hubs.com/get/trends/>>.

AI Build. **3D Printing Software**. 2023. <https://ai-build.com/>. Acesso em: 2023-06-20.

BECHTHOLD, M.; KING, N. **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design**. [S.l.]: Springer, 2023.

BONSIEPE, G. Design and democracy. **Design Issues**, v. 22, n. 2, p. 27–34, 2006.

DAI, C. et al. Support-free volume printing by multi-axis motion. **ACM Transactions on Graphics**, v. 37, n. 4, p. 1–14, 2022.

DUTY, C. E. et al. What makes a material printable? a viscoelastic model for extrusion-based 3d printing of polymers. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 58, p. 1405–1423, 2021.

FALLMAN, D. The interaction design research triangle of design practice, design studies, and design exploration. **Design Issues**, MIT Press, Cambridge, MA, v. 24, n. 3, p. 4–18, 2008.

FRASCARA, J. **Enseñando Diseño**. Buenos Aires: Ediciones Infinito, 2018. ISBN 978-9873970108.

FRASCARA, J. Communication design: Principles, methods, and practice. **Design Issues**, v. 36, n. 4, p. 3–23, 2020.

FRAYLING, C. Research in art and design. **Royal College of Art Research Papers**, v. 1, n. 1, 1993. Parcialmente Verificada: Faltam informações sobre páginas.

GIBSON, I. et al. **Additive Manufacturing Technologies**. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2021.

GODIN, D.; ZAHEDI, M. Aspects of research through design: A literature review. In: **DRS International Conference**. Umeå: [s.n.], 2014. p. 1–10.

KREMENETSKY, M. **KUKA & Ai Build Launch 3D Printing Production Cells**. 2022. <https://3dprint.com/295756/d-ai-build-kuka-launch-3d-printing-production-cells/>. Parcialmente verificada: informações suficientes, mas falta data de acesso.

LEARY, M. **Design for Additive Manufacturing**. [S.l.]: Elsevier, 2019.

LESSA, R. B. **Do código à matéria: Non-PlanaR3D, um novo método para fabricação digital**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2025. Dissertação de Mestrado.

LOH, G. H. et al. An overview of material extrusion troubleshooting. **Applied Sciences**, v. 10, n. 14, p. 4776, 2024. Verificada: Referência completa com volume, número e páginas.

MENGES, A. Material architecture: Integrating material behavior and computational design. **Architectural Design**, v. 90, n. 2, p. 86–93, 2020.

MORITZ, W. **3D Printering: Non-Planar Layer FDM**. 2016. <https://hackaday.com/2016/07/27/3d-printering-non-planar-layer-fdm/>. Acesso em: 2023-06-20.

MOSTAFAVI, S.; BIER, H. Robotic 3d printing with multiple materials. **Construction Robotics**, v. 5, n. 1, p. 3–14, 2021. Verificada: Referência completa com volume, número e páginas.

MUELLER, J. et al. Mechanical properties of interfaces in inkjet 3d printed single and multi-material parts. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 4, n. 4, p. 193–199, 2022.

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.

OXMAN, N. et al. Biological computation for digital design and fabrication: A biologically-informed theory of computation for design and fabrication with living systems. **International Journal of Architectural Computing**, v. 11, n. 4, p. 337–352, 2023.

Portal da Indústria. **Perfil da Indústria Brasileira**. 2023. <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/grafico/total/producao/#/industria-total>. Acesso em: 2025-09-13.

R3DSIGN. **IMPRESSÃO 3D de Verdade: Algoritmo Não Planar no Grasshopper (OLD Dated)**. 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=IWibVxbAzaA>. Vídeo online.

R3DSIGN. **IMPRESSÃO 3D Não Planar no Grasshopper**. 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=3W20fRBxrxl>. Vídeo online.

RIPPER, J. L. M.; MOREIRA, L. E. **Métodos de ensino de design de produtos e sua aplicação às estruturas da engenharia civil**. 2004. Artigo apresentado no COBEMGE.

RODGERS, P. A.; YEE, J. **The Routledge Companion to Design Research**. 2. ed. Abingdon: Routledge, 2023.

ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations**. 5. ed. [S.l.]: Free Press, 2003.

SABIN, J. Transformative digital fabrication: Towards a distributed means of production. **Architectural Design**, v. 91, n. 1, p. 92–99, 2021.

THOMPSON, M. K. et al. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **CIRP Annals**, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2020.

TIBBITS, S. **Active Matter: Programmable Materials for Adaptive Architecture**. [S.I.]: MIT Press, 2024. Verificada: Informações completas para um livro.

VAUGHAN, L. **Practice-Based Design Research**. London: Bloomsbury Academic, 2017.

WANG, C. C. L. et al. S³-slicer: A framework for multi-axis 3d printing of complex models. **SIGGRAPH Asia 2022 Conference Proceedings**, ACM, p. 1–15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3550469.3550471>.

WOHLERS, T. et al. **Wohlers Report 2023: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry**. [S.I.], 2023.

YUAN, P. F. et al. **Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2022**. [S.I.]: Springer, 2022. Verificada: Informações completas para um livro.

ZHAO, Y.; CHEN, Y.; ZHOU, C. Improving mechanical properties of 3d printed parts by optimizing toolpath and process parameters. **Additive Manufacturing**, v. 49, p. 102485, 2022.

ZIMMERMAN, J.; FORLIZZI, J.; EVENSON, S. Research through design as a method for interaction design research in hci. **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**, ACM, New York, p. 493–502, 2007.