

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM
SISTEMAS PRODUTIVOS

NILCE MIKI TAKAHASHI

**PROJETO DE IMPRESSORA 3D PARA OBTENÇÃO DE ARTEFATOS EM
CERÂMICA**

São Paulo

Maio/2026

NILCE MIKI TAKAHASHI

PROJETO DE IMPRESSORA 3D PARA OBTENÇÃO DE ARTEFATOS EM CERÂMICA

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro e colaboração da Prof^a Dr^a Katia Cristiane Gandolpho Candioto (EEL-USP).

Área de Concentração: Sistemas Produtivos

Linha de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade

Projeto de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica
ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável relacionados a esta dissertação e seus resultados: 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e 12 (Consumo e produção responsáveis).

São Paulo

Maio/2026

T136p Takahashi, Nilce Miki
Projeto de impressora 3D para obtenção de artefatos em cerâmica
/ Nilce Miki Takahashi. – São Paulo: CPS, 2026.
128 f. : il.

Orientador (a): Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em
Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica
Paula Souza, 2026.

1. Gestão da inovação tecnológica. 2. Impressora 3D. 3. Madeira
plástica. 4. RepRap. 5. Robocasting. I. Ribeiro, Rosinei Batista. II.
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

NILCE MIKI TAKAHASHI

**PROJETO DE IMPRESSORA 3D PARA OBTENÇÃO DE ARTEFATOS EM
CERÂMICA**

Documento assinado digitalmente
 **ROSINEI BATISTA RIBEIRO**
Data: 14/06/2026 12:15:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro
Orientador – CGPEP - CEETEPS

Documento assinado digitalmente
 **KATIA CRISTIANE GANDOLPHO CANDIOTO**
Data: 14/06/2026 17:26:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª Drª Katia Cristiane Gandolpho Candioto
Professora Colaboradora – EEL – USP

Documento assinado digitalmente
 **EDMILSON DE SOUZA**
Data: 22/07/2026 16:00:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edmilson de Souza
Examinador Externo - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATOGROSSO DO SUL - UEMS

Documento assinado digitalmente
 **SILVIA PIERRE IRAZUSTA**
Data: 22/07/2026 13:31:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Sílvia Pierre Irazusta
Examinadora Interna – CGPEP - CEETEPS

São Paulo, 28 de maio de 2026.

Embora a inspiração inicial fosse a ousadia da fictícia Lisbeth Salander, logo encontrei um propósito maior. É com profundo carinho que dedico a jornada a três amigos (*in memoriam*):

Flávio Oliveira, com quem compartilhei conquistas e evoluções nos *hackathons* da pandemia e planos de, um dia, prestarmos o mestrado em inovação;

Lissandra Issa, moça de personalidade forte, companheira de trabalho e das muitas ideias disruptivas que planejávamos implementar juntas;

Gervásio Yukishigue Kanda, que sempre tinha uma palavra amiga, conselhos e pérolas de sabedoria para compartilhar.

Sentirei a falta das conversas, das risadas e do brilho de vocês, que se foram tão precocemente!

Por aqui, carrego nossos sonhos, enquanto transborda a gratidão e a saudade.

AGRADECIMENTOS

A realização do mestrado não é uma trajetória de escolhas fáceis e nada disso seria possível sem oportunidades e valiosas colaborações.

Agradeço ao Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, pelo Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos (CGPEP), ambiente onde desenvolvi as habilidades para este projeto, estendendo a gratidão a todos os professores e ao corpo técnico do curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro, pela paciência, pelas diretrizes propostas e por viabilizar momentos cruciais para a pesquisa, como o contato com a Fazenda da Esperança[®].

À minha coorientadora, Prof^a Dra. Katia Cristiane Gandolpho Candioto, cujo convite viabilizou a visita técnica essencial a este estudo. Agradeço a ela e ao Prof. Dr. Fernando Vernilli Jr., ambos do DEMAR da EEL-USP (Lorena), pelas contribuições fundamentais e por permitirem o acompanhamento da impressora 3D em laboratório no *benchmarking*, junto às alunas Ana Ligia de Oliveira Sá Lemes da Silva e Bruna Vitória dos Santos Luz.

Expresso gratidão a Ricardo Yoshiyuki Hirata e Nathan Hatsumi Rodrigues Goto, pelos relevantes *feedbacks* na validação do meu experimento.

Aos colegas da turma 12/2024, em especial Juliana M. V. F. Freire, Albina Filipe, Renato W. dos Santos, Juliane B. B. Pinto, Thiago R. da Rocha, Sergio Copeliovitch, Wilian L. dos Santos e Rafaella Nogueira Freire, por tornarem esta travessia menos longa e mais leve.

Ao IBGE (SES-SP), em especial à equipe da Seção de Pesquisas Sociais, pela forma calorosa e generosa com que fui acolhida durante todo este período. Expresso minha profunda admiração a esses pesquisadores seniores e agradeço ao meu gestor, Jailson Lopes de Sousa, cujos conselhos e aceite tornaram esta jornada possível; a Ana Lúcia Kazan, desde o "repelente simbólico" para a imersão no quilombo até a dinâmica do QFD; e a Paulo Henrique B. Favero, pela empatia e risadas diárias. Se não fosse a paixão de vocês pela pesquisa científica, ética e rigor metodológico, meus estudos teriam sucumbido há muito tempo.

Ao Leandro Luiz de Andrade, que me incentivou lá atrás a tentar este mestrado. Aos amigos compreensivos Luís Paulo Almeida, Jackson Braga, Renee Piagentini, Carla Pazin e Fernanda Paduan, por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos amigos do dia a dia, Edmilson Sypriano da Silva, Rafael Xavier de Souza, Nadir Cardozo Lopes, Adriana Oliveira de Lima, Luiza Carolina Barros de Sousa Pessoa, Mateus do Amaral Bueno Arruda, João Máximo Dantas Martins Bertolini, Edna Satomi Hanzawa Mitsuki, Stephanie Augusta dos Santos de Jesus, Sabrina de Matos Nonato, Fabiano Henrique Leite Machado Iório e tantos outros, pela torcida constante em cada etapa.

Por fim, agradeço à minha família, pelo apoio incondicional; à minha matilha, pela lealdade silenciosa; e a Rafael Gomes Baars, por estar sempre por perto, me aturar em todos os momentos e me lembrar de que, sim, você tem razão: a gente não é uma ilha!

*I've never wanted to be part of an inner circle
of any scene. I've always been an outsider
looking to question and subvert.*

David LaChapelle

RESUMO

TAKAHASHI, N. M. **Projeto de impressora 3D para obtenção de artefatos em cerâmica.** 2026. 128 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) - Centro Estadual De Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2026.

O estudo teve como objetivo desenvolver uma proposta de projeto de uma impressora 3D de uso doméstico para obtenção de artefatos em cerâmica, com chassi estrutural em Madeira Plástica (MP), visando avaliar a viabilidade deste material como alternativa acessível e sustentável. A metodologia adotou a abordagem *Design Science Research (DSR)* e a ferramenta *Quality Function Deployment (QFD)* focada na experiência do usuário (*Voice of Customer - VoC*) para coletar percepções de um público usuário (leigos e técnicos). A coleta de dados foi realizada por meio da técnica de grupo focal, utilizando a interação direta com *mockups* físicos para a validação sensorial e ergonômica da estrutura do projeto de produto proposto. Como principais resultados, desenvolveu-se o detalhamento técnico e a modelagem de duas arquiteturas de impressoras: Cartesiana e Delta, cujas estabilidades estruturais foram otimizadas pelo uso de chapas maciças usinadas e tarugos de MP, garantindo rigidez contra as vibrações mecânicas da extrusão. A viabilidade do conceito foi validada por meio de uma dinâmica de cocriação com usuários, a qual demonstrou a alta intuitividade de montagem do modelo Delta (comparado pelos participantes a um sistema modular) e uma percepção sensorial altamente positiva quanto à robustez, acabamento e apelo ecológico dos materiais compósitos reciclados. Como produto tangível deste trabalho, foi gerado o depósito de registro de Modelo de Utilidade (MU) junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Conclui-se que o artefato atende tanto aos requisitos técnicos de engenharia quanto às demandas ergonômicas e sustentáveis dos usuários finais do projeto de produto.

Palavras-chave: Gestão da inovação tecnológica; Impressora 3D; Madeira plástica; RepRap; Robocasting.

ABSTRACT

TAKAHASHI, N. M. **3D printer design for the production of ceramic artifacts**. 2026. 128 f. Dissertation (Professional Master's in Management and Technology in Productive Systems) - Centro Estadual De Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2026.

This study aimed to develop a product design proposal for a domestic-use 3D printer for the production of ceramic artifacts, featuring a structural chassis made of Plastic Lumber (PL), to evaluate the viability of this material as an affordable and sustainable alternative. The methodology adopted the Design Science Research (DSR) approach and the Quality Function Deployment (QFD) tool focused on user experience (Voice of the Customer - VoC) to gather insights from a user audience (laypersons and technicians). Data collection was conducted through the focus group technique, using direct interaction with physical mockups for the sensory and ergonomic validation of the proposed product design structure. As main results, the technical detailing and modeling of two printer architectures: Cartesian and Delta, whose structural stabilities were optimized by using machined solid sheets and PL rods, ensuring rigidity against the mechanical vibrations of extrusion. The viability of the concept was validated through a co-creation dynamic with users, which demonstrated the high intuitiveness of the Delta model (compared by participants to a modular system) and a highly positive sensory perception regarding the robustness, finishing, and ecological appeal of the recycled composite materials. As a tangible product of this work, a Utility Model (UM) patent application was filed with the National Institute of Industrial Property (INPI). It is concluded that the artifact meets both the technical engineering requirements and the ergonomic and sustainable demands of the product design end-users.

Keywords: Technological innovation management; 3D printer; Plastic lumber; RepRap; Robocasting.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais categorias da manufatura aditiva (MA).	26
Quadro 2: Matriz de classificação de compósitos baseados em materiais.....	27
Quadro 3: Vantagens e limitações no uso da manufatura aditiva.	28
Quadro 4: Vantagens e desvantagens do uso da madeira plástica (MP).....	41
Quadro 5: Tipos de processo de fabricação.	42
Quadro 6: Classificação da pesquisa.....	44
Quadro 7: Quadro comparativo do QFD e de fases do projeto da Casa da Qualidade.....	54
Quadro 8: Relação de empresas brasileiras e impressoras 3D comercializadas.....	56
Quadro 9: Anatomia comum às impressoras 3D do tipo RepRap.	60
Quadro 10: Ficha de análise de similar 01 - Impressora TINA2.	69
Quadro 11: Ficha de análise de similar 02 - impressora 3D C01 e C02.....	70
Quadro 12: Ficha de análise de similar 03 - Impressora DuraPrinter E03.	71
Quadro 13: Ficha de análise de similar 04 - impressora 3D Phrozen Sonic Mini.	72
Quadro 14: Ficha de análise de similar 05 - impressora 3D Tronxy Moore 1 Mini Clay.	73
Quadro 15: Diretrizes de especificação do modelo básico do artefato e respectivas justificativas técnicas.....	88
Quadro 16: Especificação técnica detalhada de periféricos e sistemas complementares.	89
Quadro 17: Perfil amostral dos profissionais especialistas do Grupo de Foco (GF).	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do processo de fabricação na manufatura aditiva.	24
Figura 2: Diferença de tipos de manufatura.	24
Figura 3: Classificação dos processos de prototipagem de acordo com estado ou forma da matéria-prima.....	27
Figura 4: Fotoescultura de Gautier: (a) objeto e câmeras; (b) escultor e obra.	29
Figura 5: Retrato de cabeça de mulher, de François Willème (1865): trabalhada em cortes..	29
Figura 6: Ilustração do método de Blather para a construção de mapas topográficos.	30
Figura 7: Exemplo de desenho de construção do plano seriado e estruturas.	31
Figura 8: Um exercício proposto por Kong e a aplicação das dobras em folha de papel.	31
Figura 9: Impressoras 3D: sistema Cartesiano (a) vista em perfil; e (b) vista frontal.....	33
Figura 10: Sistemas de movimentação em impressoras 3D: (a) Cartesiano; e (b) Delta.	33
Figura 11: Representação gráfica do <i>robocasting</i>	34
Figura 12: Modelo da Casa da Qualidade para análise de requisitos.	37
Figura 13: Os 17 ODS da ONU e os 3 ainda não institucionalizados, totalizando 20 ODS...	38
Figura 14: Protocolo de método <i>Design Science Research</i> (DSR).	45
Figura 15: Validação de <i>mockups</i> : (a) componentes; (b) encaixe; e (c) modelo final.....	48
Figura 16: Insumos poliméricos: (a) recepção; (b) triagem; e (c) moagem.	49
Figura 17: Separação de composto: (a) hastes trituradas; (b) fração polimérica; (c) algodão.	50
Figura 18: Processo do plástico: (a) equipamentos; (b) cordão; (c) moagem; (d) grãos.	50
Figura 19: Extrusão de MP: (a) maquinário; (b) granulado; (c) saída; (d) produto final.....	51
Figura 20: Mapeamento do processo de manufatura de madeira plástica.....	51
Figura 21: Diagrama SIPOC: manufatura de madeira plástica.	52
Figura 22: Protótipo 01 (Misto): (a) volumes; (b) guias; (c) prismas; (d) chassi em MP.....	62
Figura 23: Detalhamento técnico do chassi estrutural: Vista Frontal, Vista Superior e Vistas de Corte AA e BB (Dimensões em mm).	63
Figura 24: Protótipo 01: (a) chassi; (b) componentes e guias; (c) tarugos.....	65
Figura 25: Protótipo 02: (a) chassi e cabeçote; (b) base e fixadores; (c) estabilização.....	65
Figura 26: Matriz QFD 1 - Requisitos dos usuários e requisitos técnicos.	67
Figura 27: Matriz QFD2 – Desdobramentos dos requisitos técnicos em características dos componentes (Casa da Qualidade).	75
Figura 28: Matriz QFD 3 – Desdobramento das características dos componentes em processos de fabricação.	77

Figura 29: Matriz QFD 4 – Desdobramento da Qualidade (fabricação).....	79
Figura 30: Vista superior cotada do estudo preliminar em configuração cartesiana.	80
Figura 31: Representação tridimensional (<i>render</i>) conceitual da impressora Delta.	81
Figura 32: Representação isométrica da impressora Delta.	82
Figura 33: Esboço 2: Vista frontal cotada do arranjo definitivo em configuração Delta.....	83
Figura 34: Esboço 2: Vista Superior cotada do chassi, evidenciando o posicionamento das torres e a área útil cilíndrica.	84
Figura 35: Esboço 2: Vista de Corte (Corte AA).	84
Figura 36: Detalhamento técnico executivo das chapas em madeira plástica (MP) para o topo e base estrutural.	86
Figura 37: Detalhamento técnico dimensional do pilar estrutural cilíndrico em MP.	87
Figura 38: Dinâmica de montagem dos <i>mockups</i> aplicada com participantes voluntários...	112
Figura 39: Voluntários montando os <i>mockups</i>	113
Figura 40: Voluntários estão experimentando encaixes e peças durante a montagem.	113
Figura 41: Participantes finalizando a montagem dos <i>mockups</i>	114
Figura 42: Mapas do Estado de São Paulo: destaque para o município de Guaratinguetá. ...	118

LISTA DE SIGLAS

ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRE. Associação Brasileira de Embalagem
ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ABS. Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACV. Análise de Ciclo de Vida
AM. *Additive Manufacturing*
BJ. *Binder Jetting*
CAD. *Computer Aided Design*
CNC. Controle Numérico Computadorizado
DED. *Directed Energy Deposition*
DIY. *Do It Yourself*
DLMS. *Direct Metal Laser Sintering*
DLP. *Digital Light Processing*
DOD. *Drop On Demand*
DSR. *Design Science Research*
EBAM. *Electron Beam Additive Manufacturing*
EBM. *Electron Beam Melting*
FabLab. *Fabrication Laboratory*
FDM. *Fused Deposition Modeling*
FFF. *Fused Filament Fabrication*
FFM. *Fused Filament Fabrication*
HoQ. *House of Quality*
IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IoT. *Internet of Things*
IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LENS. *Laser Engineered Net Shaping*
LOM. *Laminated Object Manufacturing*
MA. Manufatura Aditiva
MEx. *Material extrusion*

MJ. *Material Jetting*

MJF. *Multi Jet Fusion*

MMA. Ministério do Meio Ambiente

MP. Madeira Plástica

MSLA. *Masked Stereolithography*

ODS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU. Organização das Nações Unidas

PBF. *Powder Bed Fusion*

PCD. Diamante policristalino

P&D. Pesquisa e Desenvolvimento

PEAD. Polietileno de Alta Densidade

PEBD. Polietileno de Baixa Densidade

PETG. Polietileno Tereftalato Glicol

PGIRS. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PGRS. Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

PL. *Plastic Lumber*

PLA. Políácido láctico

PLANARES. Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PNRS. Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP. Polipropileno

QFD. *Quality Function Deployment*

RepRap. *REplicating RAPid Prototyper*

RPL. *Recycled Plastic Lumber*

RSU. Resíduos Sólidos Urbanos

SISNAMA. Sistema Nacional do Meio Ambiente

SNVS. Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SL. *Sheet Lamination*

SLA. *Stereolithography*

SLS. *Selective Laser Sintering*

SLM. *Selective Laser Melting*

SIPOC. *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*

STEAM. *Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*

TCC. Trabalho de Conclusão de Curso

TI. Tecnologia da Informação

UC. *Ultrasonic Consolidation*

UV. Ultra-Violeta

VoC. *Voice of Customer*

VP. *Vat Photopolymerization*

WPC. *Wood Polymer Composites*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo Geral	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1 Manufatura Aditiva (MA)	23
<i>3.1.1 Tipos de processos de manufatura na indústria.....</i>	<i>24</i>
<i>3.1.2 As classificações da manufatura aditiva</i>	<i>25</i>
<i>3.1.3 Os materiais da manufatura aditiva.....</i>	<i>26</i>
<i>3.1.4 Vantagens e limitações</i>	<i>28</i>
3.2 A construção de objetos físicos por camadas	28
3.3 O desenvolvimento de impressoras por meio de tecnologia inclusiva	32
<i>3.3.1 Uma impressora 3D alternativa.....</i>	<i>35</i>
<i>3.3.2 Desenvolvimento de Produtos baseado no QFD.....</i>	<i>36</i>
3.4 Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	37
<i>3.4.1 A gestão dos resíduos sólidos e o papel da economia circular.....</i>	<i>38</i>
3.5 A Madeira plástica	40
<i>3.5.1 A usinagem da madeira plástica</i>	<i>41</i>
<i>3.5.2 A rugosidade da madeira plástica.....</i>	<i>43</i>
4 METODOLOGIA.....	44
4.1 O protocolo do <i>Design Science Research</i> (DSR)	45
4.2 A madeira plástica como alternativa de material para fabricação da impressora	49
4.3 O Desdobramento da Função Qualidade (QFD)	53
<i>4.3.1 Importância do levantamento de requisitos</i>	<i>54</i>
<i>4.3.2 Benchmarking com os produtos concorrentes</i>	<i>55</i>
<i>4.3.3 Fixação das metas quantitativas</i>	<i>57</i>
<i>4.3.4 Priorização das metas</i>	<i>58</i>
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1 Projetando o artefato.....	59

5.1.1 Anatomia e Periféricos (O Padrão).....	59
5.1.2 Desenvolvimento dos primeiros esboços.....	61
5.1.3 O desenvolvimento de mockups.....	63
5.2 Benchmarking e análise de similares.....	68
5.2.1 Impressora 3D TINA2	69
5.2.2 Impressora 3D C01e C02.....	70
5.2.3 Impressora DuraPrinter E03	71
5.2.4 Impressora 3D Phrozen Sonic Mini	72
5.2.5 Impressora 3D Tronxy Moore 1 Mini Clay.....	73
5.3 Desenvolvimento do projeto da impressora 3D com estrutura em MP.....	76
5.4 Esboços e detalhamento técnico do artefato	80
5.4.1 Esboço 1: Modelo cartesiano.....	80
5.4.2 Esboço 2: Modelo Delta definitivo.....	81
5.4.3 Detalhamento executivo dos componentes em MP.....	85
5.5 Quantificação dos requisitos do produto (valor-meta)	88
5.6 Dinâmica de cocriação e avaliação conceitual com usuários.....	90
CONCLUSÃO.....	93
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE 1 – PROTOCOLO METODOLÓGICO DA DINÂMICA DE GRUPO FOCAL E COCRIAÇÃO	105
APÊNDICE 2 – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO CONCEITUAL APLICADO AO PAINEL DE ESPECIALISTAS.....	115
APÊNDICE 3 – A FAZENDA DA ESPERANÇA® (GUARATINGUETÁ, SP)	118
ANEXO A – PROJETO DE PESQUISA ENVIADO À COMISSÃO DE ÉTICA.....	120
ANEXO B – PARECER DA COMISSÃO DE ÉTICA EM PESQUISA	125
ANEXO C – COMPROVANTE DE DEPÓSITO DE PEDIDO DE PATENTE JUNTO AO INPI.....	126

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias e sua consequente integração em processos produtivos trouxe uma quarta revolução industrial, em que a tecnologia da informação (TI) deu um novo impulso para a chamada indústria 4.0, aumentando sua eficiência, através da digitalização, da inserção de recursos como a internet das coisas (*Internet of Things* - IoT) e equipamentos *smart*, além de contribuir para a evolução da logística (Santos et al., 2018). Sob a pressão de manter-se relevante e inovadora nesse mercado, muitas empresas têm investido na pesquisa e desenvolvimento (P&D) para criar produtos ou melhorar serviços, com o objetivo de continuarem fortes e competitivos, aliando a vivência das empresas no mercado junto à experiência de seus profissionais (Alves, 2025). No Brasil, é possível observar que há uma relação positiva entre investimentos públicos em P&D e criação de patentes, o que pode indicar a importância obtida na geração de propriedade intelectual através do financiamento em pesquisas para fomentar a inovação (Silva, 2024). Porém, a percepção no contexto da indústria 4.0, para muitos gestores, é de que seria preciso adotar novas técnicas para projeto, com o auxílio de dados e simulações para expor e testar o seu produto em diversos cenários. Como forma de materializar o novo produto para o consumidor, a indústria passou a utilizar, por exemplo, a técnica da manufatura aditiva (MA) também conhecido como impressão 3D (Volpato, 2017).

A MA, se comparada à tradicional, é conhecida por duas características: a complexidade gratuita (oposto ao que acontece nos processos da manufatura subtrativa - como o fresamento, perfuração ou retificação – no qual a complexidade da forma e o volume removido determinam o tempo e o custo da usinagem) e independência do tamanho do lote fabricado (Klahn; Butler; Pei, 2023).

Apesar de ter sido adotada como um processo de fabricação relativamente recente (seu uso ficou mais comum por volta de 2009), a MA teve os primeiros registros de patentes, representados por projetos de impressoras mais primitivas e que já traziam algumas características dos equipamentos atuais, como o depósito de material por camadas, cura por alguma fonte de calor, como a luz UV, mas foram arquivados nos anos 70 e 80 (Kerr, 2022).

Entre as suas vantagens, estão a utilização desse processo como facilitador da automação, uma vez que, quando o operador gerar o objeto digital, a reprodução deste ficará

totalmente a cargo da máquina, que vai imprimir essa forma quantas vezes estiver programada (Oliveira, 2023). E pode reduzir o desperdício de material ao mesmo tempo que permite a produção de peças complexas, pois somente o insumo necessário é utilizado durante a impressão, podendo ser controlado por detalhes como a espessura do filamento que será depositado (Leite et al., 2024).

Ao buscar similares em *e-commerces* no mercado brasileiro ou ao fazer contato direto com lojas especializadas no setor de impressão 3D, pode-se observar que, como indicada na literatura, as predominantes são aquelas que usam polímeros comuns. O políácido láctico (PLA), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o polietileno tereftalato glicol (PETG) são os materiais mais utilizados e as tecnologias da Modelagem a Laser Fundida (*Fused Deposition Modeling - FDM*) e a Sinterização a Laser Seletiva (*Selective Laser Sintering - SLS*) são as preferidas na impressão 3D no Brasil (Netto et al., 2024), apesar de já existirem modelos que usam outros tipos de suprimentos (ingredientes comestíveis processados, metal, gesso etc.).

Considerando a escassez de equipamentos acessíveis para materiais não poliméricos no mercado nacional, esta pesquisa propõe uma impressora 3D para imprimir cerâmica, partindo da premissa de construir e desenvolver um equipamento de baixo custo quanto ao material utilizado, para obtenção de artefatos cerâmicos. A pesquisa está alinhada ao movimento *maker* que, em geral, é definida por uma subcultura contemporânea, representando uma extensão da cultura conhecida como *Do It Yourself* (DIY, ou faça você mesmo) mas embasada no uso de tecnologia para a criação de equipamentos, ferramentas, produtos relacionados às áreas da Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática (*Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics - STEAM*), entre eletrônicos, robótica, impressoras 3D, *softwares* etc. Os adeptos dessa prática costumam se reunir em espaços conhecidos como *FabLabs* ou *hackerspaces*, para compartilhar ideias, aprendizados ou apenas, pela experiência de criar esses equipamentos juntos. Alinhado a essa cultura, o equipamento proposto neste estudo foi concebido sob a filosofia de código aberto (*open-source*), priorizando o uso de arquiteturas de hardware acessíveis e softwares livres, de modo a viabilizar a reprodutibilidade tecnológica futura, resguardados os trâmites vigentes de proteção à propriedade intelectual.

O projeto utiliza do conceito inglês chamado “*RepRap*” (*REplication RAPid Prototyper*, em tradução livre, protótipo rápido auto-replicante), surgido em 2005, na Universidade de Bath. O idealizador do projeto *RepRap*, Adrian Bowyer, publicou um manifesto que delineou as ramificações econômicas e políticas como justificativas para o lançamento de uma impressora que pode ser fabricada em todo lugar e que é autorreplicante,

ou seja, o equipamento tem a capacidade de imprimir peças que possibilitam criar uma cópia de si mesma (Söderberg, 2025). A construção de impressoras 3D de baixo custo material e de código aberto, proposto por Bowyer continua em desenvolvimento, uma vez que é compartilhada com a comunidade de entusiastas, de forma a tornar popular o movimento *maker* e democratizar o acesso às novas tecnologias de uso livre (Tabarés Gutiérrez, 2018).

A abordagem pela sustentabilidade no projeto tem origem na preocupação em mitigar problemas da degradação do meio ambiente pela alta concentração de resíduos sólidos, principalmente. Bauman (1999) comparou a sociedade atual à sociedade do consumo, em que a redução do tempo e menor retenção de atenção e o esquecimento espelham uma necessidade de satisfação maior que a sua necessidade efetiva, assim como a durabilidade do objeto de desejo deixa de ser uma exigência. O excesso de materiais descartados pelos consumidores em geral no meio ambiente é uma preocupação global.

O material selecionado para desenvolver a estrutura da impressora é a Madeira Plástica (MP), conhecida também como *Plastic Lumber (PL)*, fabricado com 100% de polímero novo ainda não reciclado ou a partir do plástico reciclado, não contendo madeira em sua composição (Müzel, 2017). Embora não seja uma solução definitiva para a crise global de poluição a MP destaca-se pela viabilidade financeira, já que são usados refugos de produção industrial em sua fabricação, gerando alto potencial de valor agregado e percepção de robustez, transformando o que seria resíduo em um componente técnico de engenharia. Para o desenvolvimento da impressora, por exemplo, foram usadas amostras cedidas pelo projeto social da Fazenda da Esperança®, mantido por uma instituição no interior do estado de São Paulo – SP, Brasil, unindo a inovação tecnológica ao impacto social local.

Essa abordagem reflete a finalidade do estudo proposto pela autora, aluna da Coordenação Geral de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa do Centro Paula Souza (CGPEP-CEETEPS). Inserido na linha de pesquisa 3, "Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade", no grupo de pesquisa "Gestão da Inovação Tecnológica", o trabalho propõe uma reflexão multidisciplinar sobre o desenvolvimento de produtos sustentáveis nos âmbitos econômico, ambiental e social. Tal proposta está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, sendo estes o: 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) que convergem na busca por impactos positivos para a sociedade e a indústria.

Questão de pesquisa

É conveniente utilizar a MP como principal material estrutural para a fabricação de uma impressora 3D voltada à obtenção de artefatos cerâmicos?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Propor o projeto de uma impressora 3D para obtenção de artefatos em cerâmica, utilizando a MP como material estrutural, fundamentado na percepção do usuário por meio da ferramenta “*Quality Function Deployment*” (QFD).

2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) **Investigar requisitos de projeto e similares:** Analisar modelos de impressoras 3D comerciais compatíveis com a impressão de cerâmica e mapear as necessidades dos usuários por meio da ferramenta *Quality Function Deployment* (QFD);
- 2) **Desenvolver o *design* estrutural:** Projetar e modelar a estrutura-base do equipamento utilizando a MP como material sustentável, contemplando o detalhamento técnico de duas arquiteturas distintas: Cartesiana e Delta;
- 3) **Avaliar a percepção do usuário (usabilidade):** Desenvolver *mockups* físicos de estudo para validação sensorial, ergonômica e de montagem da estrutura proposta, por meio de dinâmicas de Grupo Focal com públicos leigos e técnicos;
- 4) **Documentar e registrar o produto:** Gerar a documentação técnica necessária para o depósito de registro de Modelo de Utilidade (MU) junto ao INPI e estruturar as diretrizes de viabilidade para reprodutibilidade tecnológica futura do projeto.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

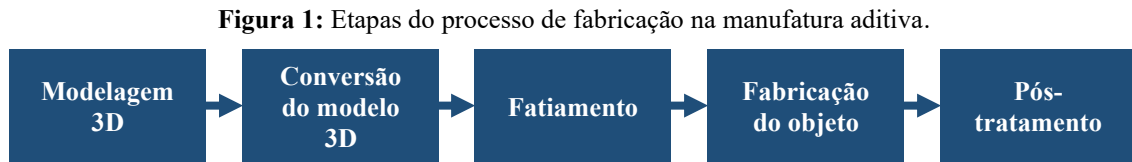
Sendo um tema de abordagem interdisciplinar e abrangente, as fontes de referência para a revisão narrativa da literatura deste trabalho são diversas. O arcabouço teórico é composto por pesquisas de institutos que representam a indústria - Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Abiplast) e Associação Brasileira de Embalagem (Abre); Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (Abrema), consulta à legislação federal vigente (Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS) e às diretrizes do Ministério do Meio Ambiente (MMA) por meio do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). Adicionalmente, foram consolidados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Ibge) e do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), além de publicações científicas indexadas nas bases da SciELO, Capes, Scopus, WoS e Google Scholar; livros de *design*, projeto de produto, gestão, tecnologia e teses acadêmicas de referência.

A fundamentação teórica foi estruturada a partir de eixos temáticos principais: a Manufatura Aditiva (MA), a contextualização histórica de conceitos e processos de criação que evoluíram até o surgimento recente da impressora 3D; a relação do projeto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a preocupação ambiental; a MP como material alternativo e características de usinagem; o desenvolvimento de impressoras por meio de tecnologia inclusiva baseado nos conceitos de código aberto (*open source*), no movimento RepRap e, por fim, a aplicação do método QFD.

3.1 Manufatura Aditiva (MA)

A Manufatura Aditiva (MA), popularmente denominada impressão 3D, consolida-se como uma tecnologia promissora por sua capacidade de proporcionar vantagens competitivas por meio da construção física de objetos via deposição sucessiva de camadas de material (Sheremetieff Jr.; Gonçalves, 2020; Stavropoulos, 2023). Trata-se de uma cadeia integrada que transcende o *hardware*, englobando desde a modelagem digital em sistemas CAD até etapas de pós-processamento e ensaios de certificação (Pei; Kabir; Leutenecker-Twelsiek, 2023). O fluxo fundamental desse processo, que converte o modelo virtual em instruções de código G para a

construção e acabamento do objeto, é sintetizado por Araújo, Clementino e Torres (2023) conforme ilustrado na Figura 1:

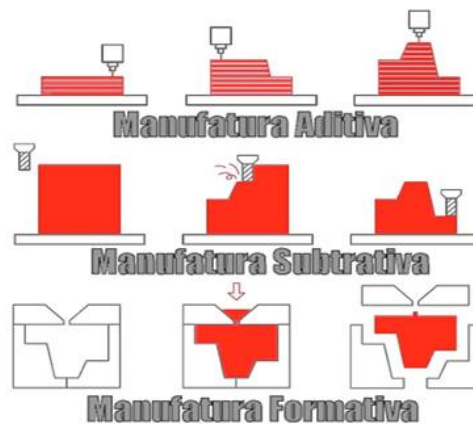


Fonte: Adaptado de Araújo, Clementino e Torres, 2023.

3.1.1 Tipos de processos de manufatura na indústria

No cenário da fabricação industrial, os processos tradicionais baseiam-se na moldagem e conformação da matéria-prima (Volpato; Carvalho, 2017). Conceitualmente, há três tipos de abordagens principais para a construção de objetos físicos (Wiltgen; Lopes, 2022), caracterizadas na Figura 2 e descritas a seguir:

Figura 2: Diferença de tipos de manufatura.



Fonte: Wiltgen e Lopes, 2022.

- **Manufatura Aditiva:** a partir da interpretação de um modelo digital em CAD por um equipamento de impressão, o material é depositado em camadas sucessivas utilizando a coordenada combinada dos eixos X, Y e Z;

- **Manufatura Subtrativa:** a peça é obtida pela remoção controlada de material de um bloco maciço, utilizando métodos tradicionais como a usinagem, fresagem ou torneamento;

- **Manufatura Formativa:** as peças são moldadas por meio da injeção de material líquido ou semilíquido em molde mecânico predefinido, sendo uma abordagem amplamente utilizada em larga escala devido ao baixo custo unitário em alta produção.

Sob a perspectiva econômica, a viabilidade da MA atrela-se à articulação de um ecossistema de parceiros que equilibre a relação custo-benefício, sobretudo quanto ao tempo de construção e baixo investimento em ferramentais físicos rígidos, tornando a produção de lotes pequenos e customizados altamente competitiva (Klahn; Butler; Pei, 2023).

Para o desenvolvimento de máquinas de pequeno porte, a seleção dos componentes de movimentação e automação é crítica para garantir a repetibilidade do processo (Volpato; Carvalho, 2017). No escopo deste projeto, optou-se pela consolidação de atuadores eletromecânicos, baseados em motores de passo padrão NEMA 17, associados a sistemas de eixos guiados por fusos ou correias dentadas. Essa configuração coordena o deslocamento preciso do cabeçote extrusor, assegurando um fluxo contínuo e livre de oscilações para sistemas de deposição de materiais pastosos e cerâmicos por *robocasting*.

3.1.2 As classificações da manufatura aditiva

Diferente das suas origens, marcadas por restrições de custo e alta complexidade, a manufatura aditiva (MA) contemporânea destaca-se por ser intuitiva e acessível (Kerr, 2022). E, em cenários específicos, projetos viabilizam-se pela rapidez produtiva e pelo suporte de comunidades globais voltadas ao compartilhamento de tecnologias abertas (*open source*), onde entusiastas e pesquisadores cooperam livremente (Kerr, 2022, p. 46). Embora existam cerca de 18 variações tecnológicas, os processos são comumente classificados pela forma inicial de sua matéria-prima (Sheremetieff Jr.; Gonçalves, 2020) ou organizados em 7 categorias principais pelo tipo de processo (Kerr, 2022, p. 4-5), sintetizadas no Quadro 1, junto aos seus principais materiais correlatos:

Quadro 1: Principais categorias da manufatura aditiva (MA).

Categorias	Tipo de tecnologia e nomes comerciais	Principais materiais usados
Material extrusado (<i>Material extrusion - MEx</i>)	- Modelagem por deposição fundida (<i>Fused Deposition Modeling - FDM</i>), fabricação por filamento fundido	Material termoplástico derretido, polpa de madeira, partículas de metal e até chocolate
Fotopolimerização em cuba (<i>Vat Photopolymerization - VP</i>)	- Estereolitografia (<i>Stereolithography - SLA</i>) - Estereolitografia mascarada (<i>Masked Stereolithography - MSLA</i>) - Processamento digital de luz (<i>Digital Light Processing - DLP</i>)	Resina fotopolimérica líquida, polímeros, cerâmica
Fusão por deposição de materiais (<i>Powder Bed Fusion - PBF</i>)	- Sinterização seletiva a laser (<i>Selective Laser Sintering - SLS</i>) e Sinterização direta de metal a laser (<i>Direct Metal Laser Sintering - DMLS</i>) - Fusão por Feixe de Elétrons (<i>Electron Beam Melting - EBM</i>) e Fusão Multijato (<i>Multi Jet Fusion - MJF</i>) - Impressão à base de gesso	Pequenas partículas de material em pó (plástico de nylon, metais, compósitos, cerâmica ou vidro) são fundidas pelo calor do laser
Jateamento de material (<i>Material Jetting - MJ</i>)	- Gota sob demanda (<i>Drop On Demand - DOD</i>) - Modelagem multijato, jato de aerossol	Polímeros, cera, cerâmicas, metal, resina líquida borrifada, necessita de luz ultravioleta para curar.
Jateamento de aglutinante (<i>Binder Jetting - BJ</i>)	- Jateamento por ligante de areia, de metal e de plástico (<i>Sand, Metal and Plastic Binder Jetting</i>)	Metais (alumínio, cobalto, titânio), cerâmicas (sílica, alumina), areia, compósitos, polímeros
Deposição direta de energia (<i>Directed Energy Deposition - DED</i>)	- Fabricação Aditiva por Feixe de Elétrons (<i>Electron Beam Additive Manufacturing - EBAM</i>) - Spray a Frio (<i>Cold Spray</i>) - Moldagem por Rede Gravada a Laser (<i>Laser Engineered Net Shaping - LENS</i>)	Metais e ligas de alto desempenho
Laminação de chapas (<i>Sheet Lamination - SL</i>)	- Fabricação de Objetos Laminados (<i>Laminated Object Manufacturing - LOM</i>) - Consolidação Ultrassônica (<i>Ultrasonic Consolidation - UC</i>).	Camadas de papel revestido com adesivo, plástico ou laminados metálicos

Fonte: Adaptado de Bueno do Amaral, 2019; Kerr, 2022; Stavropoulos, 2023.

3.1.3 Os materiais da manufatura aditiva

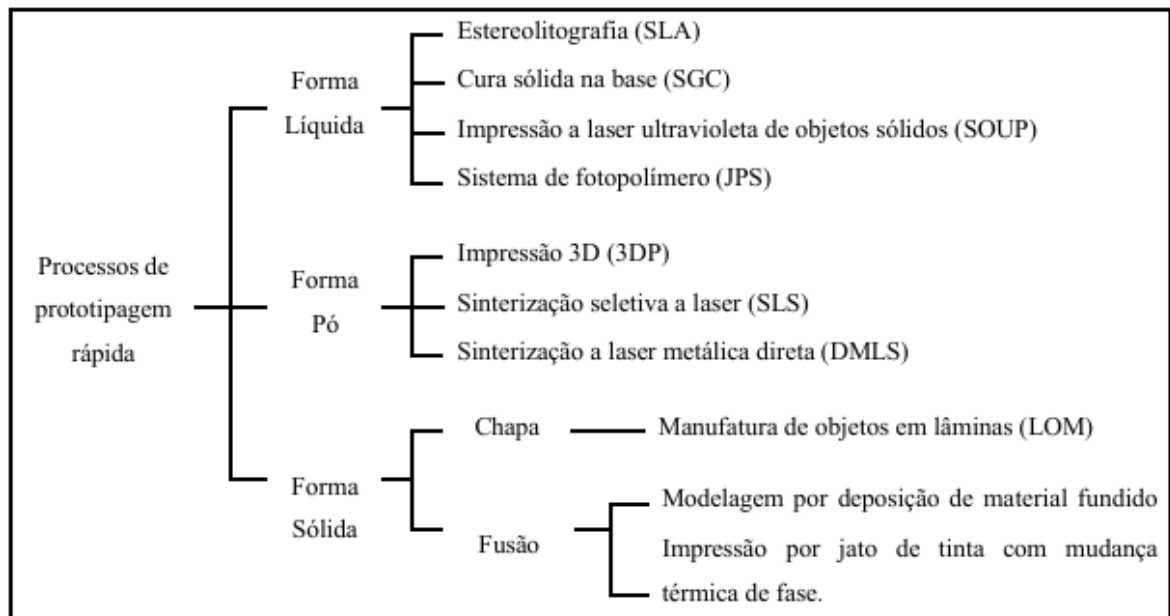
A evolução da MA reflete-se na substituição de métodos convencionais pela criação de protótipos e componentes funcionais com propriedades similares às do objeto final (Wiltgen; Lopes, 2023). Destacam-se os avanços na produção de compósitos poliméricos leves e de baixo custo, caracterizados pela integração sinérgica entre matrizes (termoplásticas ou termofixas) e fibras de reforço, cuja combinação define as propriedades finais do material (Gupta et al., 2023). A classificação dessas matrizes estruturais é sintetizada no Quadro 2:

Quadro 2: Matriz de classificação de compósitos baseados em materiais.

Matriz de classificação de materiais		
Polímeros	Metais	Cerâmicas
- Termofixos (epóxi, poliéster) - Termoplásticos (policarbonato, PLA, nylon)	Alumínio, magnésio, titânio	Zircônia, alumina, carboneto de silício

Fonte: Adaptado de Gupta et al., 2023.

Sob a perspectiva da natureza física da matéria-prima, os processos de MA podem ser categorizados por seu estado inicial (líquido, pó ou sólido), conforme estabelece a norma NBR ISO/ASTM 52900:2018 (ISO/ASTM, 2018 *apud* Sheremetieff Jr.; Gonçalves, 2020). Essa classificação correlaciona os processos de prototipagem à forma física fundamental do material (Sheremetieff Jr.; Gonçalves, 2020), conforme estruturado na Figura 3:

Figura 3: Classificação dos processos de prototipagem de acordo com estado ou forma da matéria-prima.

Fonte: Sheremetieff Jr. e Gonçalves, 2020.

Na prototipagem de componentes cerâmicos precisos, a incorporação de matérias-primas secundárias (como cal ou talco) e reforços estruturais visa otimizar as produções mecânicas e a qualidade final do artefato. Contudo, em processos baseados no leito em pó (*Powder Bed Fusion*, PBF), o manuseio desses materiais exige cuidados operacionais devido aos riscos de exposição dérmica e inalação de particulados (Hasanov et al., 2023).

3.1.4 Vantagens e limitações

A consolidação da MA na literatura permite mapear de forma abrangente as principais vantagens operacionais e limitações técnicas que balizam a tecnologia, independentemente do material aplicado (Volpato; Carvalho, 2017), conforme sintetizado no Quadro 3:

Quadro 3: Vantagens e limitações no uso da manufatura aditiva.

Vantagens	Limitações
• Liberdade geométrica na fabricação, independente da complexidade da peça. • Menor desperdício de material e uso eficiente da energia. • Desnecessário trocar ferramentas durante o processo de fabricação, que é realizado em um único equipamento. • Rapidez para obter baixa quantidade de componentes em relação a outros processos, o que facilita a obtenção de protótipos físicos, ainda que sejam complexos. • Alguns tipos de processos possibilitam misturar materiais durante o processamento, alterando a gradação funcional e variação das propriedades.	• Os autores alertam para o fato de que nem sempre as propriedades dos materiais da MA são iguais aos convencionais, justamente por serem produzidos pela sobreposição de camadas. • A precisão e acabamento das peças são inferiores aos de produtos produzidos de forma convencional. • Há limitações de materiais disponíveis por tecnologia empregada. • O custo para impressão de peças em nível industrial é elevado.

Fonte: Volpato e Carvalho, 2017.

Em suma, os dados indicam que a MA atua como uma tecnologia estratégica para o desenvolvimento ágil de produtos. Suas limitações inerentes, como restrições de acabamento superficial e custo de equipamentos de grande porte, impulsionam a pesquisa a buscar por soluções customizadas e pelo uso de materiais alternativos que otimizem a relação custo-benefício do ecossistema de projeto.

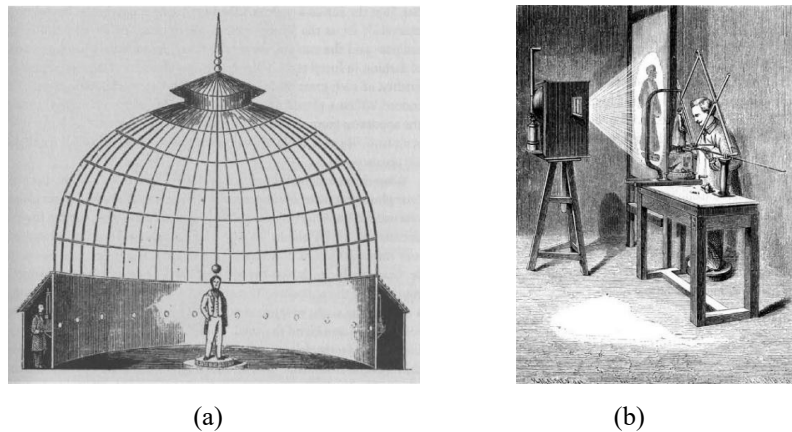
3.2 A construção de objetos físicos por camadas

Embora a manufatura aditiva (MA) pareça um conceito estritamente moderno e digital, a construção de objetos por sobreposição sucessiva de materiais remonta a princípios históricos milenares. Essa volumetria tridimensional por camadas assemelha-se a fenômenos naturais – como a deposição eólica de sedimentos e rochas estratificadas – e manifesta-se desde a arquitetura da Antiguidade até técnicas artesanais tradicionais. É o caso do “acordelado”,

método desenvolvido por povos originários e ainda aplicado no Vale do Jequitinhonha (MG), para a confecção de cerâmica utilitária e decorativa. Nessa técnica, rolos de argila são moldados manualmente e sobrepostos; à medida que a estrutura cresce, as paredes são alisadas com água, para garantir a união, a coesão e a uniformidade entre as camadas (Almada; Quites, 2025).

Por sua vez, a transição desse conceito para o ambiente industrial correlaciona-se com o desenvolvimento histórico de duas técnicas oitocentistas: a fotoescultura e a topografia. Idealizada pelo francês François Willème na década de 1860 para gerar réplicas tridimensionais fiéis, a fotoescultura baseava-se em um arranjo circular de 24 câmeras fotográficas que capturavam o objeto ou indivíduo em 360°. As imagens serviam como guias de referência para que o escultor trabalhasse individualmente em cada uma das 24 seções do material, resultando em uma cópia precisa (Garay et al., 2024). Esse fluxo operacional e o princípio do fatiamento empregado na fabricação do artefato são ilustrados nas Figuras 4 e 5:

Figura 4: Fotoescultura de Gautier: (a) objeto e câmeras; (b) escultor e obra.



Fonte: Gautier, 1864.

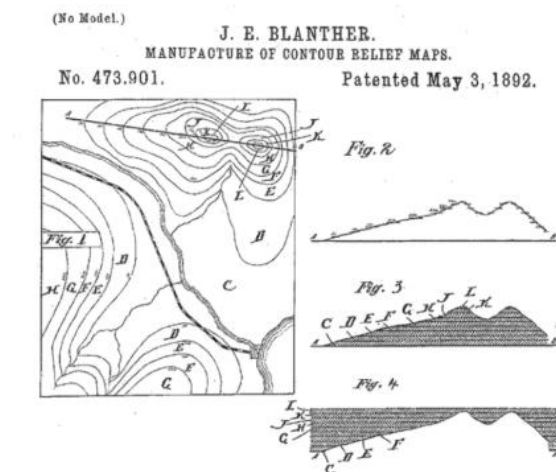
Figura 5: Retrato de cabeça de mulher, de François Willème (1865): trabalhada em cortes.



Fonte: On this date in photography, 2017.

A topografia, constitui outro marco metodológico relevante, destacado por J. E. Blather por volta de 1890 para a construção de mapas em relevos (Volpato; Carvalho, 2017). A técnica consistia na moldagem de mapas em camadas concêntricas dispostas em formato de cascata, utilizando discos de cera que reproduziam as curvas de nível cartográficas. Esse processo conferia tridimensionalidade física a representações originalmente planas, conforme ilustrado na Figura 6:

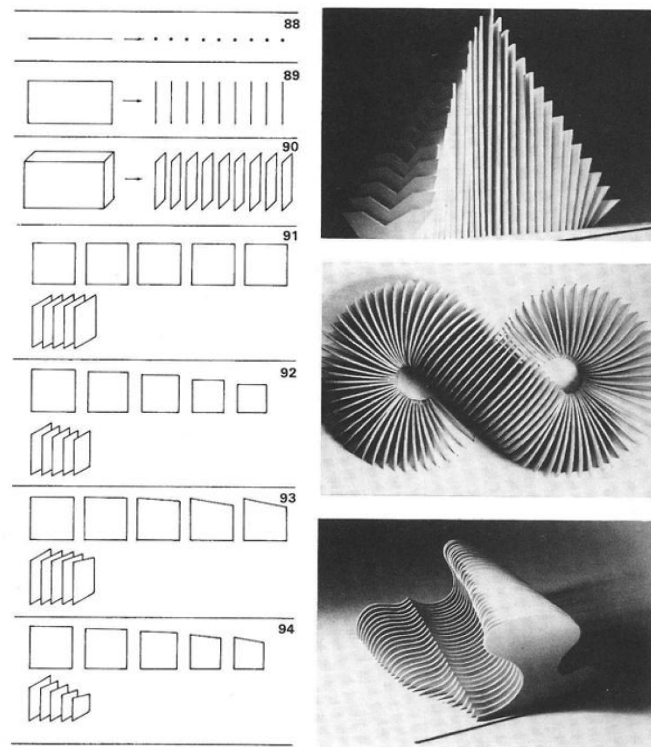
Figura 6: Ilustração do método de Blather para a construção de mapas topográficos.



Fonte: Volpato e Carvalho, 2017.

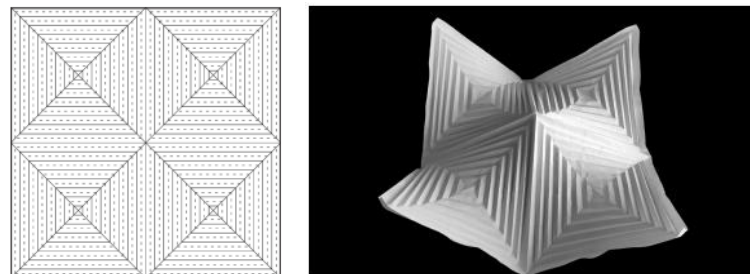
Ao longo dos anos, o campo do *design* incorporou outros métodos de representação tridimensional em camadas. Uma das abordagens célebres, fundamentada nos estudos de Wucius Wong, é o plano seriado (Wong, 1991). Essa técnica emprega materiais em folhas ou lâminas dispostas a intervalos regulares para construir volumes a partir de figuras planas que repetem o mesmo contorno ou variam sutilmente de escala (Figura 7). Explorando a plasticidade e a flexibilidade de materiais bidimensionais, dobras e cortes conferem volume e identidade espacial a superfícies planas (Kong, 2022), como exemplificado na Figura 8. Esses conceitos criativos e experimentais transcendem o exercício estético, alinhando-se ao princípio de inspiração do *Design Thinking* definido por Tim Brown como a busca por soluções que motivam a resolução de problemas complexos (Brown, 2018). Desse modo, a prototipagem por impressão 3D beneficia-se diretamente ao absorver referência da plasticidade artística e do fatiamento geométrico para o refinamento da modelagem digital.

Figura 7: Exemplo de desenho de construção do plano seriado e estruturas.



Fonte: Wong, 1991.

Figura 8: Um exercício proposto por Kong e a aplicação das dobras em folha de papel.



Fonte: Kong, 2022.

A expansão comercial e a popularidade global da MA consolidaram-se no final dos anos 2000, impulsionadas sobretudo pela expiração das patentes pioneiras de modelagem por deposição fundida (Kerr, 2022). Historicamente, os sistemas automatizados de prototipagem rápida evoluíram a partir do trabalho pioneiro de Hideo Kodama em 1981, que propôs o uso de fotopolímeros endurecidos por luz UV para converter modelos digitais tridimensionais em camadas físicas (Araújo; Clementino; Torres, 2024; Boleslavsky et al., 2025). Contudo, a consolidação industrial da técnica de estereolitografia (SLA) é creditada a Charles W. Hull, que

patenteou o processo em 1984 e o introduziu no mercado em 1987 (Pei; Kabir; Leutenecker-Twelsiek, 2023).

No cenário brasileiro contemporâneo, os processos baseados em *Fused Deposition Modeling* (FDM) predominam devido ao custo acessível e à ampla disponibilidade de insumos e equipamentos no mercado nacional. Diante dessa democratização técnica, a MA passou a viabilizar a manufatura distribuída de geometrias complexas em ambientes educacionais e de inclusão social - como o desenvolvimento de recursos cognitivos e táteis para deficientes visuais (Netto et al., 2024). Para além da precisão dimensional, recursos avançados de computação gráfica, como o *displacement map* (ou mapa de deslocamento), são integrados à modelagem digital para simular e texturizar superfícies complexas diretamente nas peças impressas (Monteiro; Garcia, 2022).

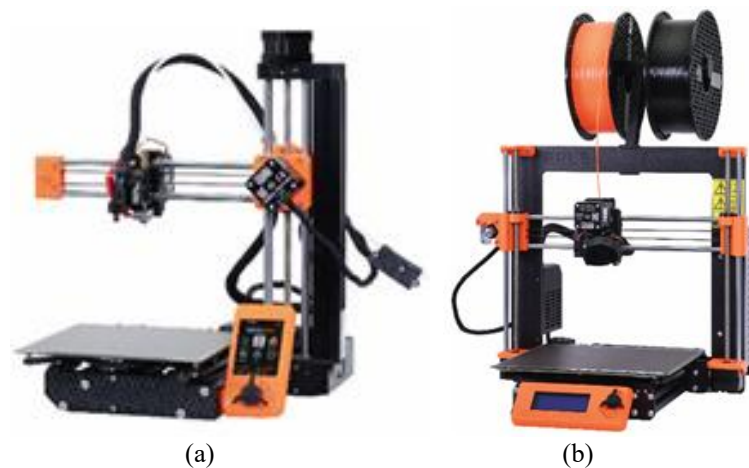
3.3 O desenvolvimento de impressoras por meio de tecnologia inclusiva

O avanço da manufatura aditiva atrela-se diretamente à consolidação do movimento *maker*. Historicamente associada à cultura *hacking*, essa vertente fomenta um paradigma fabril baseado no compartilhamento coletivo e na distribuição democrática do conhecimento e de ferramentas de prototipagem (Söderberg; Maxigas, 2022). O movimento confere uma perspectiva crítica sobre os modos de produção e consumo, permitindo que indivíduos consertem, adaptem ou autoconstruam objetos cotidianos independentemente de filiação industrial (Artico; Artico, 2021; Fanio González; Jiménez Martínez; De La Torre Cantero, 2024). Essa cultura é viabilizada por comunidades físicas e fóruns digitais estruturados para o intercâmbio de técnicas, mapeamento de fornecedores e desenvolvimento incremental de projetos baseados nos conceitos de *open innovation* e *open source* (Hatch, 2014).

Sob essa égide colaborativa, o interesse público e acadêmico impulsionou a concepção de impressoras 3D de código aberto voltadas para o ambiente doméstico (*desktop*), com destaque para o projeto RepRap (Söderberg; Maxigas, 2022). A viabilidade de autorreplicação e multiplicação dessas máquinas em larga escala encontra eco na filosofia de Walter Benjamin (2019) sobre o potencial da reprodutibilidade técnica em aproximar o objeto da realidade particular dos indivíduos, atualizando sua função social. Idealizado em 2005 pelo pesquisador Adrian Bowyer na Universidade de Bath, na Inglaterra, o projeto ganhou força após a expiração da patente de modelagem por deposição fundida (FDM), rebatizando o processo de deposição

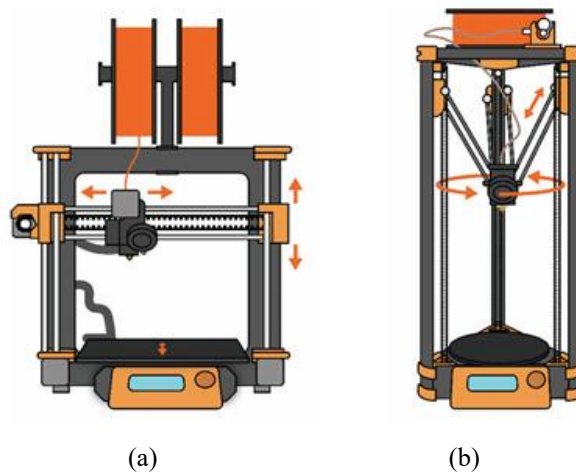
de filamento termoplástico como *Fused Filament Fabrication* (FFF) para contornar restrições na criação de uma máquina autorreplicante capaz de fabricar, sob licenças abertas, seus próprios componentes estruturais. Modelos clássicos comerciais e de código aberto, como a Prusa MINI+ e a Prusa i3 MK3S+ (Figura 9) exemplificam essa evolução, dividida predominantemente entre as arquiteturas de movimentação Cartesiana e Delta (Figura 10):

Figura 9: Impressoras 3D: sistema Cartesiano (a) vista em perfil; e (b) vista frontal.



Fonte: Kerr, 2022.

Figura 10: Sistemas de movimentação em impressoras 3D: (a) Cartesiano; e (b) Delta.



Fonte: Kerr, 2022.

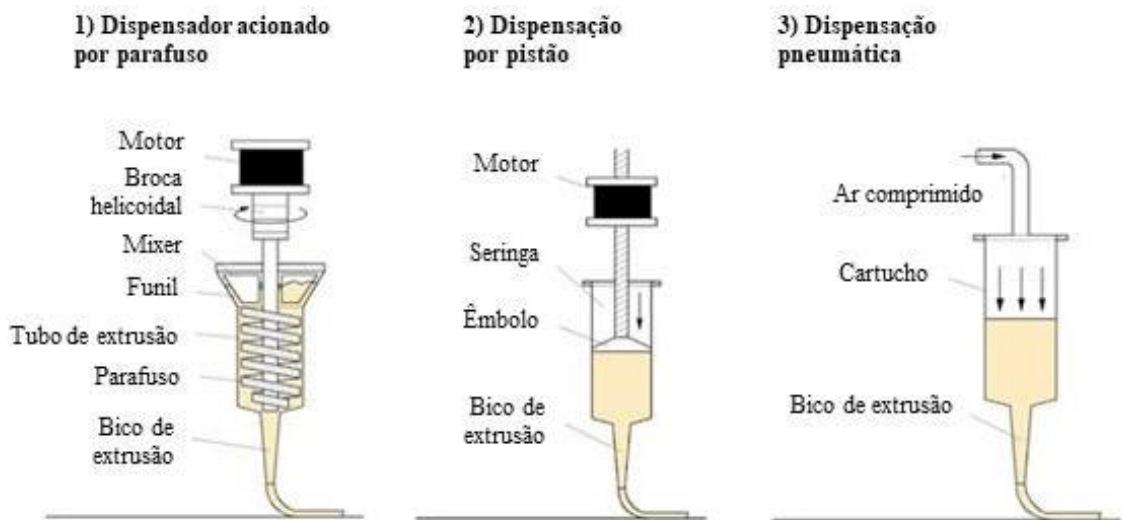
No panorama brasileiro, os FabLabs (laboratórios de fabricação digital) e oficinas criativas comunitárias cumprem a função social de democratizar ferramentas de ponta, como impressoras 3D, cortadoras a laser e fresadoras CNC. Nesses ambientes, indivíduos recebem capacitação técnica para o desenvolvimento de competências manufatureiras, incluindo práticas de economia circular por meio da reciclagem de polímeros (Filho et al., 2023).

Contudo, a maioria dos equipamentos *open source* comerciais disponíveis nesses espaços e no mercado é projetada exclusivamente para o processamento de polímeros termoplásticos. Diante disso, um dos principais desafios técnicos deste projeto residiu no desenvolvimento de um sistema de extrusão voltado para material cerâmico.

No âmbito da MA, a deposição controlada de pastas cerâmicas ou géis viscosos (como argila e formulações híbridas) é viabilizada pela técnica de *robocasting*, também denominada *direct ink writing* (DIW). O processo baseia-se na extrusão do material camada por camada para construir geometrias estáveis que, após a secagem, passam por queima e sinterização para obtenção de suas propriedades mecânicas finais (González, 2025). Em comparação aos métodos convencionais, o *robocasting* destaca-se pelo custo acessível, compatibilidade com sistemas de código aberto e versatilidade na manipulação de compósitos e suspensões metálicas (Lamnini et al., 2022) e até insumos da indústria alimentícia (Mudau; Adebo, 2024).

A Figura 11 ilustra os três métodos de dispensação mecânica baseados em extrusão direta de pastas: o sistema acionado por parafuso helicoidal, o sistema por pistão e o mecanismo de dispensação pneumática, que requer o uso de um compressor de ar:

Figura 11: Representação gráfica do *robocasting*.



Fonte: Adaptado de Guo, Zhang e Bhandari, 2019 *apud* Lamnini et al., 2022, p. 2.

O princípio operacional desses dispositivos, compartilha de um estágio inicial comum, governado pelo deslocamento controlado do insumo dentro do cartucho por meio de motores de passo acoplados ao cabeçote (Mudau; Adebo, 2024). Contudo, os vetores de força mecânica diferem conforme a tipologia adotada:

1) **Dispensador por parafuso:** a rotação de uma broca helicoidal interna força o material continuamente em direção ao bocal, configuração ideal para manter o fluxo homogêneo de massas viscosas (Mudau; Adebo, 2024);

2) **Dispensação por pistão:** um êmbolo exerce pressão mecânica direta sobre a coluna de material para ejetá-lo. Apresenta, contudo, menor recomendação técnica para fluídos com alta resistência ao cisalhamento, devido ao risco de travamento do sistema (Diao et al., 2024);

3) **Dispensação pneumática:** a pressão do ar comprimido no topo do cartucho empurra o insumo uniformemente em direção à ponta de extrusão (Mudau; Adebo, 2024), sendo uma solução altamente eficaz e indicada para fluidos de menor viscosidade (Diao et al., 2024).

3.3.1 Uma impressora 3D alternativa

O desenvolvimento de uma impressora 3D portátil e de baixo custo para MA de cerâmica possui o potencial de consolidar um ecossistema tecnológico inovador e acessível. No cenário brasileiro, observa-se uma escassez de modelos comerciais nacionais que utilizem a argila orgânica como insumo, restando opções importadas com valores proibitivos para o consumidor comum (Bueno do Amaral, 2019; Silva; Gnoato, 2017). Diante dessa lacuna de mercado, práticas como *benchmarking* e engenharia reversa operam como abordagens metodológicas essenciais para mapear tecnologias de referência e decodificar requisitos de estrutura, função e operação (Araújo et al., 2021; Lopes et al., 2024), cujos desdobramentos práticos são detalhados no Capítulo 4.

A concepção deste protótipo, baseado em materiais de fácil aquisição que permitam a replicabilidade por outros usuários, configura uma oportunidade real de democratização tecnológica (Tabarés Gutiérrez, 2018). Sob essa óptica, a incorporação da madeira plástica (MP) no chassi estrutural da máquina confere ao projeto um impacto ambiental positivo. Por ser manufaturada a partir de resíduos e aparas de polímeros industriais, a MP estende o ciclo de vida do plástico, contrapondo-se ao modelo linear tradicional de descarte e inserindo-se na lógica da economia circular (Silva et al., 2021).

Adicionalmente, razões de ordem estética, mecânica e de usinagem justificam a escolha da MP em substituição à madeira tratada convencional. O composto polimérico dispensa revestimentos protetivos superficiais, possui alta durabilidade e é isento de nós ou rachaduras internas (Schwarzkopf; Burnard, 2016). Essa seleção alinha-se aos preceitos do *design*

sustentável e do ecodesign, cuja filosofia orienta-se pela especificação de materiais recicláveis para mitigar impactos ecológicos e gerar externalidade positivas ao longo do ciclo de vida do artefato (Kishita et al., 2021; Ueda, 2021).

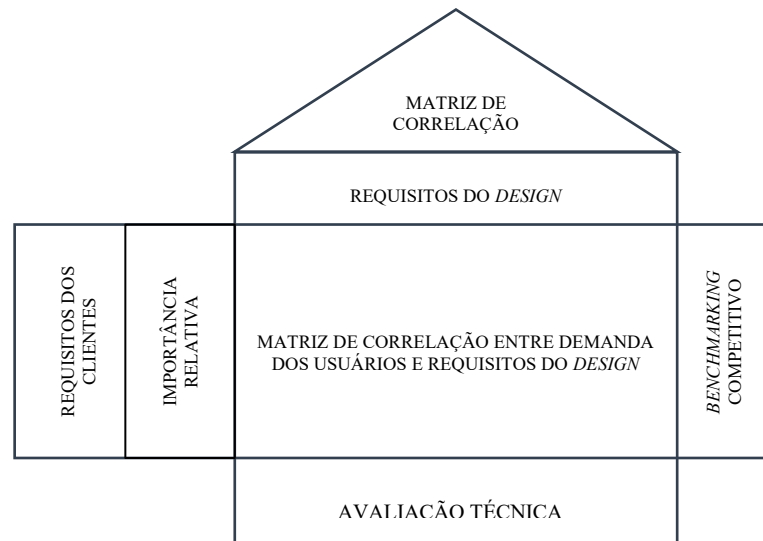
3.3.2 Desenvolvimento de Produtos baseado no QFD

O Desdobramento da Função Qualidade (do inglês *Quality Function Deployment* - QFD) é uma metodologia direcionada a compreender e traduzir as expectativas dos consumidores em requisitos de qualidade (Abreu, 1997). O método converte as demandas dos usuários em especificações técnicas de *design*, otimizando a identificação e a alocação de recursos desde a concepção global até os componentes individuais do projeto (Akao, 1997; Chixaro; Drozda; Silva, 2024). Atuando como uma ferramenta estratégica de planejamento, o QFD estabelece relações matemáticas e conceituais entre as expectativas do usuário e os parâmetros de engenharia por meio de análises qualitativas e quantitativas (Fang et al., 2023).

O levantamento preliminar dessas informações é coletado por meio de técnicas de interação social – como observação direta, entrevistas estruturadas e grupos focais –, cujos dados são tratados e classificados para gerar o inventário denominado “requisitos dos clientes” (Abreu et al., 2010). Para validar tais requisitos e mitigar erros antes da produção final, a construção de modelos e protótipos físicos ou virtuais opera como suporte fundamental para que a equipe de projeto itere soluções rapidamente (Ideo, 2011).

O principal componente operacional do método é a matriz denominada Casa da Qualidade (*House of Quality* - HoQ), cujo modelo estrutural básico está representado Figura 12. Essa matriz aproxima o desenvolvimento técnico da experiência prática do usuário, baseando-se na premissa de “ouvir o cliente” para identificar quais atributos demandam maior funcionalidade. Tradicionalmente, a HoQ é composta por sete elementos fundamentais: os requisitos dos clientes; a importância relativa de cada requisitos; os requisitos técnicos (atributos de *design*), a matriz de inter-relação; o *benchmarking* competitivo; a matriz de correlação interna; e a avaliação técnica final (Ishak et al., 2020; Coelho, 2024). Em virtude de sua robustez, o QFD é amplamente aplicado na Engenharia e em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) como uma técnica de interpretação rigorosa para a engenharia de requisitos (Sarquis; Ikeda, 2012).

Figura 12: Modelo da Casa da Qualidade para análise de requisitos.



Fonte: Adaptado de Coelho, 2024.

3.4 Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A prerrogativa do desenvolvimento sustentável consolida-se quando ocorre a inclusão social e o atendimento de necessidades fundamentais, integrando os aparatos tecnológicos ao comportamento e à cultura humana (Balder; Hagedorn; Stark, 2023). Como compromisso global firmado por Estados-membros da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 buscam articular os aspectos econômicos, sociais e ambientais para mitigar a degradação do planeta (Cobo; Gomes; Walsh, 2025). O presente projeto de pesquisa apresenta estrita aderência a esse ecossistema, alinhando-se primordialmente a 3 objetivos centrais:

- **ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura):** a pesquisa incentiva premissas de economia circular ao reutilizar polímeros reciclados (madeira plástica) no chassi do equipamento, mitigando a demanda por matéria-prima de primeiro uso e reduz a emissão de poluentes industriais. (Ipea, 2024);

- **ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis):** a reincorporação de passivos e aparas poliméricas descartadas por atividades fabris no ciclo produtivo da impressora *desktop* auxilia no gerenciamento de resíduos urbanos, convergindo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS);

- **ODS 12 (Consumo e produção responsáveis):** o reuso de materiais fomenta o consumo responsável de recursos e estimula a produção socialmente responsável, articulando-se diretamente com o projeto de inclusão mantido na Fazenda da Esperança[®], em Guaratinguetá (conforme detalhado no Apêndice 2).

Embora a pesquisa tome como base as diretrizes globais da ONU, o debate contemporâneo latino-americano aponta a necessidade de metas específicas que contemplem vulnerabilidades regionais. Diante disso, o Brasil propôs a incorporação de três novos objetivos setoriais à Agenda 2030, sob a articulação de Grupos de Trabalho da Sociedade Civil e investigações conjuntas entre a Universidade Estadual Paulista (Unesp) e a Universidade de Brasília (UnB).

O primeiro deles, de iniciativa diplomática brasileira, constitui o ODS 18 — Igualdade Étnico-Racial. Os dois subsequentes, propostos pelo "Guia Agenda 2030" (Cabral; Galvão, 2024), compreendem o ODS 19 — Arte, Cultura e Comunicação e o ODS 20 — Direitos dos Povos Indígenas e Comunidades Tradicionais. Esses três complementos e suas respectivas representações visuais encontram-se destacados na faixa inferior da Figura 13:

Figura 13: Os 17 ODS da ONU e os 3 ainda não institucionalizados, totalizando 20 ODS.



Fonte: Adaptado de ONU (2015) e Cabral e Galvão (2024).

3.4.1 A gestão dos resíduos sólidos e o papel da economia circular

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) consolidou-se como um desafio emergencial no cenário brasileiro, impulsionado pelo consumo em massa e pela obsolescência

precoce de produtos (Mira, 2021). Estima-se que a geração nacional de RSU atinja marcas críticas diariamente, das quais apenas uma fração é recuperada por sistemas estruturados de logística reversa (Abrema, 2025). Consequentemente, o uso intensivo de polímeros sintéticos e o descarte incorreto têm gerado severos impactos ecológicos, com detritos plásticos e microplásticos poluindo a quase totalidade dos ecossistemas costeiros e biomas marinhos do país (Sea Shepherd, 2024).

Como principal marco regulatório para mitigar esse panorama, a Lei nº 12.305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), definindo diretrizes para a governança, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a implementação de sistemas de logística reversa (Brasil, 2010). Contudo, a efetiva consolidação desse mecanismo ainda enfrenta barreiras estruturais, como a baixa adesão inicial dos consumidores ao descarte voluntário. Diante dessa lacuna, sobressai o papel socioeconômico fundamental desempenhado pelos catadores e cooperativas de materiais recicláveis, agentes responsáveis por impulsionar a coleta seletiva e a triagem especializada de polímeros de alto valor comercial (Abiplast; Abdi, 2022).

Para romper com a lógica da economia linear tradicional baseada no fluxo unidirecional de "produção-consumo-descarte", torna-se imperativo migrar para abordagens orientadas à sustentabilidade sistêmica (Brito et al., 2021; Silva et al., 2021). A economia circular emerge como um modelo focado em promover novos arranjos produtivos sustentados pela salvaguarda ambiental, prosperidade econômica e igualdade social (Silva et al., 2021). No entanto, o setor de polímeros ainda enfrenta gargalos complexos para viabilizar sua circularidade, demandando a expansão de sistemas de reuso, o tratamento de embalagens flexíveis e o investimento em infraestrutura capilarizada de reciclagem mecânica (MacArthur, 2025).

Apesar dos desafios estruturais em maturação, o cenário da reciclagem mecânica nacional apresenta indicadores de evolução quantitativa, demonstrando expansão no volume total de resinas plásticas pós-consumo recuperadas e reinseridas no mercado (Maxiquim, 2025). Esse avanço técnico e econômico valida a viabilidade de reaproveitar materiais secundários — como as aparas e resíduos industriais utilizados na manufatura da madeira plástica — transformando passivos ambientais urbanos em insumos estruturais de alto desempenho para novos projetos de engenharia e *design*.

3.5 A Madeira plástica

Enquanto metais como o alumínio despertam elevado interesse econômico nas cadeias de reciclagem, o tratamento de resíduos polímeros ainda impõe severos desafios à gestão de resíduos sólidos urbanos. Nesse cenário, o desenvolvimento de compósitos projetados para substituir insumos florestais desponta como uma rota sustentável promissora, combatendo a degradação de ecossistemas e mitigando o desmatamento (Mapbiomas, 2025). Sob esse enfoque, a Madeira Plástica (MP) estabelece-se como uma alternativa viável e competitiva em relação à madeira extrativa, agregando vantagens técnicas como a imunidade a pragas e a insetos xilófagos (Oliveira; Oliveira; Costa, 2022).

Na literatura internacional, o termo "madeira plástica" é uma nomenclatura comercial, frequentemente associada a acrônimos como RPL (*Recycled Plastic Lumber*) ou WPC (*Wood Polymer Composites*) (Ohara, 2011; Matos, 2017). Do ponto de vista macromolecular, trata-se de um compósito estruturado por uma fase contínua (matriz polimérica) e uma fase dispersa (elemento de reforço ou carga) (Kieling; Santana; Santos, 2019). Convém distinguir, contudo, duas vertentes tecnológicas:

Plástico Madeira (WPC): compósito fabricado a partir da blendagem de resinas poliméricas com farinha, partículas lenhosas ou fibras de madeira natural e resíduos vegetais, que atuam como agentes de reforço e redução de custo (Müzel, 2017; Santos et al., 2021).

Madeira Plástica pura: manufaturada exclusivamente a partir de frações 100% poliméricas, sejam elas derivadas de resinas virgens ou provenientes de reciclagem pós-consumo, prescindindo de elementos orgânicos (Müzel, 2017).

Uma tecnologia pioneira dessa segunda vertente foi desenvolvida no Brasil pela pesquisadora Eloisa Biasotto Mano, no Instituto de Macromoléculas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA-UFRJ). Patenteada sob a marca Imawood[®], a formulação baseia-se na blenda de 75% de polietileno de alta densidade (PEAD) — que confere rigidez e resistência mecânica — e 25% de polietileno de baixa densidade (PEBD), responsável por aportar flexibilidade e elasticidade ao composto (Almeida, 2013; Mira, 2021; Brito; Trindade, 2023).

As características sensoriais da MP assemelham-se à aparência da madeira natural, oferecendo textura tátil agradável e isenta de farpas. Comercializada em geometrias homólogas às da madeira serrada comum (tábuas, perfis em "U" ou "L" e tubos), a MP dispensa tratamentos químicos ou pinturas e encontra ampla aplicação na construção civil, arquitetura e setor moveleiro (Kieling; Santana; Santos, 2019; Oliveira; Oliveira; Costa, 2022). Ao ser confrontada com o material florestal, a MP exhibe um balanço específico de propriedades sintetizado no Quadro 4.

Quadro 4: Vantagens e desvantagens do uso da madeira plástica (MP).

VANTAGENS	DESVANTAGENS
• Fácil de limpar (basta o uso de água e sabão), suportam a exposição a produtos químicos agressivos, como soda cáustica e solvente, tanto de uso doméstico como profissional; • Menor custo de acabamento, já que não precisam ser lixadas e envernizadas e podem adquirir a cor desejada conforme a pigmentação aplicada; • É versátil, sendo possível dar o mesmo tratamento recebido pela madeira natural, se desejado, pois suporta cola, pinturas, enceramentos, manuseio de corte, furos, aparafusamentos; • Os resíduos da sua produção e, caso fossem descartados, podem ser reaproveitados no próprio processo de fabricação, zerando praticamente a perda de matéria-prima; • Não sofre com a ação de: pragas, umidade, mofo, fungos, não racham e não soltam farpas; • Impermeável, isolante e bom condutor térmico, não apodrece e pode durar mais de 100 anos; • Não propaga fogo por ter em sua composição o polietileno de alta densidade (PEAD).	• Demanda de parâmetros específicos e controle dimensional rigoroso quando submetida a processos de aplainamento e fresagem; • Variabilidade nas propriedades mecânicas finais decorrentes da flutuação na triagem de polímeros reciclados comerciais, aspecto mitigado e controlado pela adição balanceada de fibras vegetais de reforço; • Menor módulo de elasticidade em comparação à madeira natural, exigindo dimensionamento estrutural adequado para compensar deflexões sob carga; • Composição híbrida que requer ajuste otimizado na velocidade de corte e avanço durante a usinagem mecânica, a fim de mitigar o desgaste prematuro de ferramentas.

Fonte: Adaptado de Müzel, 2017; Oliveira et al., 2022; Brito, 2023.

3.5.1 A usinagem da madeira plástica

A escolha do processo de fabricação ideal para componentes estruturais é influenciada por múltiplos fatores interdependentes, incluindo as propriedades intrínsecas do material, a complexidade geométrica e a disponibilidade de maquinários industriais (Machado et al., 2015). Para transformar o insumo polimérico em produto, predominam os processos de usinagem por remoção gradual de material na forma de cavacos (Santos; Sales, 2004), cujas principais categorias convencionais e não convencionais encontram-se sintetizadas no Quadro 5 a seguir:

Quadro 5: Tipos de processo de fabricação.

Sem remoção de cavaco		Com remoção de cavaco		
Fundição Soldagem Metalurgia do pó	-	Usinagem Convencional (Tradicional)	Torneamento Fresamento Furação Alargamento Aplainamento	Mandrilamento Serramento Brochamento Roscamento etc.
Conformação	Laminação Extrusão Trefilação Forjamento Estampagem	Usinagem Não Convencional	Jato d'água Jato abrasivo Fluxo abrasivo Ultrassom Eletroquímica Eletroerosão	Feixe de elétrons Laser Plasma Química Fotoquímica etc.
Outros	-	Processos Abrasivos	Retificação Brunimento Lapidação	Lixamento Outros

Fonte: Adaptado de Santos e Sales, 2004; Machado et al., 2015.

O emprego de compósitos poliméricos como a Madeira Plástica (MP) exige critérios rigorosos durante a usinagem, visto que cada blenda manifesta uma resposta mecânica específica ao corte, elevando a complexidade da operação (Müzel et al., 2017). Para a condução da presente pesquisa, as amostras de MP foram doadas pela instituição Fazenda da Esperança®, apresentando-se em geometrias maciças de perfis cilíndricos (tarugos) com diâmetros de 35 mm e 62 mm. O processo de fabricação artesanal da MP nessa instituição baseia-se exclusivamente na fusão de polímeros diversos reciclados em uma abordagem tecnológica similar à da tecnologia Imawood®, composta por resíduos plásticos e aparas pós-industriais, sem a adição de fibras lignocelulósicas ou cargas de origem natural.

No que tange aos parâmetros de corte para esses polímeros complexos, a literatura recomenda o uso de velocidades de corte e de avanço elevadas associadas a uma profundidade de corte (a_p) reduzida. Devido à presença de cargas e impurezas abrasivas nos plásticos reciclados, as ferramentas sofrem desgaste mecânico acelerado, recomendando-se o emprego de insertos revestidos com diamante policristalino (PCD) ou metal duro altamente afiados (Santos; Sales, 2014). Adicionalmente, ressalta-se que velocidades de corte excessivas ou a elevação indiscriminada dos parâmetros mecânicos podem elevar a temperatura na zona de cisalhamento a ponto de provocar a degradação térmica superficial do polímero, conferindo-lhe um aspecto de queima e comprometendo as tolerâncias dimensionais exigidas no projeto (Machado et al., 2015).

3.5.2 A rugosidade da madeira plástica

A rugosidade de um material constitui um parâmetro técnico associado às irregularidades micro geométricas e aos desvios identificados no estado topográfico final da superfície submetida a um processo de corte (Müzel, 2017). Essa integridade superficial abrange a qualidade global da interface e qualifica as alterações mecânicas sofridas pelas camadas subsequentes do material, as quais dependem de variáveis associadas à máquina-ferramenta, às propriedades reológicas da peça e à modalidade de operação escolhida (Santos; Sales, 2004; Machado et al., 2015).

Dentre as variáveis monitoradas na usinagem da MP, as amplitudes de vibração do sistema destacam-se pelo impacto direto na estabilidade da operação, uma vez que níveis excessivos degradam a qualidade superficial da peça e provocam o micro fissuramento dos gumes da ferramenta (Müzel et al., 2017). Em estudos comparativos focados no fresamento tangencial de amostras de MP, Müzel et al. (2017) constataram que a calibração da velocidade de corte em $n = 8.000$ rpm associada a uma velocidade de avanço de $v_f = 3$ m/min proporcionou as respostas mais favoráveis para mitigar as vibrações do sistema e otimizar a qualidade superficial. Adicionalmente, verificou-se que o sentido de fresamento concordante reduziu substancialmente a vibração, resultando em menores índices de rugosidade média. Caso as operações de usinagem primárias manifestem rebarbas ou marcas de arrancamento, etapas complementares de acabamento superficial por meio de abrasivos finos ou processos artesanais e manuais tornam-se necessárias para a atenuação dos picos de rugosidade (Mantuani, 2017).

4 METODOLOGIA

Como postulado por Munari (1981), o ato de projetar torna-se inteligível quando se detém o domínio sobre o escopo do que deve ser executado. Planejar o desenvolvimento de um novo produto requer o emprego de métodos sistemáticos para estruturar as etapas do processo e, viabilizando a clarificação de sua concepção, a identificação precisa dos problemas e o delineamento das diretrizes necessárias para solucioná-los.

Secundando essa visão, Baxter (2017) afirma que o fator preponderante no processo de desenvolvimento de novos produtos é ter conhecimentos básicos e uma metodologia que possa estruturar as etapas do processo, enquanto os conhecimentos específicos são obtidos por meio do suporte interdisciplinar de outros profissionais.

A caracterização geral desta pesquisa está representada no esquema do Quadro 6, organizada sistematicamente a partir de dimensões como o método de condução, a natureza da pesquisa, os objetivos pretendidos e o tipo de abordagem combinada empregada no desenvolvimento do estudo:

Quadro 6: Classificação da pesquisa.

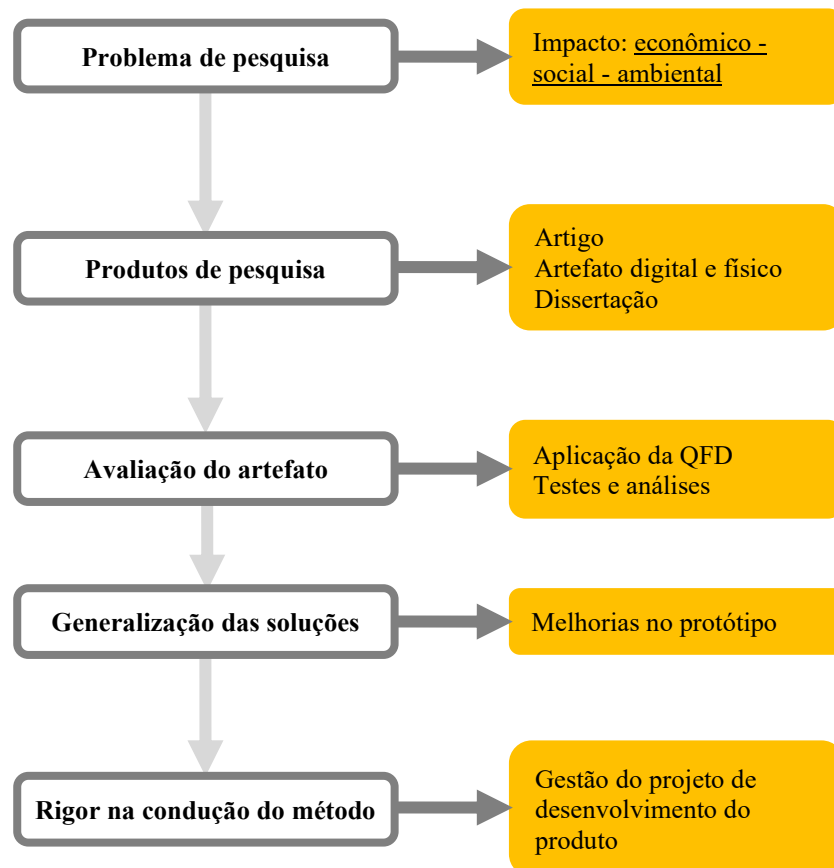
TEMA: DESENVOLVIMENTO DE IMPRESSORA 3D E INJETORA DE CERÂMICA			
Natureza	Aplicada		
Objetivo	Exploratório		
Método	DSR (<i>Design Science Research</i>) e o QFD (<i>Quality Function Deployment</i>) como ferramenta		
Abordagem Combinada	Prescritiva	Atributos semânticos	Produção de artigo e manual
	Qualitativa	Análise temática	Análise de similares, testes e melhorias
	Quantitativa	Estatística descritiva	Pesquisa de usabilidade, identificação de padrões

Fonte: Autora, 2025.

O projeto foi estruturado a partir da revisão da literatura, a qual constituiu o referencial teórico, e procede metodologicamente por meio de duas abordagens principais. A primeira, voltada à pesquisa e ao embasamento teórico necessário para o desenvolvimento prático que resultará no projeto da impressora 3D, alicerça-se nos preceitos da *Design Science Research* (DSR), conforme taxonomia proposta por Dresch, Lacerda e Antunes (2015). Simultaneamente,

dentro dessa estrutura, aplica-se a ferramenta de gestão do QFD (*Quality Function Deployment*) para aproximar a proposta tecnológica das reais necessidades dos potenciais usuários, conforme o desdobramento técnico do protocolo da DSR apresentado na Figura 14.

Figura 14: Protocolo de método *Design Science Research* (DSR).



Fonte: Adaptado de Dresch, Lacerda e Antunes Jr., 2015.

4.1 O protocolo do *Design Science Research* (DSR)

A metodologia do DSR é aplicada em estudos em que o foco é resolver problemas por meio de um rigoroso processo de projetar e avaliar artefatos, tanto no contexto acadêmico quanto no corporativo. Os artefatos podem, de forma prescritiva, proporcionar benefícios como a otimização de processos organizacionais, o incremento da qualidade de vida e o fortalecimento dos vínculos sociais de uma comunidade (Santos, 2018). Sendo o presente projeto caracterizado por sua natureza interdisciplinar, a metodologia mostra-se plenamente adequada ao apresentar um protocolo para o desenvolvimento de um artefato experimental usando um material alternativo ao convencional. Esse processo considera a heurística

construída (aquela que visa definir as características necessárias para o funcionamento do artefato, partindo de uma visão interna para o ambiente externo), a heurística contingencial (os conhecimentos adquiridos pelo mapeamento de entrevistas semiestruturadas, após a aplicação da ferramenta, com o objetivo de registrar uma percepção útil para a pesquisa), os resultados das etapas de desenvolvimento, a avaliação dos artefatos e, por fim, o estabelecimento de uma referência para investigações futuras.

A proposta apresenta parâmetros baseados nos conceitos e fundamentos do DSR, seguidos estritamente sob os critérios necessários para a obtenção de resultados confiáveis:

Problema de pesquisa: Fundamentado no referencial teórico, concerne ao impacto econômico, social e ambiental do desenvolvimento de uma impressora 3D para a obtenção de artefatos cerâmicos. Essa delimitação guarda estrita aderência ao programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, vinculando-se à linha de pesquisa em Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade e ao Projeto de Gestão da Inovação Tecnológica da CGPEP-CEETEPS;

Produtos de pesquisa: Essa etapa do processo envolve a criatividade ao gerar o artefato – o qual pode comportar múltiplas versões - com o objetivo de solucionar um problema identificado, adotando diferentes abordagens, tais como: infográficos, *mockups*, algoritmos e modelos etc. (Santos, 2018). Durante o desenvolvimento do produto, foram criados esboços e estudos gráficos em duas dimensões (2D), como forma de testar e aprimorar soluções de projeto para os elementos construtivos e estruturais da impressora, antes da transição para o modelo definitivo em CAD e da construção física do *mockup*. Parte desse material foi avaliada na etapa seguinte junto aos usuários por meio do método QFD. Como desdobramentos das investigações, produziram-se como resultados: artigo científico, artefato digital e físico, e a presente dissertação;

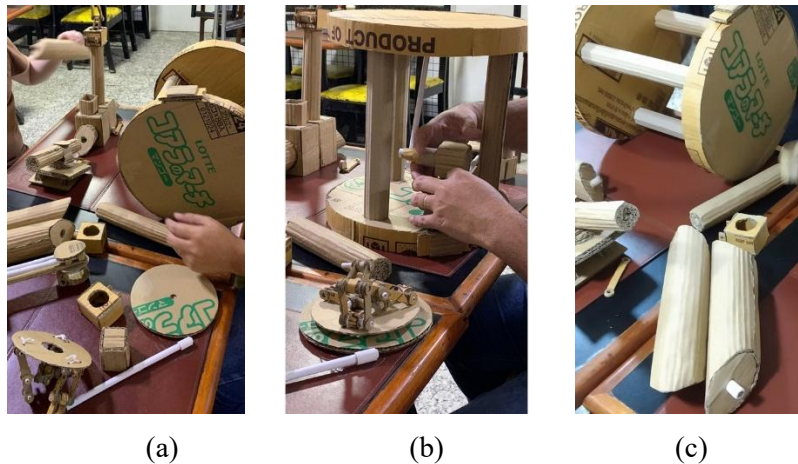
Avaliação do artefato: Inicialmente, foram avaliados modelos comerciais do tipo *desktop*, conforme sugestões adaptadas da análise de similares de Bruno Munari. Características do produto, tais como fabricante, origem, dimensões, materiais, peso, categoria de impressão, custo aproximado de aquisição, funcionalidade, uso declarado, manutenção, ergonomia, tensão elétrica, *softwares* e arquivos compatíveis, além da estética, foram utilizadas para coletar dados e comparar os parâmetros mais comuns encontrados nos modelos comerciais. Esse exercício é preconizado pela metodologia DSR devido à necessidade de compreender, de forma

interpretativa e objetiva, a realidade e o contexto do objeto de estudo. Lacerda et al. (2013) propõem alguns métodos para a avaliação de artefatos. Nesse contexto, os *mockups* foram estimados de forma experimental por pequenos grupos de pessoas. Para tanto, aplicou-se o método QFD, viabilizado pela construção de *mockups* e pela elaboração de questionário para avaliá-los, seguidos pela análise das informações coletadas e pelo detalhamento técnico, visando adequar o protótipo às necessidades dos usuários, incluindo aceitação do material estrutural, tamanho, *design*, função e usabilidade;

Generalização das soluções: A pesquisa adota uma abordagem mista (quali-quantitativa) e exploratória voltada ao desenvolvimento do projeto (desenho) de um modelo de impressora 3D. A vertente qualitativa fundamenta-se na análise detalhada da literatura técnica, desenhos e equipamentos convencionais, integrando conceitos de diversas áreas conforme a evolução do artefato. A quantitativa é viabilizada pela aplicação do método QFD, cujos dados de entrada são extraídos diretamente da interação dos participantes com os *mockups* físicos em escala 1:1 durante o Grupo Focal. A generalização ocorre por meio da contingência heurística, na qual a identificação de pontos críticos e de aprimoramento - organizados por classes funcionais - permite a construção de uma base de conhecimento sobre o artefato. Dessa forma, as percepções sensoriais e funcionais observadas na interação prática não apenas refinam o desenho final do modelo proposto para registro, mas estabelecem diretrizes de projeto que podem ser transferidas para outros contextos de desenvolvimento de tecnologias de fabricação digital.

Rigor na condução do método: As etapas previstas devem ser seguidas com o intuito de demonstrar e justificar os procedimentos selecionados nessa pesquisa, aumentando a confiabilidade dos resultados e da construção do artefato (Lacerda et al., 2013). Todas as etapas foram cumpridas, realizadas e documentadas de acordo com o protocolo de pesquisa. Como parte das evidências desse rigor procedimental e documental, realizou-se o registro fotográfico das sessões práticas de montagem e verificação dos componentes durante a interação com os *mockups* em escala 1:1, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15: Validação de *mockups*: (a) componentes; (b) encaixe; e (c) modelo final.



Fonte: Autora, 2026.

Em alinhamento com esse rigor procedimental e normativo, as representações geométricas do artefato (vistas ortogonais e isométricas cotadas) apresentadas no Capítulo de Resultados foram estruturadas em estrita observância ao item 5.3.1.2 do Manual de Desenho Industrial do INPI (Inpi, 2023). O referido documento baliza o escopo legal de proteção do registro de Desenho Industrial (DI), estipulando que, de acordo com as diretrizes do órgão regulador, as representações visuais de um desenho industrial devem contemplar elementos como a forma, a cor, a textura e o acabamento de superfície, desde que esses atributos garantam o aspecto visual na aparência externa da configuração. A forma é definida como o principal elemento distintivo do produto, sendo que aspectos como opacidade e transparência integram as características visuais do desenho industrial. Todavia, ressalta-se que o registro não concede ao titular a exclusividade sobre tais características por si sós, caso elas não integrem o escopo de proteção reivindicado (Inpi, 2023).

Fundamentado nesse arcabouço regulatório, o presente estudo exime-se da necessidade de apresentar modelagens tridimensionais renderizadas por computação gráfica ou detalhamentos exaustivos de componentes mecânicos internos não aparentes. Uma vez que o órgão regulador nacional preconiza a suficiência da configuração externa ornamental para o ato de depósito, a documentação técnica por meio de vistas 2D cotadas cumpre integralmente os requisitos de novidade, originalidade e reprodutibilidade exigidos, salvaguardando o rigor do método sem incorrer em preciosismos geométricos secundários.

4.2 A madeira plástica como alternativa de material para fabricação da impressora

A madeira plástica (MP) utilizada na construção do chassi da impressora 3D foi produzida por internos de um projeto social, sendo as amostras cedidas sob a forma de doação pela Fazenda da Esperança[®] (conforme detalhado no Apêndice 2) para a condução desta pesquisa. A proposta centra-se em projetar um modelo estrutural que possa incorporar a MP como o principal insumo da matriz estrutural da impressora 3D, criando uma rota alternativa para o reaproveitamento e a valorização de resíduos poliméricos dentro do conceito da economia circular.

Na Fazenda, é reincorporado ao ciclo produtivo inclusive o refugo gerado no próprio processo de conformação da MP. O insumo é separado por famílias de polímeros e acondicionado em contêineres flexíveis de rafia (tipo *Big Bags*) para posterior processamento, conforme ilustrado na Figura 16:

Figura 16: Insumos poliméricos: (a) recepção; (b) triagem; e (c) moagem.



Fonte: Autora, 2025.

Quando composto por outros elementos além do plástico, o material polimérico demanda a submissão a um processamento mecânico complementar. É o caso, por exemplo, dos fios de cobre — cujos filamentos são segregados de sua respectiva capa isolante polimérica — ou da dinâmica observada no beneficiamento de hastes flexíveis (compostas por plástico e algodão). Nestes cenários, o componente termoplástico é primeiramente direcionado a um secador industrial, promovendo a máxima separação e desidratação das frações para otimizar o seu aproveitamento na produção da MP, enquanto o resíduo de algodão é destinado como subproduto para aproveitamento na área têxtil, conforme evidenciado na Figura 17.

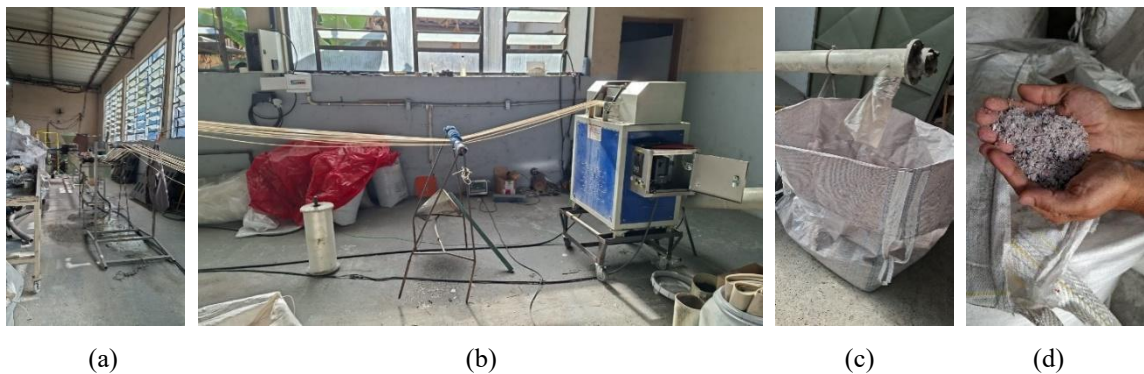
Figura 17: Separação de composto: (a) hastes trituradas; (b) fração polimérica; (c) algodão.



Fonte: Autora, 2025.

A blenda dos materiais plásticos é conduzida por uma linha de equipamentos industriais, passando sucessivamente pelas etapas de aglutinação por cisalhamento, fusão térmica, extrusão em matriz para a conformação de um cordão flexível contínuo (espaguete) e, por fim, trituração mecânica para a redução do polímero a granulados de granulometria milimétrica, Figura 18.

Figura 18: Processo do plástico: (a) equipamentos; (b) cordão; (c) moagem; (d) grãos.



Fonte: Autora, 2025.

O plástico tratado e granulado é subsequentemente alimentado em uma máquina de moldagem por extrusão, na qual passa por um novo ciclo de aquecimento controlado por resistências elétricas antes de ser forçado através de uma matriz helicoidal, adquirindo sob pressão a forma final de tábuas ou perfis cilíndricos de madeira plástica, Figura 19.

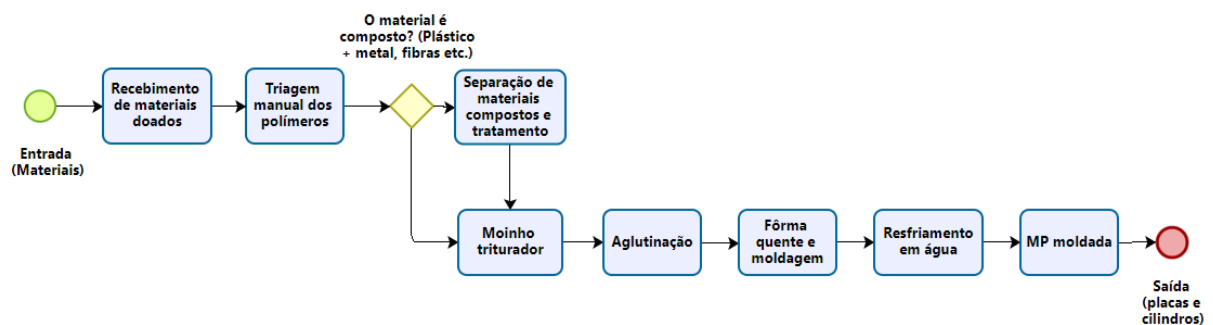
Figura 19: Extrusão de MP: (a) maquinário; (b) granulado; (c) saída; (d) produto final.



Fonte: Autora, 2025.

Em resumo, constata-se a existência de um processo genérico aplicado na maior parte do material ali produzido, o qual pode agregar etapas operacionais adicionais a depender das especificações técnicas que a peça final exigir. No entanto, as ações voltadas à personalização e ao ajuste dimensional dos perfis de madeira plástica na instituição fornecedora não dispõem de diretrizes técnicas normatizadas ou suporte de engenharia especializado, fundamentando-se estritamente na observação empírica e em testes práticos executados pelos próprios operadores. Esse fluxo operacional está mapeado de forma lógica na Figura 20, desenhado com o auxílio do *software* Bizagi Modeler®:

Figura 20: Mapeamento do processo de manufatura de madeira plástica.



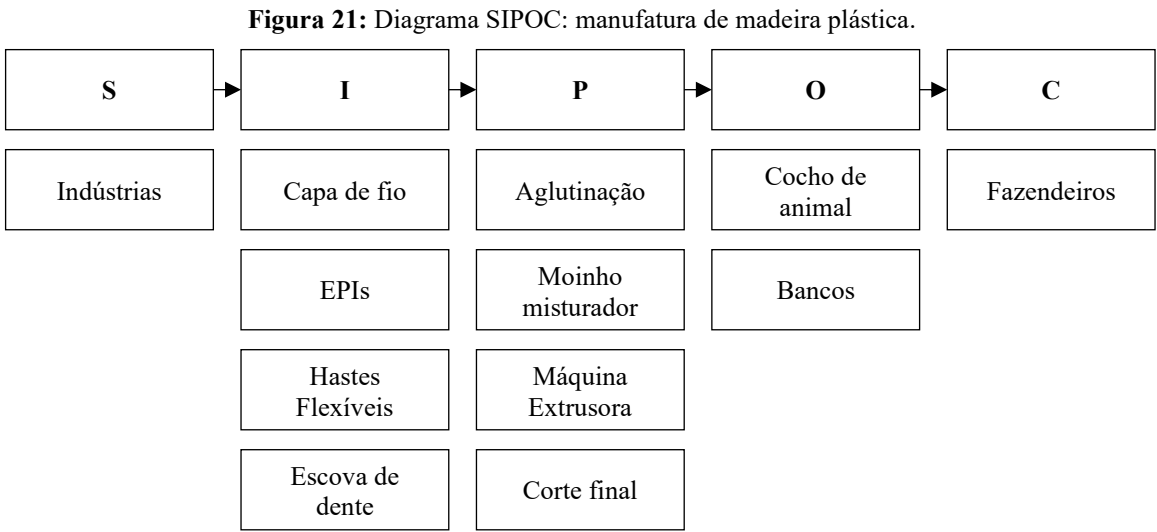
Fonte: Autora, 2025.

A análise do mapeamento do processo de fabricação pode ser aprofundada por meio da ferramenta SIPOC – acrônimo para *Suppliers* (Fornecedores), *Inputs* (Entradas), *Process* (Processos), *Outputs* (Saídas) e *Customers* (Clientes), integrante da metodologia *Six Sigma*. Enquanto o *Lean* configura uma filosofia de produção originada no Sistema de Produção da Toyota com o objetivo de reduzir e/ou eliminar desperdícios e atividades que não agregam valor dentro de um fluxo contínuo de processo, o *Six Sigma* visa melhorar a qualidade e a

produtividade organizacional reduzindo a variabilidade do processo e pautando-se em definições, métricas e análises metodológicas (Vicente; Godina; Gabriel, 2024).

Dentre as aplicações mais comuns do SIPOC, destaca-se a sua capacidade de prover eficiência organizacional, uma vez que orienta e mensura elementos em um programa, ajuda a equipe a encontrar um entendimento comum entre o escopo e o propósito do processo e do projeto e ainda, viabiliza a identificação dos pontos de convergência entre a satisfação do cliente e as atividades do marketing (Yeung, 2024).

No contexto da produção da Fazenda da Esperança[®], a aplicação do SIPOC permitiu mapear de forma inequívoca as etapas, o tempo de ciclo produtivo, a interação de cada ação e a quantidade de pessoas necessárias. Essa estruturação confere clareza para membros da equipe que ainda não conhecem os processos e fornece uma visualização completa do trabalho traduzido em um gráfico de simples entendimento (Freire et al., 2025), conforme mostrado na Figura 21:



Fonte: Freire et al., 2025.

A caracterização empírica e a variabilidade dimensional inerentes ao processo artesanal de extrusão da madeira plástica na instituição fornecedora — conforme evidenciado pelo mapeamento estruturado no SIPOC — impuseram a necessidade de um rigoroso detalhamento geométrico dos componentes de união e fixação do chassi. Devido à ausência de padronização industrial originária do insumo reciclado, o desenvolvimento do artefato demandou o projeto

individualizado de cada elemento de conexão para compensar tolerâncias e garantir a estabilidade estrutural da impressora 3D.

Diante dessa especificidade técnica, optou-se pelo desenvolvimento de representações geométricas bidimensionais exaustivamente cotadas e vistas isométricas de montagem para o modelo proposto. Essa abordagem técnico-científica, detalhada no capítulo subsequente de Resultados, foi adotada com o propósito de assegurar a reprodutibilidade exata do artefato por terceiros dentro da filosofia de código aberto (*open-source*), tornando prescindível o emprego de modelagens fotorrealistas secundárias e concentrando o rigor metodológico na precisão dimensional necessária para a montabilidade real do chassi.

4.3 O Desdobramento da Função Qualidade (QFD)

O QFD é uma ferramenta metodológica que permite traduzir as necessidades dos usuários em requisitos técnicos mensuráveis de engenharia. No contexto desta pesquisa, a aplicação do método concentra-se na fase de planejamento do produto, correlacionando os campos da “Casa da Qualidade” com as atividades práticas de projeto, conforme sistematizado no Quadro 7.

Ao aplicar os requisitos ao diagrama, busca-se converter a “Voz do Cliente” em metas de *design* com validade qualitativa, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva e fundamentada nas expectativas dos *stakeholders* (Rosenfeld et al., 2010). O QFD é estruturado de forma que cada etapa siga um processo de priorização hierárquica (Carvalho, 1997).

No planejamento deste equipamento, a sustentabilidade é integrada de forma preliminar, avaliando-se os impactos ambientais por meio da seleção estratégica de materiais (Balder; Hagedorn; Stark, 2024). Contudo, é importante ressaltar que, mesmo com a presença de materiais reciclados na estrutura da impressora - o caso do uso de MP -, a abordagem visa representar um avanço pontual na economia circular do *hardware*, sem a pretensão de garantir a sustentabilidade global do ciclo de vida completo do experimento.

A fim de delimitar a aplicação do QFD no estudo, seguindo as diretrizes de Baxter (2017) para projetos de complexidade similar, o método será aplicado até a quarta etapa (em destaque no Quadro 7), o que já abrange desde a definição dos requisitos dos clientes até a priorização das metas de projeto.

Quadro 7: Quadro comparativo do QFD e de fases do projeto da Casa da Qualidade.

Campo do QFD	Atividades da Casa da Qualidade	Estágios a desenvolver	Descrição da etapa
1. Requisitos dos Clientes	1. Aplicação da “Voz do Cliente”.	1. Conversão das necessidades do consumidor (Planejamento do Produto)	1.Desenvolvimento da matriz, conversão das necessidades em atributos técnicos do produto
2. Importância relativa da demanda dos usuários 3. <i>Benchmarking</i> com os produtos concorrentes	2. Planejamento das partes	2.Análise dos produtos concorrentes (<i>Design</i> do Produto/ <i>benchmarking</i>)	2. Análise dos similares e classificação pela satisfação dos consumidores e desempenho técnico
4. Requisitos técnicos do <i>design</i> 5. Correlação entre os requisitos dos clientes e do produto	3. Definição dos requisitos do produto e planejamento do processo.	3. Fixação das metas quantitativas para cada atributo técnico (Planejamento do Processo)	3. Atribuição de valores para cada meta
6. Pontuação e importância dos requisitos do produto (valor-meta)	4. Planejamento das operações.	4. Classificação das metas do projeto (Controle do Processo)	4. Priorização de metas para nortear o projeto

Fonte: Adaptado de Abreu, 1997; Rosenfeld et al., 2010; Baxter, 2017; Ishak et al., 2020.

4.3.1 Importância do levantamento de requisitos

A aproximação junto aos consumidores proposta pelo QFD assemelha-se ao conceito de *Design* Centrado no Usuário (*User-Centered Design*), focado no desenvolvimento de ferramentas sob a perspectiva de operabilidade e compreensão do usuário final (McElroy, 2017). Dentro deste método, a “Voz do Cliente” (VoC) é capturada para determinar o peso atribuído a cada característica do produto (Siwiec; Pacana; Gazda, 2023).

No contexto do projeto, a definição estratégica de “com quem falar” é essencial, pois a aceitação do equipamento depende da integração harmônica entre as demandas ergonômicas e os requisitos de engenharia. Busca-se, assim, projetar produtos que mitiguem impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida (Fongsatitkul; Kainuma, 2021).

Preconizando o cumprimento rigoroso dessas diretrizes de operabilidade e interação usuário-artefato, o procedimento de captura da "Voz do Cliente" e validação dos requisitos técnicos foi estruturado a partir de uma abordagem qualitativa em profundidade com amostragem intencional. Dessa forma, optou-se pela condução de sessões práticas de engenharia reversa e montabilidade com uma amostragem restrita a 2 (dois) participantes

avaliadores. Essa escolha metodológica justificou-se pela necessidade de monitorar minuciosamente, em tempo real, a usabilidade e o ajuste mecânico dos encaixes simulados sem a dispersão de dados comum em grandes grupos focalizados. O registro fotográfico autêntico dessa dinâmica prática de bancada, evidenciando a manipulação e a montagem assistida dos *mockups* estruturais em escala 1:1, foi formalmente documentado e integrado ao protocolo metodológico, conforme apresentado na Figura 15, detalhada na Seção 4.1.

É importante ressaltar que a utilização da MP na estrutura do equipamento não visa apenas a reciclagem pontual, mas a imobilização de polímeros em um componente de longa vida útil. Esta escolha técnica busca retardar a fragmentação desses materiais em micropartículas (resíduos particulados) e reduzir a dependência de polímeros de primeiro uso, transformando resíduos pós-consumo em um bem de capital durável, o que caracteriza uma abordagem de *upcycling* aplicada ao *hardware*.

4.3.2 Benchmarking com os produtos concorrentes

O *benchmarking* constitui um método sistemático e contínuo de avaliação comparativa aplicado a produtos, serviços e práticas operacionais de organizações reconhecidas como líderes de mercado (Chiavenato, 2004). No âmbito do *design* de produto, essa prática transcende a mera análise estética ou escolhas baseadas em preferências subjetivas; ela atua como um instrumento crítico e reflexivo que compele o projetista a examinar detalhadamente as características de fabricação, as vantagens estruturais e as limitações tecnológicas de soluções preexistentes por meio de fichas de análise parametrizadas (Munari, 2016).

No entanto, a consolidação de dados técnicos concorrenciais enfrenta restrições severas no cenário industrial, haja vista a assimetria de informações e as barreiras de propriedade intelectual que limitam o compartilhamento de especificações de projeto e de desenvolvimento de produtos (Januário, 2003; Alves, 2025). Diante dessa complexidade e com o propósito de fundamentar empiricamente a análise competitiva desta pesquisa, conduziu-se um mapeamento de mercado entre os meses de setembro e outubro de 2025, no qual foram catalogadas e contatadas 13 empresas brasileiras atuantes no segmento de manufatura aditiva. A amostragem abrangeu desde fornecedores de insumos poliméricos e serviços especializados até fabricantes de equipamentos de impressão 3D, distribuídos estrategicamente em quatro estados da federação (Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina), cujo levantamento de dados

operacionais processou-se via canais oficiais de comunicação corporativa, conforme sistematizado no Quadro 8.

A análise de dados sintetizados no Quadro 8 revela que, embora o mercado brasileiro possua uma presença consolidada de revendedores, há uma homogeneidade crítica nos insumos oferecidos. De todas as empresas consultadas, apenas duas comercializam equipamentos capazes de utilizar argila ou pastas cerâmicas como insumo – sendo uma delas voltada para argila orgânica (alinhada à proposta deste trabalho) e a outra para resinas com carga cerâmica de uso odontológico.

Quadro 8: Relação de empresas brasileiras e impressoras 3D comercializadas.

Loja	Cidade/ Estado	Tipo de uso	Insumo
1	Atibaia (SP)	Doméstico, produção menor	Filamentos plásticos
2	São Paulo (SP)	Doméstico, produção menor	Filamentos plásticos
3	São Paulo (SP)	Profissional, industrial, saúde	Resina, fibra de carbono, material solúvel
4	São Paulo (SP)	Doméstico, produção menor	Filamentos plásticos e resina
5	Santo André (SP)	Doméstico, produção menor	Filamentos plásticos
6	Florianópolis (SC)	Doméstico, hobby	Filamentos plásticos
7	São José dos Campos (SP)	Profissional, industrial, design	Filamentos plásticos, cerâmica, resinas e outros
8	Itaboraí (RJ)	Engenharia civil, design, industrial	Exclusivo em cerâmica
9	Pinhais (PR)	Doméstico, hobby	Filamentos plásticos
10	Americana (SP)	Doméstico, hobby	Filamentos plásticos
11	São Paulo (SP)	Doméstico, hobby	Filamentos plásticos
12	São Paulo (SP)	Profissional, industrial, saúde, engenharia	Filamentos plásticos, resina, SLS/SLM
13	Joinville (SC)	Industrial	Exclusivo em cerâmicas

Fonte: Autora, 2025.

Este cenário de mercado contrasta com o interesse de atender à maioria dos usuários, que prefere filamentos plásticos tradicionais como o PLA, ABS, PETG, *Hyper ABS (high-speed ABS)* e resinas, mais acessíveis em custo e disponibilidade de equipamentos (Bueno do Amaral, 2019; Silva; Gnoato, 2017; Netto et al., 2024). Essa constatação é fundamental para o preenchimento da matriz QFD, pois valida a carência tecnológica de soluções nacionais voltadas para materiais sustentáveis e orgânicos, elevando a prioridade competitiva do sistema de extrusão e da estrutura propostos.

Adicionalmente, observa-se que os modelos de impressão em cerâmica disponíveis no mercado exigem equipamentos e insumos de alto custo, destinados principalmente a produções de caráter comercial, com demandas de escala superiores, se comparados às impressoras do tipo *maker*. Esta última, na qual se insere a proposta deste projeto, fundamenta-se na utilização de componentes simplificados e acessíveis, visando atender ao *hobby* ou à produção artesanal de pequenos objetos.

Para o aprofundamento do estudo de *benchmarking* e análise técnica comparativa, adotou-se como objeto de referência a impressora 3D DuraCer[®], equipada com o sistema Delta DuraPrinter E03. A referida unidade analítica encontra-se em operação na Área II da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (EEL-USP), cuja proximidade e abertura para inspeção técnica permitiram estabelecer um contraste direto entre um equipamento consolidado de pesquisa institucional e a proposta de baixo custo e sustentabilidade desenvolvida nesta dissertação.

4.3.3 Fixação das metas quantitativas

A partir da análise dos similares, estabeleceu-se uma matriz de parametrização técnica comparativa entre os equipamentos comerciais disponíveis no mercado. A ficha de análise do produto, fundamentada nas diretrizes de Munari (2016), consolida indicadores como dimensões volumétricas, custo de aquisição, valor social agregado, especificação de materiais e peso estrutural, viabilizando a identificação das variáveis críticas passíveis de otimização de desempenho. Esses atributos traduzem os requisitos técnicos e operacionais que impactam diretamente a percepção prática dos usuários, servindo como base para alinhar o desenvolvimento do artefato às demandas das áreas de *Design*, Engenharia, Tecnologia da Informação e Educação. Tais variáveis são mensuráveis por meio de valores quantitativos numéricos (dimensões e espessuras) ou por matrizes de opções qualitativas (Chixaro; Drozda; Oliveira, 2024).

No contexto desta pesquisa, as métricas de engenharia foram definidas para responder diretamente às limitações observadas na DuraPrinter E03 e nos modelos de entrada (como a Tina2). O direcionamento projetual concentrou-se no incremento da estabilidade estrutural — provido pelo emprego dos perfis maciços de MP no chassi — e na expansão da amplitude útil do eixo Z, visando viabilizar a manufatura aditiva de peças cerâmicas de maiores dimensões.

4.3.4 Priorização das metas

Concluída a etapa de análise comparativa, atribuíram-se ponderações numéricas para a identificação hierárquica das prioridades de projeto, assegurando que os esforços de desenvolvimento fossem direcionados aos vetores de maior valor para o usuário e mitigando potenciais conflitos entre metas técnicas concorrentes (Baxter, 2017).

A consolidação e a priorização dessas metas foram estruturadas por meio da matriz QFD, integrando as demandas de usabilidade capturadas na dinâmica prática com os usuários avaliadores e os requisitos técnicos validados sob a perspectiva de engenharia de produto. Para a atribuição dos pesos relacionais na matriz, processou-se uma rodada de consulta técnica e avaliação em profundidade com amostragem intencional, envolvendo profissionais das áreas de engenharia e *design* de artefatos.

A opção por uma amostragem restrita e intencional de participantes para a validação prática baseia-se no conceito de engenharia de usabilidade de Nielsen (2000), o qual demonstra que avaliações em profundidade com poucos usuários são suficientes para identificar a maior parcela das inconformidades críticas de um artefato. Ademais, conforme preconizado por Griffin e Hauser (1993) no desenvolvimento do método QFD, a análise qualitativa concentrada mitiga a dispersão de dados típica de grandes grupos focalizados, convergindo com as diretrizes de Baxter (2017) ao priorizar o julgamento técnico de um painel de especialistas para a calibração dos requisitos de engenharia.

Os resultados dessa análise relacional apontaram que a facilidade de montagem e a manutenibilidade (focada na facilidade de higienização do sistema) constituem os requisitos críticos do equipamento. Essa parametrização justificou tecnicamente o descarte da configuração cinemática Cartesiana inicialmente avaliada em favor da arquitetura Delta, visto que esta última minimiza os impactos da variabilidade dimensional do material reciclado e preserva a precisão milimétrica necessária para a deposição controlada de argila.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Projetando o artefato

O desenvolvimento do artefato final foi fundamentado na convergência metodológica entre os protocolos do *Design Science Research* (DSR) e do *Quality Function Deployment* (QFD). Essa abordagem integrada buscou estruturar tecnicamente o planejamento da impressora 3D, garantindo que o emprego dos perfis de madeira plástica (MP) reciclada estivesse perfeitamente alinhado às necessidades reais de usabilidade e restrições mecânicas identificadas ao longo da pesquisa.

A viabilização de um modelo de baixo custo e tecnologia acessível foi precedida por um mapeamento mercadológico abrangente, o qual incluiu o contato com fabricantes, representantes e o estudo detalhado de equipamentos convencionais e sistemas de extrusão cerâmica. Por meio da aplicação de fichas de análise parametrizadas (*benchmarking*), foram extraídos os requisitos funcionais e geométricos necessários para propor um equipamento replicável, estável e de fácil montagem. Na sequência, apresentaram-se os resultados referentes à fixação das metas qualitativas e à sua respectiva hierarquização, as quais balizaram a configuração final do projeto.

5.1.1 Anatomia e Periféricos (O Padrão)

Mesmo sob diferentes métodos de impressão e variabilidade de insumos, as impressoras 3D comerciais e de código aberto (*open source*) compartilham de uma anatomia característica comum (Kerr, 2022). No escopo do movimento *RepRap*, as relações e interações de seus subsistemas estruturais e eletromecânicos principais podem ser segregadas em blocos funcionais específicos, cuja tecnologia associada fundamenta-se em padrões abertos, conforme sugerido por Gozzo, (2017), Garcia (2010) e Souto, Souza e Frank Gil (2019), no Quadro 9:

Quadro 9: Anatomia comum às impressoras 3D do tipo RepRap.

Requisito	Descrição	Exemplos
Estrutura	É a base, a construção física do equipamento, na qual toda a parte eletrônica, mecânica e cabeamento da impressora ficarão.	As peças da base, mesa aquecida, eixo transversal, podem ser produzidas em MDF, metal ou mesmo plástico.
Eletrônica	Controla a movimentação dos componentes, temperaturas de diferentes áreas do equipamento, é responsável pela parte funcional da impressora.	Microcontroladores, Arduino, RAMPS, motor de passo, sensores.
Firmware	Parte lógica, inserida na placa controladora.	Firmware (Marlin 2)
Software	São sistemas usados para modelar objetos, fatiá-los, interpretar o desenho em CAD e ser a interface entre máquinas.	Software (Blender, Thingiverse), para fatiamento (Slic3r, Cura).

Fonte: Gozzo, 2017; Garcia, 2010; Souza, Garcia e Frank Gil, 2019.

O funcionamento operacional das impressoras 3D adota uma lógica sequencial parametrizada para a execução dos movimentos nos eixos coordenados, conforme descrito por Kerr (2022):

- 1) Um conjunto de extrusão desloca-se linearmente ao longo do eixo X (orientação esquerda-direita), impulsionado por um sistema de correia elastomérica e guiado por hastes lineares paralelas;
- 2) O conjunto de extrusão realiza movimentações no eixo Z (orientação vertical ascendente-descendente) por meio de barras lineares fixadas por fusos rosqueados. Nesse eixo específico, prescinde-se do uso de correias, priorizando-se fusos de esferas ou roscas trapezoidais para assegurar maior precisão posicional e estabilidade mecânica;
- 3) A mesa de impressão executa a movimentação de translação no eixo Y (anteroposterior), tracionada por correia síncrona sobre guias lineares duplas. Em modelos cartesianos comerciais, essas plataformas são aquecidas e magnéticas para otimizar a adesão do item manufaturado. No presente projeto, essa cinemática cartesiana de translação da mesa é substituída, migrando-se a movimentação para os três eixos verticais concorrentes da arquitetura do tipo Delta;
- 4) O conjunto de fusão térmica (*hotend*) funde o filamento polimérico de maneira controlada. Seu subsistema de alimentação mecânica utiliza extrusores de acionamento direto (*direct drive*), compostos por engrenagens tracionadas, dissipadores de alumínio, blocos cerâmicos, bicos de latão de 0,4 mm e ventilação forçada integrada para o resfriamento do material extrudado;

- 5) Um motor de passo bifásico dedicado ao controle cinemático da correia síncrona do eixo X;
- 6) Motores de passo acoplados de forma síncrona para governar o deslocamento vertical preciso do eixo Z;
- 7) Atuador mecânico do tipo interruptor (botão liga/desliga) posicionado na interface posterior do chassi para o seccionamento da fonte de alimentação estabilizada;
- 8) Interface de controle dotada de display LCD e codificador rotativo (*encoder*) para navegação contextual em menus internos, permitindo comandos de calibração manual, controle de temperatura do *hotend* e interrupção/reinício emergencial de rotinas de impressão;
- 9) Painel de interface visual navegável com suporte a barramento de comunicação e leitura de cartões de memória externos para a importação autônoma de arquivos de código G (*G-code*), controle de alimentação e retração de insumos poliméricos em suportes dedicados (Kerr, 2022).

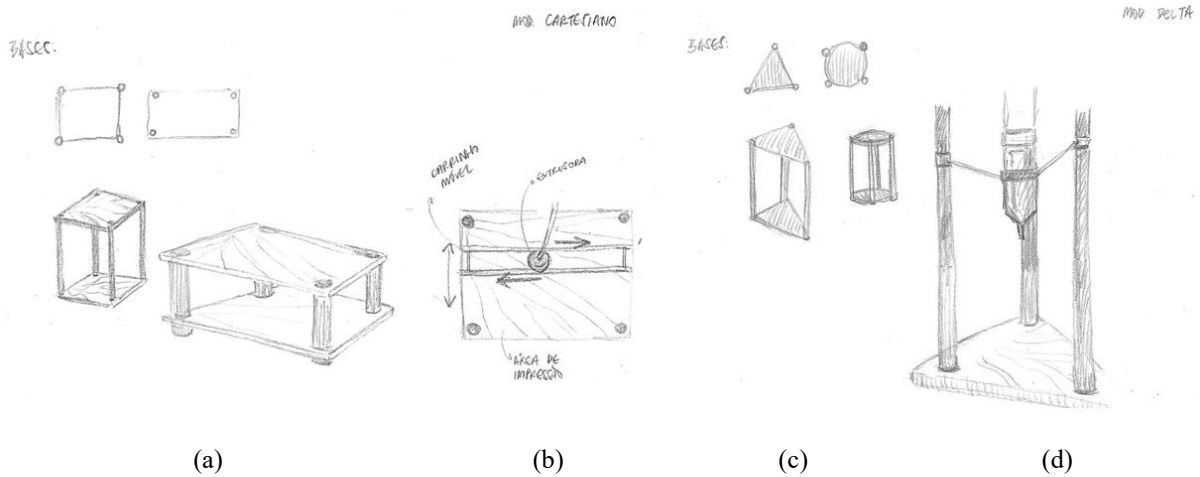
Definidos os componentes funcionais de *hardware* e a arquitetura eletrônica baseada no padrão *RepRap*, a fase subsequente do projeto consistiu na exploração formal e geométrica do artefato. Com o intuito de conciliar as metas dimensionais obtidas no estudo de *benchmarking* com as propriedades físico-mecânicas intrínsecas da Madeira Plástica, partiu-se para a materialização de esboços esquemáticos e modelos físicos conceituais preliminares, priorizando os requisitos de estabilidade estrutural do chassi e a simplificação do processo de montagem e fixação dos componentes.

5.1.2 Desenvolvimento dos primeiros esboços

A revisão sistemática da literatura e o mapeamento de mercado indicam que a maioria das impressoras 3D de categoria *desktop* adota a cinemática cartesiana, consolidando-se como a arquitetura mais difundida e comercializada no cenário global (Kerr, 2022; Pereira et al., 2023; Andrade, 2023). Essa preferência industrial decorre da relativa simplicidade operacional do sistema cartesiano, cujas coordenadas de movimentação baseiam-se em deslocamentos lineares diretos e independentes nos eixos X, Y e Z (Maia, 2025). Sob essa premissa

tecnológica, foram desenvolvidos os primeiros esboços conceituais do protótipo, voltados à exploração volumétrica preliminar do chassi estrutural, como ilustrado na Figura 22:

Figura 22: Protótipo 01 (Misto): (a) volumes; (b) guias; (c) prismas; (d) chassi em MP.



Fonte: Autora, 2025.

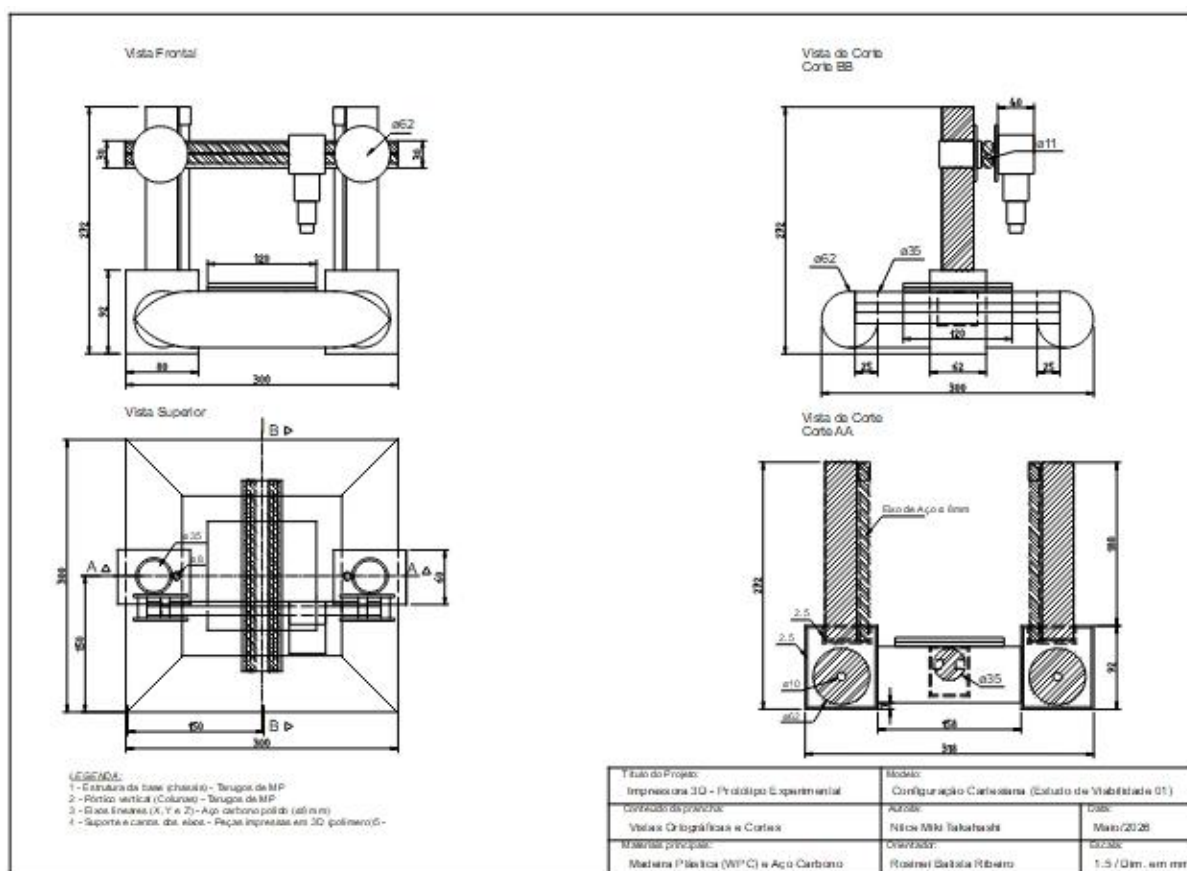
Os resultados principais da pesquisa desenvolvida até este estágio foram obtidos por meio de estudos teóricos direcionados a estabelecer o embasamento necessário para a condução de análises comparativas entre impressoras 3D similares, cujos parâmetros serviram de insumo direto para a posterior projeção de *mockups* físicos. Embora os esboços iniciais tenham explorado a volumetria primária do artefato sob a lógica cartesiana, fez-se indispensável um aprofundamento técnico com base nos modelos consolidados de mercado, utilizando os dados extraídos das fichas de *benchmarking* para o refinamento das metas de projeto na Matriz QFD.

Considerando as especificações dimensionais levantadas, estabeleceu-se que o volume útil de impressão do artefato proposto deveria situar-se na faixa limite entre o mínimo de 210 x 210 x 180 mm e o máximo de 355 x 290 x 430 mm (L x C x H), parâmetros compatíveis com o padrão de equipamentos de classe *desktop*. Essas restrições geométricas tornaram-se condicionantes críticas para o dimensionamento dos tarugos de MP, exigindo que a estrutura apresentasse rigidez mecânica suficiente para suportar a deposição de massas cerâmicas densas e mitigar os efeitos de vibrações harmônicas e ressonância estrutural durante a operação de extrusão. Ademais, buscou-se conceber um arranjo que aliasse a facilidade de replicabilidade do *hardware* à simplicidade de acoplamento dos componentes.

Para conciliar essas metas dimensionais com as propriedades mecânicas e a variabilidade dimensional inerentes à madeira plástica reciclada, as geometrias estruturais da

proposta cartesiana inicial foram detalhadas por meio de representações gráficas bidimensionais normatizadas. Essa etapa viabilizou a transição dos esboços artísticos para um modelo construtivo rigoroso, definindo as tolerâncias de encaixe dos eixos de aço e a distribuição das forças nos elementos de união do chassi, conforme especificado no detalhamento técnico da Figura 23:

Figura 23: Detalhamento técnico do chassi estrutural: Vista Frontal, Vista Superior e Vistas de Corte AA e BB (Dimensões em mm).



Fonte: Autora, 2026.

5.1.3 O desenvolvimento de mockups

A construção de modelos representativos e protótipos físicos preliminares divide opiniões na literatura técnica. Para Martin e Hanington (2012), a prototipagem precoce atua como catalizador para a interação ativa no *design*, servindo de meio de incentivo ao engajamento, ao pensamento subjetivo com o sistema do protótipo, com o serviço, produto ou artefato. Em contrapartida, Ulrich, Eppinger e Yang (2020) afirmam que o protótipo ideal é o

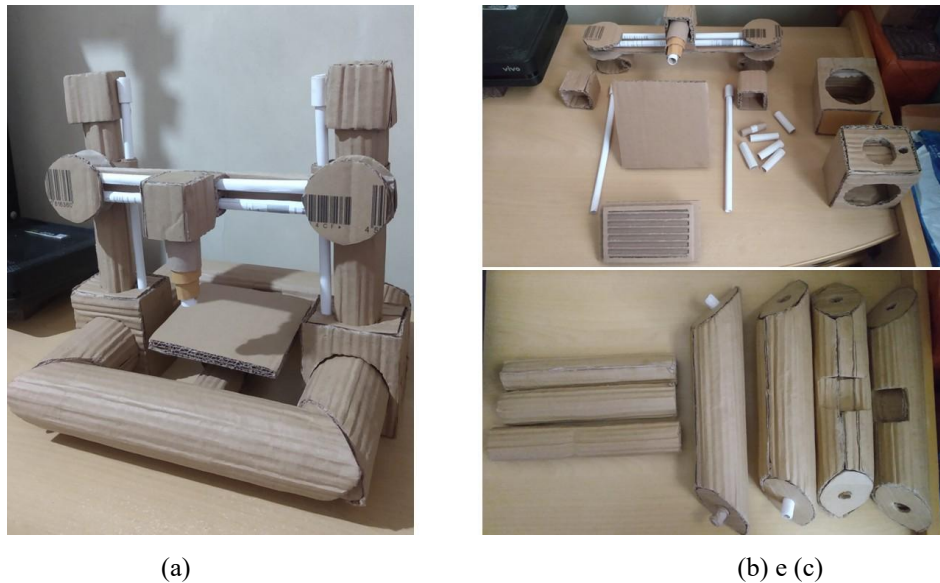
processo de desenvolver algo próximo ao produto, como uma pré-produção de versões tangíveis dele. O protótipo físico pode ajudar a identificar fenômenos não relacionados de início, além de reduzir o risco de custos e iterações. Porém, Baxter (2017) tem uma visão mais crítica. Afirma o autor que só se deve fazer protótipos em último caso, quando for algo estritamente necessário e após esgotar todas as alternativas. Justifica elencando uma sequência de razões para isso: construção de protótipos oneram o projeto em tempo e custo, tiram o foco da equipe (que poderiam empenhar maior esforço em outra atividade mais importante), aconselhando o desenvolvimento de exemplares simples e pouco complexos. Nesse contexto, sugere a opção pelo uso de modelos de aparência ou *mockups*.

A opção por desenvolver *mockups* de modelos para o projeto foi imposta como uma condição para aplicar o QFD junto a um público interessado no equipamento, pois a experiência visual do objeto construído facilitaria a compreensão daquilo que será projetado.

Assim, surgiram dois modelos, em escala 1:1, confeccionados apenas com materiais comuns e de fácil acesso, como papelão ondulado de caixas de embalagens secundárias, fecho plástico, papel e cola branca. Ambos foram estruturados por meio do uso de instrumentos de corte como tesoura, estiletes e furador, sendo criados com as medidas de base e altura próxima de similares do tipo *desktop*, padronizadas em 300 mm x 300 mm.

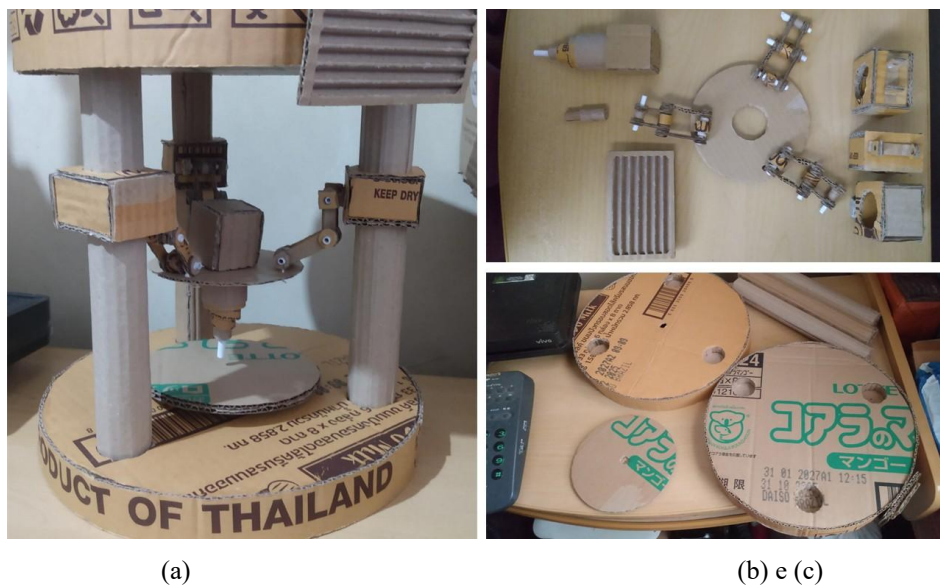
A primeira configuração cinemática materializada buscou simular o arranjo cartesiano, conforme apresentado na Figura 24. Essa montagem inicial serviu para validar a furação e o corte da madeira plástica, porém revelou uma alta complexidade na quantidade de peças necessárias para a estabilidade do sistema. Em contrapartida, a transição para a arquitetura Delta (Figura 25) permitiu que a própria rigidez dos tarugos verticais atuasse como chassi principal, reduzindo significativamente a necessidade de componentes acessórios de fixação.

Figura 24: Protótipo 01: (a) chassi; (b) componentes e guias; (c) tarugos.



Fonte: Autora, 2026.

Figura 25: Protótipo 02: (a) chassi e cabeçote; (b) base e fixadores; (c) estabilização.



Fonte: Autora, 2026.

O papelão é um material de baixo custo que pode ser considerado sustentável, uma vez que foram usados caixas de embalagens secundárias, assim como as aparas de papel (sulfite, kraft, entre outros), materiais facilmente encontrados para descarte e, muitas vezes, em abundância (Caldas, 2019). O material também é empregado em projetos de construção e arquitetura, pois, em comparação a outros materiais convencionais, tem como vantagem a rápida execução da obra, além de ser mais leve e barato, bastante versátil, o método de construção ser limpo e não ter a necessidade de mão de obra especializada, o que pode tornar

atrativo para servir como alternativa na montagem de lares temporários ou emergenciais ou também de caráter provisório (Salado, 2006).

A transição entre o modelo cartesiano e o delta foi motivada pela observação prática durante a confecção dos *mockups*. Enquanto o sistema cartesiano exigia um número elevado de peças funcionais e peças estruturais complexas para garantir a estabilidade da madeira plástica (MP), o sistema delta permitiu uma simplificação da base e o aproveitamento da rigidez natural dos tarugos de madeira plástica dispostos verticalmente.

A partir das explorações iniciais com *mockups* e sistematização das impressões obtidas, aplicou-se a Primeira Etapa da Matriz QFD (Figura 26) para hierarquizar os requisitos dos usuários. O resultado permitiu converter as necessidades dos usuários em parâmetros técnicos mensuráveis, observando-se o destaque dado à importância da precisão dimensional (34%) e do diâmetro estrutural (26%) para a viabilidade do artefato, o que direcionou a pesquisa para a análise de similares que pudessem oferecer tais parâmetros.

Figura 26: Matriz QFD 1 - Requisitos dos usuários e requisitos técnicos.

Características da qualidade		REQUISITOS TÉCNICOS DO PROJETO							
R1 R2 R3	Requisitos do Cliente (Voz do Cliente)	Dados da Escala (Média Likert)	IMPORTÂNCIA (Priorização VoC)	Diâmetro dos Tarugos (6,2 cm e 3,5 cm)	Sistema de União (Parafuso/Cavilha)	Usinagem/ Acabamento de Topo (Planicidade)	Geometria de Encaixe (Macho-fêmea ou sobreposto)	Gabaritos de Furação (Arquivos Digitais/STL)	Especificação de polímero (MP)
	Visibilidade do trabalho	5	5	9	1	9	3	1	9
	Espaço para manuseio	5	5	6	3	9	3	3	0
	Facilidade de limpeza	5	5	6	3	9	3	0	3
	IMPORTÂNCIA TÉCNICA ABSOLUTA		0	100	34	129	43	20	56
	IMPORTÂNCIA RELATIVA		0%	26%	9%	34%	11%	5%	15%
	META DO PROJETO (TARGET - O que o 3D deve ter)		-	Mínimo de Ø60mm Garante o momento de inércia necessário para suportar o peso do extrator cerâmico sem deformação.	Parafusos M5 + Cavilhas Ø8mm Padronização de componentes de mercado (fácil reposição) e travamento mecânico duplo.	Tolerância de ± 0,1mm Garante a planicidade das faces para que a estrutura não apresente desvios de prumo (importante na cerâmica).	Encaixe Macho-Fêmea (15mm) Profundidade suficiente para garantir o alinhamento automático das peças durante a montagem.	Folga de 0,2mm nos guias Precisão necessária para que a furação manual (com furadeira) coincida perfeitamente com o projeto digital.	Madeira plástica Material lavável (essencial para o barro) e com baixa absorção de umidade.
	JUSTIFICATIVAS								

Fonte: Autora, 2026.

5.2 *Benchmarking* e análise de similares

Conforme evidenciado anteriormente, a escassez nacional de impressoras 3D dedicadas à extrusão de massas argilosas no mercado nacional, corroborada pela sondagem de mercado preliminar realizada (Quadro 8), motivou a seleção de equipamentos convencionais de entrada. Estes se aproximam da proposta de um protótipo acessível, menos complexo e passível de reprodução via tecnologia de código aberto (*open source*).

A sistematização baseou-se na metodologia de estudo de concorrentes proposta por Munari (2016), cuja ficha de análise adaptada decompõe o objeto em variáveis funcionais, materiais e construtivas. A seleção resultou em quatro modelos de impressoras, adotando-se como referência comparativa o equipamento DuraPrinter E03 (Sistema Delta), fabricado pela empresa DuraCer.

Contudo, delimitou-se que o foco deste projeto é o desenvolvimento do artefato estrutural, concebido como uma plataforma universal em madeira plástica (MP). Tal escolha visa oferecer a robustez mecânica necessária para suportar diversos cabeçotes de extrusão de mercado, sem a necessidade de desenvolver um sistema de extrusão proprietário, o que extrapola o escopo desta pesquisa. Na sequência, apresentam-se as respectivas fichas de análise (Quadros 10 a 14).

5.2.1 Impressora 3D TINA2

Quadro 10: Ficha de análise de similar 01 - Impressora TINA2.

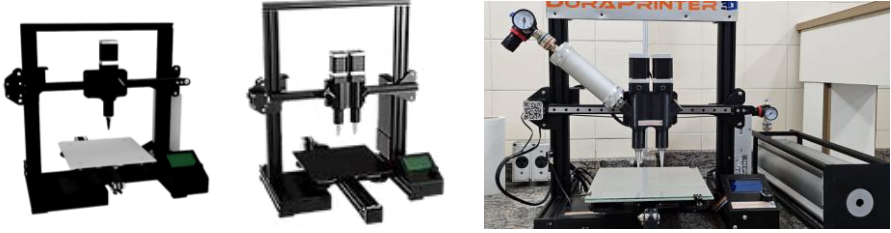
	
MODELO 1: TINA2	
Fabricante (Origem)	Weedo (Jiangsu, China)
Dimensão (LxCxH)	210x210x290 mm (ext.); 100x105x100 mm (área de impressão)
Materiais	Metal, plástico, placa de construção magnética (flex e dobrável), tubo flexível, bico injetor e conjunto de bico de reposição, motor de passo de parafuso, fuso de precisão e arruelas, tampa de proteção, fonte de energia, cabo de conexão USB, cartão SD, entradas USB, bico de liberação rápida e suporte de filamento dobrável.
Peso	3 kgs
Cat. de Impressão	Sistema cartesiano, FDM: impressão com filamento colorida PLA, PLA Pro, TPU e Wood
Custo	R\$ 1999,00 a R\$ 2499,00
Valor social	Considerado um modelo para iniciantes, de uso fácil até para crianças, inclusive com dispositivo de segurança interno, bordas arredondadas
Uso declarado	Mini impressora 3D
Funcionalidade	Serve para uso doméstico, escolar e para trabalho em laboratórios como <i>fablabs</i> e espaços <i>makers</i> , usa <i>wi-fi</i> .
Manutenção	A manutenção dos cabos, motor e circuito é favorecida pelo design interior. Já o manuseio do filamento é feito pela parte externa. Uso de fusos para facilitar a troca de peças (motor de passo, fuso de precisão).
Ergonomia	O <i>design</i> contempla os circuitos, motor e cabo na parte interna, enquanto a tela de controle fica na parte superior do aparelho. Compacto, sem pontas externas e o baixo peso facilitam seu transporte. Tampa de proteção impede toque acidental no bico quente e o processamento interno anti-compressão evita que crianças manipulem com o dedo.
Acabamentos	Cantos arredondados, material de acabamento liso, tampa de proteção, placa de construção flexível que facilita destacar o objeto impresso.
Tensão	Entre 110-220V, fonte de energia de 60W.
Software	WIIBuilder, Cura
Arquivo compatível	STL / GCODE / OBJ
Estética	Design limpo, sem muitos cabos desorganizados e aparentes.

Fonte: Sites da Fesmo (<https://fesmo.com.br/wp-content/uploads/2024/04/TINA2-2024.pdf>) e Tina2Shop.

(<https://tina2shop.com.br/impressora-3d-weedo-de-filamento/>)

5.2.2 Impressora 3D C01e C02

Quadro 11: Ficha de análise de similar 02 - impressora 3D C01 e C02.

	
MODELO 2: C01 E C02	
Fabricante (Origem)	Duracer (Itaboraí, Rio de Janeiro, Brasil)
Dimensão (LxCxH)	235x235x180 mm (ext.); 235x190x160 mm (área de impressão)
Materiais	Alumínio estrutural extrudado, plástico, vidro, borracha, aço inox 302, cabos flexíveis, fonte de alimentação, bicos (cabecote de impressão pode variar com um ou dois) e extrusor para argila. Necessário o uso de compressor.
Peso	N/C
Cat. de Impressão	Sistema cartesiano, FDM: impressão exclusiva com argila orgânica ou qualquer material, seja argila ou pasta, que possa ser extrudada.
Custo	A partir de R\$ 23980,00.
Valor social	Única impressora 3D para cerâmica fabricada no Brasil, tem um custo muito elevado e, portanto, não é acessível a todos.
Uso declarado	Impressora 3D exclusiva de cerâmica.
Funcionalidade	O fabricante comercializa esse modelo como de entrada. Descrito como equipamento para prototipagem de corpos cerâmicos a partir da extrusão de barbotinas. Pode funcionar com um ou dois bicos extrusores.
Manutenção	São fabricados de modo a receber outros elementos que podem ser facilmente adaptados ou substituídos, com bico e reservatório para argila.
Ergonomia	O <i>design</i> é mais simples e robusto. A ergonomia está mais relacionada à praticidade na manutenção e no manuseio da argila do que ao conforto do usuário. O equipamento tem redução de vibrações.
Acabamentos	Mais simples, parte das peças são impressas em 3D ou usinadas em CNC. Os cabos são aparentes, assim como o tubo de compressão é externo.
Tensão	127V ou 220V, seleção automática.
Software	Ultimaker Cura, OrcaSlicer e outros.
Arquivo compatível	GCODE
Estética	<i>Design</i> estilo RepRap, com as varetas aparentes, inspirado no modelo Prusa.

Fonte: Site da empresa Duracer (<https://www.duracer.com.br/impressao-3d>) e Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa MCTI (<https://pnipe.mcti.gov.br/equipment/32870>)

5.2.3 Impressora DuraPrinter E03

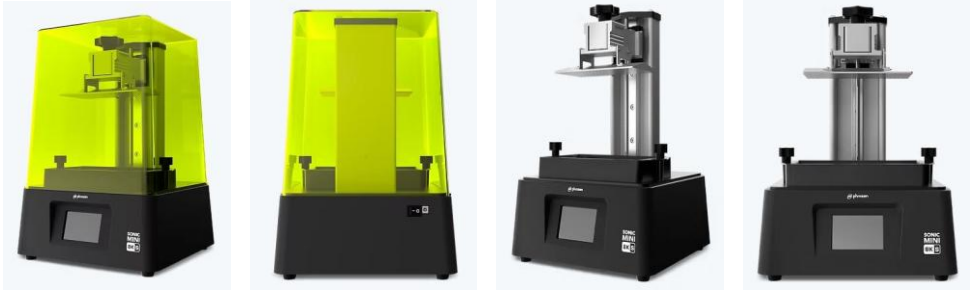
Quadro 12: Ficha de análise de similar 03 - Impressora DuraPrinter E03.

	
MODELO 3: DURAPRINTER E03	
Fabricante (Origem)	DuraCer (Itaboraí, Rio de Janeiro, Brasil),
Dimensão (LxCxH)	690x640x1270 mm (ext.); Ø 300x600 mm (área de impressão cilíndrica),
Materiais	Chapa de aço carbono com pintura eletrostática, aço retificado (eixos), ligas de alumínio, nylon usinado, tubulações poliméricas flexíveis reforçados e bicos metálicos.
Peso	Aproximadamente 40,0 kg (sem o conjunto do reservatório).
Cat. de Impressão	Sistema delta, DIW (Direct Ink Writing/Robocasting): extrusão contínua de massas cerâmicas, argilas e materiais de alta viscosidade.
Custo	Sob consulta (Modelo industrial / laboratorial de alta performance).
Valor social	Impressora 3D de alta robustez mecânica para cerâmica fabricada no Brasil, voltada a laboratórios de pesquisa, universidades e setores industriais avançados.
Uso declarado	Impressora 3D profissional exclusiva para massas argilosas e pastas cerâmicas.
Funcionalidade	Equipamento de alta capacidade operacional. A alimentação ocorre por reservatório de alumínio de 3,5 litros com êmbolo pneumático (suporta até 7,0 Bar). A cabeça de impressão usa uma mini-extrusora à hélice intercambiável para bicos de 2,0 mm a 10,0 mm.
Manutenção	Exige limpeza rigorosa do sistema de extrusão à hélice e do reservatório após o uso para evitar a cura da argila, além de lubrificação periódica das guias lineares verticais.
Ergonomia	O design em torre delta mantém a mesa de impressão totalmente estática na base, eliminando forças de inércia sobre o material depositado, o que previne o colapso estrutural das camadas de argila fresca.
Acabamentos	Carenagem industrial fechada e robusta em aço, blindagem integrada de proteção mecânica para os eixos verticais e reservatório externo montado sobre suporte estrutural.
Tensão	220V.
Software	Ultimaker Cura, Orcaslicer e outros geradores de G-code.
Arquivo compatível	GCODE
Estética	Design robusto, industrial (torre), com pintura eletrostática preta fosca e detalhes em laranja.

Fonte: Adaptado de DuraCer, 2026 e registros da Autora, 2026.

5.2.4 Impressora 3D Phrozen Sonic Mini

Quadro 13: Ficha de análise de similar 04 - impressora 3D Phrozen Sonic Mini.

	
MODELO 4: 3D RESINA PHROZEN SONIC MINI 8K	
Fabricante (Origem)	Phrozen (Taiwan, China)
Dimensão (LxCxH)	290x290x430 mm (ext.); 165x72x170 mm (área de impressão)
Materiais	Acrílico, metal, parafuso do tipo Lead Screw, plástico, entradas USB, fonte de energia, cabos flexíveis, hastes de metal, parafusos, pés de silicone com ventosas.
Peso	10 kgs
Cat. de Impressão	Sistema cartesiano, LCD: impressão de alta precisão, utiliza resinas líquidas fotossensíveis (resinas UV) compatíveis com impressoras 3D do tipo LCD/MSLA, com carga cerâmica.
Custo	A partir de R\$ 4751,22.
Valor social	É um modelo de alta precisão, que consegue imprimir peças de maior qualidade e, apesar de importada e do valor estar na média, não é um aparelho de categoria tão acessível, visto que o kg da resina custa em torno de R\$ 2000,00.
Uso declarado	Impressora 3D de resina com carga cerâmica.
Funcionalidade	Recomendada para impressão de miniaturas, aplicação em odontologia, joalheria de precisão, protótipos pequenos e modelagem artística.
Manutenção	A caixa protetora transparente evita tanto a contaminação externa por pó como garante o processo interno de impressão limpo. O design simples permite fácil acesso aos componentes em caso de reparos.
Ergonomia	O <i>design</i> é limpo e simples, projetado com linhas arredondadas, não possui arestas pontiagudas, o que permite um manuseio confortável ao usuário.
Acabamentos	Acabamento agradável visualmente sem arestas ou quinas, tem o <i>design</i> arredondado..O motor , placa e outros componentes eletrônicos ficam na parte inferior, protegidos e não visíveis, tornando o modelo mais elegante.
Tensão	AC 100-240V; 50/60 Hz.
Software	Lychee, Tango, Chitubox V1.9.6 e superior (ou outros).
Arquivo compatível	.ctb, .prz, .phz
Estética	Visual limpo, colorido, material de acabamento liso.

Fonte: Site da empresa Voxel (<https://www.voxelmanufatura.com.br/product-page/impressora-3d-resina-phrozen-sonic-mini-8k-s-7-1-voxel-manufatura>)

5.2.5 Impressora 3D Tronxy Moore 1 Mini Clay

Quadro 14: Ficha de análise de similar 05 - impressora 3D Tronxy Moore 1 Mini Clay.

	
MODELO 5: TRONXY MOORE 1 MINI CLAY 3D PRINTER	
Fabricante (Origem)	Shenzen Tronxy Tecbnoology Co. Ltd (Shenzen, China)
Dimensão (LxCxH)	355x252x370 mm (ext.); 180x180x180 mm (área de impressão)
Materiais	Acrílico, metal, tubo de plástico, pistão, mangueira plástica, prato de fibra de vidro, pregadores de metal, barra de metal para extrusão, conector pneumático (metal e plástico), entradas USB, fonte de energia, cabos flexíveis, hastes de metal, parafusos, pés de silicone com ventosas, adaptador de energia.
Peso	7,5 kgs
Cat. de Impressão	Sistema cartesiano, LDM: impressão de cerâmica, utiliza argila, pasta cerâmica, porcelana vermelha e outros materiais.
Custo	Entre US\$ 466,65 a US\$ 549.
Valor social	É um modelo projetado para uso doméstico, em atividades de família (porém, não recomendado para crianças sem a supervisão de adultos), tem uma estrutura “tudo em um”.
Uso declarado	Impressora 3D para impressão de cerâmica.
Funcionalidade	Recomendada para impressão de pequenas peças.
Manutenção	O modelo é prático, não precisa de compressor para fazer a extrusão da pasta cerâmica. E as peças são fáceis de montar, desmontar e limpar.
Ergonomia	O <i>design</i> é limpo e simples, funcional.
Acabamentos	Acabamento agradável visualmente, sem arestas ou quinas e <i>design</i> arredondado.
Tensão	AC 100-240V; 24V/4A DC; 50/60 Hz.
Software	Cura.
Arquivo compatível	.stl, .obj
Estética	Visual limpo, sem muitos parafusos e ferragens aparentes, material de acabamento liso, poucos elementos compoendo a máquina e o <i>design</i> parece integrar tudo.

Fonte: Site da fabricante Tronxy (<https://www.tronxy3d.com/products/tronxy-moore-1-mini-clay-3d-printer>)

Após o detalhamento das fichas técnicas, a análise comparativa revelou que o gargalo técnico para a impressão de argila reside na estabilidade da plataforma estrutural. Equipamentos de alto desempenho, como os sistemas da WASP ou a *DuraPrinter* E03, exigem rigidez e absorção de vibrações que superam as capacidades de chassis plásticos convencionais.

Essa constatação confirma a necessidade de uma estrutura em madeira plástica (MP), que oferece a massa e a atenuação mecânica de impacto necessárias, mantendo o baixo custo. Como observado junto a especialistas, a versatilidade do projeto deve permitir que o cabeçote seja substituído; por isso, delimitou-se que o foco deste projeto é o desenvolvimento do artefato estrutural, concebido como uma plataforma universal e modular.

Para consolidar essas metas de engenharia, aplicou-se a Segunda Etapa da Matriz QFD (Desdobramento de Componentes). Esta figura cruza as diretrizes de projeto com a características físicas das peças, definindo parâmetros como a folga de furação e a massa específica do compósito polimérico (Figura 27):

5.3 Desenvolvimento do projeto da impressora 3D com estrutura em MP

Seguindo a etapa de *design* e desenvolvimento do produto preconizado pela metodologia DSR, e partindo das impressões validadas nos *mockups*, avançou-se para o detalhamento técnico do artefato. Nesta fase, o projeto evoluiu para a arquitetura Delta, utilizando os tarugos de MP como elementos lineares estruturais e guias de movimentação.

O foco do desenvolvimento concentrou-se na criação de um chassi universal e robusto, capaz de receber diferentes sistemas de extrusão de mercado. Para simplificar a operação e garantir a acessibilidade do projeto, a estrutura foi dimensionada para suportar extrusores acionados por parafuso ou pistão, eliminando a dependência de sistemas pneumáticos complexos.

Para operacionalizar a seleção dos componentes e dos respectivos processos de fabricação, aplicou-se a Terceira etapa da Matriz QFD (Desdobramento para Processos), que correlaciona as características das peças com os métodos produtivos ideais.

Essa abordagem matricial permite traduzir os requisitos críticos de engenharia em parâmetros de fabricação perfeitamente alinhados à realidade do ecossistema de manufatura nacional. Ao cruzar variáveis como tolerâncias e propriedades do compósito com processos de usinagem, conformação e montagem, garante-se a viabilidade técnica e a reprodutibilidade do equipamento proposto. Os desdobramentos operacionais e os índices de relevância resultantes dessa análise são apresentadas na Figura 28:

Figura 28: Matriz QFD 3 – Desdobramento das características dos componentes em processos de fabricação.

ID	Componente de Projetos (CP)	Importância (%)	OP 1: Impressão 3D	OP 2: Corte	OP 3: Usinagem	OP 4: Furação	OP 5: Acabamento	OP 6: Montagem
CP1	Colunas estruturais	8%	1	3	9	1	3	3
CP2	Suportes de motor	25%	1	1	3	9	1	9
CP3	Fixadores	33%	3	9	9	9	3	9
CP4	Sistema de eixos	14%	3	1	1	9	1	9
CP5	Mesa de impressão	18%	1	9	9	3	9	1
CP6	Lixamento	10%	9	1	1	3	1	3
PONTO DE CONTROLE CRÍTICO (PCC)								
			Verificar adesão e dimensões da base da primeira camada.	Conferir esquadro e comprimento final; usar esquadro metálico de precisão e paquímetro após	Verificar profundidade do rebaiço e sinais de fusão (tomar cuidado para a MP não derreter).	Conferir centralização do gabarito no tarugo (evitar furos "vortos").	Inspeção visual e tátil de rebarbas.	Testar resistência à tração manual; testar encaixe e torque.
	CAPACIDADE ESTIMADA DO		Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta
	IMPORTÂNCIA ABSOLUTA		280	533	634	744	334	725
	IMPORTÂNCIA RELATIVA		9%	16%	20%	23%	10%	22%
	ANÁLISE DA DIFICULDADE TÉCNICA		3	2	5	2	1	3
	META DO PROCESSO		Resolução 0,2mm / Infill > 40%	Corte perpendicular a 90° com tolerância de	Velocidade de avanço constante / Rotação estável	Uso de furadeira de bancada (90°) / Desvio máx. 0,5 mm	Livagem de face/topo com grão 80/120.	Torque manual controlado
	JUSTIFICATIVA		Garante rigidez e precisão dimensional do gabarito.	Garante a planicidade do topo para o encaixe	O calor excessivo da fresa deforma o polímero recalcado.	Evita o desvio da broca e desalinhamento dos tarugos.	Remove rebarbas do polímero que impedem o ajuste fino.	Previne o esparamento das rosas no material composto.
	FERRAMENTA/MÁQUINA		Impressora 3D (FDM)	Serra de esquadria ou	Tupia laminadora ou fresadora	Furadeira com broca de aço	Livadeira orbital ou lima manual.	Chave hexagonal / Manual
Legenda:								
+	Correlação positiva (Apoio)							
-	Correlação negativa (Conflito/Trade-off)							

Fonte: Autora, 2026.

Como resultado da aplicação sequencial das quatro etapas da Matriz QFD, conforme sistematizado na Figura 29, obteve-se uma rastreabilidade metodológica rigorosa, convertendo a “Voz do Usuário” – coletada junto ao painel multidisciplinar de especialistas - em parâmetros nominais de fabricação (QFD 4). Com as tolerâncias críticas de $\pm 0,2$ mm nos furos e as metas de torque manual definidas, consolidou-se um plano de execução que mitiga as incertezas no uso da MP como material estrutural.

Este último desdobramento estabelece os requisitos de controle essenciais para assegurar a conformidade geométrica e funcional do artefato durante a manufatura. Ao cruzar as operações de processo – como corte, furação e montagem – com métodos específicos de verificação (incluindo o uso de gabaritos de furação do tipo passa/não passa e torquímetros), a matriz fixa os critérios de aceitabilidade para a validação do lote piloto. Com a engenharia do chassi devidamente especificada sob a ótica de garantia de qualidade, o desenvolvimento avançou para a elaboração dos modelos técnicos e ilustrações do artefato, apresentados a seguir.

Figura 29: Matriz QFD 4 – Desdobramento da Qualidade (fabricação).

ID	Operações de Processos (OP)	Importância (%)	Requisitos de Controle					
			RC 1: Inspeção Dimensional (Paquímetro/gabarito)	RC 2: Teste de resistência mecânica (Tração/torque)	RC 3: Estabilidade térmica, exposição	RC 4: Checklist de montagem (manual de instruções)	RC 5: Manutenção preventiva de ferramenta	RC 6: Avaliação de usabilidade
OP 1	Impressão 3D	9%	9	1	1	9	3	9
OP 2	Corte	16%	9	3	9	9	1	9
OP 3	Usinagem	20%	9	9	9	9	3	9
OP 4	Furação	23%	9	9	9	3	9	9
OP 5	Acabamento	10%	3	1	9	9	3	9
OP 6	Montagem	22%	3	9	9	0	9	9
OP 7	IMPORTÂNCIA ABSOLUTA		704	650	562	538	704	446
OP 8	IMPORTÂNCIA RELATIVA		20%	18%	16%	15%	20%	12%
OP 9	MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO		Tolerância dimensional rigorosa de $\pm 0,2$ mm nos furos.	Suportar torque de 'X' Nm sem rachar o WPC.	Temperatura de superfície $< 60^\circ \text{C}$ durante a usinagem.	Tempo de montagem inferior a 'Y' minutos (eficiência).	Cronograma de troca de brocas e nivelamento da mesa 3D.	Índice de satisfação $> 80\%$ ou ausência de erros de montagem.
OP 10	FERRAMENTA/MÁQUINA/PROCEDIMENTO		Paquímetro Digital e Gabarito de Verificação (Passa/Não Passa).	Torquímetro e Dinamômetro (ou teste de carga manual com pesos padrão).	Termômetro infravermelho (laser) ou câmera térmica.	Protocolo de verificação (formulário/tablet)	Cronograma de manutenção, kit de afiação/troca.	Questionário de percepção/avaliação (escala Likert) ou teste de montagem "cego".

Fonte: Autora, 2026.

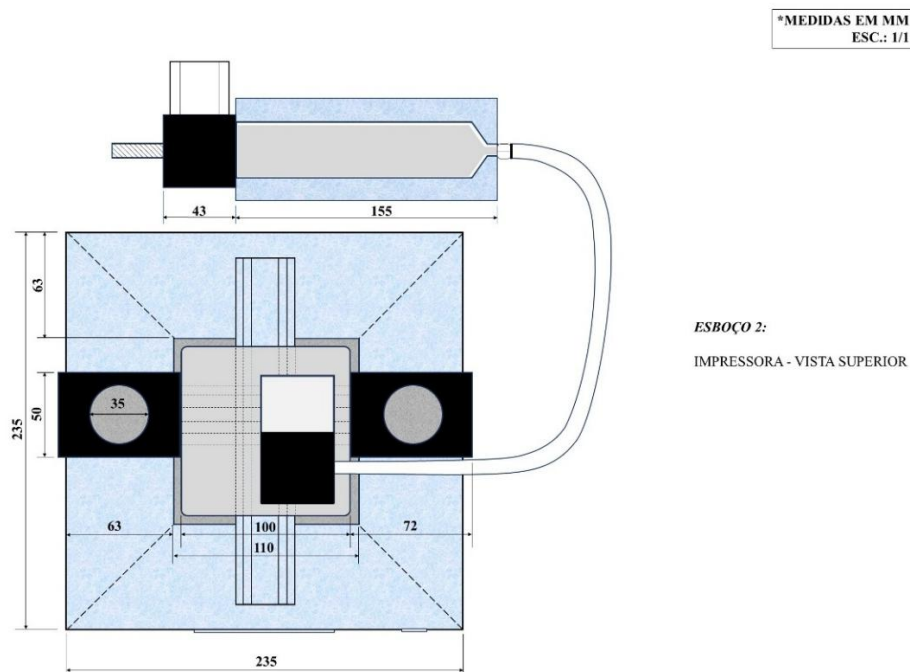
5.4 Esboços e detalhamento técnico do artefato

A evolução dos esboços para o modelo digital final seguiu as diretrizes estabelecidas pelas matrizes QFD (Figuras 26 a 29). Enquanto as representações físicas iniciais (Figuras 24 e 25) focavam na viabilidade volumétrica através de uma estrutura cartesiana simplificada, o refinamento posterior no QCAD® priorizou a estabilidade estrutural e a transição para a arquitetura Delta.

5.4.1 Esboço 1: Modelo cartesiano

A Figura 30 apresenta o primeiro estudo digital do artefato em ambiente CAD. Nesse estágio, explorou-se a viabilidade de um chassi híbrido, utilizando os tarugos de MP como pilares de sustentação de uma estrutura cartesiana. Embora funcional para a escala pretendida, esta configuração evidenciou a necessidade de um sistema de movimentação que minimizasse a inércia sobre a base de impressão, direcionando o projeto para o modelo Delta subsequente.

Figura 30: Vista superior cotada do estudo preliminar em configuração cartesiana.

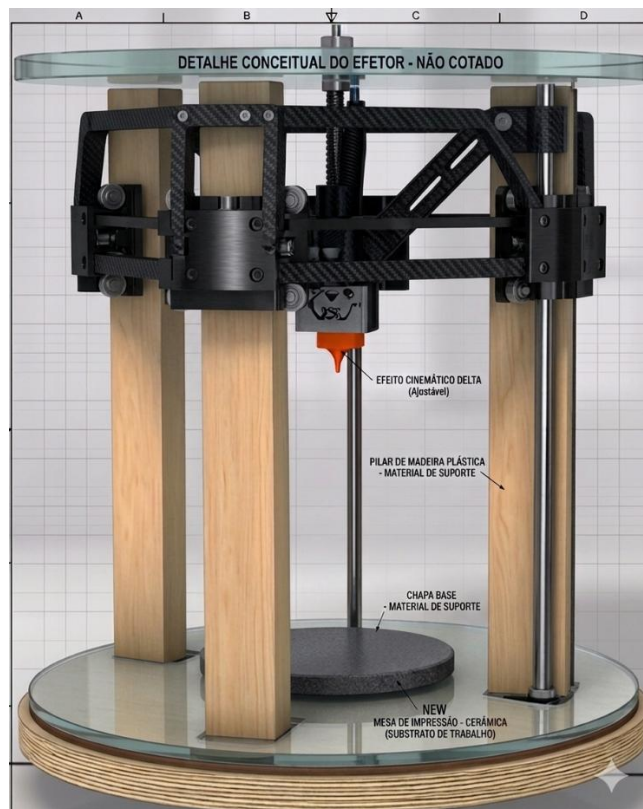


Fonte: Autora, 2026.

5.4.2 Esboço 2: Modelo Delta definitivo

Para solucionar as limitações de estabilidade identificadas no modelo cartesiano conceitual, desenvolveu-se a arquitetura Delta. A Figura 31 apresenta a representação tridimensional (*render*) do artefato, idealizada para integrar as colunas em MP não apenas como suporte, mas como guias estruturais que aproveitam a densidade e propriedades mecânicas do compósito ($\geq 0,95 \text{ g/cm}^3$) para a atenuação de vibrações harmônicas durante o processo de extrusão de materiais viscosos (argila).

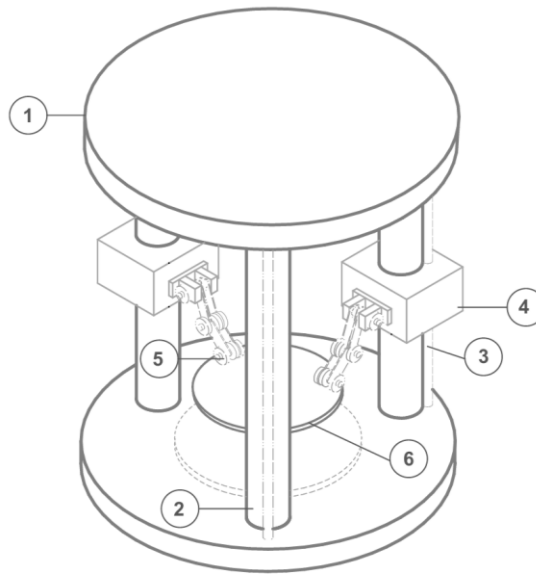
Figura 31: Representação tridimensional (*render*) conceitual da impressora Delta.



Nota: Os elementos e apontamentos visuais na imagem possuem caráter puramente ilustrativo para consolidação do arranjo volumétrico e estético do produto; as dimensões nominais soberanas e os parâmetros exatos de fabricação são estabelecidos nos detalhamentos técnicos sequenciais.

Fonte: Autora, 2026.

Figura 32: Representação isométrica da impressora Delta.



Fonte: Autora, 2026.

A ordenação dos componentes na Figura 32 reflete as especificações de projeto voltadas à estabilidade e precisão do sistema, destacando-se a substituição de elemento poliméricos comerciais por componentes maciços usinados em MP. O arranjo é composto por:

1. Base Superior (Topo): Chapa maciça de MP usinada, atuando como elemento de amarração rígido que garante o paralelismo e travamento das torres estruturais;

2. Colunas Estruturais (Torres): Perfis cilíndricos em Madeira Plástica (Ø 35 mm) que se acoplam por interferência mecânica (encaixe macho-fêmea) diretamente nas chapas da base e do topo, absorvendo as vibrações de alta frequência;

3. Guias Lineares: Barras de aço retificadas (Ø 8 mm) fixadas paralelamente aos tarugos para o direcionamento dos eixos;

4. Carros Deslizantes (Carriages): Suportes poliméricos móveis impressos em PLA (*infill* 80%) que deslizam pelas guias de aço, acionados pelas correias sincronizadas;

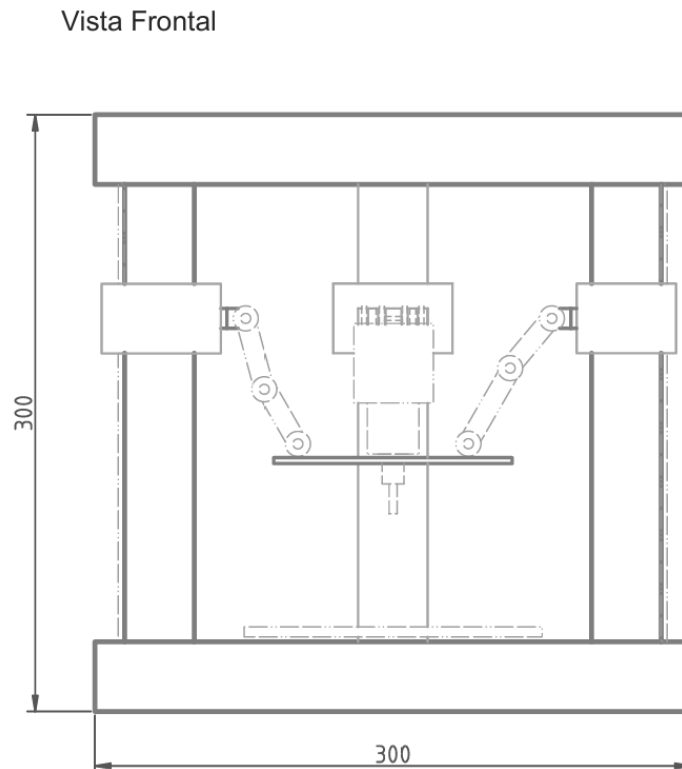
5. Braços Articulados (Bielas): Sistema cinemático Delta de movimentação paralela acoplado ao efector final;

6. Mesa de Impressão: Base estática inferior, suportada por uma chapa maciça de MP, destinada à deposição segura do material cerâmico pesado.

Para complementar a documentação de engenharia e viabilizar a posterior fabricação do sistema, as Figuras 33, 34 e 35 apresentam, respectivamente, a vista frontal cotada do arranjo global, a vista superior com delimitação da área útil cilíndrica e os correspondentes cortes longitudinais de montagem. O detalhamento dessas projeções ortográficas é fundamental para traduzir fisicamente os parâmetros estabelecidos nas etapas anteriores da matriz QFD.

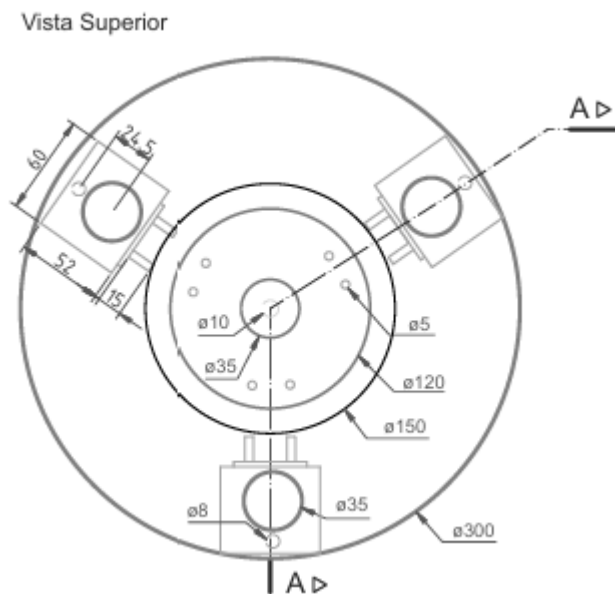
A vista frontal (Figura 33) evidencia a configuração volumétrica externa do chassi estrutural na arquitetura Delta, delimitando os limites tridimensionais máximos que compreendem a estabilidade vertical do protótipo. Por meio desta representação em escala nominal, torna-se possível validar as interações espaciais preliminares entre os perfis guias e os elementos móveis de sustentação do cabeçote:

Figura 33: Esboço 2: Vista frontal cotada do arranjo definitivo em configuração Delta.



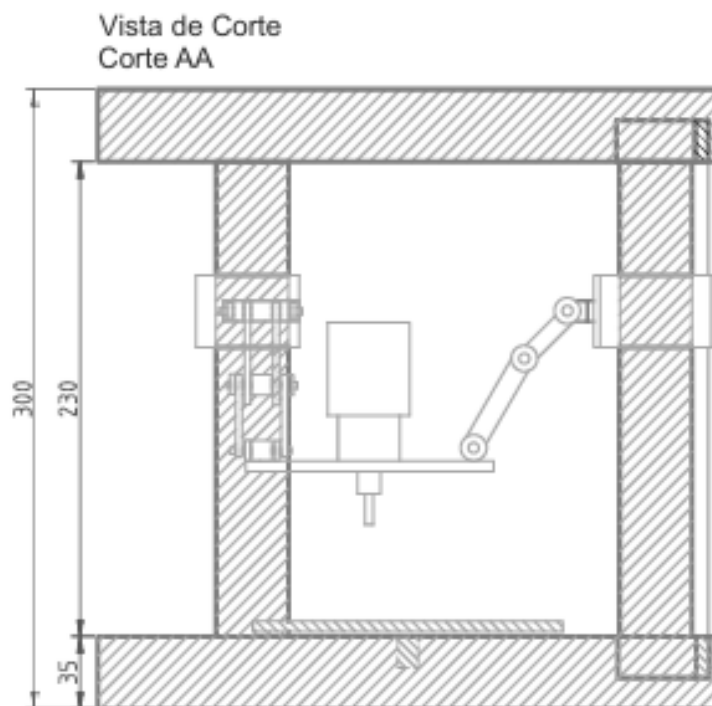
Fonte: Autora, 2026.

Figura 34: Esboço 2: Vista Superior cotada do chassi, evidenciando o posicionamento das torres e a área útil cilíndrica.



Fonte: Autora, 2026.

Figura 35: Esboço 2: Vista de Corte (Corte AA).



Fonte: Autora, 2026.

A compreensão do arranjo geral do chassi, consolidada pelas vistas e cortes macro anteriores, fundamenta a necessidade de detalhar individualmente os componentes customizados em Madeira Plástica (MP). Visto que os demais elementos cinemáticos, motores e eixos constituem itens comerciais padronizados, a replicabilidade do artefato depende diretamente da precisão geométrica e dimensional das peças usinadas.

5.4.3 Detalhamento executivo dos componentes em MP

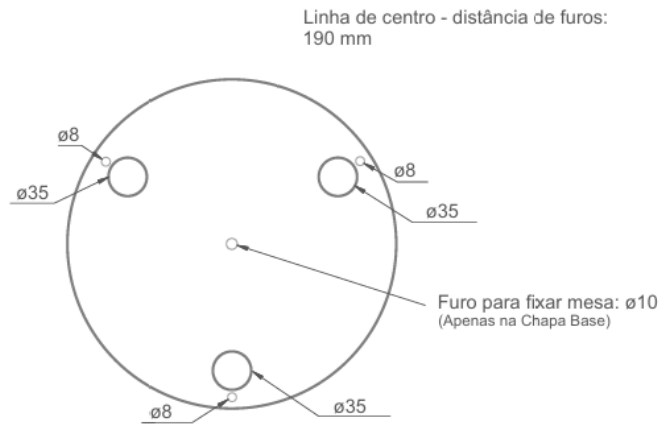
A Figura 36 apresenta o detalhamento técnico bidimensional das chapas da Base Superior (Topo) e da Mesa de Impressão (Base). O desenho especifica os diâmetros nominais das furações de acoplamento das torres ($\varnothing$ 35 mm) e das guias lineares de aço ($\varnothing$ 8 mm), orientados por linhas de centro para garantir o posicionamento coordenado e a conformidade rigorosa com as especificações de depósito de propriedade intelectual do artefato.

Nota-se que o arranjo radial das guias lineares resulta em uma parede remanescente de 3 mm em relação ao rebaixo das torres estruturais e uma borda periférica de segurança. Devido às propriedades de usinabilidade da Madeira Plástica (MP), que tende a sofrer menores tensões de cisalhamento se comparada a polímeros puros, essa aproximação geométrica é viabilizada na manufatura real mediante o uso de usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado) com velocidade de avanço controlada, mitigando riscos de trincas estruturais.

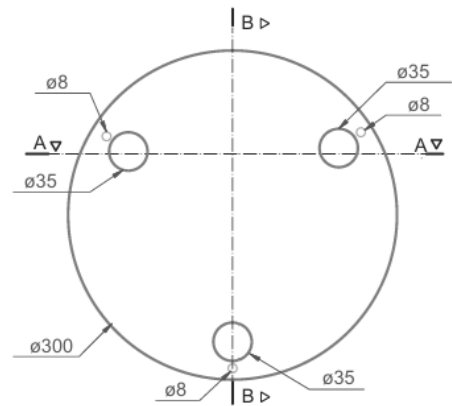
Ademais, a tolerância de ajuste dos elementos comerciais (*carriages*) foi parametrizada para absorver essa interface sem perdas na área útil cinemática. Tal controle dimensional, aliado à rigidez intrínseca do material, permite que o conjunto suporte cargas dinâmicas elevadas sem comprometer a estabilidade do cabeçote, fator determinante para a precisão da deposição da massa cerâmica durante o ciclo de impressão. Complementarmente, o corte longitudinal evidencia a espessura total das chapas e a profundidade de 15 mm dos rebaiços usinados, necessários para o travamento por interferência mecânica.

Figura 36: Detalhamento técnico executivo das chapas em madeira plástica (MP) para o topo e base estrutural.

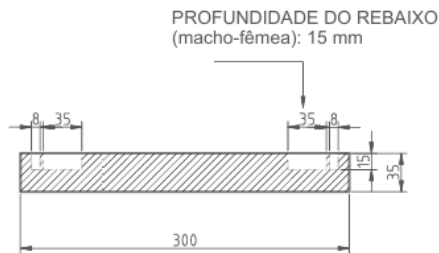
Vista Superior (Chapa base)



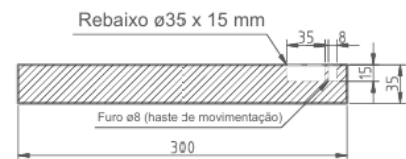
Vista Superior (Chapa topo)



CORTE AA (Típico para Chapa Topo e Base)



CORTE BB (Chapa Topo)



Fonte: Autora, 2026.

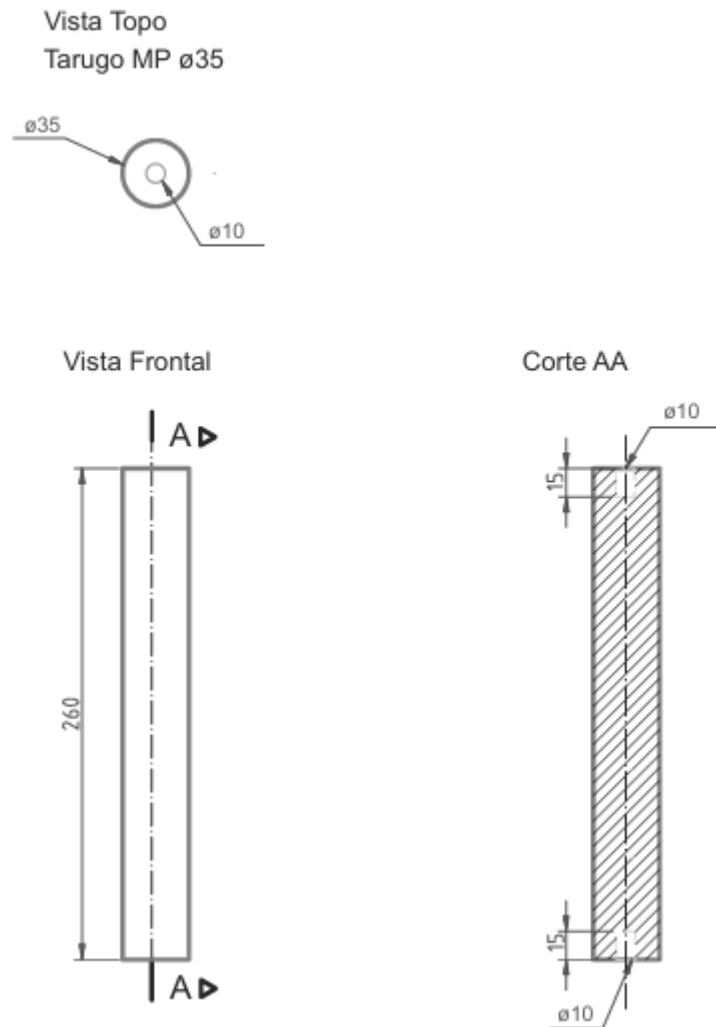
A precisão no posicionamento angular das furações em 120° é o fator crítico para assegurar o paralelismo das guias lineares de aço ($\varnothing 8$ mm). Qualquer desvio centesimal nesta etapa comprometeria a suavidade do deslocamento dos carros (*carriages*), gerando sobrecarga nos motores de passo e imperfeições estéticas nas camadas do material cerâmico extrudado.

Com a ancoragem inferior rigidamente travada na base e a amarração superior garantida pela chapa do topo, o chassi estrutural atinge a rigidez torcional exigida pelo método de desenvolvimento. Desse modo, o subsistema estrutural e o subsistema cinemático encontram-se perfeitamente integrados, restando consolidar os parâmetros operacionais que foram validados junto aos usuários finais.

Para assegurar o paralelismo rigoroso exigido pela cinemática Delta, a Figura 37 detalha o elemento linear vertical (Torre). O desenho técnico especifica o comprimento total do pilar estrutural (260 mm), indicando as furações cegas de acoplamento com 15 mm de profundidade

em ambas as extremidades, delimitando uma extensão útil central de movimentação de 230 mm e o diâmetro de seção de Ø35 mm.

Figura 37: Detalhamento técnico dimensional do pilar estrutural cilíndrico em MP.



Fonte: Autora, 2026.

A consolidação da geometria de fabricação e o arranjo espacial detalhados nas vistas ortográficas, cortes e detalhamentos executivos anteriores validam a viabilidade física do chassi estrutural em formato Delta. A partir dessa modelagem bidimensional e tridimensional parametrizada, torna-se viável traduzir as restrições de projeto e as demandas dos usuários — exaustivamente mapeadas na matriz QFD — em parâmetros numéricos exatos. Dessa forma, o subitem a seguir estabelece a quantificação rigorosa dessas metas globais, correlacionando os componentes mecânicos, eletrônicos e os periféricos de suporte essenciais para a operação estável do sistema de impressão cerâmica.

5.5 Quantificação dos requisitos do produto (valor-meta)

De acordo com a metodologia de Rozenfeld, et al. (2010), as especificações-meta de um produto consistem em informações completas, quantitativas e mensuráveis que subsidiam diretamente a síntese de soluções para o problema de projeto apresentado. No desenvolvimento deste artefato, a definição de tais parâmetros buscou equilibrar a eficiência técnica da manufatura aditiva cerâmica com as premissas ecológicas e estruturais da sustentabilidade.

Importante ressaltar, contudo, que a utilização de materiais reciclados, como a MP e o filamento PLA, representa um avanço pontual no ciclo de vida do produto. Essa escolha não configura, por si só, uma solução de sustentabilidade global. Conforme apontado por especialistas durante o processo de qualificação, o caráter sustentável de um artefato reside na análise integral de sua cadeia produtiva, consumo energético e circularidade, indo além da mera origem da matéria-prima.

Desta forma, o presente projeto assume-se como um passo em direção a iniciativas ambientais específicas, priorizando a redução do uso de polímeros de base fóssil e a exploração de subprodutos industriais (WPC/MP) para aplicações estruturais de alto valor agregado. Para materializar as diretrizes levantadas nas matrizes QFD sob essa ótica, definiu-se a configuração técnica do artefato. O Quadro 15 sintetiza a proposta do modelo básico, estabelecendo a relação entre os requisitos de projeto e a justificativa técnica para cada escolha de material e arquitetura:

Quadro 15: Diretrizes de especificação do modelo básico do artefato e respectivas justificativas técnicas.

CATEGORIA	ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO	JUSTIFICATIVA TÉCNICA (QFD)
Arquitetura	Delta (3 torres verticais)	Estabilidade da base estática para deposição de cerâmica úmida
Material estrutural	Tarugos de madeira plástica (Ø35 mm) e chapas maciças de MP	Absorção de vibrações de extrusão, alta rigidez torcional e sustentabilidade
Material de interface	PLA (Apenas em carros, efetores e suportes menores)	Redução do uso de polímeros de base fóssil, mantendo precisão em peças móveis
Volume de Impressão	Ø200 mm x 350 mm (altura)	Atendimento às necessidades do usuário
Fixação e união	Encaixe por interferência mecânica e parafusos M5	Fixação robusta metal-polímero, garantindo o travamento das chapas e tarugos

Fonte: Autora, 2026.

Cabe ressaltar que o dimensionamento inicial dos perfis cilíndricos de MP foi fixado em Ø35 mm para o modelo básico, garantindo a esbeltez e a viabilidade volumétrica da arquitetura Delta. Todavia, devido à natureza maciça das chapas de base e topo em MP, a interface de

encaixe por interferência mecânica permite uma escalabilidade direta (*upscaling*) para tarugos de até Ø60 mm, caso os testes práticos de calibração exijam uma rigidez torcional ainda maior para suportar sistemas de extrusão cerâmica mais pesados.

Além da estrutura principal, a viabilidade operacional do equipamento depende da integração de sistemas periféricos capazes de suportar as demandas mecânicas da impressão cerâmica. O Quadro 16 detalha os componentes eletrônicos e mecânicos selecionados para garantir o torque e a precisão necessários:

Quadro 16: Especificação técnica detalhada de periféricos e sistemas complementares.

CATEGORIA	ITEM	JUSTIFICATIVA DE PROJETO	REFERÊNCIA/ESPECIFICAÇÃO
Hardware	Barras de aço (Guias)	Garantem rigidez e alinhamento axial dos carros deslizantes.	Barras cilíndricas retificadas de Ø 8 mm (aço SAE 1045)
	Estrutura de fixação	União rígida e transição geométrica das chapas de MP às guias de aço.	Peças modulares impressas em PLA (Infill 80%, camada 0.2 mm)
Eletrônica	Microcontrolador	Processamento central e execução do <i>firmware</i> Marlin/Repetier.	Arduíno Mega 2560
	<i>Shield</i> de potência	Interface para distribuição de corrente aos motores e sensores.	RAMPS 1.4 (ou superior)
	<i>Drivers</i> de passo	Suporte a maior corrente sem superaquecimento e suavização do movimento dos eixos.	DRV8825 (ajustados para 1/32 de passo)
	Motores de passo	Torque necessário para suportar a inércia do cabeçote e os esforços cinemáticos Delta.	NEMA 17 (min. 4.8 kgf.cm)
	Mesa aquecida/base	Adesão da primeira camada e controle de secagem basal da peça.	Tampo de vidro removível com resistência ao aquecimento opcional
Mecânica	Movimentação linear	Reduz o atrito estático e suaviza o deslocamento nas guias de aço.	Rolamentos de esferas recirculantes tipo LM8UU (x12)
	Transmissão	Evita alongamento sob tensão, mantendo a precisão do passo (2 mm).	Correias GT2 (Passo 2mm) com alma de fibra de vidro (anti-alongamento).
	Acoplamentos	Absorção de desalinhamentos radiais e axiais.	Acopladores flexíveis de alumínio (5x5 mm ou 5x8 mm)
Sistema de extrusão	Extrator de argila	Fluxo contínuo da massa cerâmica, eliminando bolhas e gotejamentos.	Extrusora por rosca sem fim (Tipo “WASP” ou similar (customizada))
	Propulsão de material	Depósito mecânico por pistão ou cartucho pressurizado (Cartucho de alumínio/PVC 500 ml).	Suporta a alta viscosidade e reologia da argila, empurrando o material com pressão constante.

Fonte: Autora, 2026.

A escolha pelo conjunto integrado RAMPS 1.4 e Arduino Mega 2560, detalhada no Quadro 16, foi estratégica para permitir o uso de *firmware open source* (como o Marlin). Essa arquitetura aberta facilita o ajuste fino de parâmetros críticos que, na impressão cerâmica, diferem drasticamente da impressão de polímeros convencionais, tais como a “retração” – essencial para interromper o fluxo do material viscoso sem gerar gotejamento – e a “velocidade de avanço”, que precisa ser perfeitamente coordenada com a taxa de extrusão da argila.

5.6 Dinâmica de cocriação e avaliação conceitual com usuários

Para validar a viabilidade operacional, a percepção sensorial dos materiais recicláveis e a ergonomia de montagem, realizou-se uma dinâmica de *design* participativo com usuários. A atividade seguiu o protocolo aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP).

A amostragem intencional reuniu dois profissionais com perfis complementares, representando o público não especialista em manufatura aditiva cerâmica, ideal para testar a usabilidade sob uma perspectiva real de mercado:

- **Participante 1 (Gestão/Mercado):** Economista, sem letramento prévio em engenharia mecânica, focado na avaliação da clareza cognitiva do arranjo estrutural;
- **Participante 2 (Design Digital):** *Designer* Digital, familiarizado com interfaces visuais, mas sem experiência prática em modelagem 3D ou fabricação digital.

A dinâmica de 120 minutos usou maquetes de estudo (*mockups*) e kits com componentes simulados (tubos metálicos para o cabeçote, fixadores, parafusos, gabaritos em papelão) e amostras reais de Madeira Plástica (MP) e WPC para ensaios táteis e visuais. Conduzido de forma colaborativa, o ensaio gerou dados qualitativos documentados no Apêndice A. O perfil amostral dos especialistas do Grupo Focal (GF) é sintetizado no Quadro 17:

Quadro 17: Perfil amostral dos profissionais especialistas do Grupo de Foco (GF).

Perfil dos profissionais participantes	Qtde.	Critério de seleção / Afinidade técnica
Engenheiros e Designers de Produto	6	Domínio em modelagem geométrica e desenvolvimento de produto.
Técnicos e operadores de manufatura aditiva	3	Experiência prática na operação e manutenção de impressoras 3D.
Usuários Hobbistas / Ceramistas	3	Familiaridade com processos de extrusão ou manufatura aditiva.

Fonte: Autora, 2026.

A resposta qualitativa e comportamental dos grupos gerou dados valiosos para o refinamento paramétrico do projeto, sintetizados a seguir:

- Lógica de Montagem e Ergonomia:** Os participantes compreenderam com facilidade o arranjo Delta em comparação à arquitetura Cartesiana. Para evitar o viés de indução, as instruções limitaram-se a breves explicações sobre os componentes previamente segregados. A clareza geométrica da estrutura Delta conferiu ao sistema a percepção de “kit de montagem intuitivo”, comparado por um usuário à experiência de “montar Lego”. Essa fluidez é justificada pela simetria das torres e pela padronização cinemática. Em contrapartida, o modelo Cartesiano gerou dispersão e monotonia, devido ao elevado número de variáveis e tentativas de acoplamento sem nexos estrutural imediato;
- Percepção dos Materiais Sustentáveis:** Houve consenso positivo quanto à robustez do material. Os usuários destacaram o apelo visual favorável, associado aos conceitos de sustentabilidade e economia circular, evidenciando aceitação da textura superficial que mimetiza a madeira natural. O material transmitiu confiabilidade e resistência física, motivando sugestões de aplicações na construção civil. Sob a perspectiva de peso, as amostras foram consideradas leves devido às dimensões reduzidas e geometria vazada. Contudo, a incorporação de componentes maciços no projeto final atua como decisão de engenharia deliberada, cujo peso superior é desejável para aumentar a inércia do chassi e mitigar as vibrações dinâmicas do sistema de extrusão;

- **Sugestões de Melhorias:** Como contribuições para desdobramentos futuros, apontou-se a necessidade de incluir manuais visuais de instrução (infográficos). Adicionalmente, sugeriu-se um escalonamento dimensional (*upscaling*) do equipamento para expandir a área útil e viabilizar a impressão de peças cerâmicas de maior porte, corroborando a meta de flexibilidade do projeto.

Dessa forma, a dinâmica empírica confirmou as premissas levantadas nas matrizes QFD, consolidando que o uso de subprodutos industriais reciclados atende tanto aos requisitos técnicos de rigidez estrutural quanto às expectativas estéticas e ergonômicas dos usuários finais.

CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu o objetivo de projetar e validar conceitualmente o chassi estrutural de uma impressora 3D para extrusão de material cerâmico, utilizando como insumo a madeira plástica (MP). A integração do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e a modelagem geométrica (CAD), permitiu traduzir sistematicamente as necessidades dos usuários em parâmetros rigorosos e mensuráveis de fabricação.

A transição da arquitetura Cartesiana preliminar para a configuração Delta definitiva mostrou-se uma decisão de projeto acertada. Testes geométricos e as análises em corte evidenciaram que a mesa estática da arquitetura Delta é ideal para a deposição de massas viscosas e pesadas como a argila, mitigando riscos de deformação estrutural durante a manufatura. Além disso, a substituição de componentes comerciais por chapas maciças e pilares estruturais de MP conferiu ao chassi a robustez e a massa inercial necessárias para absorver e amortecer as vibrações mecânicas decorrentes do processo de extrusão.

A validação empírica, conduzida por meio da dinâmica de avaliação conceitual e *design* participativo, reiterou a viabilidade do artefato sob a perspectiva da ergonomia cognitiva e da usabilidade. O *feedback* qualitativo fornecido pelos usuários avaliadores consolidou o caráter intuitivo do arranjo de montagem – assemelhado à clareza de blocos modulares - e validou a aceitação estética e sensorial dos compósitos reciclados. A textura superficial e o aspecto visual mimetizado da madeira plástica reforçaram o apelo sustentável e os preceitos de economia circular intrínsecos ao escopo do projeto.

Como recomendações para trabalhos futuros e continuidade da evolução do Modelo de Utilidade (MU) junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), propõe-se o desenvolvimento de um protótipo físico em escala real que adote uma configuração assimétrica das torres estruturais. Essa variação paramétrica prevê a integração de duas colunas guias com diâmetro nominal de 35 mm e uma terceira torre de carga reforçada, com seção de 62 mm. Esta assimetria justifica-se tecnicamente para concentrar o suporte de carga e a absorção de esforços torcionais no ponto exato de fixação do reservatório de massa cerâmica, otimizando a distribuição de material compósito sem comprometer a leveza cinemática do efector final. Adicionalmente, sugere-se a elaboração de manuais visuais infográficos para o usuário e o escalonamento dimensional (*upscaling*) do equipamento para viabilizar a impressão de peças cerâmicas de grande porte.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST, ABDI. **Modelos de negócios para aprimoramento da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. São Paulo, 2022. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/publicacoes/relatorio_rsu/. Acesso em: 21 maio 2025.
- ABRE. **Protocolo global sobre sustentabilidade de embalagens 2.0**. Tradução de Teddy Lalande e Dixie Toga. São Paulo: ABRE, 2013.
- ABREMA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025**. [S. l.]: Grappa Marketing Editorial, 2025. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 26 jan. 2026.
- ABREU, Fábio de Souza. **QFD - Desdobramento da Função Qualidade - Estruturando a satisfação do Cliente**. São Paulo: RAE Revista de Administração de Empresas, v. 37, n. 2, p. 47-55, abr/jun. 97
- AKAO, Yoji. QFD: Past, present and future. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON QFD, 3., 1997. **Proceedings** [...]. Linköping: [S. n.] 1997. Disponível em: http://www.las.inpe.br/~perondi/19.10.2009/Akao_1997_QFD_History.pdf. Acesso em 06 nov. 2025.
- ALGERI, Carla. Reciclagem e reutilização: é possível transformar o lixo em lucro? **IFSC Verifica**, 20 maio 2024. Disponível em: https://www.ifsc.edu.br/post-ifsc-verifica/-/asset_publisher/uII70Nv266Xk/content/id/13735672/reciclagem-e-reutilização-é-possível-transformar-o-lixo-em-lucro. Acesso em: 11 jun. 2025.
- ALMADA, Agesilau Neiva; QUITES, Maria Regina Emery. **Cerâmica do Vale do Jequitinhonha**: Uma coleção do Museu de História Natural e Jardim Botânico da Universidade Federal de Minas Gerais. Veranópolis, RS: Diálogo Freiriano, 2025.
- ALMEIDA, Aquiles Bezerra. **Madeira plástica**: Estudo de viabilidade técnico e econômico a partir do resíduo sólido. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- ALVES, Danilo Eduardo. **Seleção correta da otimização orientada por DFX ao PDP de uma equipe Fórmula SAE**. 2025. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2025.
- ANDRADE, Patrick Alan de Menezes. **Efeito das dimensões na precisão dimensional de peças fabricadas por impressão 3D utilizando PLA**. 2023. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará. Russas, 2023.
- ARAÚJO, José Victor dos Santos; CLEMENTINO, Thamyres Oliveira; TORRES, Pablo Marcel de Arruda. Systematical Bibliography review and guidelines on additive manufacturing/3D printing oriented to sustainability. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 10, nº 2, p. 81-90, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/269359?show=full>. Acesso em: 24 out. 2025.
- ARTICO, Jair Aparecido; ARTICO, Maria Goreti Lopes. A pandemia, os novos hábitos e o comportamento do consumidor. In: GARCIA, Solimar (Org.). **Gestão 4.0, disrupção e**

pandemia. São Paulo: Blucher, 2021. cap. 12. p. 231-245.

BALDER, Juliane; HAGEDORN, Lisa; STARK, Rainer. A Methodical Concept for the Development of Sustainable Products Through Radical Innovations. In: FUKUSHIGE, Shinichi et al. (Org.). **EcoDesign for sustainable products, services and social systems I.** Singapura: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2023. cap. 8, p. 103-118.

BAUMAN, Zygmunt. **Globalização: As consequências humanas.** Tradução de Marcus Penchel. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1999.

BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos.** Tradução de Itiro Iida. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2017.

BENJAMIN, Walter. **A obra de arte na era de sua reprodutibilidade técnica.** Tradução de Gabriel Valladão Silva. Porto Alegre, RS: L&PM, 2019.

BOLESLAVSKÝ, Adam et al. Study of 3D printing process: Optimization, quality analysis, and comparison of 3D printed and cast ceramic properties. **Open Ceramics**, v. 23, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100797>. Acesso em: 23 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de resíduos sólidos - Planares.** Brasília, DF: MMA, 2022.

BRASIL. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 de ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 16 jun. 2025.

BRITO, Haroldo Lacerda de et al. Análise sobre utilização da madeira plástica: aplicação dos princípios do modelo de economia circular. In: V ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO (EIGEDIN), 5., 2021, Campo Grande. **Anais [...].** Campo Grande: UFMS, 2021. v. 5. n. 1. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/13953>. Acesso em: 13 mar. 2026.

BRITO, Juliana Zadi de; TRINDADE, Christiane Areias. **Compósitos madeira-plástico: tecnologia associada à sustentabilidade.** 2023. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2023.

BROWN, Tim. **Design Thinking: uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias.** Tradução de Cristina Yamagami. Rio de Janeiro: Alta Books, 2018.

BUENO DO AMARAL, Letícia. **Manufatura aditiva de cerâmicas por projeção: projeto de máquina, formulação de suspensões e processo.** 2019, 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

BURNARD, Michael. D.; SCHWARZKOPF, Matthew. Wood-Plastic Composites—Performance and Environmental Impacts. In: **Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts.** Singapura: Springer Science+Business Media Singapore, 2016.

CABRAL, Raquel; GALVÃO, Thiago Gehre (org.). **Guia Agenda 2030: Integrando ODS, Educação e Sociedade**. São Paulo: UNESP, 2024. Disponível em: <https://www.guiaagenda2030.org/>. Acesso em: 11 nov. 2025.

CALDAS Lucas Rosse. Uso do papelão no design e arquitetura: sistematização do processo construtivo para uma produção mais sustentável. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 7., Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2019.

CAMARGO, Ítalo Leite de. et al. Design development of a ceramic DLP 3D printer integrating QFD and Triz, In: ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 26., 2021, Florianópolis. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABCM, 2021.

CAPES. **Relatório Técnico**. Brasília, DF: CAPES, 2019.

CARVALHO, Marly Monteiro de. **QFD Uma ferramenta de tomada de decisão em projeto**. 1997, 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

CAVALCANTE, Livia Teixeira Canuto; OLIVEIRA, Adélia Augusta Souto de. Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. **Psicologia em Revista**. Belo Horizonte, v. 26 nº 1, p. 82-100, jan./abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5752/P.1678-9563.2020v26n1p82-100>. Acesso em: 26 mar. 2026.

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 7 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

CHIXARO, Davi Salvini; DROZDA, Fabiano Oscar; OLIVEIRA, Ricardo Júnior de. Aplicação da metodologia QFD no desenvolvimento de suporte utilizado em drones de corrida feito por manufatura aditiva. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus, ES, v. 10, n. 1, p. 64-78, 2024.

COBO, Barbara, GOMES, Alinne, WALSH, Bianca. Os ODS na produção acadêmica e de extensão da ENCE/IBGE. In: KRONEMBERGER, Denise, ATHIAS, Leonardo, COBO, Barbara (org.). **Reflexões sobre a Agenda 2030: 10 anos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. p. 129-143.

COELHO, Vanessa Andreia Cirne. **U3Design: Metodologia centrada no utilizador para a manufatura aditiva de dispositivos de assistência**. 2024. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Universidade NOVA de Lisboa. Lisboa, Portugal: 2024.

COSTA, Larissa et al. Avançando na economia circular do plástico: avaliação de impacto através de uma perspectiva de sustentabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 44. 2024, Porto Alegre. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2024.

CRESWELL, John W. **Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Tradução de Magda França Lopes. 3. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DIAO, Dieynabou et al. Development and future prospects of 3D printed surimi products: A review. **Applied Food Research**, v. 5, 2025.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JR., José Antônio Valle. **Design**

Science Research: A method for science and technology advancement. Cham, Suíça: Springer International Publishing Switzerland. 2015. 126p.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Agenda de plásticos para empresas 2030**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2025. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/agenda-dos-plasticos-para-empresas-2030>. Acesso em: 26 jan. 2026.

EMOS DE ARAÚJO, Maria Clara et al. Contribuições da engenharia reversa e produção de modelos 3D para o ensino médico. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, 2021.

ESPERANÇA, Fazenda da. **Relatório de atividades da obra social 2024**. Guaratinguetá, SP: Ed. Fazenda da Esperança, 2025. Disponível em: <https://portalfazenda.org.br/?r3d=relatorio-de-atividades-da-obra-social-2024>. Acesso em: 02 dez. 2025.

FABIAN, Michal, HUŇADY, Róbert, KUPEC, František. Reverse Engineering and Rapid Prototyping in the Process of Developing Prototypes of Automotive Parts. **Manufacturing Technology**, v. 22, nº 6, 2022.

FANIO GONZÁLEZ, Ana Maria; JIMÉNEZ MARTÍNEZ, Carlos; DE LA TORRE CANTERO, Jorge. Ilustrando la ética maker: proceso experimental colaborativo en una neoartesanía. València, **EME Experimental Illustration, Art & Design**, nº 12, p. 152–165, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4995/eme.2024.21039>. Acesso em: 25 out. 2025.

FANG, Meichen et al. Enhancing User Experience through Optimization Design Method for Elderly Medication Reminder Mobile Applications: A QFD-Based Research Approach. **Electronics**, v. 12, nº 13, 2860, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics12132860>.

FONGSATITKUL, Thanyatorn; KAINUMA, Yasutaka. Integrating a Voice of Customer to Create the Customer Needs Quality Function Deployment (CNQFD) for a Sustainable New Product Development. **Operations and Supply Chain Management**, v. 14, nº 4, p. 520 – 535, 2021.

FREIRE, Rafaella Nogueira et al. Análise do processo produtivo da madeira plástica desenvolvida pela Fazenda da Esperança em Guaratinguetá, SP - Brasil: um estudo de caso. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 1., 2025. **Anais [...]**. Ponta Grossa: ABEPRO, 2025.

GARAY, Alin L. et al. Use of 3D Printing Models in Orthopedics and Traumatology: Case Series. **Revista de la Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología**, v. 89, nº 3: p. 266-274, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2024.89.3.1839>. Acesso em: 24 out. 2025.

GARCIA, Luis Hilário Tobler. **Desenvolvimento e fabricação de uma mini-impressora 3D para cerâmicas**. 2010, 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GAUTIER, Théophile. **Photo Sculpture**. Paris, Paul Dupont, 1864. Disponível em: <https://play.google.com/books/reader?id=RPNDAAAAYAAJ&pg=GBS.PA14&printsec=frontcover&output=reader&hl=en>. Acesso em: 24 out. 2025.

GONZÁLEZ, Javier Alférez. **Integración y Optimización de un Sistema de Extrusión de Tintas Biocerámicas para Impresión 3D mediante un Router CNC**. 2025, 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Béjar, Universidad de Salamanca, Salamanca, 2025.

GRIFFIN, Abner; HAUSER, John R. The Voice of the Customer. **Marketing Science**, v. 12, nº 1, p. 1-27, 1993.

GUPTA, Ankit et al. Composites (Fiber-Reinforced Plastic Matrix Composites). In: PEI, Eujin et al. (org.). **Springer Handbook of Additive Manufacturing**. Springer Cham: Switzerland, 2023. p. 627-637.

HASANOV Seymur et al. Environmental Health and Safety II. In: PEI, Eujin et al. (org.) **Springer Handbook of Additive Manufacturing**. Springer Cham: Switzerland, 2023. p. 547-557.

HATCH, Mark. **The Maker Movement Manifesto: rules for innovation in the new world of crafters, hackers, and tinkerers**. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

HELIAS, Virginie. Changing the paradigm to enable and inspire responsible consumption. In: SZAKY, Tom (Org.) **The Future of Packaging: From linear to circular**. Oakland, CA: Berrett-Koehler Publishers, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022: População e Domicílios - Primeiros Resultados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama da cidade de Guaratinguetá, São Paulo**. Rio de Janeiro: IBGE Cidades, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/guaratingueta/panorama>. Acesso em: 15 nov. 2025.

IDEO. **Human Centered Design: Kit de ferramentas**. 2. ed. São Paulo: IDEO, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (Brasil). **Manual Básico para Proteção por Patentes de Invenções, Modelos de Utilidade e Certificados de Adição**. Rio de Janeiro: INPI, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (Brasil). **Manual de Desenho Industrial**. Rio de Janeiro: INPI, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/desenhos-industriais/manual-de-desenho-industrial>. Acesso em: 16 abr. 2026.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Agenda 2030: objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 9: construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação**. Brasília: Ipea, 2024. 25 p. (Cadernos ODS, 9). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ri2024ODS9>. Acesso em: 21 jun. 2025.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Agenda 2030: objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 11: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis**. Brasília: Ipea, 2024. 18 p. (Cadernos ODS, 11). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ri2024ODS11>. Acesso em: 21 jun. 2025.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Agenda 2030:** objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 12: consumo responsável – assegurar padrões de consumo e produção sustentável. Brasília: Ipea, 2024. 19 p. (Cadernos ODS, 12). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ri2024ODS12>. Acesso em: 21 jun. 2025.

ISHAK, Aulia et al. Integration of Kano Model and Quality Function Deployment (QFD) to Improve Product Quality: A Literature Review. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 1003, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1003/1/012025>.

JANUÁRIO, Emiliane. **Práticas de identificação e busca de informações em benchmarking utilizadas por grandes empresas no Brasil**. 2003, 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

KERR, Tyler. **3D Printing: Introduction to Accessible, Affordable Desktop 3D Printing**. Cham, Suíça: Springer Cham, 2022.

KEWUYEMI, Yusuf Olamide; KESA, Hema; ADEBO, Oluwafemi Ayodeji. Trends in functional food development with three-dimensional (3D) food printing technology: prospects for value-added traditionally processed food products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 61, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1920569>.

KIELING, Antônio Cláudio; SANTANA, Genilson Pereira; SANTOS, Maria Cristina dos. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. **Revista Scientia Amazonia**, Manaus, v. 8, nº 1, p. B1-B14, 2019.

KISHITA, Yusuke et al. (org.). **EcoDesign and Sustainability I - Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management**. Singapura: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021.

KLAHN, Christoph; BUTLER, David; PEI, Eujin, Economics of Additive Manufacturing. In: PEI, Eujin et al. (org.). **Springer Handbook of Additive Manufacturing**. Cham, Suíça, 2023. p. 31-42.

KRONEMBERGER, Denise; ATHIAS, Leonardo; COBO, Barbara (org.). **Reflexões sobre a Agenda 2030: 10 anos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

KOMARIAH, Siti Hajar; SAEDUDIN, Raden Rohmat. Analysis of Web Browser Design Improvements based on Customer Voice using Quality Function Deployment. In: SULISTIYANI, M. D.; NUGRAHA R. A. (org.), **Proceedings of the International Conference on Enterprise and Industrial Systems (ICOEINS 2023)**. Cham, Suíça: Springer, 2023. (Advances in Economics, Business and Management Research, v. 270). DOI: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-340-5_22.

KONG, Mário S. Ming. **Dobragem de papel para arquitetura e design: exercícios para a exploração de formas, volumes e composição no desenho conceptual**. Lisboa: Archi&Book's, 2022.

LACERDA, Daniel Pacheco, *et al.* Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 20, nº 4, p. 741-761, 2013.

LAMNINI, Soukaina, et al. Robocasting of advanced ceramics: ink optimization and protocol to predict the printing parameters - A review. **Heliyon**, Cambridge, MA, v. 8, nº 9, 2022.

LEITE, Gerson Lima; PILATTI, Luiz Alberto; MIQUELIN, Awdry Feisser; POSTIGO, Manuel Pedro. Explorando o potencial da impressão 3D na fabricação de instrumentos musicais: Revisão sistemática. **Revista Vórtex**, Curitiba, v. 12, nº 1, p. 1-23, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.33871/vortex.2024.12.8611>. Acesso em: 21 out. 2025.

LIMA, Lilian Albuquerque Carvalho de et al. **Economia Circular e Reinserção Social: Análise da Produção de Madeira Plástica em uma unidade de Comunidade Terapêutica da Fazenda da Esperança[®], como Estratégia de Sustentabilidade e Reabilitação**. 2025. Manuscrito não publicado. In: SIMPÓSIO DOS PROGRAMAS PROFISSIONAIS DE PÓS-GRADUAÇÃO, 20., 2025, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: CGPEP, nov. 2025.

LOPES, Felipe de Jesus, et al. Uso da engenharia reversa para recuperação de suportes de ferramentas de usinagem. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, nº 7, p. 01-20, 2024.

LOPES, Marcelo; WILTGEN, Filipe. Fusão da manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 44, nº 1, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5020/23180730.2023.11994>. Acesso em: 23 out. 2025.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MAIA, Gonçalo Alexandre Lopes. **Projeto de uma Impressora 3D baseada num braço robótico de 6-eixos**. 2025, 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2025.

MANTUANI, Adnilson Cesar. **Importância do uso dos sistemas CAD/CAM/CNC na usinagem de machos e cavidades de moldes para termoplásticos**. 2017. 15 f. Monografia (Especialização em Usinagens Especiais) - Faculdade de Tecnologia Senai Roberto Mange, Campinas, 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/122094330/IMPORTANCIA_DO_USO_DOS_SISTEMAS_CAD_CAM_CNC_NA_USINAGEM_DE_MACHOS_E_CAVIDADES_DE_MOLDES_PARA_TERMOPLASTICOS. Acesso em: 12 mar. 2026.

MAPBIOMAS. **RAD2024: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2024**. São Paulo: MapBiomass, 2025. DOI: 10.1088/1748-9326/ac5193. Disponível em: https://alerta.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/17/2025/05/RAD2024_15.05.pdf. Acesso em: 06 nov 2025.

MARTIN, Bella; HANINGTON, Bruce. **Universal methods of Design**. Beverly, MA: Rockport Publishers, 2012.

MATHIAS, Guilherme Manoel, et al. **Impressora 3D por Extrusão de Massa Cerâmica. Ciência e Engenharia de Materiais: Princípios e Fundamentos em Pesquisa**. 1 ed. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2022, v. 2, p. 93-106. DOI: <https://dx.doi.org/10.37885/221010691>.

MATOS, Victor Hugo Miranda de. **Viabilidade de substituição da madeira natural e compensada pela madeira plástica para uso temporário em obra situada no município de**

Osasco/SP. 2017, 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2017.

MAXIQUIM. **Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no Brasil 2025** (Ano-Base 2024). Porto Alegre: Maxiقيم, 2025. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2025/09/indice-pesquisa-reciclagem-2025-mpt.pdf>. Acesso em 03 fev. 2026.

MCELROY, Kathryn. **Prototyping for Designers: Developing the best digital & physical products**. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2017

MENICHELLI, David, MAZUR, Glenn H. **Customer-Centric Design: Based on QFD principles**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2025.

MIRA, Maria do Rosário Gonçalves. **Plástico, design e sociedade: transformações suscitadas pelo material plástico, aplicado ao design de produto, na sociedade moderna e contemporânea**. 2021. 377 f. Tese (Doutorado em Design) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MONTEIRO, Hércules M. S.; GARCIA, Lucas J. Utilização do *displacement map* na criação de recursos auxiliares à educação inclusiva para Pessoas com Deficiência Visual. **Revista Design & Tecnologia**, Porto Alegre, v. 12, n° 25, 2022.

MUDAU, Masala; ADEBO, Oluwafemi Ayodeji. Three dimensional (3D)-printed foods: A review of recent advances in their ingredients, printing techniques, food printers, post-processing methods, consumer acceptance and safety. **Journal of Food Process Engineering**, v. 47, n° 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14621>.

MUNARI, Bruno. **¿Cómo nacen los objetos?: Apuntes para una metodología proyectual**. Tradução de Carmen Artal Rodríguez. 2ª Ed. Barcelona: Ed. Gustavo Gili, 2016.

MÜZEL, Sarah David. **Estudo da usinagem dos compósitos plástico madeira e madeira plástica**. 2017. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

MÜZEL, Sarah David et al. Estudo da vibração e da qualidade superficial de compósitos poliméricos usinados por fresamento tangencial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville. **Anais [...]**. Joinville: ABCM, 2017.

NETTO, Miguel Olimpio de Paula et al. A utilização da manufatura aditiva no desenvolvimento de novos produtos e tecnologias no Brasil: uma revisão sistemática. **ARACÊ: Direitos Humanos em Revista**, v. 6, n° 4, p. 13674–13714, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/arev6n4-157>. Acesso em: 15 out. 2025.

NIELSEN, Jakob. **Why You Only Need to Test with 5 Users**. Nielsen Norman Group, 2000. Disponível em: <https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>. Acesso em: 14 maio 2026.

OHARA, Wilton Shigueaki. **Estudo das propriedades mecânicas da madeira plástica**. 2011. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

OLIVEIRA, Alessandro de. **Desenvolvimento e construção de uma impressora 3D para obtenção de scaffolds por meio da tecnologia FDM**. 2023. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2023.

OLIVEIRA, E. M. R. DE, OLIVEIRA, E. M., COSTA, R. A. **Madeira plástica**. Salvador: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2013, 2ª Ed. atual. em 05/2022.

PATTON, Michael Quinn. **Qualitative research & evaluation methods: integrating theory and practice**. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2015.

PEI, Eujin. KABIR, Israt Rumana. LEUTENECKER-TWELSIEK, Bastian. **History of AM**. In: PEI, Eujin et al. (org.) **Springer Handbook of Additive Manufacturing**. Cham, Suíça: Springer Cham, 2023.

PEI, Eujin et al. (org.). **Springer Handbook of Additive Manufacturing**. Cham, Suíça: Springer Cham, 2023.

PEREIRA, Mateus V. et al. Guia detalhado para montagem própria de impressoras 3D. **Química Nova**, v. 46, nº 8, p. 822-827, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20230057>. Acesso em: 11 fev. 2026.

ROSENFELD, Henrique, *et al.* **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. 5ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010. p. 232-233.

SALADO, Gerusa de Cássia. **Construindo com tubos de papelão: Um estudo da tecnologia desenvolvida por Shigeru Ban**. 2006, 193 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SANTOS, Aguinaldo dos. **Seleção do método de pesquisa: guia para pós-graduando em design e áreas afins**. Curitiba: Editora UFPR, 2021.

SANTOS, Anderson Ravik et al. Propriedades dos compósitos madeira-plástico e seu uso na construção de decks em substituição às madeiras naturais: uma revisão. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS (EUROELECS), 4., 2021. **Anais [...]**. 2021. p. 358- 372, 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/2527>. Acesso em: 23 fev. 2026.

SANTOS, Bruno P.; SILVA, Nadjane de A.; SILVA, Cíntia da S. B. C. da; LACERDA, Thalita A. S. Industry 4.0: Challenges and opportunities. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, nº 1, p. 111–124, 2018. DOI: <https://doi.org/10.32358/rpd.2018.v4.316>. Acesso em: 20 out. 2025.

SANTOS, Neusa Maria dos. Metodologia de pesquisa utilizando a internet como coleta de informações para realizações de pesquisas. **Brazilian Journal of Business**, Curitiba, v. 6, nº 3, p. 1-10, 2024.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. Belo Horizonte: PUC-Minas, 2004.

SARQUIS, Aléssio Bessa; IKEDA, Ana Akemi; SCHULKA, Adriana Carla. Aplicação do *quality function deployment* no desenvolvimento de produtos: um estudo no setor de eletrodomésticos. **Revista Eletrônica Estratégia de Negócios**, Florianópolis, v. 5, nº 2, p. 138-170, maio/ago. 2012.

SCHWARZKOPF, Matthew John; BURNARD, Michael David. Wood-Plastic Composites - Performance and Environmental Impacts, In: KUTNAR, Andreja; MUTHU, Subramanian Senthilkannan (org.). **Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts**. Singapura: Springer Science+Business Media, 2016, p. 19-43. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5_2.

SHEPHERD BRASIL, Sea. **Raio-X dos resíduos na costa brasileira**: Descobertas da 1ª expedição Ondas Limpas na Estrada. 1. ed. São Paulo: Sea Shepherd Brasil, 2024. Disponível em: https://seashepherd.org.br/files/relatorio_olne.pdf. Acesso em: 20 maio 2025.

SHEREMETIEFF JR, Alexandre; GONÇALVES, Afrânio A. G. Uma introdução às tecnologias de manufatura aditiva em acordo com a ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018. **REUCP**, Petrópolis, v. 14, nº 2, p. 81-91, 2020.

SILVA, Anderson José da. Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) no Brasil: uma análise comparativa do investimento em políticas de inovação. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA, 11., 2024. **Anais...** 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/p/186038?lang=pt-br> Acesso em: 08 fev 2026.

SILVA, Thainy Genny Esteves, *et al.* Economia circular: um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 21, nº 3, p. 951-972, 2021.

SILVA, Gustavo Ambone; GNOATO, João Henrique Araújo. **Construção de um dispositivo de impressão 3D para massa cerâmica adaptado a uma máquina universal de ensaio**. 2017, 145 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

SIWIEC, Dominika; PACANA, Andrzej; GAZDA, Andrzej. A New QFD-CE Method for Considering the Concept of Sustainable Development and Circular Economy. **Energies**, Basel, Suíça, v. 16, nº 2474, p. 1-22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052474>.

SÖDERBERG, Johan, MAXIGAS. **Resistance to the Current**: The dialectics of hacking. Cambridge, MA: The MIT Press, 2022. Disponível em: <https://direct.mit.edu/books/oa-monograph/5494/Resistance-to-the-CurrentThe-Dialectics-of-Hacking>. Acesso em 24 jun. 2025.

SOUTO, Thiago Vinícius Vieira; SOUZA, Marcelo Goulart; FRANK GIL, João Francisco. **Construção de uma impressora 3D para fins didáticos**. Lages, SC: UNIFACVEST, 2019.

STAVROPOULOS, Panagiotis. **Additive Manufacturing: Design, Processes and Applications**. Cham, Suíça: Springer, 2023.

SUZUKI, Gilberto Takashi, et al. SIPOC como instrumento de transformação sistêmica: um ensaio teórico para o desenvolvimento da economia circular no contexto da sustentabilidade global. Curitiba, PR: Studies Publicações Ltda., **Revista Caderno Pedagógico**, v.22, n.12, p. 01-22, 2025.

TABARÉS GUTIÉRREZ, Raúl. La importancia de la cultura tecnológica en el movimiento maker. **ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura**, Madrid, v. 194, nº 789, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3989/arbor.2018.789n3013>.

TAKAHASHI, Nilce Miki et al. Projeto de impressora 3D para obtenção de artefatos cerâmicos. In: **Anais....** Itajubá: UNIFEI, 2025. DOI: <https://doi.org/10.29327/9786527218609.1250326>.

TEIXEIRA, Marco Antônio Casadei; MORAES, Carlos Aurélio; OLIVEIRA, Edson. In: ENCONTRO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DOS PROFISSIONAIS EM ADMINISTRAÇÃO, 8., 2022, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Unisa, 2022. Disponível em: <https://sistema.emprad.org.br/8/anais/arquivos/101.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2026.

UEDA, Edilson. Industrial Designers Towards Design Concepts Based on the Water and Fire Themes — A Review and Comparison of Sustainability Considerations. In: KISHITA, Yusuke et al. (org.). **EcoDesign and Sustainability I: Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management**. Singapura: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021.

ULRICH, Karl T., EPPINGER, Steven D., YANG, Maria C. **Product design and development**. 7 ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.

VACCHI, Marco et al. Industry 4.0 and Smart Data as Enablers of the Circular Economy in Manufacturing: Product Re-Engineering with Circular Eco-Design. **Sustainability**, v. 13, nº 10366, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131810366>.

VICENTE, Inês; GODINA, Radu; GABRIEL, Ana Teresa. Applications and future perspectives of integrating Lean Six Sigma and Ergonomics. **Safety Science**, v. 172, abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106418>.

VOLPATO, Neri (Org.). **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 19 p.

VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas de. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, Neri (org.). **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. p. 15-30.

WILTGEN, Filipe; LOPES, Marcelo. Manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa. **RETEC: Revista de Tecnologias da Faculdade de Tecnologia de Ourinhos, Ourinhos, SP**, v. 15, nº 1, p. 45-63, 2022.

WILTGEN, Felipe; LOPES, Marcelo. Fusão da manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 44, p. 1-16, 2023.

WONG, Wucius. **Fundamentos del diseño bi- y tri-dimensional**. 7. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gilli, 1991. p. 107 e 115.

YEUNG, S. M. C. Integrating SIPOC into responsible programme management for Sustainable Development Goals acceleration. **Corporate Governance and Organizational Behavior Review**, v. 8, nº 3, p. 77–87, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22495/cgobrv8i3p7>.

ZOCCA, Andrea et al. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, potentialities, and opportunities. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 98, nº 7, p. 1983-2001, 2015.

APÊNDICE 1 – PROTOCOLO METODOLÓGICO DA DINÂMICA DE GRUPO FOCAL E COCRIAÇÃO

1) Caracterização dos participantes (Painel de Usuários)

A dinâmica de avaliação contou com a colaboração de 2 (dois) participantes selecionados por amostragem intencional, representando o público-alvo de usuários leigos em engenharia mecânica de manufatura aditiva, o que permitiu testar os fatores de usabilidade e ergonomia cognitiva do artefato:

- **Participante 1 (P1):** Profissional com formação superior em Economia, atuante na área de gestão e mercado. Sem letramento ou experiência prévia em engenharia de máquinas ou softwares de modelagem tridimensional.
- **Participante 2 (P2):** Profissional graduado em Design Digital. Possui familiaridade com o desenvolvimento de interfaces e comunicação visual, porém declarou não possuir experiência prática com modelagem 3D, fabricação digital ou montagem de hardware.

Os instrumentos de pesquisa a seguir foram desenvolvidos sob a égide da Design Science Research (DSR), que foca na produção de conhecimento científico por meio da criação e avaliação de artefatos voltados à solução de problemas reais (Dresch; Lacerda; Antunes, 2015). A coleta de dados foi estruturada para alimentar a matriz do Quality Function Deployment (QFD), método que permite traduzir sistematicamente a "Voz do Usuário" em requisitos técnicos de projeto (Akao, 1990).

A triagem inicial utiliza uma abordagem mista para garantir a validade da amostra (Creswell, 2014). A dinâmica de grupo focal e a manipulação de *mockups* em escala 1:1 fundamentam-se na necessidade de avaliação da experiência do usuário e do *design* emocional, permitindo que os participantes interajam com o volume e a forma do artefato (McDonagh-Philp; Denton, 2000). A mediação do debate segue as diretrizes de Patton (2014) para garantir que as percepções qualitativas sobre ergonomia e sustentabilidade (madeira plástica e cerâmica) sejam capturadas com profundidade e isenção ética. Para a mensuração quantitativa das percepções, utiliza-se a escala Likert, instrumento validado para capturar níveis de concordância.

Os instrumentos de coleta utilizam uma linguagem adaptada à Cultura Maker, visando reduzir a distância entre o pesquisador e o participante e fomentar o engajamento através de termos familiares ao universo STEAM (McDonagh-Philp; Denton, 2000).

Os três instrumentos de coleta estão detalhados na ordem proposta para a aplicação do QFD e do Grupo Focal, sendo que o formulário e a avaliação da escala Likert são digitais e a dinâmica, acontecerá de forma presencial.

2.1) INSTRUMENTO 1: Survey de Caracterização e Triagem (Screening)

Pesquisa de percepção do usuário na criação de impressora 3D para peças de cerâmica **Seção 1: Formulário de interesse e Triagem**

Olá! Para pessoas interessadas em novas tecnologias e soluções como você:

Convido a participar da "**Pesquisa de percepção do usuário na criação de impressora 3D para peças de cerâmica**". Sua seleção foi motivada pelo fato de seu perfil representar uma perspectiva fundamental para este estudo, pois acredita-se que a inovação tecnológica só é efetiva quando integra diferentes visões — desde o conhecimento técnico e profissional até a experiência prática e o olhar do usuário final. Sua participação é essencial para garantir que o design deste equipamento seja, simultaneamente, funcional, acessível e alinhado às reais necessidades do cotidiano.

Seção 2: Sigilo das Informações (Consentimento)

Sigilo das informações

Você está sendo convidado a participar da: "**Pesquisa de percepção do usuário na criação de impressora 3d para peças de cerâmica**" e sua seleção foi pelo fato de seu perfil compor uma amostragem que integra diferentes visões sobre tecnologia e *design*, além de ter conhecimento, experiência e prática com a área pesquisada.

Sua contribuição muito engrandecerá nosso trabalho pois participando desta pesquisa você nos trará uma visão específica pautada na sua experiência sobre o assunto.

Esclarecemos, contudo, que sua participação não é obrigatória. Sua recusa não trará nenhum prejuízo em sua relação com o pesquisador ou com a instituição proponente.

O objetivo deste estudo é desenvolver o projeto de uma impressora 3D doméstica para cerâmica, utilizando madeira plástica como material estrutural, validando seus requisitos técnicos e de usabilidade através da percepção de variados tipos de usuários.

As informações obtidas, por meio desta pesquisa, serão confidenciais e asseguramos o sigilo sobre sua participação. Os dados serão divulgados de forma a não possibilitar sua identificação, protegendo e assegurando sua privacidade. Esclarecemos, ainda, que os Termos assinados pelos participantes serão mantidos em confiabilidade estrita, juntos em um único arquivo, físico ou digital, sob a guarda e responsabilidade deste pesquisador, por um período mínimo de 05 anos.

A qualquer momento você poderá tirar suas dúvidas sobre o projeto e sua participação, ou mesmo desistir da pesquisa. A Dissertação, com os resultados da pesquisa, ficará disponibilizada no site do Programa de Mestrado (<http://www.pos.cps.sp.gov.br/>).

1) Declaro que entendi os objetivos de minha participação na pesquisa e concordo em participar. Registro também que concordo com o tratamento de meus dados pessoais para finalidade específica desta pesquisa, em conformidade com a Lei nº 13.709 – Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD).*

() Sim

() Não

[LÓGICA DO FORMULÁRIO: CRITÉRIO DE EXCLUSÃO – ENCERRAR: PERFIL NÃO COMPATÍVEL]

Seção 3: Perfil (Filtros Éticos e Técnicos)

Para validar os critérios da sua participação na pesquisa, poderia responder às questões abaixo?

2) Qual é a sua “versão” atual? *

() **v1.8 a v2.9** - Explorando novos horizontes e começando a trilha.

[LÓGICA DO FORMULÁRIO: CRITÉRIO DE EXCLUSÃO – ENCERRAR: PERFIL NÃO COMPATÍVEL]

() **v3.0 a v4.5** – Consolidando experiências e hackeando processos.

() **v4.6 a v6.0** – Referência na área e olhar estratégico sobre a prática.

() **v6.0+** – Sênior com foco em mentoria e novos legados.

3) Para fins de transparência ética, você possui colaboração direta em projetos atuais com a pesquisadora? *

() Sim

[LÓGICA DO FORMULÁRIO: CRITÉRIO DE EXCLUSÃO – ENCERRAR: PERFIL NÃO COMPATÍVEL]

() Não

Seção 4: Perfil do Colaborador (Aceitos)

Sobre sua conexão com o universo Maker (hobby, artesanato, faça você mesmo) e Tecnologia:

4) Qual seu nível de escolaridade atual (completo ou em curso)?

(Máx. 3 opções)

() Ensino Médio

() Ensino Técnico

() Ensino Superior (Graduação)

() Pós-graduação Lato Sensu (Especialização/MBA)

() Pós-graduação Stricto Sensu (Mestrado)

() Pós-graduação Stricto Sensu (Doutorado)

4) Qual sua principal área de atuação ou formação?

5) Você já teve contato com a cultura Maker, princípios de aprendizado na prática, resolução criativa de problemas ou mão na massa?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Já ouvi falar

6) Como você se define em relação à Fabricação Digital (Impressão 3D)?

- ☐ **Explorador:** Já ouvi falar, mas nunca tive contato direto com as máquinas.
- ☐ **Entusiasta:** Conheço o processo e talvez já tenha mandado imprimir algo.
- ☐ **Maker/Técnico:** Opero máquinas, modelo em 3D ou trabalho na área técnica.

7) Com que frequência você consome, utiliza ou tem contato com produtos cerâmicos (utilitários, decorativos ou industriais) no seu dia a dia?

- ☐ **Nunca ou raramente:** Quase não tenho contato com objetos de cerâmica além do básico (Ex. Louça de cozinha comum)
- ☐ **Pouca frequência:** Tenho alguns itens, mas não é um material que me desperte atenção constante
- ☐ **Frequência moderada:** Consumo ocasionalmente e valorizo o material
- ☐ **Alta frequência:** Sou um entusiasta, colecionador ou utilizo cerâmica frequentemente em minhas atividades
- ☐ **Muito alta frequência:** Trabalho com cerâmica, sou ceramista ou convivo diariamente com o processo de produção/uso intenso.

8) Ao lidar com novas tecnologias ou *softwares*, você se considera:

- ☐ **Independente** (resolvo sozinho e aprendo rápido)
- ☐ **Assistido** (preciso de manuais ou vídeos explicativos)
- ☐ **Dependente** (tenho dificuldades básicas com interfaces digitais)

9) Qual sua motivação para participar de uma dinâmica de construção de novas tecnologias?

Seção 5: Conclusão da Triagem (Perfil excluído)

Agradeço o seu interesse e a disponibilidade em colaborar com esta pesquisa. Informo que, para esta etapa do estudo, o sistema de triagem identifica perfis que atendam a recortes específicos de idade e ausência de vínculo profissional, visando o equilíbrio das amostras do Grupo Focal. Conforme os critérios estabelecidos, sua participação foi registrada apenas nesta etapa de triagem. Seus dados serão mantidos em sigilo conforme as diretrizes éticas.

Seção 6: Conclusão da etapa de Triagem (Perfil compatível)

Parabéns! Suas informações foram registradas com sucesso e seu perfil está alinhado com os objetivos desta etapa da pesquisa. Em breve, retornarei contato com mais informações da próxima etapa!

**Perguntas com respostas obrigatórias*

2.2 INSTRUMENTO 2: Roteiro do Grupo Focal e Dinâmica Maker

Tempo estimado: 90 a 120 minutos.

ETAPA	TEMPO	ATIVIDADE	OBJETIVO
1. Acolhimento e Contextualização	15 min.	Boas-vindas, apresentação da pesquisadora e breve explicação sobre o conceito de economia circular e o uso da madeira plástica para a estrutura da impressora 3D de cerâmica.	Estabelecer o "horizonte empático" e garantir que todos compreendam o propósito social e tecnológico do artefato.
2. Reconhecimento e identificação por agrupamento	20 min.	Os componentes dos <i>mockups</i> 1:1 são apresentados dispostos sobre a bancada, organizados em grupos por afinidade funcional (ex: bloco da base/sustentação, bloco das torres/eixos e bloco do extrusor/bocal). Os participantes realizam o reconhecimento tátil e visual das peças em separado.	Esta organização reduz a carga cognitiva inicial, permitindo que participantes leigos em impressão 3D infiram a função das peças pela geometria e proximidade, ampliando os horizontes empáticos entre usuário e tecnologia.
3. Dinâmica de Montagem Coletiva Orientada	30 min.	O grupo é convidado a unir os blocos pré-agrupados para formar o equipamento completo. A pesquisadora observa a intuição dos encaixes e a percepção de volume do artefato em escala real.	Validar a usabilidade e a ergonomia do design por meio da manipulação direta de artefatos em escala real.
4. Debate Norteador e Voz do Usuário	30 min.	Discussão mediada pelas seguintes questões: 1. "Ao ver as peças agrupadas por função, o uso do equipamento ficou claro para vocês?" 2. "O que vocês pensam sobre a robustez desse material (madeira plástica) para um equipamento doméstico?" 3. "O que facilitaria a montagem e o uso para quem não é da área técnica?"	Extrair requisitos qualitativos para a matriz QFD , garantindo a isenção e profundidade da coleta.
5. Encerramento e Aplicação da Escala Likert	15 min.	Preenchimento individual do questionário de percepção e agradecimentos finais.	Consolidação quantitativa das impressões colhidas durante a experiência prática e o debate.

***Nota:** A pesquisadora atuará como facilitadora, garantindo que o ambiente maker seja colaborativo e que o nível de conhecimento técnico prévio (ou a falta dele) não seja uma barreira para a expressão das opiniões dos voluntários. O foco da mediação será o acolhimento das percepções subjetivas e a segurança deles durante a manipulação dos modelos físicos.*

2.3 INSTRUMENTO 3: Escala de Validação Técnica e Sensorial (Likert)

Formato: Pesquisa de opinião via formulário digital (acesso via QR Code ou link)

Método de Resposta: Escala Likert de 5 pontos.

Escala de Referência: 1) Discordo Totalmente; 2) Discordo; 3) Neutro; 4) Concordo; 5) Concordo Totalmente

Questionário de percepção técnica e sensorial

Instrução aos Participantes: Com base na sua experiência de montagem e interação com o modelo em escala real, assinale o quanto você concorda com as afirmações abaixo, onde:

- 1) **Discordo Totalmente:** Nada intuitivo/Não funcionou
- 2) **Discordo:** Achei meio ‘bugado’/Precisa melhorar
- 3) **Neutro:** Dá para usar, mas não impressiona
- 4) **Concordo:** Curti/ Design bem resolvido
- 5) **Concordo Totalmente:** Nível Pro/ Super funcional

Seção 1: Blocos das percepções

Bloco A: Usabilidade e Design (Voz do Usuário para o QFD)

- A lógica de montagem (os encaixes e a forma das peças) foi fácil de entender.

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

- O bocal de alimentação de cerâmica parece estar em um lugar acessível para quem vai operar a máquina.

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

- O tamanho total da impressora faz sentido para um uso doméstico ou em um pequeno ateliê

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

Bloco B: Percepção de Material (Madeira Plástica)

- A estrutura transmite a sensação de ser robusta o suficiente para aguentar o tranco do trabalho.

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

- O uso de material reciclado (madeira plástica) agrega valor e me faz ter mais interesse no produto.

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

Bloco C: Percepção final

- Eu me sentiria seguro e confiante para operar essa impressora sozinho (a).

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

- O design visual (estética) está alinhado com o que eu espero de uma tecnologia moderna e sustentável.

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

Nota sobre o Tratamento de Dados: Os dados coletados através deste formulário digital serão armazenados em ambiente em nuvem com acesso restrito por senha à pesquisadora. As respostas são tratadas de forma anônima, garantindo que nenhum participante seja identificado nos resultados da pesquisa, conforme as diretrizes éticas vigentes.

Seção 2 – Finalização e Agradecimento

Sua contribuição foi registrada com sucesso! A autora do projeto agradece sua participação voluntária. Como informado no TCLE, o resultado desta pesquisa será publicado e poderá ser consultado no repositório oficial no site da faculdade. Seus dados foram tratados de forma anônima e segura.

Bloco I: Dinâmica de Montagem e Ergonomia (*Mockups*)

- Considerando o arranjo geométrico tridimensional do modelo Delta, quais foram as principais facilidades ou travas identificadas no alinhamento das torres com as bases superior e inferior?

- Como vocês avaliam a complexidade de montagem deste sistema comparativamente às experiências prévias com a arquitetura cartesiana tradicional?

Bloco II: Análise Sensorial dos Materiais Sustentáveis

Ao manipular as amostras de Madeira Plástica (MP) e WPC, qual é a percepção tátil e visual quanto à robustez, acabamento superficial e mimetismo em relação à madeira natural?

Sob a ótica de aplicação na estrutura de uma impressora 3D cerâmica, a densidade percebida do material transmite confiabilidade contra vibrações dinâmicas de extrusão?

Bloco III: Cocriação e Melhorias Futuras

Caso fosse necessário realizar intervenções imediatas no chassi estrutural para otimizar a rotina operacional do equipamento, quais as modificações geométricas ou de componentes vocês sugeririam?

2) Transcrição Condensada e Notas de Campo

- **Participante 1 (Economia):** Demonstrou facilidade imediata em compreender a lógica de montagem do arranjo Delta, destacando a simetria das torres como um facilitador visual para o acoplamento. Sob a ótica de mercado, validou o apelo estético da Madeira Plástica, associando o acabamento rústico a um forte valor de sustentabilidade.
- **Participante 2 (Design Digital):** Relatou que a clareza geométrica do arranjo conferiu ao sistema a percepção de um "kit intuitivo", comparando os encaixes à experiência de blocos modulares (estilo Lego). Sugeriu o desenvolvimento futuro de manuais puramente visuais (infográficos).

3) Registros fotográficos

Figura 38: Dinâmica de montagem dos *mockups* aplicada com participantes voluntários.



Fonte: Arquivo da pesquisa, 2026.

Figura 39: Voluntários montando os *mockups*.



Fonte: Arquivo da pesquisa, 2026.

Figura 40: Voluntários estão experimentando encaixes e peças durante a montagem.



Fonte: Arquivo da pesquisa, 2026.

Figura 41: Participantes finalizando a montagem dos *mockups*.



Fonte: Arquivo da pesquisa, 2026.

APÊNDICE 2 – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO CONCEITUAL APLICADO AO PAINEL DE ESPECIALISTAS

Consulta Técnica: Validação de requisitos e metas de projeto - Impressora 3D Sustentável

"Prezado(a) Especialista / Entusiasta,

Esta consulta técnica integra a fase de **Desdobramento da Função Qualidade (QFD)** de uma pesquisa de Mestrado focada no desenvolvimento de uma impressora 3D de baixo custo com estrutura em madeira plástica (*upcycling*).

O objetivo deste instrumento é coletar dados técnicos e percepções de especialistas/usuários experientes para a **priorização de requisitos e fixação de metas quantitativas** do equipamento. As suas respostas são estritamente anônimas e os dados serão tratados de forma agregada para fins acadêmicos.

Agradeço imensamente sua contribuição para o avanço da manufatura aditiva sustentável no Brasil."

Seção 1

Perfil Técnico

1

Área principal de atuação/formação: *

- ☐ Design / Arquitetura
- ☐ Engenharia (Mecânica, Materiais, Produção, etc.)
- ☐ Tecnologia da Informação / Computação
- ☐ Artes / Educação
- ☐ Outra

2

Qual seu nível de familiaridade com tecnologias de Manufatura Aditiva (Impressão 3D)? *

- ☐ Leigo (Apenas curiosidade)
- ☐ Iniciante (Já vi operar ou estudei o básico)
- ☐ Intermediário (Opero máquinas esporadicamente / Tenho uma impressora hobby)
- ☐ Avançado / Profissional (Trabalho na área / Pesquisa acadêmica ativa)

3

Sobre o tema "Materiais Sustentáveis e Economia Circular": *

	Muito Baixa	Baixa	Neutra	Alta	Muito Alta
Qual a sua afinidade pessoal com o tema?	☐	☐	☐	☐	☐
Qual a importância que você atribui ao uso de materiais reciclados na indústria hoje?	☐	☐	☐	☐	☐

Avaliação de parâmetros de *Design*

Instrução geral:

4

Para cada afirmação abaixo, selecione o nível de concordância que melhor representa sua percepção técnica com base nas imagens e descrições do protótipo apresentadas: *



	Discordo Totalmente	Discordo	Neutro	Concordo	Concordo Totalmente
Ergonomia: "O volume total do equipamento é adequado para operação em bancadas de trabalho de dimensões padrão (Escritórios/Laboratórios)."	☐	☐	☐	☐	☐
Rigidez Estrutural: "A utilização de madeira plástica (upcycling) na estrutura parece conferir a rigidez necessária para suportar os esforços do sistema de extrusão."	☐	☐	☐	☐	☐
Arquitetura Delta: "O sistema de movimentação Delta é uma escolha técnica pertinente para a produção de objetos com geometria vertical (cerâmica/argila)."	☐	☐	☐	☐	☐
Sustentabilidade: "A proposta de imobilizar resíduos polímeros em um hardware de longa vida útil contribui positivamente para a economia circular."	☐	☐	☐	☐	☐
Manutenibilidade: "O design dos encaixes mecânicos aparenta facilitar a montagem e a eventual substituição de componentes estruturais."	☐	☐	☐	☐	☐

Materialidade e Sustentabilidade Percebida

5

Com base na comparação entre o modelo de estudos (papelão) e as amostras do material final (madeira plástica), avalie as seguintes afirmações: *



PAPELÃO



MADEIRA PLÁSTICA

	Discordo Totalmente	Discordo	Neutro	Concordo	Concordo Totalmente
Estética e Propósito: "A aparência da madeira plástica (textura e cores) comunica de forma eficaz a identidade sustentável e o uso de materiais reciclados no equipamento."	☐	☐	☐	☐	☐
Qualidade Percebida: "A substituição do modelo de estudos pelo material final (madeira plástica) sugere um incremento adequado em termos de durabilidade e robustez para o hardware."	☐	☐	☐	☐	☐

Muito obrigada!!!

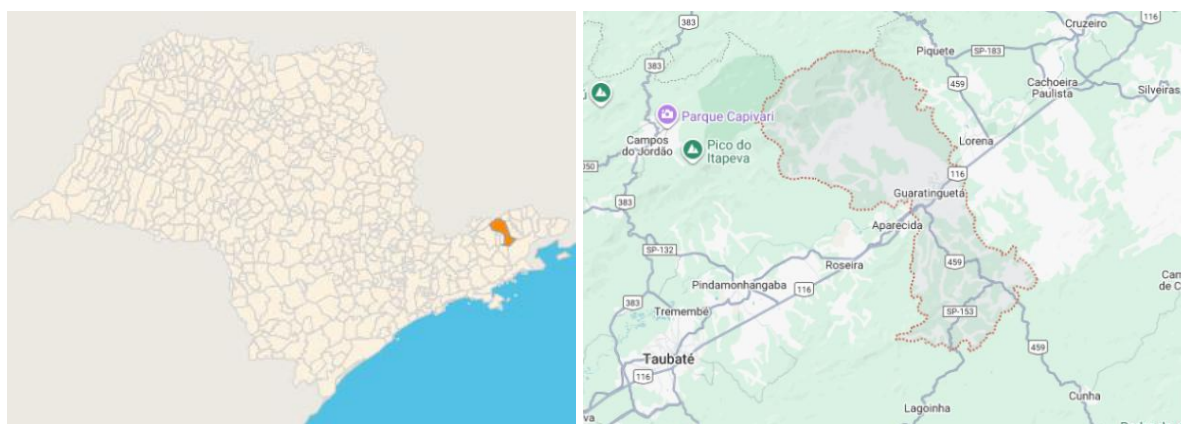
Sua contribuição foi fundamental para o refinamento técnico deste projeto de mestrado.

[+ Adicionar nova pergunta](#)

APÊNDICE 3 – A FAZENDA DA ESPERANÇA® (GUARATINGUETÁ, SP)

Foi realizada uma visita técnica em 22 de agosto de 2025, para conhecer a linha de fabricação da MP em Guaratinguetá, São Paulo. Com uma população estimada em 118.044 pessoas no último Censo Demográfico realizado em 2022 (IBGE, 2022), o município de Guaratinguetá fica no interior do estado paulista e está a cerca de 163 km de distância da capital, na região do Vale do Paraíba (Figura 42):

Figura 42: Mapas do Estado de São Paulo: destaque para o município de Guaratinguetá.



Fonte: IBGE/Google Maps.

A MP é produzida em um amplo galpão da unidade terapêutica masculina da Fazenda da Esperança®, mantida e administrada por uma instituição religiosa chamada Obra Social Nossa Senhora da Glória, presente em todo o território brasileiro, distribuídos em 106 unidades.

O projeto da Fazenda propõe a reintegração de dependentes químicos na sociedade utilizando uma metodologia pedagógica com duração de um ano – embora o interno possa precisar ou ser convidado a ficar mais tempo, caso queira - através de um conjunto de atividades em que o cotidiano os insere entre os pilares "Trabalho (como processo pedagógico), Convivência (em família) e Espiritualidade (para encontrar o sentido da vida)", valores que são cultivados na prática, durante todo o período de internação e de acolhimento.

Separados em grupos, cada um deles é liderado por internos que estão a mais tempo em recuperação, e são os veteranos que orientam os mais novos e estes, por sua vez, estão aprendendo as tarefas enquanto retomam ou reaprendem princípios éticos e morais na prática, como: o convívio com outras pessoas, o respeito aos colegas, a organização do local de trabalho,

a importância de zelar e respeitar regras, cumprir horários, dentre tantas coisas que cada um deve ter perdido ao longo de suas trajetórias (Lima et al., 2025).

Na ocasião, foi destacado que a resolução de conflitos é feita de forma autônoma e pacífica pelos próprios membros, indicando um aprendizado efetivo da disciplina. Tal detalhe é vital, visto que o trabalho envolve o manuseio de equipamentos, ferramentas e produtos químicos que, se não supervisionados, poderiam resultar em acidentes. O programa terapêutico busca, assim, garantir que os internos adquiram a responsabilidade e a consciência de segurança necessárias para preservar a integridade física de toda a equipe e manter a harmonia inclusive em situações tensas.

Durante a visita, foi possível acompanhar o processo de fabricação da MP, produzida para atender uma encomenda, a dos cochos com trilhos para alimentação animal. O comedouro foi construído para ter resistência suficiente e, por conta do peso e tamanho, é equipado com trilhos instalados na base. Esse design garante a mobilidade no pasto, simplificando operações essenciais como a limpeza e a mudança estratégica do local de alimentação dos animais, o que se traduz em maior praticidade.

A fabricação da MP está instalada em um galpão amplo, mantido limpo e organizado pelas equipes, com atividades bem definidas por setor. A instituição recebe doações de algumas empresas, de plásticos provenientes da sobra ou de produtos que não passaram pelo controle de qualidade, de origem industrial. A triagem das doações recebidas é feita pelos próprios internos e de forma manual. Na perspectiva da Economia Circular, o estímulo à reciclagem de materiais e a consequente reestruturação de processos rumo à sustentabilidade representam uma mudança paradigmática nas organizações (Vacchi et al., 2021).

Além da produção de MP, é oferecida a eles a possibilidade de trabalhar em outras linhas, como a da fábrica de água sanitária e em outro setor, chamado de "Harmonia Pesada", com atividades relacionadas à construção civil (Esperança, 2025).

Importante ressaltar que as linhas de trabalhos variam de uma unidade a outra e quando tem programas de capacitação profissional com o apoio de entidades parceiras (SENAI, SENAC, SESC, escolas técnicas, sindicatos, entre outros) e que podem, portanto, incluir a fabricação de doces, pães, biscoitos, artesanatos ou artigos religiosos, cursos que envolvem maquinários, segurança (primeiros socorros, brigada de incêndio), horticultura etc. (idem, p. 12-13).

ANEXO A – PROJETO DE PESQUISA ENVIADO À COMISSÃO DE ÉTICA

PROJETO DE PESQUISA PARA COMISSÃO DE ÉTICA

Título: Projeto de impressora 3D para obtenção de artefatos em cerâmica.

Pesquisador: Nilce Miki Takahashi

Resumo: O estudo propõe o projeto de uma impressora 3D doméstica para obtenção de artefatos em cerâmica, com estrutura em madeira plástica (MP), visando avaliar a viabilidade deste material como alternativa acessível e sustentável. A metodologia adota a abordagem *Design Science Research* (DSR) e o método *Quality Function Deployment* (QFD) focado na experiência do usuário (Voz do Usuário) para coletar percepções de um público misto (leigos e/ou com perfil técnico). A coleta de dados será realizada por meio da técnica de Grupo Focal, utilizando a interação direta com *mockups* físicos (protótipos de baixa fidelidade), permitindo a validação sensorial e ergonômica da estrutura proposta. A partir dessa validação qualitativa, o trabalho resultará em um modelo 2D/3D detalhado, culminando no pedido de registro de Desenho Industrial junto ao INPI.

Palavras-chave: Gestão da Inovação Tecnológica. Impressora 3D. Grupo focal. Madeira Plástica. *RepRap*. *Robocasting*.

Justificativa: A Indústria 4.0 e a Manufatura Aditiva (MA) revolucionaram a produção global através da digitalização e da redução de desperdícios (Santos *et al.*, 2018; Leite *et al.*, 2024). No entanto, o mercado brasileiro de impressão 3D permanece concentrado em polímeros convencionais e tecnologias padrão (Netto *et al.*, 2024), revelando uma lacuna para tecnologias que utilizem outros insumos. A dependência de materiais sintéticos limita a autonomia tecnológica de pequenos produtores e artesãos.

Diante do alto custo das máquinas comerciais, este projeto propõe uma impressora 3D para cerâmica acessível, baseada na cultura *maker* e nos princípios STEAM. O uso da Madeira Plástica (MP) proveniente de resíduos industriais como solução estrutural, promove a economia circular e as ODS, enquanto o uso de material produzido na Fazenda Esperança® (Guaratinguetá-SP) consolida o caráter extensionista da pesquisa, unindo inovação técnica ao impacto social direto e à conscientização ambiental da comunidade.

Objetivo Geral: Analisar o desenvolvimento do projeto por meio da percepção do usuário utilizando a implantação do “Desdobramento da Função Qualidade” (QFD).

Objetivos específicos:

1. Estudar modelos de impressoras 3D comerciais, compatíveis à impressão de argila orgânica/cerâmica;
2. Projetar a estrutura base da impressora 3D utilizando as dimensões de amostra de madeira plástica (MP);
3. Construir *mockups* em papelão para estudo da impressora 3D;
4. Analisar o desenvolvimento do projeto por meio da percepção do usuário utilizando o método “Desdobramento da Função Qualidade” (QFD).

Pergunta de pesquisa: É conveniente utilizar a MP como principal material da estrutura no projeto de uma impressora 3D para obtenção de artefatos cerâmicos?

Método: A pesquisa possui natureza exploratória e abordagem qualitativa predominante, utilizando o método *Design Science Research* (DSR) para estruturar o desenvolvimento de uma impressora 3D doméstica, para peças em cerâmica. O caráter exploratório justifica-se pela busca de soluções para uma lacuna de mercado, permitindo uma investigação profunda sobre a viabilidade da madeira plástica (MP) como material estrutural.

Na etapa de construção do artefato, emprega-se o QFD para traduzir as necessidades dos usuários em especificações de *design*, otimizando a alocação de recursos (Abreu, 1997; Chixaro, Drozda, Silva, 2024). A coleta de dados ocorre por meio da "Voz do Usuário", utilizando a técnica do Grupo Focal, com amostra mista composta por perfis leigos e técnicos. Essa abordagem pode ter sua abrangência ampliada ao consultar um grupo de usuários, desde a fase do *pré-design*, passando por etapas de geração e seleção de conceitos até o seu refinamento (McDonagh-Philp, Denton, 2000).

Diferente de abordagens estritamente quantitativas, a dinâmica fundamenta-se na interação mediada por *mockups* físicos, permitindo a coleta de percepções sensoriais, ergonômicas e funcionais em tempo real (Patton, 2014; Creswell, 2021). Conforme a proposição de Baxter (2017), a aplicação do QFD delimita-se ao desenvolvimento da matriz até

a priorização das metas, fornecendo as diretrizes necessárias para o desenho final e o detalhamento técnico da impressora.

Lócus da pesquisa: A coleta de dados ocorrerá em ambiente físico e síncrono, utilizando a técnica de Grupo Focal mediada por *mockups*. O registro da gravação do áudio será feito pelo *app* Gravador de Voz. Para o registro sistemático das percepções individuais, será utilizado o *app* MS Forms^R, acessível por *link* ou QR *code*. Este instrumento permitirá que os participantes quantifiquem suas impressões sensoriais e funcionais em tempo real, servindo como suporte estruturado para a posterior alimentação da matriz QFD.

Procedimentos do QFD e Grupo Focal: O QFD atua na coleta de impressões dos usuários e no planejamento dos atributos funcionais do produto, correlacionando expectativas qualitativas a requisitos técnicos (Fang *et al.*, 2023; Chixaro, Drozda, Silva, 2024). Para viabilizar a correlação, a técnica do Grupo Focal é adotada como o principal canal para captar a “Voz do Usuário”, fornecendo os dados e as prioridades que alimentarão a Casa da Qualidade (HoQ). Essa ferramenta, por sua vez, organiza atividades inter-relacionadas para alinhar o desenvolvimento do artefato à experiência do usuário, seguindo uma estrutura de priorização e hierarquia (Carvalho, 1997). Para este projeto, as etapas serão as seguintes:

1. **Desenvolvimento de Mockups:** Confeção de modelos físicos em papelão, escala 1:1, para teste de volume e encaixes.
2. **Planejamento do Roteiro e Instrumento de Coleta:** Elaboração de roteiro para condução do Grupo Focal e de um formulário digital (MS Forms^R), com perguntas fechadas em Escala Likert (coleta quantitativa do QFD) e questões abertas para captar percepções qualitativas sobre a viabilidade do uso doméstico.
3. **Dinâmica de Grupo Focal (Voz do Usuário):** Presencial, a sessão de discussão mediada pela pesquisadora, com duração aproximada de 120 minutos, para coleta de percepções sensoriais e funcionais.
4. **Processamento do QFD:** Conversão das médias e *insights* coletados em requisitos técnicos na Casa da Qualidade (HoQ).
5. **Projeto Detalhado:** Refinamento do modelo final em 2D e 3D, para o registro no INPI.

Sujeitos da pesquisa: Alinhada aos conceitos de tecnologia aberta, em que o perfil do usuário final abrange variados níveis de conhecimento técnico, a pesquisa utiliza uma amostragem por variação máxima ou diversidade de perspectiva (Patton, 2014). A amostra é composta por um grupo heterogêneo de participantes, entre leigos e perfis técnicos multidisciplinares em engenharia, *design* ou tecnologia, selecionados nas seções de pesquisas e departamentos estruturais da Superintendência Estadual do IBGE em São Paulo. O objetivo é identificar padrões comuns e necessidades convergentes entre diferentes graus de familiaridade com o processo produtivo. Para a validação dos requisitos, adota-se a triangulação concomitante (Creswell, 2010), integrando dados quantitativos extraídos via Escala Likert e qualitativos, da interação no Grupo Focal, simultaneamente. A abordagem permite a convergência de múltiplas percepções para consolidar as especificações técnicas e funcionais do equipamento na matriz QFD.

Critérios de inclusão e exclusão: Foram definidos os seguintes critérios:

Inclusão: Os participantes da pesquisa devem atender a esses requisitos: serem maiores de 18 anos; ter capacidade de acesso visual e tátil para interagir com *mockups* físicos e poder avaliar volumes e proporções;

Exclusão: Indivíduos que não aceitarem o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE); pessoas com relação direta de trabalho ou cooperação em projetos com a pesquisadora; que declararem total desconhecimento ou incapacidade de interpretação de interfaces digitais e processos de fabricação básica; registros incompletos no formulário digital que impossibilitem a análise no QFD.

Perfis estratégicos (Amostras por variação máxima): Indivíduos com formação ou experiência prévia em:

- **Grupo 1 (Perfil técnico):** Engenharia, impressão 3D, *design* de produto ou áreas correlatas ao desenvolvimento de *hardware*;
- **Grupo 2 (Interessados/Leigos):** *Designers*, entusiastas de tecnologia ou interessados por inovação e sustentabilidade; não possuam conhecimento aprofundado em impressão 3D, representando o público do uso doméstico.

Referências bibliográficas:

ABREU, Fábio de Souza. **QFD - Desdobramento da Função Qualidade - Estruturando a satisfação do Cliente**. São Paulo: Revista de Administração de Empresas, v. 37, n. 2, p. 47-55,

abr/jun. 97

BAXTER, Mike. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. Trad. Itiro Iida. 3ª ed. (5ª reimpressão). São Paulo: Blucher, 2017.

CARVALHO, Marly Monteiro de. **QFD Uma ferramenta de tomada de decisão em projeto**. 1997, 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

CHIXARO, Davi Salvini, DROZDA, Fabiano Oscar, OLIVEIRA, Ricardo Júnior de. **Aplicação da metodologia QFD no desenvolvimento de suporte utilizado em drones de corrida feito por manufatura aditiva**. São Mateus, ES: Brazilian Journal of Production Engineering, v. 10, n. 1, p. 64-78, 2024.

CRESWELL, John W. **Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Trad. Magda França Lopes. 3ª Ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

FANG, Meichen *et al.* **Enhancing User Experience through Optimization Design Method for Elderly Medication Reminder Mobile Applications: A QFD-Based Research Approach**. Electronics 2023, 12(13), 2860. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12132860>

LEITE, G. I.; PILATTI, L. A.; MIQUELIN, A. F.; POSTIGO, M. P. **Explorando o potencial da impressão 3D na fabricação de instrumentos musicais: Revisão sistemática**. Revista Vórtex, Curitiba, v. 12, p. 1-23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.33871/vortex.2024.12.8611>

MCDONAGH-PHILP, D., DENTON, H.G. **User-centred design and the focus group: developing the student designer's empathic horizons**. In: Kimbell, R. (ed.). Design and Technology International Millennium Conference. Wellesbourne: The D&T Association, pp. 111-116, 2000.

NETTO, Miguel Olímpio de Paula *et al.* **A utilização da manufatura aditiva no desenvolvimento de novos produtos e tecnologias no Brasil: uma revisão sistemática**. ARACÊ, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 13674–13714, 2024. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev6n4-157>

PATTON, Michael Quinn. **Qualitative research & evaluation methods: integrating theory and practice** (4th edition). Thousand Oaks: SAGE Publications, 2015.

SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. **Industry 4.0: Challenges and opportunities**. Revista Produção e Desenvolvimento, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 111–124, 2018. DOI: <https://doi.org/10.32358/rpd.2018.v4.316>

ANEXO B – PARECER DA COMISSÃO DE ÉTICA EM PESQUISA

PARECER DA COMISSÃO DE ÉTICA EM PESQUISA DO MESTRADO DO CENTRO PAULA SOUZA

PARECER_S.P. Nº 002/2026

1. PROTOCOLO Nº 004/2026	04/05/2026 Recebido em	2. PARECER EMITIDO EM 04/05/2026
3. TÍTULO DO PROJETO:		
Projeto de impressora 3D para obtenção de artefatos em cerâmica		
4. PESQUISADOR(ES) PROPONENTE(S):		
Nilce Miki Takahashi		
Rosinei Batista Ribeiro		
5. PARECER:		
A Comissão de Ética esclarece que não analisa os aspectos metodológicos da ABNT, haja vista que estes são de exclusiva responsabilidade dos orientadores. Após apreciação do projeto de pesquisa proposto, a Comissão de Ética em Pesquisa resolve: Instrumento de Pesquisa está adequado ao TECLE e se mostra supletivamente aderente ao Projeto de Pesquisa. Parecer favorável à aplicação.		
 Documento assinado digitalmente FRANCISCO DEL MORAL HERNANDEZ Data: 04/05/2026 11:36:56 -0300 Verifique em https://validar.jf.gov.br		
Comissão de Ética em Pesquisa Prof. Dr. Francisco del Moral Hernandez		

**ANEXO C – COMPROVANTE DE DEPÓSITO DE PEDIDO DE PATENTE JUNTO
AO INPI**

*(PESQUISA DESENVOLVIDA NO ÂMBITO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM SISTEMAS PRODUTIVOS DO CENTRO ESTADUAL DE
EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA - COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO,
EXTENSÃO E PESQUISA).*



21/05/2026 870260048369
10:23
29409162357484795

Pedido nacional de invenção; Pedido nacional de modelo de utilidade; Pedido nacional de certificado de adição de invenção; e Entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 20 2026 012495 3

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: NILCE MIKI TAKAHASHI

Tipo de Pessoa: Pessoa Física

CPF/CNPJ: [REDACTED]

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: [REDACTED]

Endereço: [REDACTED]

Cidade: [REDACTED]

Estado: [REDACTED]

CEP: [REDACTED]

País: [REDACTED]

Telefone: [REDACTED]

Fax: [REDACTED]

Email: [REDACTED]

**PETICIONAMENTO
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Petição Eletrônica em 21/05/2026 às 10:23, Petição 870260048369

Dados do Pedido

Natureza Patente: 20 - Modelo de Utilidade (MU)

Título da Invenção ou Modelo de CONFIGURAÇÃO APLICADA EM IMPRESSORA 3D DE

Utilidade (54): MECÂNICA DELTA PARA MATERIAIS CERÂMICOS

Resumo: A presente patente de modelo de utilidade refere-se a uma disposição construtiva introduzida em chassi estrutural de equipamento de manufatura aditiva configurado para a extrusão de massas pastosas e artefatos cerâmicos. O chassi é constituído essencialmente por perfis de Madeira Plástica (MP) obtidos a partir de compósitos poliméricos reciclados, provendo rigidez estrutural e propriedades de amortecimento mecânico aptas a mitigar as vibrações decorrentes dos esforços dinâmicos e da inércia dos eixos mecânicos. O arranjo construtivo é otimizado para arquiteturas cinemáticas do tipo Cartesiana e Delta, empregando chapas usinadas e tarugos de fixação do referido compósito, garantindo estabilidade ao cabeçote extrusor durante o processo de deposição por robocasting. A disposição construtiva resulta em um equipamento de alta robustez, apelo ecológico e simplicidade de montabilidade, reduzindo custos de fabricação e viabilizando o processamento preciso de insumos cerâmicos.

Figura a publicar: 1