

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MINAS, METALÚRGICA E MATERIAIS

FLÁVIA RIBEIRO VIEIRA

DESIGN E MATERIAIS: impressão 3D de PLA em telas de pintura visando a
aplicação em STEAM

Porto Alegre

2024

FLÁVIA RIBEIRO VIEIRA

DESIGN E MATERIAIS: impressão 3D de PLA em telas de pintura visando a aplicação em STEAM

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de “Mestre em Engenharia – Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais”.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Vieira, Flavia
DESIGN E MATERIAIS: impressão 3D de PLA em telas de
pintura visando a aplicação em STEAM / Flavia Vieira.
-- 2024.
129 f.
Orientador: Wilson Kindlein Júnior.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Manufatura Aditiva. 2. Modelagem 3D. 3.
Digitalização 3D. 4. Design & Tecnologia. 5. STEAM. I.
Kindlein Júnior, Wilson, orient. II. Título.

FLÁVIA RIBEIRO VIEIRA

DESIGN E MATERIAIS: impressão 3D de PLA em telas de pintura visando a aplicação em STEAM

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Coordenador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Aprovado em: 31/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Álvaro Meneguzzi (PPGE3M/UFRGS) _____

Prof. Dr. Félix Bressan (DAV/UFRGS) _____

Prof. Dr. Everton Sidnei Amaral da Silva (DEG/UFRGS) _____

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é fruto de muito trabalho, esforço e, principalmente, colaboração. Portanto não posso deixar de agradecer a contribuição daqueles que me auxiliaram de forma didática ou emocional durante a minha jornada.

Especialmente gostaria de dedicar um espaço para honrar a memória de meu pai Paulo Debon Vieira, que sempre foi o maior incentivador ao longo da minha trajetória acadêmica e pessoal. Seus conselhos e confortos foram a fonte de força que me mantiveram em movimento, mesmo diante das dificuldades. Suas lições vão seguir moldando meu caminho. Gostaria também de agradecer minha mãe, Ana Laura Ribeiro, por ter me ajudado a traçar minha trajetória. Às minhas irmãs pelos conselhos e apoio ao longo de todas as etapas, em especial à Bruna, que abraça todos os desafios comigo e sempre sabe o que dizer para me fazer seguir em frente. À minha afilhada Ana Clara, por todo carinho e amor que enriquece minha jornada. Todo meu esforço dedico a ti. À minha dinda Maria Alice por suas palavras de encorajamento.

Um agradecimento especial também ao meu companheiro Gabriel e à nossa pequena família (Mimosa, Guri, Preta, Amarelinha e Pretinha), cujo apoio diário, afeto e encorajamento foram fundamentais para a conclusão dessa etapa.

Ao meu orientador Wilson que desde o princípio transbordou nossas reuniões de ideias, sabedoria e conselhos. Agradeço toda paciência, compreensão e principalmente por compartilhar seus conhecimentos e experiências que me serviram de inspiração.

Agradeço aos meus amigos que foram meus conselheiros e suporte nessa jornada. Em especial ao Thiago, Nicole, Henrique, Luiz Júnior, Leonardo, Gabriela, Juliana, Matheus e Strieder. Nossos momentos de descontração contribuíram de forma significativa para enfrentar os desafios desta jornada.

Agradeço também aos colegas e professores do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM), por todo auxílio, ideais e inspirações. Em especial aos colegas Jaque, Brendon, Ivan, Victor e Pedro.

Por fim agradeço aos professores que tive o prazer de compartilhar essa jornada e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

RESUMO

Ao longo dos últimos anos, a pesquisa em busca de novos produtos avançou consideravelmente. A manufatura aditiva, incluindo a impressão 3D, emergiu como uma ferramenta facilitadora dos processos de criação, oferecendo aplicações diversificadas e rápida prototipagem. Porém, suas possibilidades não devem se restringir apenas ao cenário industrial ou a áreas técnicas inacessíveis ao grande público. Neste contexto, o estudo adotou o conceito STEAM (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática), promovendo uma abordagem de pesquisa que trabalha de acordo com conceitos de criatividade e da perspectiva não convencional para estimular a expressão artística. Destacando a relevância da interdisciplinaridade, sobretudo o papel das artes, a pesquisa explora o emprego da manufatura aditiva no campo das artes. O estudo investiga a viabilidade da impressão de peças em PLA (Ácido Poliláctico), utilizando a técnica FFF (Fabricação com Filamento Fundido), diretamente sobre telas de pintura, visando demonstrar o potencial do STEAM na convergência entre estas áreas de estudo. A análise da viabilidade da técnica envolveu ensaios para avaliar a aderência, acabamento e importância dos parâmetros e materiais usados. Com base nesses conhecimentos, foram desenvolvidos motivos baseados na geometria Voronoi, ilustrando a aplicação artística da técnica. Além disso, a digitalização e modelagem 3D foram utilizadas na execução de diferentes possibilidades de criação utilizando impressão 3D em telas de pintura. Os resultados demonstraram a viabilidade da técnica, possibilitando a interação entre os materiais propostos e evidenciando seu potencial no contexto apresentado. Para a aplicação da técnica, o escopo do presente trabalho indica que os parâmetros definidos para a impressão em PLA sobre telas de pintura, de tectimento 2x1, sejam de 200 °C de temperatura do bico extrusor e 60 mm/s da velocidade de impressão. Quanto à altura da peça, é sugerida uma espessura mínima de 0,36 mm e, para as extremidades, altura máxima de 1 mm. Por fim, é recomendado adotar o procedimento de imprimir a primeira camada sobre a mesa antes de iniciar o processo de impressão desejado na tela.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Modelagem 3D. Digitalização 3D. Design & Tecnologia. STEAM.

ABSTRACT

Over the past years, research in pursuit of new products has significantly progressed. Additive manufacturing, including 3D printing, has emerged as a facilitating tool presented in creation processes, offering varied applications and rapid prototyping. However, its potential should not be limited solely to the industrial field or technical areas inaccessible to the public. In this context, the study implemented the STEAM concept (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics), promoting a research approach that operates through creativity and an unconventional perspective to encourage an artistic expression. Emphasizing the importance of interdisciplinary practices, particularly the role of art, the research explores the use of additive manufacturing in an artistic approach. The study researches the feasibility of printing PLA (Polylactic acid) parts, onto a painting canvas parts, using the FFF (Fused Filament Fabrication) technique directly, focusing on the demonstration of the potential of STEAM in the union of these fields of study. The analysis of the technique's viability involved tests to assess adhesion, surface texture, and the importance of parameters and materials used in the process. Based on this knowledge, Voronoi-based patterns were developed, illustrating the artistic application of the technique. Furthermore, 3D scanning and modeling were employed to explore various creative possibilities using 3D printing on canvases. The results demonstrated the feasibility of the technique, enabling interaction between the proposed materials and highlighting its potential in the presented context. For the implementation of this technique, the scope of this work specifies that the defined parameters for printing on painting canvases, structured with 2x1 weave, using PLA should be a nozzle extrusion temperature of 200°C and a printing speed of 60 mm/s. Concerning the layer height, a minimum height of 0.36 mm is suggested, while a maximum height of 1 mm is recommended for the edges. Lastly, it is advised to adopt the procedure of printing the first layer on the bed before initiating the desired printing process on the canvas.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D Modeling. 3D Scanning. Design & Technology. STEAM.

LISTRAS DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da dissertação: Introdução	17
Figura 2 - Estrutura da dissertação: Revisão bibliográfica	20
Figura 3 - Modelos de ensino transversal	22
Figura 4 – Design como fio condutor na prática de STEAM.....	24
Figura 5 - Representação de design thinking.....	25
Figura 6 - Representação da malha triangular de um arquivo STL	29
Figura 7- Materiais para Impressão 3D	32
Figura 8 - Estrutura da dissertação: Materiais e métodos	40
Figura 9 - Fluxograma das etapas de estudo.....	41
Figura 10 - Impressora 3D e filamento	42
Figura 11 - Tipos de tecimentos das telas.....	44
Figura 12 - Tela 1 – Tecimento 2x1.....	45
Figura 13 - Tela 2 – Tecimento 1x1.....	46
Figura 14 - Primeira camada de impressão.....	47
Figura 15 - Equipamento Pull Off	49
Figura 16 - (A) Dispositivo de arranque; (B) Abertura para o encaixe dolly	50
Figura 17 – Representação das dimensões do dolly (medidas em mm).....	50
Figura 18 - Pino (dolly) impresso em PLA.....	51
Figura 19 - Microscópio Eletrônico de Varredura do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM)	52
Figura 20 - Preparação do dolly para o ensaio no MEV	53
Figura 21 - Registro do ensaio com o equipamento Pull Off	54
Figura 22 - Dollys deslocados após a realização do teste Pull Off.....	55
Figura 23 - Teste Pull Off com fixada por uma estrutura em madeira	56
Figura 24 - Passos para a construção de um diagrama Voronoi.....	57
Figura 25 - Algoritmo gerado para o motivo 1	58
Figura 26 - Etapas de elaboração do Motivo 1.....	59
Figura 27 – Modelo sólido do objeto proposto para o motivo 1	60
Figura 28 - Algoritmo gerado para o motivo 2	60
Figura 29 - Etapas de elaboração do motivo 2.....	61
Figura 30 - Modelo sólido do objeto proposto para o Motivo 2.....	61

Figura 31 – Título: 'O Mar' Fonte: Elaborado pela Autora (2023)	63
Figura 32 - Scanner tridimensional Artec™ Eva.....	64
Figura 33 - Superfície da pintura texturizada.....	64
Figura 34 - Ajuste de altura do modelo da pintura.....	65
Figura 35 - Teste para ajuste de altura.	66
Figura 36 - Determinação da área do relevo	66
Figura 37 - Relevo.....	67
Figura 38 - Imperfeição associada à espessura abaixo da otimizada	68
Figura 39 - Teste para definir espessura mínima para impressão em PLA.....	69
Figura 40 - Demonstração visual das camadas da peça.....	69
Figura 41 – Projeto do módulo (medidas em mm)	70
Figura 42 - Combinações propostas e impressas para a representação do design de superfície.....	71
Figura 43 - Desenho técnico das peças a serem impressas para os testes de empenamento	73
Figura 44 - Estrutura da dissertação: Resultados	74
Figura 45 - (A) Dolly impresso sobre tela 1; (B) Dolly impresso sobre tela 2	75
Figura 46 - Defeitos associados a utilização da Tela 2	76
Figura 47 - Comparação entre métodos de impressão	77
Figura 48 - Capturas obtidas pelo MEV revelando a superfície de contato do PLA ao substrato.....	79
Figura 49 - Análise visual para a determinação de aderência sobre a tela 1	80
Figura 50 - Imagens obtidas por MEV, com ampliação de 100x demonstrando as bordas dos corpos de prova	81
Figura 51 - Análise visual para a determinação de aderência sobre a tela 2	82
Figura 52 – Relevo 1	84
Figura 53 - Relevo 2.....	85
Figura 54 – Relevo 3.....	86
Figura 55 - Relevo 4.....	87
Figura 56 - Modelos digitais e impressos	88
Figura 57 - Comparação entre malhas digitalizadas e histograma.....	89
Figura 58 - Superfície em PLA com aplicação de pastas metálicas e pátinas reagentes	92
Figura 59 - Motivo 1 impresso sobre a tela 1	92

Figura 60 - Motivo 2 impresso sobre a tela	93
Figura 61 - Proposta estética associada ao design de superfície	95
Figura 62 - Erros de impressão associados à altura da mesa de impressão	97
Figura 63 - Teste de empenamento realizado sobre mesa de impressão.....	99
Figura 64 - Teste de empenamento realizado sobre tela de pintura	100
Figura 65 - Teste de empenamento realizado sobre mesa de impressão.....	101
Figura 66 - Teste de empenamento realizado sobre tela de pintura	102
Figura 67 - Efeito "stringing" sobre o Relevo 2.....	104
Figura 68 - Ajuste da tela de pintura sobre a mesa de impressão	105
Figura 69 - Comparação entre o projeto do dolly ao dolly impresso sobre a mesa de impressão.....	106
Figura 70 - Comparação entre o projeto do dolly ao dolly impresso sobre a tela 2.	106
Figura 71 - Comparação entre o dolly impresso sobre a mesa de impressão ao dolly impresso sobre a tela 2	107
Figura 72 - Comparação entre peças impressas sobre a mesa de impressão e sobre a tela de pintura.....	108
Figura 73 - Etapas de elaboração da peça final	109
Figura 74 - Finalização da peça impressa sobre a tela de pintura	110
Figura 75 - Estrutura da dissertação: Conclusão	111
Figura 76 - Representação visual do STEAM no desenvolvimento deste trabalho .	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demonstração dos tipos diferentes de técnicas de impressão 3D	30
Tabela 2 - Especificações do equipamento utilizado (Impressora Ender 3).....	43
Tabela 3 - Parâmetros fixos	48
Tabela 4 - Parâmetros de teste	48
Tabela 5 - Parâmetros de impressão dos Pinos (Dollys)	51
Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a impressão dos relevos	68

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Desenho Assistido por Computador (do inglês – <i>Computed-Aided Design</i>)
FDM	Modelagem por Deposição Fundida (do inglês – <i>Fused Deposition Modeling</i>)
FFF	Fabricação com Filamento Fundido (do inglês – <i>Fused Filament Fabrication</i>)
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
PLA	Ácido Polilático
SLA	Aparato de Estereolitografia (do inglês <i>Stereolithography Apparatus</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (do inglês <i>Selective Laser Sintering</i>)
3D	Tridimensional
STEAM	Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática (do inglês – Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics)
CAM	Manufatura Assistida por Computador (do inglês <i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
STL	Linguagem Padrão de Triângulos (do inglês <i>Standard Triangle Language</i>)
LDSM	Laboratório de Design e Seleção dos Materiais
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
TPU	Polímero Termoplástico
PC	Policarbonato

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 STEAM	20
3.2 MANUFATURA ADITIVA.....	26
3.2.1 Estereolitografia (SLA)	33
3.2.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	33
3.2.3 Fabricação com Filamento Fundido (FFF)	34
3.2.3.1 Tipos de filamentos	34
3.2.3.2 Parâmetros de Impressão	36
3.2.4 Impressão 3D em materiais têxteis	37
3.3 MODELAGEM 3D.....	38
3.4 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 IMPRESSÃO 3D SOBRE O MATERIAL TÊXTIL	41
4.1.1 Impressora 3D e filamento	42
4.1.2 Telas para pintura	43

4.1.3	Definição do método de impressão.....	46
4.1.4	Definição de parâmetros de impressão	47
4.2	TESTES DE ADERÊNCIA.....	48
4.2.1	Impressão de pinos (<i>Dollys</i>)	49
4.2.2	Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	51
4.2.3	Teste de aderência <i>Pull Off</i>	53
4.3	APLICAÇÃO DE MOTIVOS – VORONOI.....	56
4.3.1	Definição da geometria.....	57
4.4	DIGITALIZAÇÃO 3D.....	62
4.4.1	Definição da pintura texturizada.....	63
4.4.2	Digitalização e equipamento	63
4.4.3	Análise da superfície e ajuste de altura	64
4.4.4	Impressão dos relevos	66
4.5	TESTES DE ESPESSURA PARA IMPRESSÃO	68
4.6	DESIGN DE SUPERFÍCIE	70
4.7	TESTES PARA DEFINIÇÃO DA ALTURA MÁXIMA	72
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5.1	TELAS DE PINTURA 1 E 2	74
5.2	RESULTADOS QUANTO AOS MÉTODOS DE IMPRESSÃO	76
5.3	RESULTADOS QUANTO AOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	78
5.3.1	Resultados quanto à aderência	78
5.3.2	Resultados quanto ao acabamento superficial.....	83

5.4	POSSIBILIDADES ARTÍSTICAS (VORONOI).....	91
5.5	DIGITALIZAÇÃO DA PINTURA TEXTURIZADA (“MATA VONTADE”).....	94
5.6	PROPOSTA ESTÉTICA - DESIGN DE SUPERFÍCIE	94
5.7	POSSÍVEIS DEFEITOS DE FABRICAÇÃO	95
5.7.1	Nivelamento da mesa de impressão	96
5.7.2	Empenamento	97
5.7.3	Efeito Stringing	103
5.7.4	Ajuste do tecido sobre a mesa de impressão	104
5.7.5	Deformação	105
5.8	PEÇA FINAL – COLAGEM EM 3D	108
6.	CONCLUSÃO	111
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
	REFERÊNCIAS.....	117
	APÊNDICE A – Gráfico de resultados numéricos obtidos pelo teste de Aderência <i>Pull Off</i>	122
	APÊNDICE B – Proposta de sistema secundário para etapa de design de superfície	124
	APÊNDICE C – Resultados adicionais dos testes de empenamentos (<i>Dollys 1 e 3</i>).....	125

1. INTRODUÇÃO

STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics) pode ser definido como um conceito aplicado ao aprendizado, pesquisa e educação que tem como objetivo desenvolver a criatividade para a execução de projetos e a capacidade de resolver problemas pela união da ciência, tecnologia, engenharia, artes e matemática (PERIGNAT, KATZ-BUONINCONTRO, 2019). Uma das caracterizações fundamentais para a prática de STEAM é a transdisciplinaridade, que conta com a junção de conhecimentos advindos destas áreas do conhecimento e pontos de vista diversos (KINDLEIN W. JÚNIOR, BRESSAN, PALOMBINI, 2021). Apesar da importância da perspectiva técnica e dos conhecimentos obtidos das áreas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM), deve ser reconhecido que estas não são suficientes para trazer as inovações desejadas atualmente, para isto é necessário que estas se relacionem com as artes, trazendo o 'A' para o STEAM. Dessa maneira, o papel das artes no STEAM é de auxiliar na resolução de problemas, pela inspiração e o incremento emocional em conjunto ao conhecimento (MAEDA, 2013). Nesse contexto, o trabalho com a inclusão das artes em STEAM pode ser implementado inclusive como um meio de engajar alunos e professores, expandindo oportunidades para uma identificação pessoal aos projetos e assim desenvolver o conceito do entusiasmo ao longo do processo de aprendizagem. A prática é capaz de auxiliar no desenvolvimento cognitivo e abrir horizontes para a mente e possíveis reflexões (BACICH, MORAN, 2018). A arte também traz reconhecimento para a importância do Design no desenvolvimento de projetos, este que funciona como um elo entre as áreas de estudo do STEAM (KINDLEIN W. JÚNIOR, BRESSAN, PALOMBINI, 2021). O Design é o processo de criação, seja de um objeto ou de um método desenvolvido, em que a interdisciplinaridade, o estudo e a troca de conhecimentos são fundamentais, assim como para o STEAM (HENRIKSEN, 2017).

As ferramentas de tecnologias 3D são grandes aliadas ao Design e à prática de STEAM devido ao seu potencial de exploração, pois estes oferecem meios claros de visualizar o que está sendo desenvolvido e concretizar etapas importantes do processo de criação, sendo estas fundamentais para a pesquisa de viabilidade do

método ou produto (KINDLEIN W. JÚNIOR, BRESSAN, PALOMBINI, 2021). A modelagem 3D permite o desenvolvimento de objetos tridimensionais por meio de softwares que podem ser projetados a partir de um desenho bidimensional ou de uma sequência de algoritmos, utilizando plugins como o *Grasshopper*®, que operam na plataforma *Rhinoceros 3D*®, software de modelagem paramétrica. A digitalização 3D também vem se tornando muito popular entre os processos de inovação tecnológica, pois esta permite a reprodução de formas tridimensionais reais, assim trazendo diversas possibilidades para a medicina, ciência e até preservação histórica. Esta tecnologia proporciona que objetos tenham sua geometria explorada para outras finalidades, sendo assim uma grande aliada ao design e às artes.

No que diz respeito à inovação, a ferramenta de tecnologia 3D que está em plena ascensão é a impressão 3D, uma das razões de sua popularidade é devido à facilidade que a técnica proporciona para o desenvolvimento de novos produtos, em razão da sua capacidade de rápida prototipagem. Seu funcionamento se dá pela adição de camadas de material, determinadas previamente de acordo com projeto e equipamento, a fim de obter um objeto tridimensional com precisão geométrica. A concepção desses modelos a serem impressos são gerados pela modelagem 3D e a preparação do arquivo é obtido por softwares de fatiamento, em que é possível determinar os parâmetros de impressão.

Há diversos tipos de processos de impressão 3D, entre eles a Fabricação com Filamento Fundido (FFF) ou Modelagem por Deposição Fundida (FDM), como também sinterização seletiva a laser (SLS), estereolitografia (SLA), entre outras. Para a pesquisa foi utilizada a técnica FFF por ser um processo simples, acessível para utilização industrial e pessoal, e pelo seu baixo custo (WANG *et al.*, 2017). Equipamentos que operam com este tipo de processo permitem diferentes tipos de filamentos. Os principais materiais poliméricos para este fim são ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PETG (Polietileno Tereftalato Glicol) e o PLA (Poliácido Láctico). Para os testes realizados ao longo da pesquisa, foi escolhido o filamento PLA.

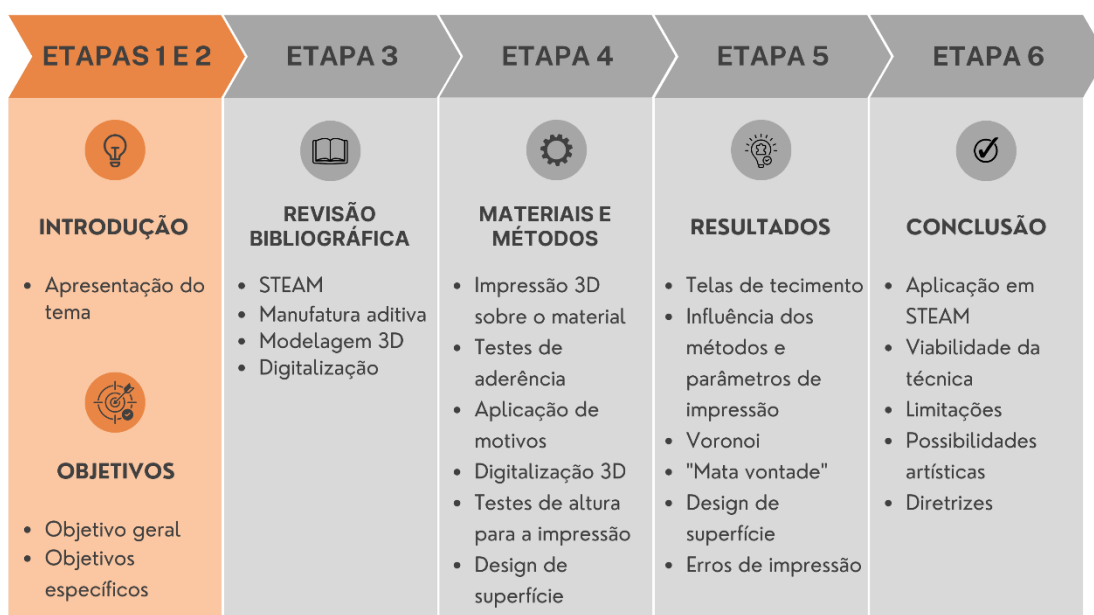
Apesar de já serem conhecidas as diversas possibilidades que a impressão 3D oferece, ainda há muito a ser explorado sobre a técnica. Com esta finalidade, a pesquisa se propõe a estudar a utilização da manufatura aditiva juntamente à área das artes, aplicando a prática de STEAM como estratégia criativa. Para fins, o presente estudo buscou desenvolver um método para a aplicação de modelos

projetados para serem impressos diretamente sobre telas de pintura (material têxtil com acabamento acrílico). Com este objetivo, foi analisada a viabilidade e as limitações da técnica e dos materiais utilizados, por meio de testes de aderência adotando quatro combinações de parâmetros de impressão e dois tipos de substratos. Em conjunto, foram estudados meios de combinação do processo da modelagem à impressão 3D, visando a compreensão de suas especificidades.

A modelagem e digitalização 3D foram utilizadas na pesquisa como demonstrativo das possibilidades artísticas que a técnica pode oferecer. Com este propósito, foram projetados motivos pelo plugin *Grasshopper*®, para a representação da viabilidade técnica. A digitalização tridimensional de uma pintura texturizada foi empregada na pesquisa como uma proposta criativa, obtendo o detalhamento de sua superfície e replicando sobre a tela de pintura. Esta etapa buscou revelar novos desdobramentos artísticos ou, inclusive, viabilizar a reprodução de pinturas em relevo que possam ter suas réplicas impressas presentes em exposições, permitindo que os espectadores tenham a experiência tátil ao apreciar a arte.

A estrutura da dissertação e suas etapas estão presentes no esquema visual apresentado na figura 1.

Figura 1 - Estrutura da dissertação: Introdução



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Por fim, o propósito da pesquisa é explorar uma abordagem que possa ser interessante para o processo criativo, oferecendo uma ferramenta viabilizada pela

impressão 3D (PLA) e fornecer orientações para que seja possível incorporar a técnica de forma eficaz, para aqueles que desejarem acrescentar a tecnologia 3D às suas criações.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é apresentar as possibilidades proporcionadas pela técnica de impressão 3D em PLA em telas de pintura. O estudo visa ressaltar a aplicação do STEAM para inovação artística no campo das Artes, unindo conceitos de ciência, tecnologia, engenharia e matemática a fim de trazer inovação para a área das artes, utilizando materiais e técnicas convencionais associadas às tecnologias 3D (impressão e digitalização).

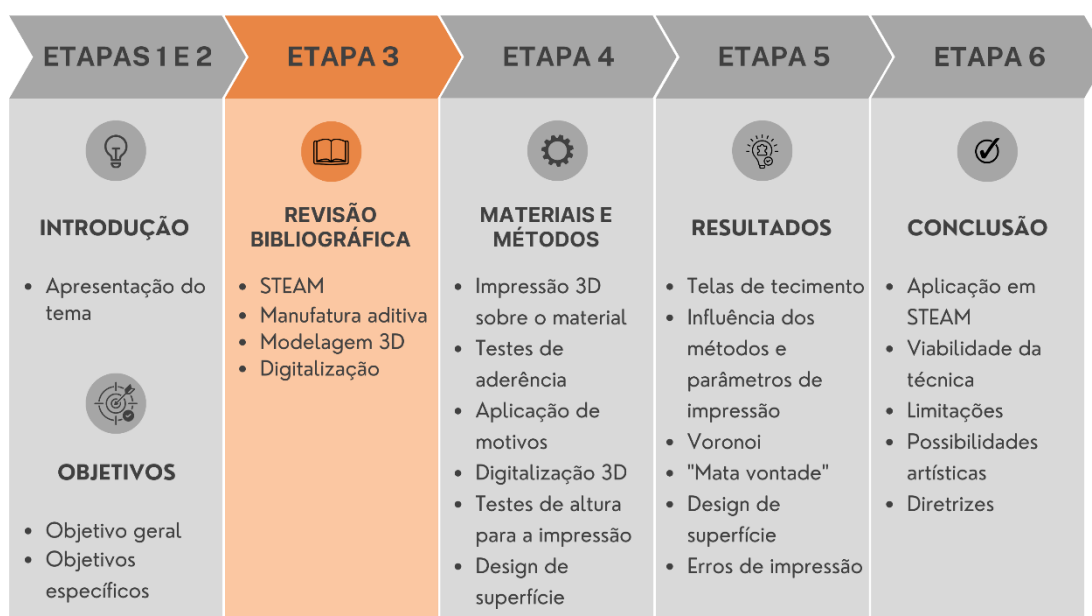
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I) Verificar aderência do PLA ao tecido para definição de método e parâmetros a serem utilizados no trabalho.
- II) Realizar a modelagem e impressão de diferentes motivos para demonstrar as possibilidades artísticas da técnica.
- III) Exemplificar uma releitura de cunho artístico por meio da digitalização 3D.
- IV) Descrever os procedimentos a serem seguidos para a execução da técnica de forma adequada, definindo parâmetros de processo para aplicação nas artes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa, apresentada na figura 2, é realizada a revisão bibliográfica sobre os conceitos fundamentais para a realização da pesquisa.

Figura 2 - Estrutura da dissertação: Revisão bibliográfica



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

3.1 STEAM

STEAM é uma abordagem que busca soluções para problemas de forma coletiva e colaborativa, reunindo diferentes perspectivas. Os resultados dependem da forma em que o conceito é executado e do ambiente onde é aplicado. Há por exemplo, a abordagem aplicada em laboratórios e salas de aula, que visa a importância da integração de conhecimentos para a aprendizagem, possibilitando a observação de diferentes perspectivas, transferência de conhecimento e novas formas de fazer com que os pesquisadores explorem os caminhos do saber.

Pelo ponto de vista de Skowronek *et al.* (2022), é urgente a reforma no sistema de educação aplicado atualmente no mundo ocidental, pois o mesmo é estruturado por disciplinas segmentadas em habilidades necessárias para o mercado de trabalho convencional. Este modelo de ensino foi sistematizado com base no STEM, em que o foco está no ensino das habilidades técnicas (*hard skills*) na área de ciências, tecnologia, engenharia e matemática, com pouca inclusão das áreas humanas, críticas e artísticas (*soft skills*). No geral, o ensino tradicional segue padrões rígidos,

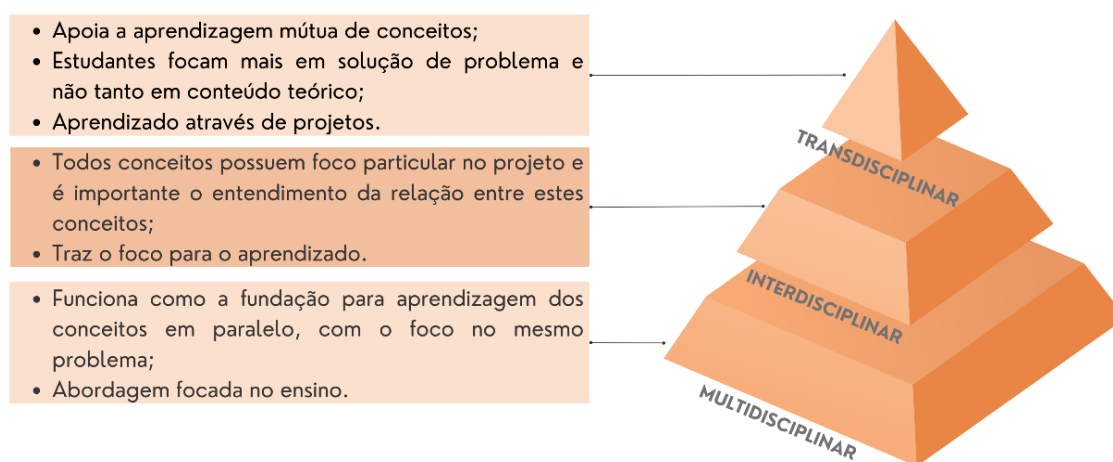
focando em regras e conceitos de certo ou errado, muitas vezes não incentivando os alunos a pensarem de forma inovadora. Isso pode levar à transmissão de conhecimento teórico sem dar ênfase suficiente à sua aplicação prática e ao estímulo da criatividade durante o aprendizado.

O modelo de ensino STEAM (incluindo o A de Artes) está em ascensão nos Estados Unidos da América, mas ainda é muito retraído nas escolas brasileiras. De acordo com os dados do PISA (Programa Internacional de Avaliação de Estudantes) em 2018, 43% dos estudantes brasileiros do ensino fundamental tiveram pontuações abaixo do nível em Leitura, Matemática e Ciências, o que indica que estes estudantes não possuem habilidades matemáticas e científicas para prosseguir os estudos nos próximos níveis de educação, sendo assim necessárias diferentes abordagens e uma verdadeira reforma no modelo educacional no Brasil (MAIA *et al.*, 2021). Na pesquisa de Dias e Mello (2022), foram conduzidas entrevistas com um grupo de professores brasileiros, entre os quais a maioria não estava familiarizada com a abordagem educacional STEAM. Apesar da estrutura curricular brasileira possibilitar a implementação desta abordagem, é necessário investir em estratégias de ensino e materiais e, principalmente, em formação profissional e planejamento nas escolas.

Nas escolas brasileiras existem alguns exemplos de aplicações do STEAM para análise de problema, planejamento e proposta de soluções, como demonstrado na pesquisa realizada por Maia *et al.* (2021), na qual foram estudadas duas situações da aplicação do conceito em território nacional. O primeiro se trata do trabalho realizado pela professora brasileira Garofalo, que realizou, juntamente aos alunos, um projeto para a utilização de materiais recicláveis com o objetivo de desenvolver robótica sustentável, estimulado pelo problema de descarte de lixo na comunidade. Em seguida, o trabalho realizado por Paulo Blikstein, em uma escola pública, também incentivado por dificuldades da comunidade, buscou obter soluções para o consumo de energia elétrica com a finalidade de obter o empenho intelectual e emocional dos estudantes. Já nos cursos de pós-graduação brasileiros, há trabalhos em desenvolvimento que vem buscando conhecimentos de design e tecnologia. Estes tem acompanhado as inovações mundiais em Design de produto, utilizando assim os conceitos de STEAM como elo entre os estudos das propriedades técnicas dos materiais com os seus atributos de percepção (tátil, visual etc.) (KINDLEIN W. JÚNIOR, BATISTA RIBEIRO, 2022).

O autor Wu (2022), defende que para a aplicação do aprendizado baseado em STEAM é necessária a colaboração dos professores, o que pode ser uma dificuldade no processo, devido à falta de experiência em ensinamentos experimentais e práticos e a estrutura educacional teórica implementada atualmente na maioria das escolas. Porém, este cenário torna a abordagem crucial para que os alunos estejam preparados para o mercado de trabalho e para que consigam exercitar sua criatividade pelo processo de ensino transversal, que consiste na integração de diversas áreas de conhecimento para o entendimento de conceitos. O ensino transversal inclui os seguintes modelos de orientações de estudo (figura 3): Multidisciplinaridade, Interdisciplinaridade e Transdisciplinaridade.

Figura 3 - Modelos de ensino transversal



Fonte: Adaptado de Wu (2022)

A inclusão de pessoas do sexo feminino em áreas de STEM também é um objetivo para a aplicação do conceito de STEAM, devido à baixa porcentagem de mulheres inseridas em estudos de áreas exatas. Nas universidades, mulheres representam a minoria dos alunos (cerca de 35% de acordo com dados da ONU) matriculados em cursos das áreas de STEM, principalmente nas engenharias e cursos de tecnologias, nos quais esse número fica abaixo de 28% de representatividade feminina (KINDLEIN W. JÚNIOR, BATISTA RIBEIRO, 2022). Em contrapartida, áreas como as artes costumam ser associadas ao sexo feminino em ambientes de aprendizagem. Tendo este desafio em vista, o STEAM se apresenta como um método de inserir mais mulheres nas áreas de STEM e assim desenvolver interesses e habilidades para uma possível carreira na área (PERIGNAT, KATZ-BUONINCONTRO, 2019). Devido aos aspectos abordados, a importância das Artes

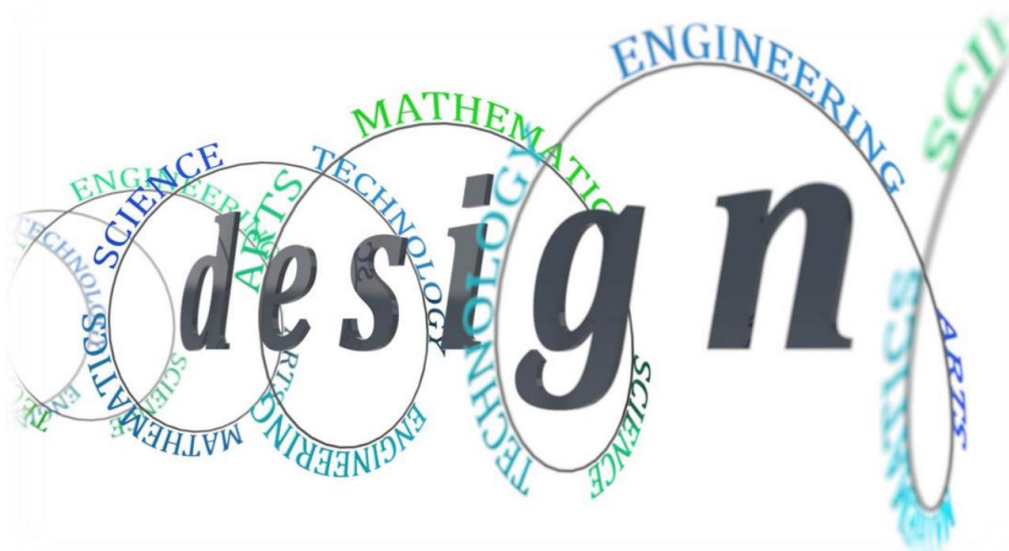
em STEAM pode ser reconhecida como fator determinante para que durante a educação, os alunos tenham contato direto com o conceito de criatividade, pela interdisciplinaridade aplicada ao longo do desenvolvimento de projetos. Esta integração pode vir com dificuldades, pois no ensino convencional, as disciplinas de STEM dificilmente estão interligadas com as áreas artísticas, por isso é necessário utilizar o STEAM como ferramenta para quebrar as barreiras das disciplinas (HENRIKSEN, 2017). É mencionado por Rocha e Garcia (2020), que a abordagem STEAM faz com que os objetivos na educação sejam reconsiderados, destacando a importância do ensino de uma ampla gama de disciplinas para desenvolver habilidades como criatividade e pensamento crítico nos estudantes. Dentro desse contexto, a arte desempenha um papel essencial no modelo STEAM.

O ensino das áreas humanas e artes, representadas na letra 'A' de STEAM, normalmente são consideradas pouco importantes, ou até mesmo um luxo quando abordadas em escolas públicas, porém, atualmente a expressão criativa e habilidades artísticas vêm sendo tão importantes quanto as habilidades de STEM para o mercado de trabalho, especialmente para profissões como designers, artistas, comunicadores, entre outros. Devido a estes fatores, o sistema educacional deve reconhecer as artes não apenas por sua importância cultural, mas também pela sua necessidade na economia global atual (economia criativa). Além dos benefícios para a vida profissional, estuda-se a importância do STEAM para a formação de alunos com mais empatia e noções sociais em geral (SKOWRONEK *et al.*, 2022). Para Arce *et al.* (2022) é fundamental que os jovens sejam estimulados a desenvolver estas competências que não estão presentes no currículo escolar convencional, mas que se fazem fundamentais na vida profissional e pessoal. Ao analisar os tópicos discutidos, conclui-se que é necessário que os materiais para o aprendizado sejam focados em experiências em STEAM, tirando o foco do conteúdo engessado nas disciplinas, assim alterando as prioridades definidas para o ensino.

Neste contexto, a criação no processo do design é fundamental para a área de projeto e engenharia, pois une os estudos dos materiais e processos enquanto tem como objetivo a configuração ideal para o produto ou método a ser desenvolvido. Segundo Kindlein W. Júnior, Bressan e Palombini (2021), a integração das áreas distintas é fundamental para pesquisas em Design, pois essa associação possibilita a busca de diferentes pontos de vista sobre o tema a ser estudado, permitindo também

a interpretação de maneira holística. Neste cenário, o design tem o papel de fio condutor que integra os diferentes campos do conhecimento de STEAM, como é representado na figura 4.

Figura 4 – Design como fio condutor na prática de STEAM



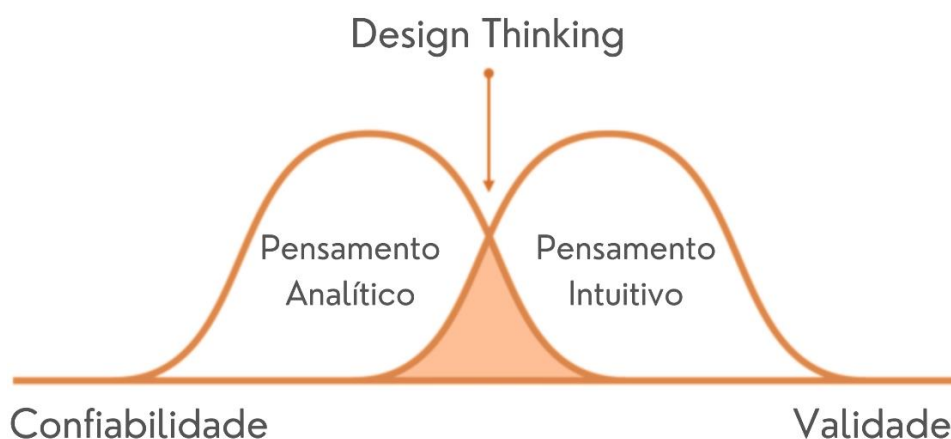
Fonte: Kindlein W. Júnior, Bressan, Palombini (2021)

Com o foco na resolução de problemas pelo pensamento criativo, foi desenvolvida uma estratégia para estimular a inspiração e inovação denominada *design thinking*. Este método utiliza a sensibilidade e artifícios de designers para manter o foco a quem o projeto se destina, atendendo suas necessidades e expectativas. O *design thinking* consiste em três fases que podem ocorrer simultaneamente, estas são: inspiração, ideação e implementação. Por intermédio destas etapas, são levantados questionamentos, desenvolvidas ideias e assim é possível obter respostas e soluções aos problemas apresentados (BONINI, SBRAGIA, 2011).

Por meio do *design thinking*, é incorporado o “Design Centrado no Homem”, que traz conceitos como empatia e aprendizado com o público-alvo, realizando protótipos para considerar as opiniões e obter avaliação interativa com os usuários, o que reforça a necessidade do desenvolvimento de profissionais com habilidades humanas e não apenas técnicas (ARCE *et al.*, 2022). É importante enfatizar como esta metodologia complementa os estudos em STEAM, trazendo criatividade para métodos convencionais de desenvolvimento e estudo, assim resultando em inovação nas áreas em que é aplicado. Este pensamento ajuda a destacar a importância da colaboração e troca de experiências para a resolução de problemas (KIJAMA, YANG-

YOSHIHARA, MAEKAWA, 2021). Conforme o texto de Kindlein W. Júnior e Batista Ribeiro (2022), há três pilares fundamentais para os estudos e ensino, conhecido como os três H's (*heart, head and hands*) que representam a emoção (coração), estratégia (cabeça) e a prática (mãos). Isto se traduz claramente nos objetivos da prática STEAM, que reforçam a importância do conhecimento dos materiais, processos e, durante seu desenvolvimento, é imprescindível a estratégia e engajamento quando aplicados os conhecimentos na prática, para assim obter êxito no progresso e aprimoramento de novos métodos e tecnologias. O chamado *design thinking* age como uma ferramenta em projetos, buscando unir o pensamento intuitivo (artístico), que tem como finalidade o seu valor e estado afetivo para o consumidor final e o pensamento analítico (científico), este que garante a confiabilidade do produto. Esta representação está exposta na figura 5 (HENRIKSEN, 2017).

Figura 5 - Representação de *design thinking*



Fonte: Adaptado de Henriksen (2017)

De acordo com Rocha e Garcia (2020), nas escolas, o *design thinking* funciona como um guia para o pensamento, auxiliando o trabalho dos professores, para que possam exercer o estudo pelo conceito do STEAM, por práticas criativas e transdisciplinares. No aprendizado, é discutida a importância da criatividade de maneira coletiva, mantendo o foco em colaboração criativa em grupo, e seus efeitos nas perspectivas das interações entre pessoas e ambiente como um todo, não apenas como uma característica pessoal. Considerando que esta é uma habilidade que requer prática e pode ser desenvolvida por todos os indivíduos, é de grande importância que os educadores apliquem uma abordagem pedagógica transdisciplinar com o objetivo do engrandecimento das habilidades de aprendizado e desenvolvimento holístico (WU, 2022). A criatividade também é importante para despertar a emoção e interesse

dos alunos, pois quando são permitidos a demonstrarem sua individualidade, conseguem se identificar com o trabalho que estão realizando. Quando a criatividade se alia às competências técnicas, amplia-se a capacidade de enfrentar desafios multidimensionais, que demandam uma abordagem holística (SKOWRONEK *et al.*, 2022).

Para os designers, a ciência e tecnologia atuam como um auxílio para criação de novos produtos e sistemas, o que faz com que compreendam a importância da integração da ciência, tecnologia, engenharia, artes e matemática para a inovação, pois estes oferecem os recursos para o processo de desenvolvimento. A acessibilidade da técnica de impressão 3D, as possibilidades de protótipos rápidos, sem a necessidade de moldes e sua capacidade de fornecer auxílio no processo prático e visual, torna esta tecnologia uma ferramenta importante para estudos na área de STEAM (CHIEN, CHU, 2018). Como um exemplo, observa-se o trabalho do autor Oi-Lam Ng (2017), que analisou o ensino de volume de sólidos a alunos de 13 a 15 anos, com o auxílio de ferramentas de CAD (Desenho Assistido por Computador) e impressão 3D. Neste estudo, foi designado para os estudantes a tarefa de elaborar um chaveiro com seus respectivos nomes e, em seguida, realizar a impressão 3D dos mesmos. No desenvolvimento inicial, não foi mencionado aos alunos o objetivo e sequer a palavra 'volume'. A necessidade do cálculo de volume só foi observada quando se apontou a sua importância devido aos custos de materiais para a impressão subsequente e limitações do equipamento a ser utilizado para o fim. O trabalho então foi realizado com êxito pelos alunos e notou-se que ao fim dos projetos, os estudantes falavam sobre volumes de sólidos de forma fluente e os relacionavam diretamente com o ambiente tridimensional. Estes resultados reforçam a importância do aprendizado pela aplicação do STEAM de forma prática e da relevância das tecnologias e impressão 3D neste processo.

3.2 MANUFATURA ADITIVA

No decorrer dos últimos anos, as pesquisas realizadas em função do desenvolvimento de novos produtos para a indústria vêm acontecendo de forma acelerada, devido à alta competitividade e demanda de artigos variados de um maior nível de complexidade. Para acompanhar tais ritmos de produção, houve a necessidade de buscar tecnologias para o auxílio dos processos durante a elaboração de novas peças e objetos. No processo, é exigido que as novas técnicas garantam a

qualidade de produção, enquanto promovem a redução de custos e tempo de fabricação (FIGUEIREDO, CESAR, 2022). Com o objetivo de facilitar a construção de protótipos para impulsionar o mercado, a impressão 3D teve seu desenvolvimento durante a década de 80, quando surgiram as primeiras técnicas de fabricação a laser, originando a estratégia de sinterização seletiva a laser (SLS). O processo de modelagem por deposição fundida foi inventado em seguida, em 1990 e desde então, estas e outras técnicas vem sendo estudadas e otimizadas, assim expandindo suas possibilidades de uso e aplicação (LIRA, 2021).

Anteriormente à ascensão da manufatura aditiva, os principais métodos de produção eram baseados no processo de moldagem do material, podendo envolver sua fusão (fundição em moldes, metalurgia do pó, injeção de polímeros, entre outras), remoção, conhecida como “manufatura subtrativa” (torneamento, fresamento, retifica, etc.), na conformação (forjamento, estampagem, extrusão, laminação, entre outras) e também na confecção de produtos pela união ou separação de peças obtidas com a aplicação de uma ou mais das técnicas mencionadas. A junção destes componentes pode ser realizada por meio de artifícios, como soldagem e brasagem, e sua divisão por diferentes técnicas de corte (FIGUEIREDO, CESAR, 2022). Apesar de diversas dessas táticas serem consolidadas e de grande importância para os meios de produção, em alguns casos elas podem trazer problemáticas, como a necessidade de utilização de material extra para o desenvolvimento de moldes ou até mesmo o desperdício de materiais em técnicas subtrativas. Nestes casos, a impressão 3D pode se apresentar como uma solução para os desafios mencionados, reduzindo desperdícios no processo de produção e operando como uma ferramenta para a concentração de etapas, desde o processo de prototipação, até a fabricação final, permitindo ajustes ainda em sua fase inicial, antes das etapas de produção em massa, evitando assim a perda de produtos (ASSIS, 2018).

Em síntese, podemos definir a manufatura aditiva como o processo de adição de camadas de material com o objetivo de gerar objetos tridimensionais. Seu diferencial é a capacidade de gerar diversos tipos de geometrias, das mais simples às mais complexas sem a necessidade de equipamentos especializados de alto custo para este fim (REDWOOD *et al.*, 2017). Embora a impressão 3D seja um processo de produção com o objetivo de ser simplificado, é necessário que ocorram cinco etapas até que seja possível obter o resultado de uma peça tridimensional finalizada. Estas

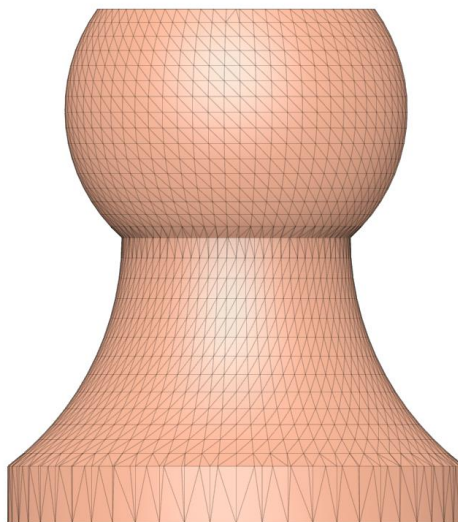
são: Modelagem virtual tridimensional, geração da malha, processo de fatiamento (divisão de camadas), produção do objeto camada por camada (impressão 3D) e acabamento (CUNICO, 2015).

Para os processos de manufatura aditiva, a geração de modelos virtuais é considerada uma de suas principais etapas, este processo ocorre com a utilização de softwares de CAD, que fornecem as ferramentas necessárias para o desenvolvimento dos produtos que serão criados pela impressão 3D (FIGUEIREDO, CESAR, 2022). Antes do processo de modelagem do objeto, é necessário levar em consideração sua finalidade para que seja possível tomar decisões com esta informação, como a escolha do material, técnica e equipamento a ser utilizado, visto que existem limitações individuais relacionadas a cada definição.

Subsequente ao processo de modelagem virtual é necessário passar pela etapa de transformação do objeto modelado para uma extensão de arquivo permitida pelo software de fatiamento, estas podendo ser OBJ (Arquivo de Objeto Wavefront 3D - *Object File Wavefront 3D*), 3MF (Formato de Manufatura 3D – 3D Manufacturing Format) e STL (Linguagem Padrão de Triângulos – *Standard Triangle Language*).

O formato STL consiste em uma sequência de formas triangulares ligadas que descrevem a superfície de um modelo em 3D, como um conjunto de semiplanos. A quantidade de triângulos é definida no desenvolvimento da etapa de acordo com a complexidade e resolução do projeto (HU, 2017). O formato é utilizado devido às vantagens que o mesmo apresenta, como a fácil conversão usando o modelo tridimensional, decorrente do algoritmo de triangulação que se destaca por sua simplicidade e confiabilidade. O processo ainda permite ajustes de precisão controlados de acordo com a preferência e necessidade apresentadas pelo modelo. A facilidade que o arquivo fornece em seu processo de fatiamento se apresenta como uma de suas principais vantagens, pois assim encaminha o processo para próxima etapa de produção. Esta facilidade é justificada pela malha triangular que constitui o objeto tridimensional (figura 6) (KUMAR, 1997).

Figura 6 - Representação da malha triangular de um arquivo STL

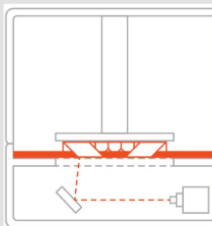
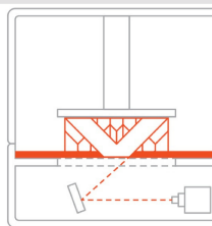
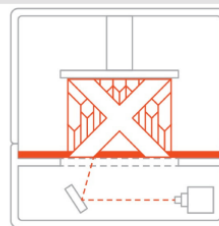
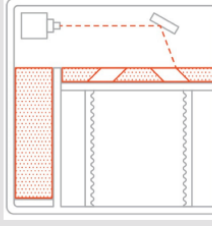
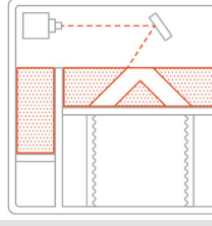
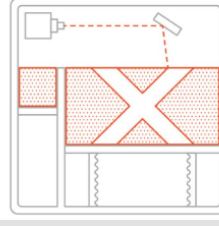
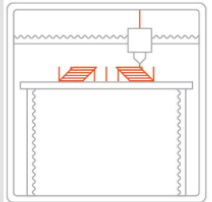
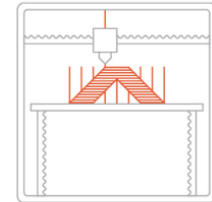
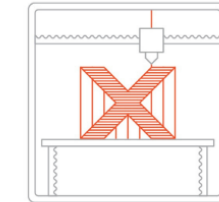


Fonte: Elaborado pela Autora usando o software Fusion (2023)

Em sequência ao processo de conversão para o formato STL, o modelo precisa passar pelo processo de “fatiamento” em que a peça e os suportes gerados devem ser seccionados por um software previamente determinado. É nesta etapa que são definidos os parâmetros de impressão, fundamentais para o sucesso da operação e a qualidade do objeto. Por consequência dos parâmetros estabelecidos, este passo também indica o tempo de impressão, considerado fundamental principalmente para projetos que resultarão em uma produção em massa. Os programas que realizam o processo de “fatiamento” também oferecem possibilidades de modificação do projeto, como a alteração de sua escala ou seu posicionamento sobre a mesa de impressão. Esta repartição ocorre por camadas paralelas horizontais (eixo Z) e estas camadas então armazenadas com suas coordenadas (X e Y) em um arquivo de texto que deverá ser lido pelo processamento do equipamento (LIRA, 2021). O arquivo de texto no formato é redigido em uma linguagem de programação, denominada G-Code, que compreende uma sequência de comandos encarregados de controlar ações como direção e a velocidade a serem seguidas pelo equipamento (ACIU, CIOCARLIE, 2014).

Assim que concluído o processo de fatiamento, leitura do arquivo de texto em G-Code, há a etapa que tem sua execução condicionada ao sucesso dos processos anteriores, esta etapa é impressão 3D. Esta etapa pode ser realizada por diversas tecnologias disponíveis atualmente, com diferentes propósitos, benefícios e limitações. A seguir são apresentadas algumas das principais técnicas de impressão 3D (tabela 1).

Tabela 1 - Demonstração dos tipos diferentes de técnicas de impressão 3D

TECNOLOGIA	PROCESSO		
<p>Estereolitografia (SLA)</p> <p>Utiliza um raio laser para realizar a fotopolimerização do material, que está inicialmente em estado líquido, até que se torne rígido e consistente. Esta tecnologia é capaz de processar diferentes tipos de resina que emulam características de materiais termoplásticos.</p>			
<p>Sinterização Seletiva a Laser (SLS)</p> <p>Esta tecnologia utiliza um raio laser para fundir partículas de pó de polímero, construindo a peça camada por camada. As impressoras SLS utilizam principalmente pó de poliamida, porém também permitem impressão com materiais elásticos como TPE e TPU.</p>			
<p>Modelagem por Deposição Fundida (FDM)</p> <p>Utiliza o material em forma de filamento sólido, que quando fundido é depositado em camadas na superfície de impressão. Para o filamento são usados diferentes tipos de termoplásticos, onde os mais comuns são ABS, PLA e PETG.</p>			

Fonte: Adaptado de REDWOOD *et al.* (2017)

Após efetuado o procedimento da impressão 3D, alguns processos exigem uma etapa extra de acabamento das peças impressas, definida de acordo com a finalidade do projeto, visto que a fabricação deixa marcas de camadas, titulado efeito escada. Não apenas este efeito pode impulsionar a busca por uma etapa de aperfeiçoamento, visto que durante o processo de impressão podem surgir defeitos inesperados causados por problemas durante o nivelamento da mesa de impressão, entupimento do bico extrusor, parâmetros como velocidade e temperatura ou até mesmo marcas que resultam nas conexões dos suportes. De acordo com Cunico (2015), os tipos de finalização variam de acordo com o processo e materiais empregados na etapa anterior, e de acordo com sua finalidade, pois alguns processos podem afetar as propriedades mecânicas e estruturais dos materiais. Entre os tipos de pós-processamento estão presentes os processos mecânicos (lixa, retífica, corte) e químicos (vapor, verniz, pintura).

A tecnologia da impressão 3D está presente em diversos setores da indústria e de estudo. A vasta gama de tecnologias e materiais disponíveis para serem

utilizados neste processo de produção pode ser o seu principal estímulo. A biônica (união entre engenharia e biologia) vem sendo aplicada para o estudo de implantes como próteses e órgãos sintéticos (FIGUEIREDO, CESAR, 2022). Na indústria aeroespacial, a tecnologia de impressão 3D está presente pois fornece a liberdade necessária quanto ao design no processo de construção de peças, contando com materiais leves, e permitindo a substituição facilitada de componentes presentes nas aeronaves. Na indústria automobilística, a manufatura também se mostra interessante em relação à massa dos componentes, tanto quanto à velocidade de produção associada à técnica (SHHRUBUDIN, 2019). A técnica vem sendo utilizada em empresas renomadas com o propósito de otimizar o design e facilitar os processos de fabricação, como por exemplo a empresa Ford, que afirmou recentemente já ter produzido mais de quinhentas mil peças impressas em 3D e economizado muitos recursos financeiros e horas de trabalho (KANTUMUCHU, 2021).

Na medicina, a manufatura aditiva possui diversas aplicações, desde substituições de partes físicas, como ossos, tecidos e cartilagens, quanto na produção de fármacos (SHHRUBUDIN, 2019). Um exemplo da utilização da tecnologia 3D combinado à medicina pode ser ilustrado pelo trabalho da pesquisadora Sudbrack da Fonte (2022), pois seu estudo demonstra a aplicabilidade da manufatura aditiva para a fabricação de moldes para próteses mamária externas confeccionadas para mulheres pós-mastectomizadas. Para esta aplicação, a possibilidade da reprodução de geometrias complexas e anatômicas disponíveis por meio da impressão 3D foram essenciais para executar os experimentos realizados ao longo da pesquisa, pois obtiveram próteses mais precisas como resultado e foram apresentadas possibilidades de reprodução para que futuramente seja possível beneficiar um maior número de pessoas e aperfeiçoar o método pela personalização para cada paciente e a redução do tempo para o processo.

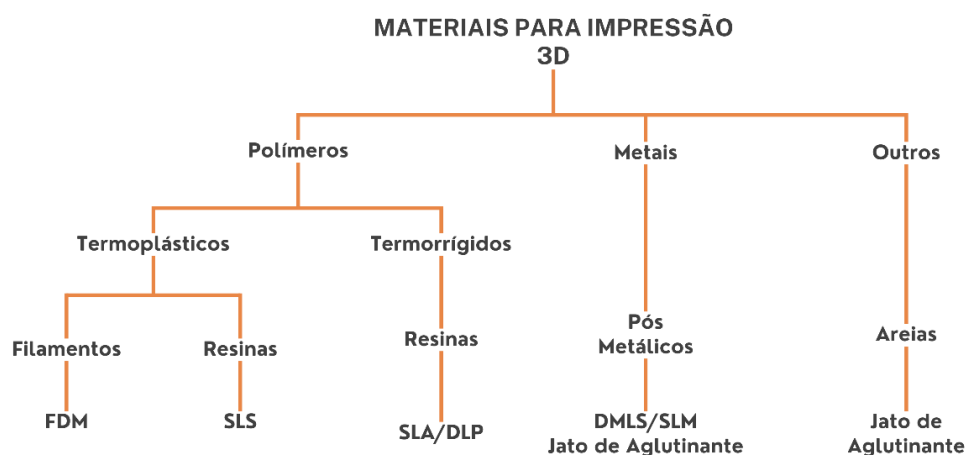
Na arquitetura, a manufatura aditiva se apresenta como uma ferramenta ilimitada, trazendo possibilidades desde o protótipo e desenvolvimento de uma ideia, até a construção das paredes de prédios. Já na indústria da moda, a técnica vem sendo usada para a produção de joias, sapatos e roupas, com propostas estéticas e inteligentes (SHHRUBUDIN, 2019). O trabalho dos pesquisadores Bugin *et al.* (2020) pode ser mencionado como exemplo quanto à produção de sapatos, sendo criado um algoritmo para proposta de criação de uma entressola customizada, pelo ensaio de

distribuição de pressão plantar, em que os pontos gerados estruturaram uma geometria em Voronoi, um conceito matemático que descreve a divisão de um espaço em células com base na proximidade dos pontos determinados. A geometria foi posteriormente impressa em TPU, material flexível compatível com calçados. Isso demonstra a capacidade da técnica para a fabricação personalizada, de acordo com as necessidades particulares do consumidor.

Quanto ao Design, a manufatura aditiva se mostra uma aliada no processo de criação, pois conta com a diminuição de processos, baixo custo e uma maior liberdade de criação quanto às geometrias e aplicações (JANDYAL *et al.*, 2022). As possibilidades de criação fornecidas pela manufatura aditiva fornecem aos designers novas maneiras para expressar arte e criações estéticas.

Em algumas ocasiões, as técnicas utilizadas nos processos são definidas de acordo com os materiais previamente determinados para o projeto em desenvolvimento. Na manufatura aditiva há a possibilidade de trabalhar com diversas matérias-primas, como cerâmicas, tecidos, biomateriais, metais, além dos diversos tipos de polímeros que são comumente utilizados na impressão 3D e podem ser aplicados para variados propósitos (FIGUEIREDO, CESAR, 2022). Os materiais selecionados estão de acordo com a técnica a ser utilizada, como observado na figura 7.

Figura 7- Materiais para Impressão 3D



- DMLS - Sinterização Direta a Laser de Metal;
- SLM - Derretimento Seletivo a Laser;
- FDM - Modelagem por Deposição Fundida;
- SLS - Sinterização Seletiva a Laser;
- SLA - Estereolitografia;
- DLP - Impressão de processamento de luz digital.

Fonte: Adaptado de REDWOOD *et al.* (2017)

3.2.1 Estereolitografia (SLA)

A técnica de Estereolitografia (SLA) foi a primeira disponível no mercado para a fabricação de modelos em 3D e protótipos. Para o uso da técnica, também se faz necessária a etapa da transformação do modelo para STL para que o equipamento possa manufaturar o objeto. O processo ocorre pela fotopolimerização e conta com quatro elementos fundamentais: Um líquido polimérico fotossensível que seja curado por uma luz ultravioleta (resina), uma plataforma perfurada, uma fonte de laser e um computador para controlar o processo. A plataforma é imersa no tanque com o líquido, e assim que o contato é feito, o laser ultravioleta é direcionado à superfície do polímero, realizando a cura (solidificação) de forma instantânea (JANDYAL *et al.*, 2022). O processo acontece por meio da construção de camadas, controlado pelo deslocamento da plataforma, transformando-se em um sólido polimerizado por meio de um raio laser UV. Como mencionado anteriormente, há processos em que o acabamento é uma etapa adicional e opcional, porém quando se trata de fotopolimerização, é fundamental que a peça produzida passe por um processo de cura pós impressão (FIJOL, 2022).

A técnica se destaca pela capacidade de produção de peças de alta precisão e detalhamento. De acordo com Jandyal *et al.* (2022), a técnica SLA pode ser utilizada em fabricações aplicadas à engenharia, odontologia e medicina. Como exemplo, pode ser mencionado a fabricação de válvulas cardíacas, produzidas utilizando a técnica com materiais compatíveis com o corpo humano, de células advindas da pessoa que utilizará o componente.

3.2.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A impressão utilizando a técnica Sinterização Seletiva a Laser (SLS) funciona pela consolidação de materiais na forma de pó em camadas consecutivas, sem a necessidade de suportes complementares, sendo uma das tecnologias mais abrangentes quanto à complexidade das geometrias, permitindo inclusive a formação de componentes internos. A tecnologia SLS utiliza principalmente polímeros termoplásticos na forma granular como matéria-prima. O equipamento é composto de duas câmaras, em que a transferência do pó ocorre na câmara de construção, então a impressora realiza o pré-aquecimento do pó, ainda abaixo de sua temperatura de fusão e então o laser realiza a fusão do material de acordo com a programação definida pelo arquivo, transformando assim o material em um objeto sólido (JANDYAL

et al., 2022). Esta técnica de impressão pode ser utilizada na indústria para a criação de protótipos e produtos de alta qualidade.

3.2.3 Fabricação com Filamento Fundido (FFF)

A fabricação com filamento fundido (FFF) é a técnica mais comum, econômica e acessível da manufatura aditiva, a mesma pode ser utilizada para diversas aplicações e tem se expandido para o uso de materiais não poliméricos. A técnica consiste na extrusão do material em forma de filamento, através de um bico aquecido, para assim depositar o material em camadas sobre uma mesa de impressão, onde passará pela solidificação (VALERGA *et al.*, 2020). Existem diversos equipamentos que trabalham com a técnica FFF, podendo ser variados de acordo com suas dimensões, materiais permitidos, forma de deslocamento e até por número de componentes. Alguns equipamentos possuem mais de um bico extrusor permitindo dois filamentos ou mais por impressão. Usualmente, o bico extrusor se desloca no sentido x, a mesa de impressão no sentido y e o equipamento em z, porém isto pode variar de acordo com o tipo de impressora (JANDYAL *et al.*, 2022).

Durante o processo de impressão pela técnica FFF, diversos fatores podem ser responsáveis pelo acabamento da superfície da peça. Essas variáveis, apesar de possuírem a capacidade de otimizar ou causar danos e deformações às peças, não podem garantir um resultado perfeito ao objeto impresso. Esses fatores podem ser vibração, material, tipo de equipamento, parâmetros como velocidade e espessura da camada, entre outros (VIJAY *et al.*, 2011). Ao longo da etapa de impressão, também podem ser enfrentadas dificuldades práticas em relação ao nivelamento da altura da mesa de impressão. Este ajuste possui interferência direta sobre o resultado da peça, pois influencia a aderência da peça à mesa e o acabamento da mesma. As aplicações da técnica FFF podem ser várias, desde realização de pesquisas na educação (FABLABS), até a manufatura de peças finais de uma ampla gama a nível industrial (Decoração, automotiva, saúde, etc.).

3.2.3.1 Tipos de filamentos

Para a técnica de impressão 3D FFF, são utilizados termoplásticos em forma de filamento como matéria-prima. Dentre os principais filamentos, destacam-se o PLA (Ácido Polilático), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), TPU (Polímero Termoplástico), PC (Policarbonato), entre outros.

O processo de escolha de filamentos de impressão utilizados pela técnica requer cuidado pois está diretamente ligado à qualidade de impressão e aos processos e parâmetros a serem implementados. Cada material trabalha com parâmetros específicos para assim resultar em um melhor acabamento (CUNICO, 2015).

O polímero Polietileno Tereftalato (PET) é bastante utilizado atualmente e na impressão 3D, e se encontra disponível seu derivado, conhecido como PETG, sendo este mais flexível em relação ao PLA e tem seu processo de impressão mais facilitado em comparação com o ABS. É considerado um termoplástico estável, reciclável e não gera fumaça em seu processo de impressão, exigindo controle fino das temperaturas de impressão e mesa aquecida para o processo (BESKO *et al.*, 2017).

O filamento ABS também é muito utilizado na impressão 3D, tendo suas propriedades mecânicas superiores ao PLA. Uma de suas vantagens é seu baixo custo, sendo o termoplástico mais barato presente no mercado de filamentos atualmente. Porém, o termoplástico é derivado do petróleo, gerando fumaça tóxica no processo de impressão. Outra desvantagem relacionada ao filamento, é a deformação que pode ocorrer ao longo do processo de impressão, este fenômeno é justificado pela necessidade de controlar com máxima acuidade as temperaturas para seu processo de impressão já que a diferença de temperatura em relação ao ambiente pode causar alterações na forma das peças. Uma forma de solucionar o problema, é utilizar o filamento em impressoras fechadas, com o auxílio da mesa de aquecimento (BESKO *et al.*, 2017). Para objetos impressos em filamento ABS, o pós-processamento pode ser realizado com a sua exposição à acetona (dimetil-cetona), que resulta em um alisamento da peça pois causa o amolecimento do filamento (PESTANO *et al.*, 2022).

O filamento PLA é o polímero mais utilizado na técnica de impressão 3D FFF, ele exige uma temperatura de impressão inferior quando comparado ao filamento ABS e não demanda uma mesa aquecida para o processo de impressão. O termoplástico é advindo de fontes como amido de milho, cana-de-açúcar ou amido de batata, portanto não é tóxico, sendo assim considerado uma melhor opção em termos ecológicos referente a materiais disponíveis para a manufatura aditiva. Considera-se o PLA como um dos filamentos mais fáceis de trabalhar em processos de impressão 3D (BESKO *et al.*, 2017). Porém, o filamento possui restrições, como sua característica quebradiça e sua baixa qualidade quanto ao acabamento superficial e textura característica. Estes

efeitos podem ser reduzidos, porém não evitados por completo, por técnicas de pré e pós processamento (VALERGA *et al.*, 2019).

No processo de pré-processamento, com o objetivo de otimizar o acabamento da superfície do objeto, é requerida uma atenção aos parâmetros chave aplicados no processo de fatiamento do modelo e no ajuste correto do equipamento. Devido à sua composição, o pós-processamento aplicado ao ABS não exerce o mesmo efeito em peças impressas em PLA. No entanto, há diversas outras técnicas disponíveis que podem resultar na redução dos defeitos de processo que ocorrem ao longo da impressão que utiliza deste material, como cortes, lixamento, envernizamento, pintura, entre outros (VALERGA *et al.*, 2019).

3.2.3.2 Parâmetros de Impressão

Em relação aos equipamentos e materiais utilizados, a definição dos parâmetros é uma das etapas mais importantes do processo de impressão 3D, podendo ser responsável pelo sucesso ou fracasso da operação, pois é necessário garantir que os mesmos estejam dentro do padrão estipulado pelo equipamento, material e técnica.

Existem diversos parâmetros que exercem influência sobre o resultado do processo de impressão, entre estes estão: densidade do preenchimento, padrão de preenchimento, velocidade de extrusão, velocidade de deslocamento e temperatura de extrusão. Parâmetros como temperatura e velocidade devem considerar a espessura de construção de camadas definida, pois estes são interligados, isto é, espessuras maiores quando combinadas à baixas velocidade de extrusão e alta velocidade de deslocamento, resultam em uma aderência reduzida entre camadas, podendo assim provocar a falta de material para a deposição. Considerando estes fatores, é necessário planejamento prévio quanto à definição destes parâmetros para que a fabricação não seja prejudicada (CUNICO, 2015). Portanto, os parâmetros de velocidade e temperatura foram as duas variáveis analisadas ao longo da pesquisa, considerando os possíveis efeitos em sua utilização junto à tela de pintura.

Quanto à temperatura, quando elevada, leva a um aumento de fluidez do filamento, podendo causar uma expansão das camadas, trazendo defeitos de impressão e afetando diretamente a dimensão da peça. A temperatura elevada também está associada ao fenômeno '*warping*', que consiste na contração do material, resultando no encurvamento da peça. O fenômeno ocorre pela diferença de temperatura

considerável entre o material e o ambiente, porém o empenamento também pode ser associado à adesão inadequada do material à superfície da mesa de impressão, devido à temperatura ou ajuste da superfície de impressão. Existe outro problema comum enfrentado no processo de impressão 3D pela técnica FFF, este é conhecido como '*stringing*'. Este defeito consiste em fios de material presentes na superfície, formados em consequência do deslocamento do bico extrusor. Este defeito é de difícil remoção, trazendo prejuízos quanto à qualidade do produto. Este fenômeno também está associado à temperatura ambiente, qualidade do material, mas está principalmente relacionado à temperatura de impressão, pois com a maior temperatura e fluidez do material, maiores as chances de formar o efeito *stringing* (HAQUE, 2020).

No que refere à altura da camada, sua relação quanto à qualidade da peça é inversamente proporcional, já que quanto menor a altura, mais lisa e uniforme se torna a superfície do objeto. Em virtude disso, os parâmetros que demonstram maior influência para garantir a qualidade da peça impressa são: temperatura do bico extrusor e altura da camada (TAŞCIOĞLU *et al.*, 2022).

3.2.4 Impressão 3D em materiais têxteis

A impressão 3D sobre tecidos já foi estudada em diferentes contextos. No estudo conduzido por Spahiu *et al.* (2017), destacou-se a influência significativa da temperatura de impressão nos resultados de adesão, revelando a importância dos parâmetros de impressão na qualidade do processo. Além disso, a pesquisa realizada por Pei, Shen e Watling (2015) evidenciou que o polímero PLA apresentou desempenho superior ao ser impresso sobre tecidos, com notável redução nos efeitos de empenamento, quando comparado a outros filamentos permitidos para impressoras de entrada. Este resultado ressalta a relevância da escolha do material polimérico na obtenção de resultados satisfatórios. Por outro lado, a análise conduzida por Korger *et al.* (2016) revelou que a adesão está intimamente ligada à morfologia do tecido, ao invés do tipo de filamento utilizado. Especificamente, substratos com uma superfície mais rugosa, trama mais aberta e maior presença de fibras na superfície demonstraram uma aderência mais eficaz. Essas descobertas destacam a complexidade do processo de impressão 3D em tecidos e apontam para a importância de considerar cuidadosamente diversos fatores para otimizar os resultados.

3.3 MODELAGEM 3D

Como visto anteriormente, a modelagem 3D é uma etapa fundamental no processo de impressão, pois esta define a geometria a ser utilizada e a integridade do arquivo a ser fatiado. Esta é a etapa que consiste na criação de objetos, formas e geometrias que podem ser aplicados à diversas finalidades, associados ao projeto e software a serem utilizados. Os softwares de desenho e manufatura auxiliado por computador (CAD-CAM) são ferramentas que auxiliam a criação de modelos virtuais ao longo do processo de criação de protótipos, e são comumente associados a processos de manufatura como usinagem por CNC e a impressão 3D (HUANG, LIN, 2017).

A modelagem 3D é essencial para os processos de design de produto, prototipagem e inovação. A tecnologia serve como uma ferramenta para a prototipagem rápida, diretamente associada à impressão 3D e pode ser fundamental para etapas de processos que definem a estética, permitindo a realização de testes e simulações e permitindo a personalização de artigos a serem fabricados. O processo padrão de modelagem tridimensional consiste na elaboração de um desenho bidimensional em um plano, definido anteriormente. Com essa geometria é feita a geração e refinamento do modelo utilizando ferramentas de extrusão, arredondamento, corte e chanfro (MAFIPOUR, VILGERTSHOFER, BORRMANN, 2023).

Assim como atualmente há diversas técnicas disponíveis a serem utilizadas para os processos de criação de protótipos e de produção, há também uma certa variedade de softwares de CAD à disposição. Parte do desenvolvimento atual das ferramentas utilizadas para a criação de modelos em 3D contam com softwares de modelagem paramétrica que facilitam a formação de modelos que apresentam desafios quando criados por meio da modelagem tradicional, além de possibilitar alterações ao longo do desenvolvimento de projetos, ou após sua conclusão, concedendo meios de personalização e refinamento de artigos de maneira otimizada. Para viabilizar a implementação da modelagem paramétrica, são necessários programas computacionais que operam com algoritmos que possibilitam alternâncias de parâmetros e geometrias. O software *Grasshopper*® opera como uma linguagem de programação inserida no programa de CAD *Rhinoceros*® e oferece possibilidades de modelagem paramétrica por sequências de componentes que geram modelos tridimensionais no programa (VIEIRA FAGUNDES, 2021).

As ferramentas que permitem a correlação de parâmetros aplicados à construção de modelos tridimensionais contribuem para as fases de testes e aprimoramento presentes ao longo da concepção de novos projetos (FLORIO, 2007). A função primária da modelagem paramétrica é baseada na criação de modelos adaptáveis, estes que podem ser aplicados à diversas áreas da criação, desde engenharia mecânica até conceitos aplicados em projetos artísticos (MAFIPOUR, VILGERTSHOFER, BORRMANN, 2023).

3.4 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

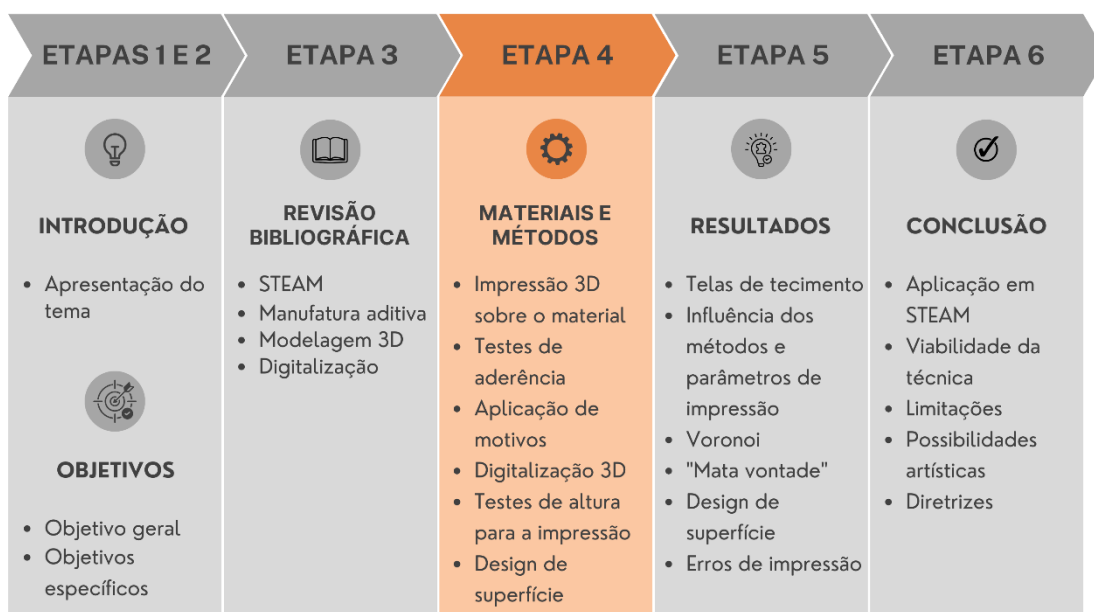
A digitalização tridimensional vem se expandindo ao longo dos anos pois fornece diversas possibilidades ao processo de fabricação. O processo tem como objetivo a obtenção de curvas, texturas, dimensões e detalhes de um objeto, possibilitando a análise de superfície e ocorre por escaneamento a laser (utilizando feixes de luz para medição de forma e estrutura) ou fotogrametria (capturas de diversos ângulos). A tecnologia conta com a etapa fundamental de pós processamento dos dados obtidos, para que seja possível alinhar e tratar o modelo digital por softwares virtuais (SILVA, 2006).

De acordo com Silva (2011), a digitalização 3D não apenas permite a captura de modelos digitais de objetos físicos, mas também oferece a capacidade de ajustar e aprimorar modelos tridimensionais com de softwares de CAD. Esta funcionalidade abre portas para releituras e melhorias de objetos, possibilitando uma reutilização de geometrias. A digitalização tridimensional é amplamente utilizada em diversas áreas, como na manufatura e produção, para realizar a avaliação de peças obtidas pelos processos de produção. Na indústria do entretenimento, a tecnologia é utilizada para a aplicação em cenários, efeitos especiais, entre outros. Já na medicina, esse avanço tecnológico tem sido particularmente eficaz em pesquisas voltadas para produtos feitos sob medida, possibilitando a captura de formas do corpo humano. Como resultado, é possível criar produtos personalizados que atendam às necessidades individuais dos usuários. Apesar das vantagens oferecidas pela tecnologia, é crucial destacar que a digitalização tridimensional ainda não é tão difundida e acessível como a impressão 3D, principalmente devido ao alto custo dos equipamentos, demandando um investimento significativo (BLENDER *et al.*, 2016).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, representado na etapa 4 da figura 8, são apresentados os materiais, equipamentos e métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, estes definidos com o objetivo de estudar possibilidades para aplicação do STEAM pela união das artes à técnica de impressão 3D FFF.

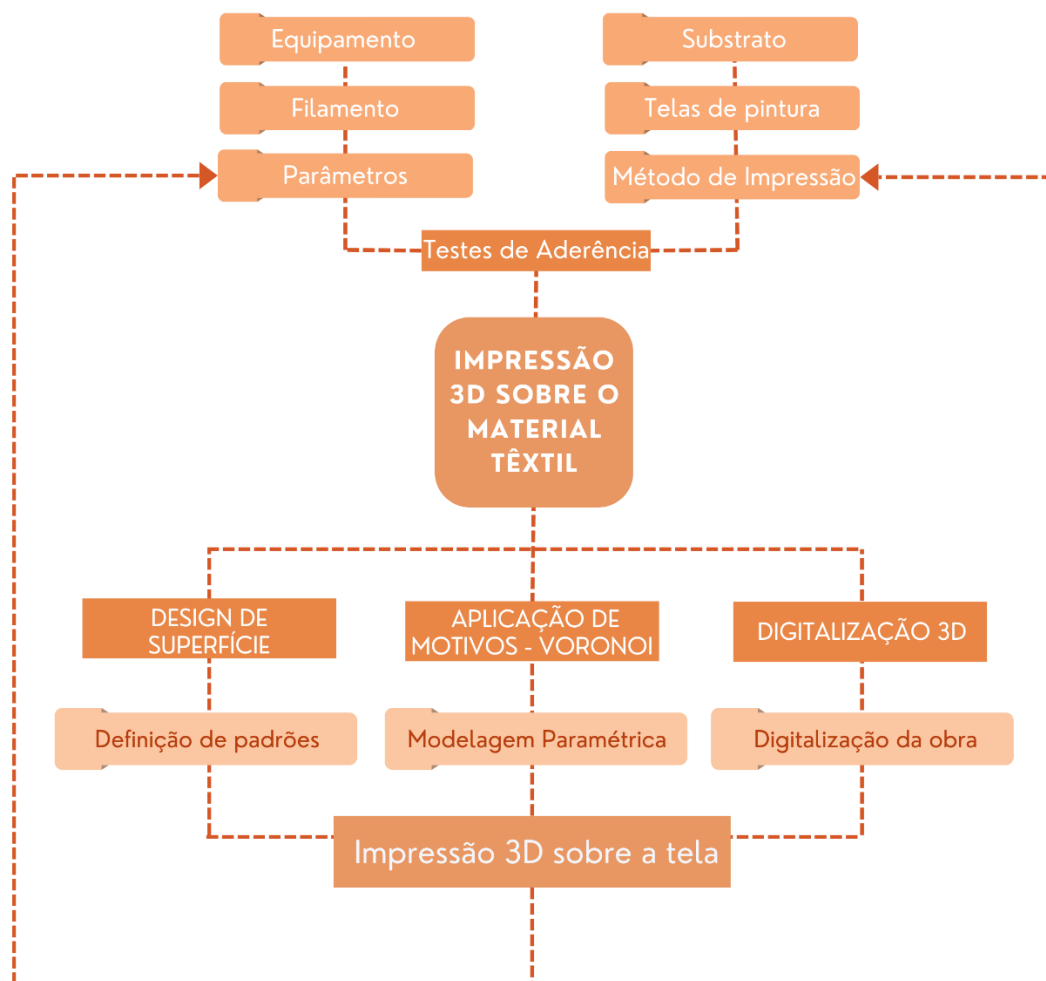
Figura 8 - Estrutura da dissertação: Materiais e métodos



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

As etapas do estudo foram definidas ao decorrer de sua execução em um processo “retroalimentar”, isto é, com características observadas nos resultados obtidos ao longo de seu desenvolvimento, foi possível decidir sobre a necessidade da adição de recursos como, por exemplo, testes para definir a espessura mínima ideal para a impressão sobre tecido. A importância destes ensaios foi detectada ao decorrer destes passos após a conclusão de etapas anteriores, indicando que detalhamentos adicionais foram necessários para seguir com as etapas seguintes. Na figura 9 é mostrada a sequência adotada para a realização do trabalho.

Figura 9 - Fluxograma das etapas de estudo



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

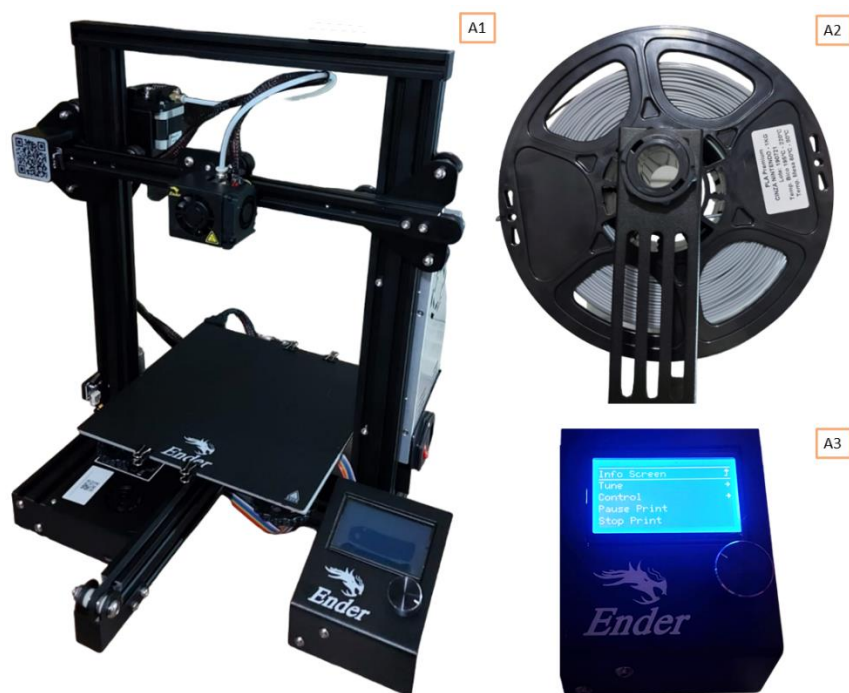
4.1 IMPRESSÃO 3D SOBRE O MATERIAL TÊXTIL

O primeiro passo da pesquisa foi a análise da viabilidade da prática do método para a compreensão dos materiais utilizados, neste caso o filamento PLA e os substratos (telas para pintura), para assim observar suas especificidades e comportamento ao realizar a sua união pelo processo de impressão 3D sobre o tecido. A escolha da técnica FFF para o estudo foi de acordo com a disponibilidade do equipamento a ser utilizado. Foi realizada a revisão das especificações e exigências da impressora, no que diz a respeito aos parâmetros, área de impressão, entre outras. Baseado nas informações disponíveis e compressão sobre material, impressora 3D e técnica, foram definidos parâmetros e métodos de impressão, descritos a seguir.

4.1.1 Impressora 3D e filamento

Para a pesquisa, foi utilizado o equipamento de impressão 3D da fabricante *Creativity®*, no modelo Ender-3 (figura 10). O princípio de funcionamento da impressora é a Fabricação com Filamento Fundido (FFF) que permite filamentos como PLA, ABS, PETG entre outros.

Figura 10 - Impressora 3D e filamento. (A1) Impressora Ender 3, (A2) Filamento PLA cinza, (A3) Display da impressora Ender 3



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Ao desenvolver um modelo para um projeto impresso em 3D, é necessário o conhecimento prévio da sua área de impressão útil. A impressora Ender-3 dispõe de 220 mm de largura no eixo x, 220 mm de comprimento no eixo y e 250 mm de altura no eixo z de espaço permitido para impressão. Como destacado no capítulo anterior, especificações de equipamento como velocidade máxima de impressão e temperatura do bico são fundamentais para a qualidade e o êxito do processo de impressão. Para a delimitação dos parâmetros iniciais, foi realizada uma verificação dos parâmetros de trabalho permitidos pela configuração atual do equipamento, estes presentes na tabela 2, que orientaram as etapas subsequentes.

Tabela 2 - Especificações do equipamento utilizado (Impressora Ender 3)

Velocidade máxima de impressão	180 mm/s
Diâmetro do bico	0,4 mm
Temperatura máxima do bico	255 °C
Temperatura máxima da mesa de impressão	110 °C
Espessura da camada	0,1 - 0,4 mm/s

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Após a consideração das delimitações do equipamento, para o próximo passo foi necessário atender as especificações do material a ser utilizado. Na pesquisa, o filamento determinado foi o PLA (Ácido Poliláctico), na cor cinza, que permite ser trabalhado entre as temperaturas de extrusão entre 195 °C e 220 °C e temperatura de mesa entre 60°C a 80°C. O filamento PLA foi designado primeiramente devido à sua compatibilidade com o equipamento designado na etapa anterior e, principalmente, por sua facilidade para impressão, pois este permite combinações diversas de parâmetros e exige uma menor demanda de tratamento posterior para a peça. A cor cinza foi escolhida de forma randômica e fixado ao decorrer do desenvolvimento do trabalho para evitar possíveis alterações relacionadas ao pigmento presente no material.

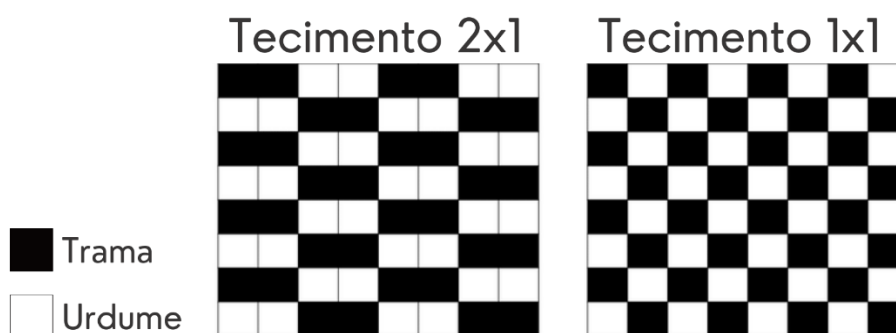
4.1.2 Telas para pintura

Para a determinação do substrato onde seria aplicado o PLA, filamento estipulado para a técnica de impressão 3D, foi considerado o conceito que a pesquisa buscou percorrer, já que a importância das artes é imperativa na busca de conhecimento pelo STEAM. No presente estudo, fez-se a utilização de um material convencional utilizado como forma de expressão visual, sendo este a tela para pintura. As telas de pintura destinam-se a pinturas à óleo, tintas para tecido, tintas acrílicas, entre outras. As telas usadas na pesquisa são compostas por algodão e tratadas previamente com um primer acrílico branco para melhor aderência à pintura e proteção das fibras do tecido. Telas de pintura podem ser feitas de diversos materiais e podem ser preparadas conforme a preferência do artista após sua aquisição. No escopo deste trabalho, optou-se por trabalhar com um material convencional, visando introduzir uma técnica adicional ao processo. Para os primeiros testes, foram selecionados dois tipos de telas

para pinturas, estes diferenciados pela espessura e por seu tipo de tecimento, definido pela forma em que a trama e o urdume da tela são ordenados.

Na composição de uma tela, um fio de urdume passa alternadamente pelo fio da trama, assim formando o tecido. A tela mais grossa, denominada 'tela 1' possui um tecimento de 2x1, representado na figura 11, e cada fio de trama é entrelaçado por dois fios de urdume, deixando assim maiores espaços entre os fios, trazendo uma característica mais rugosa e aberta ao tecido. Adicionalmente, selecionou-se outra tela para pintura, denominada de 'tela 2', com uma característica mais lisa e de menor espessura, em virtude da composição de seu tecimento 1x1, em que cada fio de urdume se entrelaça a um fio de trama, assim deixando um espaço reduzido entre os fios. A decisão de inicialmente realizar testes com dois substratos foi motivada pela busca de um material que obtivesse um comportamento compatível com a técnica e filamento PLA, fornecendo uma melhor aderência e, por consequência, viabilizasse o método estudado.

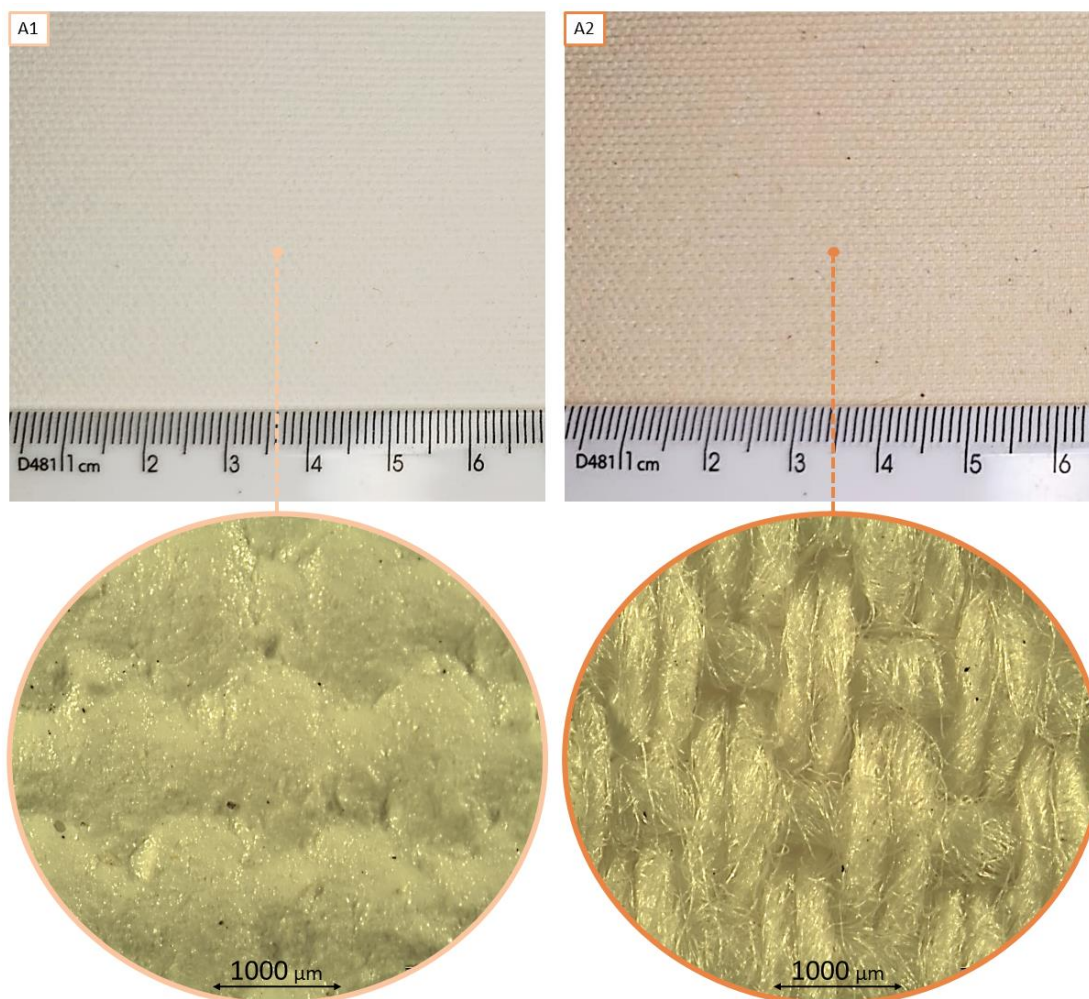
Figura 11 - Tipos de tecimentos das telas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

A tela 1 é formada por uma gramatura de 350 g/m² e uma espessura de 540 µm com alta ondulação, justificando sua característica rugosa. Na figura 12 é possível observar a superfície da tela, preparada com acabamento acrílico e em seu verso, onde observa-se o tecido cru, fica evidente o tecimento 2x1.

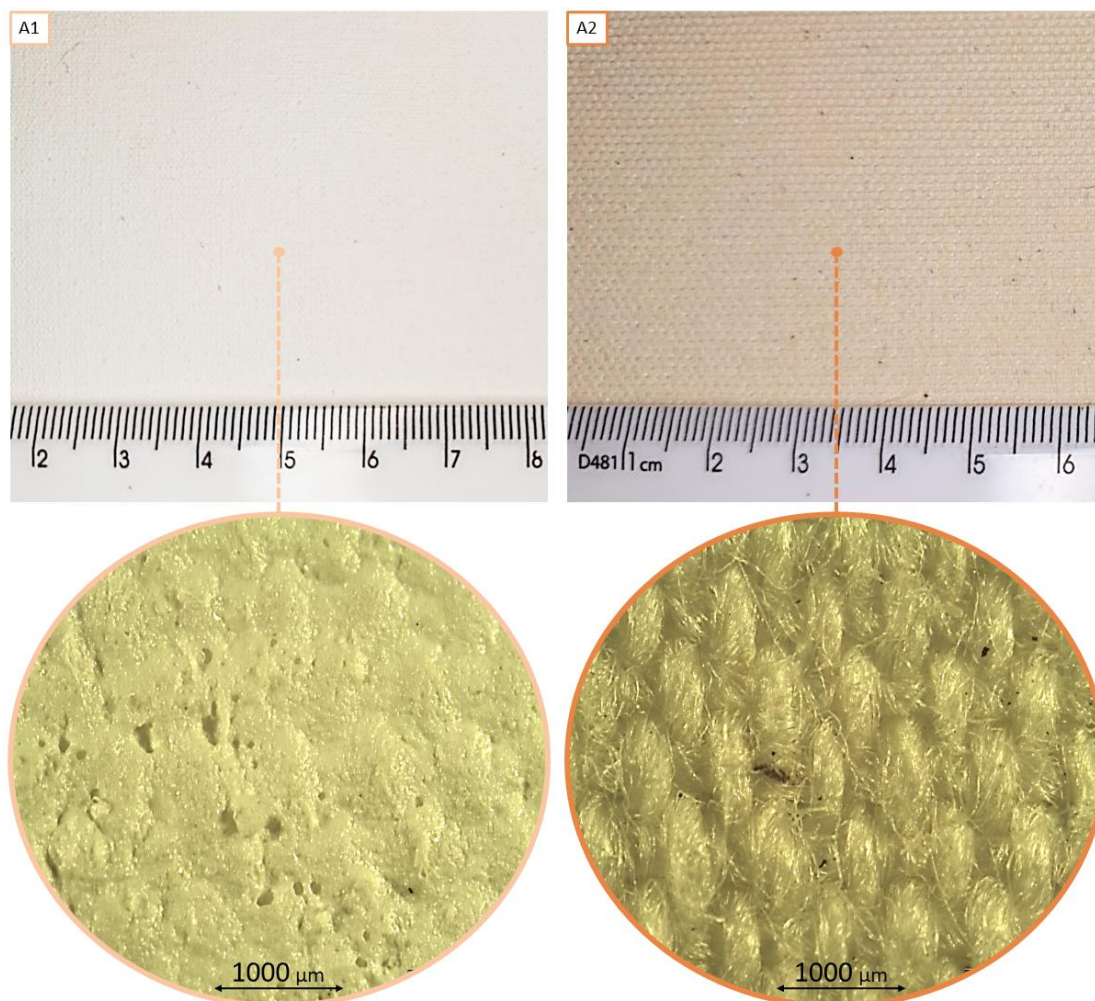
Figura 12 - Tela 1 – Tecimento 2x1 (A1) Superfície da tela 1 com imagem ampliada, (A2) Verso da Tela 1 (tecido cru) com imagem ampliada



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

A tela 2 tem sua característica fina justificada por sua gramatura de 280 g/m^2 e espessura de $420 \text{ }\mu\text{m}$, valores de composição inferiores ao da tela 1. Sua superfície possui uma menor ondulação, fornecendo assim uma textura lisa, podendo ser observada na figura 13, juntamente ao tecido cru, onde evidencia seu tecimento 1x1.

Figura 13 - Tela 2 – Tecimento 1x1 (A1) Superfície da tela 2 com imagem ampliada, (A2) Verso da Tela 2 (tecido cru) com imagem ampliada



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

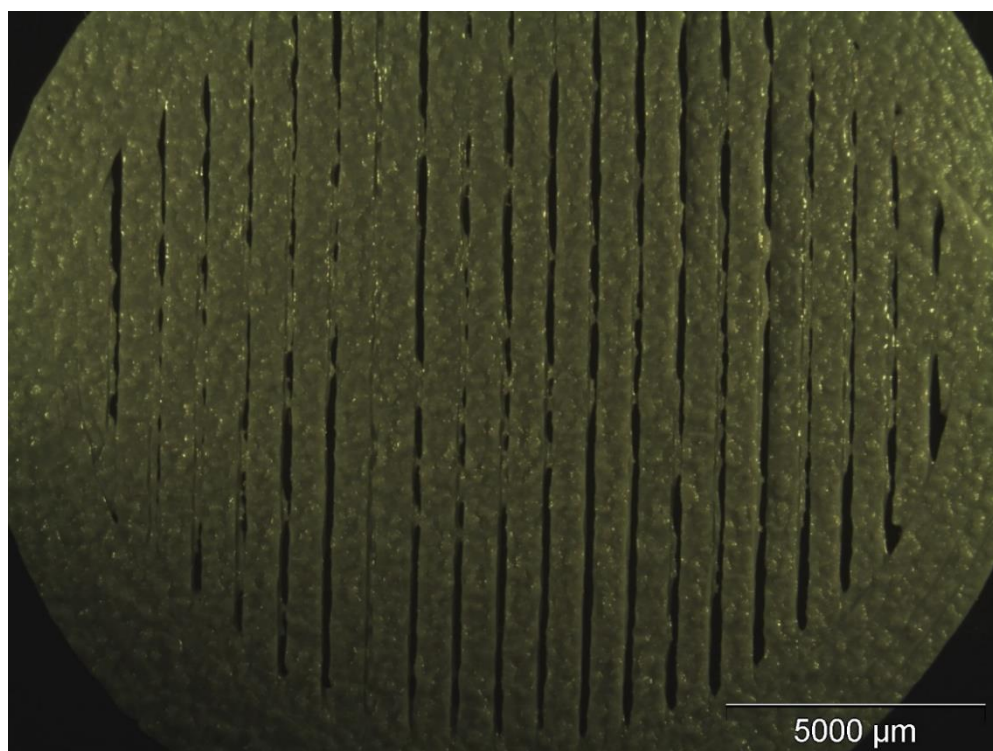
4.1.3 Definição do método de impressão

Assim que definidos os materiais e equipamento a serem utilizados na pesquisa, foi dado início aos primeiros testes de impressão 3D sobre as telas de pintura. No método de impressão empregado nos testes iniciais, o tecido era posicionado sobre a mesa de impressão, previamente ao início da impressão e assim fixado com prendedores em suas extremidades, para então dar início ao processo. Observou-se assim que o PLA não demonstrava aderência suficiente à tela, levando inclusive ao tombamento de diversas peças durante a impressão, o que motivou a busca de um método de impressão mais adequado à técnica.

Em virtude dos problemas enfrentados no primeiro método de impressão, foi considerada uma nova maneira de realizar este processo, que consistia em depositar

a primeira camada de material (figura 14) sobre a mesa de impressão e assim que essa etapa se concluía, o processo era interrompido para que o tecido fosse ajustado sobre a mesa e a primeira camada, assim retornando a depositar as camadas subsequentes sobre a tela. Deste modo o tecido se mantinha entre as duas primeiras camadas de PLA ao decorrer do processo, formando uma espécie de “sanduíche” de materiais.

Figura 14 - Primeira camada de impressão



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

4.1.4 Definição de parâmetros de impressão

Para a etapa de testes iniciais, foram determinados parâmetros randômicos, dentro das limitações impostas pelo filamento e equipamento, porém, para a sequência dos testes foram determinados alguns parâmetros fixos e outros com valores que poderiam ser variados com o objetivo de compreender a influência dos mesmos sobre a aderência do PLA à tela de pintura. Os parâmetros fixos foram definidos de acordo com as especificações da impressora e do filamento PLA apresentados anteriormente. Quanto à qualidade desejada, os valores foram determinados por intermédio do software de fatiamento *Ultimaker Cura*, definidos assim de acordo com a escolha da qualidade optimal (*super quality*) estimada para as peças impressas. Estes valores podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros fixos

Altura da camada	0,12 mm
Altura da primeira camada	0,12 mm
Largura da linha	0,4 mm
Espessura da parede	1,2 mm
Preenchimento	20 %

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Levando em consideração a possibilidade da alteração da aderência e qualidade das peças em decorrência dos critérios definidos, foram selecionados parâmetros de teste que permitissem uma alternância para assim verificar sua influência sobre o resultado. Os valores definidos foram estipulados dentro dos limites estabelecidos pela impressora 3D e o filamento PLA, mostrados na tabela 4. A temperatura de impressão e a velocidade foram estipuladas para esta intercalação pois, como visto anteriormente, estes são correlacionados e possuem influência direta sobre a qualidade do objeto tridimensional a ser impresso. O objetivo da etapa era encontrar a combinação de parâmetros que viabilizasse a união dos materiais e fornecesse melhor resultado quanto à aderência.

Tabela 4 - Parâmetros de teste

Temperatura de impressão	200 - 220 °C
Temperatura da mesa	70 °C
Velocidade de impressão	40 - 60 mm/s
Velocidade de impressão (primeira camada)	20 - 30 mm/s
Velocidade de impressão (parede)	20 - 30 mm/s

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

4.2 TESTES DE ADERÊNCIA

A presente etapa foi essencial para a sequência da dissertação, pois na mesma estudou-se maneiras de realizar uma etapa comparativa entre as combinações de parâmetros quanto à aderência do PLA sobre a tela de pintura. As práticas foram conduzidas de maneira que possibilitassem a seleção de uma combinação de parâmetros para a sequência do trabalho e determinassem a influência dos

parâmetros de teste (velocidade e temperatura) sobre esta decisão. Inicialmente foram determinados dois métodos de verificação de aderência, o primeiro sendo uma observação por MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e em seguida, por meio de resultados obtidos por um equipamento medidor de aderência, denominado *Pull Off*.

4.2.1 Impressão de pinos (*Dollys*)

Para encontrar meios que possibilitassem o entendimento da influência dos parâmetros quanto à aderência do PLA à tela de pintura, foram propostos testes que contavam com o arrancamento do objeto impresso sobre a superfície da tela de pintura. Um dos testes contou com o auxílio do equipamento *Pull Off* (figura 15), um medidor de aderência que realiza o arrancamento de peças, de formato compatível com o equipamento, que fora previamente colado a uma superfície. Assim definiu-se um modelo padrão a ser impresso, para que tornasse possível a sua aplicação em ambos os métodos de testes.

Figura 15 - Equipamento *Pull Off*



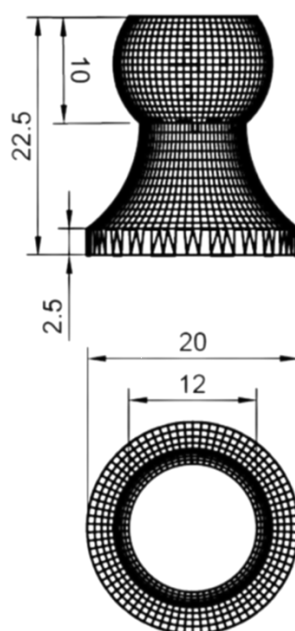
Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

O orifício presente no equipamento *Pull Off*, permite o encaixe de uma peça metálica, denominada "*Dolly*". Esta peça é usualmente colada sobre o material destinado aos testes de aderência e então inserido no equipamento, assim permitindo o arrancamento, viabilizando a medição de deslocamento e o fornecimento de resultados quanto a força exercida (MPa). O dispositivo de arranque pode ser visto na figura 16.

Figura 16 - (A) Dispositivo de arranque; (B) Abertura para o encaixe *dolly*

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Nos testes de aderência realizados na dissertação, o objetivo era obter valores que mostrassem a aderência do PLA ao substrato sem a interferência de outros materiais, como cola. Para que isto fosse possível, seria necessária impressão do *dolly* diretamente sobre o tecido. Considerando esta implicação, foi obtido o modelo digital tridimensional do *dolly* de diâmetro de 20 mm (figura 17) para que fosse posteriormente convertido para um arquivo STL e, em sequência, ser seccionado no software de fatiamento, quando seriam definidos os parâmetros de teste individual para cada conjunto de parâmetros.

Figura 17 – Representação das dimensões do *dolly* (medidas em mm)

Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Concluída a conversão do modelo digital do *dolly* para STL, na sequência houve a etapa de seleção dos parâmetros para a análise de aderência. Assim foram determinadas quatro combinações de variáveis como parâmetro de teste, os parâmetros fixos se mantiveram de acordo com os presentes na tabela 3. Na tabela 5 são indicados parâmetros de impressão para cada combinação.

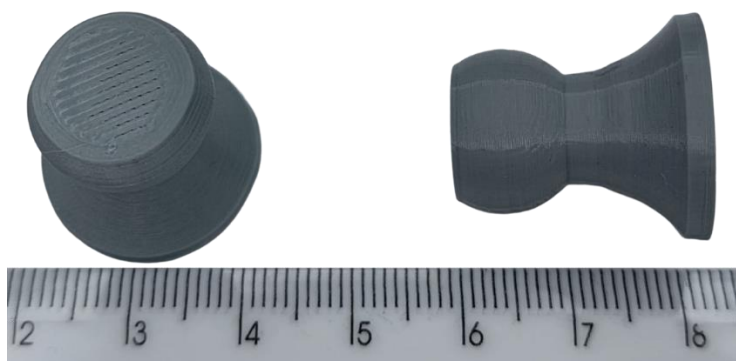
Tabela 5 - Parâmetros de impressão dos Pinos (*Dollys*)

MODELOS DE IMPRESSÃO	DOLLY 1	DOLLY 2	DOLLY 3	DOLLY 4
Temperatura de impressão	200 °C	220 °C	220 °C	200 °C
Velocidade de impressão	40 mm/s	40 mm/s	60 mm/s	60 mm/s
Velocidade de impressão da parede	20 mm/s	20 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Velocidade de impressão da primeira camada	20 mm/s	20 mm/s	30 mm/s	30 mm/s

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Na sequência, foi dado início ao processo de impressão dos *dollys*, primeiramente apenas sobre a mesa de impressão sem o substrato (figura 18), para efeitos de comparação apresentadas nas etapas seguintes.

Figura 18 - Pino (*dolly*) impresso em PLA



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Em seguida, iniciou-se a impressão dos *dollys* sobre os substratos selecionados anteriormente, neste caso tela 1 e tela 2. Para a análise de aderência individual, seguindo os parâmetros representados na tabela 5.

4.2.2 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Assim que impressos os *dollys* para cada combinação de parâmetro, em ambas as telas de pintura, foi dada a sequência para o primeiro teste visual de aderência realizado com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (figura 19)

disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Esta etapa ocorreu pela análise de imagens microscópicas obtidas da superfície de contato entre o substrato e o PLA (base do *dolly*) após realizado o arrancamento.

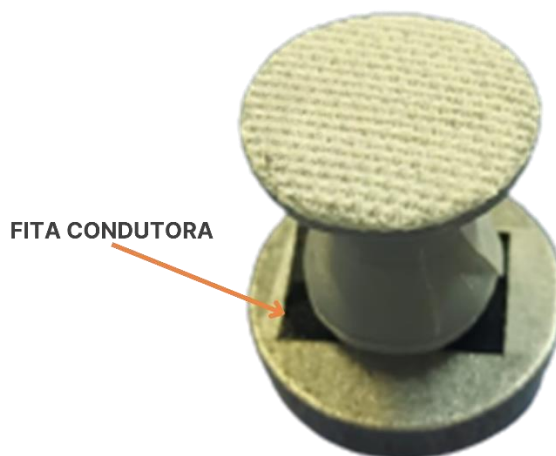
Figura 19 - Microscópio Eletrônico de Varredura do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM)



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Os primeiros registros microscópicos se deram por imagens de topo que permitiram a visualização de uma camada de PLA depositado sobre a superfície da tela, com o propósito de verificar o comportamento dos materiais.

Para viabilizar um estudo mais aprofundado sobre a aderência, constatou-se que a observação da superfície de contato entre o PLA e o tecido seria fundamental para a atingir uma conclusão de maior confiabilidade. Com esta finalidade foram registradas oito imagens ampliadas da base dos *dollys* impressos anteriormente, de maneira que permitissem a observação de detalhes adicionais, para assim realizar a comparação do comportamento das peças quando impressas sobre as duas telas de impressão distintas, bem como a comparação do efeito da combinação de parâmetros para cada *dolly* impresso. A primeira análise foi executada com as imagens obtidas da impressão dos quatro *dollys* sobre a tela 1, de superfície mais rugosa. As peças foram retiradas manualmente do substrato, aplicando-se força sobre a tela e o *dolly* em direções opostas. Este arrancamento ocorreu momentos antes da inserção do *dolly* no equipamento, para que assim as fibras e resíduos presentes na superfície se mantivessem intactos. Em seguida, os *dollys* foram preparados para os ensaios e fixados com o auxílio de fita condutora, assegurando uma conexão elétrica estável entre a amostra e o suporte durante os ensaios de MEV. A preparação do *dolly* é apresentada na figura 20.

Figura 20 - Preparação do *dolly* para o ensaio no MEV

Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Assim que inseridos no equipamento e posicionados, foi selecionada uma ampliação de 100x para cada um dos corpos de prova. Assim que definida uma imagem com uma boa resolução, o processo repetia-se na sequência. Após obter todos os oito registros, as imagens foram tratadas posteriormente e coloridas, a fim de uma melhor observação de suas características.

4.2.3 Teste de aderência *Pull Off*

Concluída a etapa de análise de visualização da aderência por meio do MEV, buscou-se um ensaio que retornasse valores numéricos para comparar a aderência entre os modelos impressos mediante combinações diferentes de parâmetros. Desta forma, definiu-se o teste de aderência realizado por meio do equipamento *Pull Off*. Esta ferramenta de teste funciona pelo arranque do *dolly*, previamente fixado a uma superfície para assim medir a força exercida em Mega Pascal (MPa).

Considerando que o equipamento conta com a medição da força exercida para o arrancamento, semelhante a um ensaio de tração, conclui-se que a tela de pintura necessitaria ser fixada a uma superfície para prover um resultado confiável ao teste. A primeira solução pensada foi realizar a fixação do tecido sobre uma placa de madeira (mdf) por meio de cola epóxi. Em seguida, foram impressos cinco modelos tridimensionais para cada combinação de parâmetro em ambas as telas, totalizando assim quarenta amostras que foram posteriormente fixadas e submetidas ao teste de aderência *Pull Off*. A demonstração do desenvolvimento do teste pode ser vista na figura 21.

Figura 21 - Registro do ensaio com o equipamento *Pull Off*

Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Ao longo da realização do teste, foi possível notar características que indicaram uma anormalidade, como *dollys* que, ao serem arrancados do tecido, causavam o arrancamento da superfície da madeira, produzindo assim um resultado não confiável quanto à aderência. Ocorreu o oposto para algumas peças impressas com os mesmos parâmetros, já que o ato de encaixar o *dolly* no equipamento fornecia força suficiente para arrancá-lo do tecido. Devido à esta instabilidade para a obtenção dos resultados, conclui-se que o teste forneceu dados não conclusivos, que se encontram no apêndice A.

Ao repetir o teste com a tela 2, o equipamento forneceu valores superiores quanto à medição de força aplicada, e em muitos casos, o arrancamento não foi possível devido a sua fixação. Considerando os dados de arrancamento obtidos anteriormente, levantou-se a hipótese de que os testes sofreram interferência pela cola utilizada para fixar o tecido sobre a superfície da madeira.

Em virtude da provável influência da cola nos resultados de teste, foram levantadas alternativas a fim de obter valores confiáveis advindos do equipamento *Pull Off*. A alternativa inicial foi utilizar fita adesiva dupla face com o objetivo de fixar o verso do tecido com a superfície da madeira. Para esta etapa foi impresso apenas um modelo para cada combinação de parâmetro, a fim de verificar a viabilidade da fixação para o teste. Portanto, a fita dupla face não demonstrou a aderência esperada para a conclusão do teste, assim causando um deslocamento na região central da peça no momento do ensaio, fornecendo assim resultados inconclusivos para a etapa. Esta ocorrência pode ser observada na figura 22.

Figura 22 - *Dollys* deslocados após a realização do teste *Pull Off*



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Enfim, testou-se uma terceira alternativa para a realização do ensaio, dispensando o uso de colas e realizando a fixação apenas por uma estrutura preparada em madeira, fixada por prendedores, que isolaria o tecido ao redor e permitiria apenas o encaixe do equipamento em seu centro, como mostrado na figura 23. Verificou-se que esta ferramenta também contribuía para o deslocamento da tela ao decorrer da execução dos testes, e em sua maioria não foi capaz de realizar o arrancamento do *dolly*. Concluiu-se assim que o teste não poderia fornecer valores de força confiáveis para serem acrescentados como resultados objetivos para os testes de aderência.

Figura 23 - Teste *Pull Off* com fixada por uma estrutura em madeira



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Concluindo a etapa de testes realizados utilizando o equipamento *Pull Off*, foi tomada a decisão de não adotar os resultados como valores referentes à aderência do material sobre a tela de pintura. Não foram feitas tentativas adicionais pois não havia sido identificada uma solução viável para obter resultados sem a influência dos meios de fixação aplicados. Logo, visto que as combinações de parâmetros determinadas para os testes demonstraram aderência em todos os casos, quando impressas sobre a tela 1, a referência de resultados para etapas seguintes da pesquisa passou a ser realizada por metodologia de análise visual realizada por imagens MEV.

4.3 APLICAÇÃO DE MOTIVOS – VORONOI

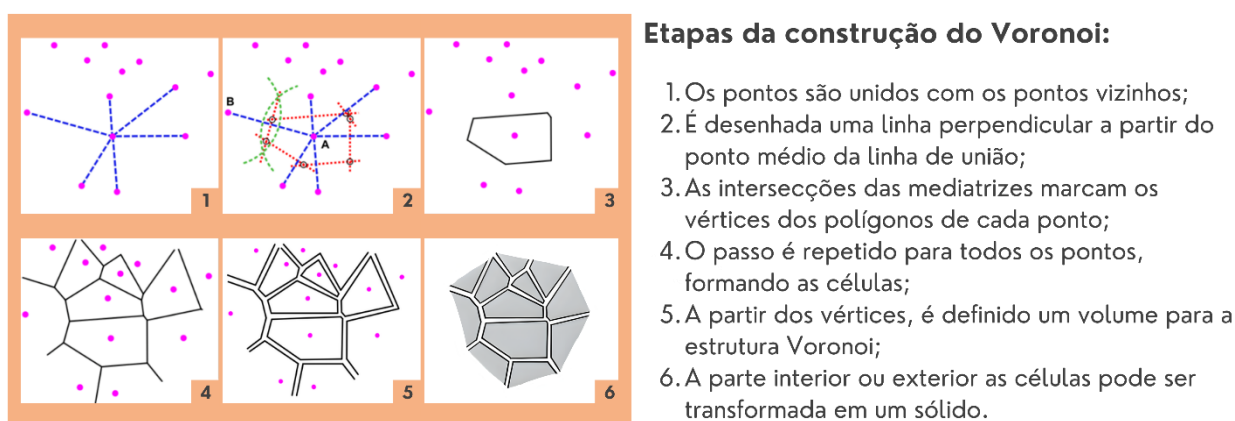
Na sequência dos testes e da demonstração da viabilidade da técnica de impressão, foram elaboradas maneiras de demonstrar a sua aplicação a fim de representar as possibilidades artísticas, tendo em vista que o estudo busca apresentar a impressão 3D como uma ferramenta para artistas, unindo a tecnologia a outras expressões de arte. Esta etapa consistiu na elaboração de dois motivos que unissem os elementos presentes em STEAM em uma representação visual que permitisse explorar as possibilidades oferecidas pela técnica.

4.3.1 Definição da geometria

Para esta etapa, decidiu-se pelo aproveitamento da ferramenta de programação *Grasshopper*®, operando em conjunto ao software de modelagem paramétrica *Rhinoceros*® 3D, para que assim fosse possível realizar modificações em variáveis de projeto ao longo do conhecimento da técnica, evitando que cada ajuste exigisse uma nova modelagem. A modelagem paramétrica se apresenta como um meio de otimizar etapas em projetos que buscam reproduzir características de elementos presentes na natureza, pois em determinados casos, estas seguem padrões.

A pesquisa buscou trazer elementos presentes na natureza para representar o ‘S’ de *Science* (ciência) do STEAM. O elemento considerado foi a aplicação da geometria Voronoi, encontrado similarmente em elementos da natureza, como cascas de tartaruga, asas de libélulas, entre outras. A estrutura Voronoi se apresenta frequentemente como uma solução nas áreas do design e engenharia, devido às suas características estéticas e estruturais. O diagrama pode ser descrito como uma divisão de áreas em um espaço, onde vários pontos são conectados por linhas. É feita a mediatriz dessa conexão e uma linha perpendicular é traçada partindo de seu ponto médio. Os pontos de intersecção entre as linhas perpendiculares formam o que se chama a célula Voronoi. Esta demonstração está presente na figura 24.

Figura 24 - Passos para a construção de um diagrama Voronoi



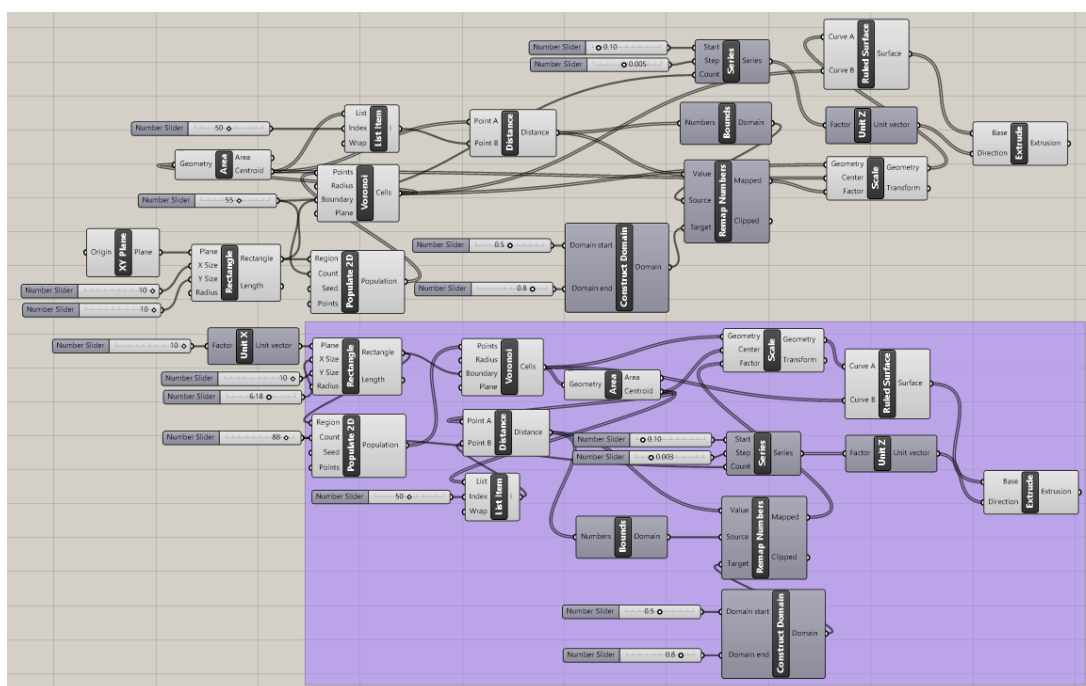
Fonte: Adaptado de Marín (2021)

A aplicação do Voronoi em projetos deve respeitar uma geometria previamente estabelecida, podendo exercer a forma de uma face do projeto ou de preenchimento. Considerando que na pesquisa a forma seria aplicada sobre uma tela de pintura, definiu-se a geometria retangular para este fim, mais precisamente inspirada no

“Retângulo de ouro” por Euclides. Esta definição foi realizada com o objetivo de representar a Matemática ‘M’ (*Mathmatics*) presente no STEAM como estímulo visual ao projeto. Para a definição da dimensão do retângulo, foi definido primeiramente que este deveria respeitar os limites impostos pela impressora Ender-3, sendo de 220 mm nas coordenadas X e Y. Portanto, respeitando as dimensões do equipamento, definiu-se o retângulo de 16,18 cm por 10 cm. Como visto anteriormente, o diagrama de Voronoi conta com células presentes em sua estrutura, foi então estabelecido que os modelos seriam divididos em duas partes, sendo a primeira, um quadrado de 10 cm com 55 células e a outra um retângulo de 6,18 cm por 10 cm com 89 células.

Com as definições pré-estabelecidas, foi gerado o algoritmo para a realização do primeiro motivo, denominado ‘motivo 1’. O algoritmo está presente na figura 25.

Figura 25 - Algoritmo gerado para o motivo 1

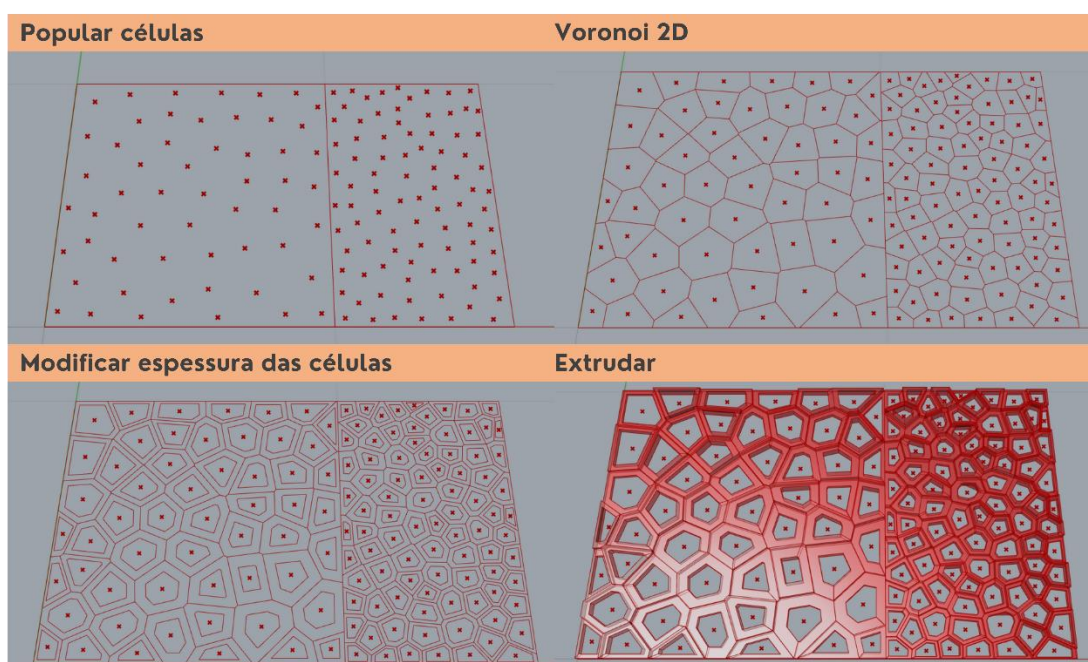


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

O princípio foi dado a partir de um plano bidimensional ‘XY’, onde foi construído o quadrado e retângulo definidos na etapa anterior. Em seguida, as geometrias foram “populadas” com o número de pontos estabelecidos previamente, e no quadrado foram gerados 55 pontos e no retângulo 89 pontos em posições randômicas utilizando a ferramenta “Populate 2D”. Com esta ferramenta, foi aplicada a ferramenta “Voronoi”, que gera automaticamente as células com os pontos definidos anteriormente. Esta ferramenta gerou uma estrutura Voronoi composta por linhas. Para que fosse possível

obter uma estrutura capaz de ser impressa tridimensionalmente, o algoritmo necessitou da ferramenta “*Scale*” para estabelecer a espessura das células e da ferramenta “*Construct Domain*” para realizar ajustes. Nesta etapa, a extrusão das células criadas foi viabilizada, portanto, a efeito visual, optou-se por células com diferentes alturas, utilizando a ferramenta “*Series*” aplicada sobre o plano “Z”. As etapas de elaboração do projeto podem ser observadas na figura 26.

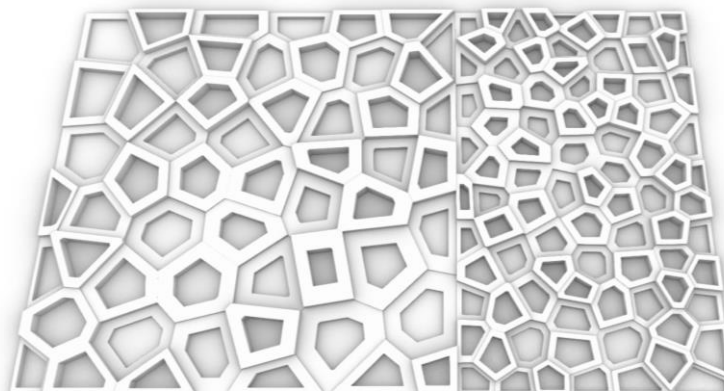
Figura 26 - Etapas de elaboração do motivo 1



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Assim que concluídas as etapas de elaboração do projeto proposto para o motivo 1, foi realizada a etapa de transformação do modelo em um sólido tridimensional, com a opção “*Bake*” disponível na ferramenta de extrusão. Assim foi possível obter uma visualização renderizada do projeto (figura 27), e assim realizada a transformação do objeto para um arquivo em formato STL, preparando o arquivo para o fatiamento realizado na etapa seguinte do processo.

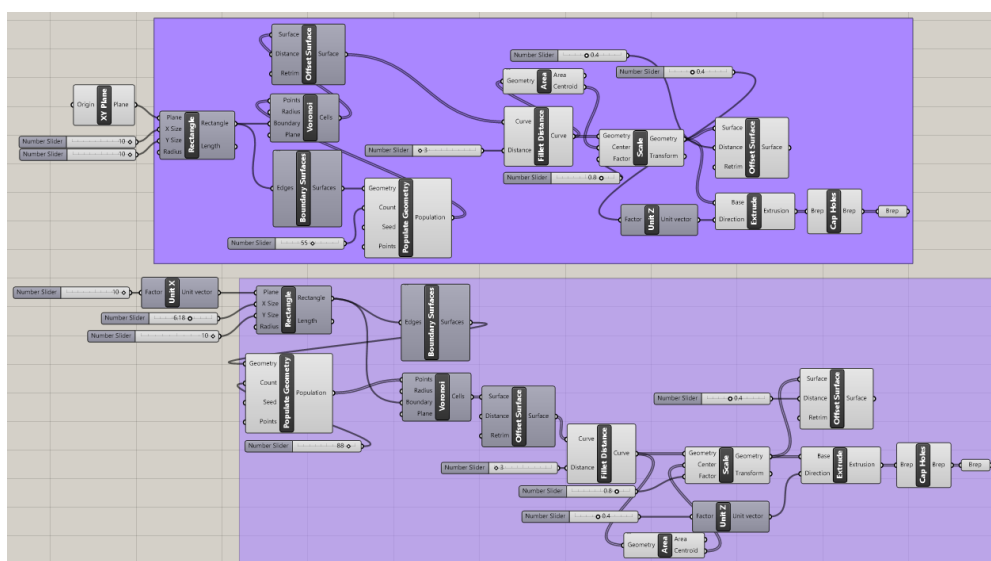
Figura 27 – Modelo sólido do objeto proposto para o motivo 1



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Em seguida da elaboração do primeiro motivo, notou-se a necessidade de demonstrar as possibilidades propostas pela pesquisa, já que um objeto impresso em 3D diretamente sobre a mesa de impressão necessitaria de uma estrutura “fechada” para manter seus componentes unidos. Como o método estudado utiliza a tela de impressão para a aplicação do modelo tridimensional, não se faz necessário o fechamento dessa estrutura, podem assim ser composto de diversos sólidos separados por distâncias variadas. Como forma de explorar esta possibilidade, utilizou-se as mesmas estruturas presentes no motivo 1, quanto ao número de células e a geometria definida. Assim estruturou-se o ‘motivo 2’, e seu algoritmo está presente na figura 28, o algoritmo proposto segue o mesmo princípio do primeiro algoritmo, porém de forma simplificada.

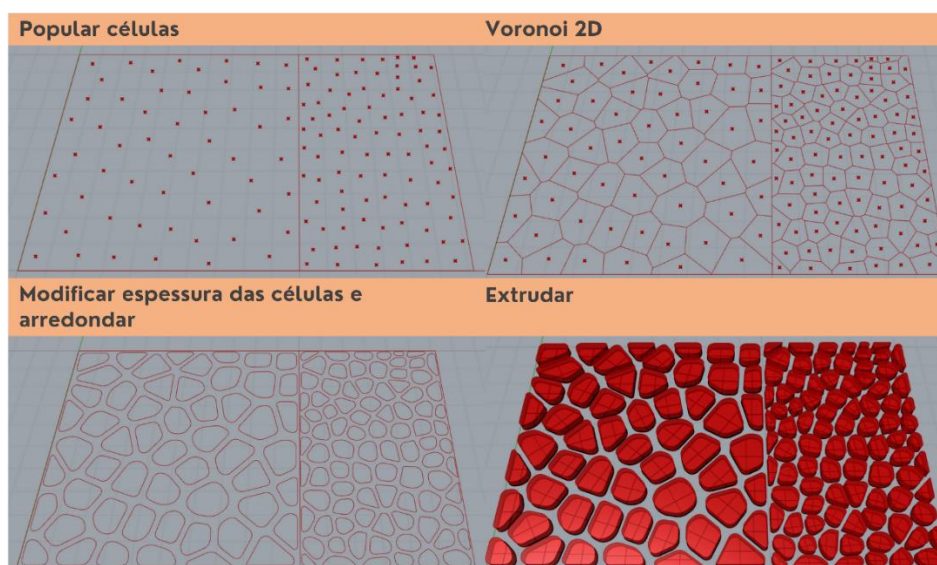
Figura 28 - Algoritmo gerado para o motivo 2



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Para este projeto, após a definição das células Voronoi e sua espessura, foi estabelecido um arredondamento sobre a geometria individual das células utilizando a ferramenta “*Fillet Distance*”. Em seguida, a extrusão das células foi realizada, porém como uma forma “oca”, portanto foram aplicadas as ferramentas “*Cap Holes*” e finalizada com “*Brep*”, formando assim a superfície das células. As etapas de elaboração para o motivo 2 estão presentes na figura 29.

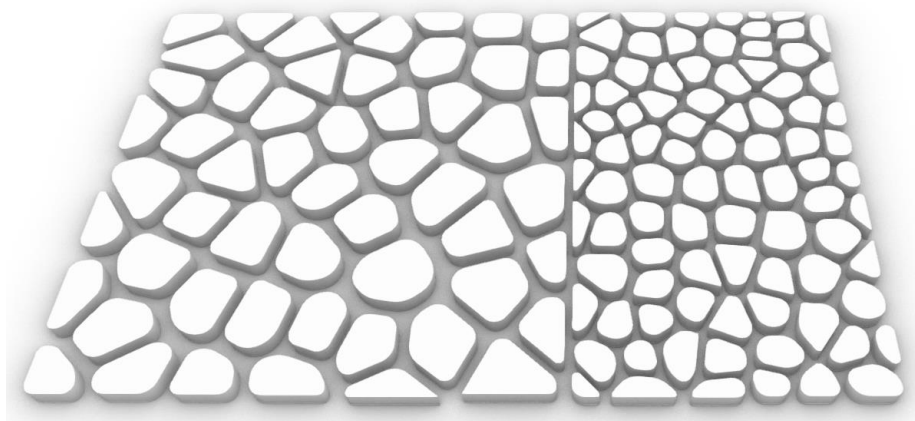
Figura 29 - Etapas de elaboração do motivo 2



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Assim que finalizada a geometria proposta para o motivo 2, a estrutura foi transformada em um sólido, com a ferramenta “*Bake*”, passando assim pelo processamento digital de renderização da peça (figura 30).

Figura 30 - Modelo sólido do objeto proposto para o Motivo 2



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

4.4 DIGITALIZAÇÃO 3D

Após concluída a demonstração das potencialidades de modelos em 3D com a elaboração dos motivos 1 e 2, considerou-se pertinente a exploração de competências adicionais ofertadas pela técnica. No atual contexto, optou-se por exemplificar as capacidades de releitura e reprodução de uma pintura texturizada pela colaboração entre duas formas de tecnologia complementares, a digitalização 3D e a impressão 3D.

A utilização da digitalização 3D é adequada em diversas circunstâncias, desde a conversão de um objeto para um modelo tridimensional com o propósito de seu armazenamento, como também para a sua modificação, otimização, pesquisa, entre outros. Na presente circunstância, a utilização da tecnologia foi elaborada pela concepção em um âmbito artístico, em que o método estudado não estaria apenas limitado à criação de elementos que incorporassem obras artísticas, mas que também permitisse sua releitura e reprodução com novas técnicas e materiais.

A captação de superfícies de obras artísticas e sua reprodução com materiais poliméricos pode apresentar-se como uma nova forma de concepção de artigos artísticos, como pinturas e esculturas. Os artefatos históricos e passíveis de deterioração encontrados em museus e exposições inviabilizam o ato do toque. Essa privação de tato é compreensivelmente demandada devido aos possíveis danos causados por interferências e inadvertências. No entanto, embora a apreciação visual seja frequentemente considerada um estímulo satisfatório ao admirar obras de arte, argumenta-se que o sentido do tato foi e continua sendo de grande importância na história da arte, com potencial para inclusão e ensino de maneira descomplicada (CANDLIN, 2009). Para pessoas portadoras de deficiências visuais, atualmente são fornecidas visitas guiadas a museus e exposições com descrições detalhadas que buscam transmitir a experiência, porém o projeto *HERITAGE: Please Touch the Art* (Por favor, toque na arte) realizado pela Universidade Oxford (GARTH, 2016) reforça a importância da experiência do toque e os desafios encontrados na descrição verbal de elementos capturados visualmente ou pelo tato. Desta maneira, a digitalização 3D de obras artísticas e a reprodução por impressão 3D podem tornar a apreciação da arte mais acessível e conveniente. Sabe-se, devido às propriedades específicas do PLA, a sua utilização para percepção tátil pode exigir a substituição das peças ao

longo do tempo. Essa necessidade surge devido à degradação gradual do material, resultando na perda de suas propriedades originais.

4.4.1 Definição da pintura texturizada

A fim de exemplificar as ideias apresentadas sobre a capacidade fornecida pela união da digitalização 3D à impressão 3D sobre telas de pintura, a presente pesquisa empregou para os ensaios a pintura texturizada, criada por Pedro Augusto Xavier Kindlein, disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM - UFRGS), denominada 'O Mar' (figura 31), realizada nas séries iniciais do ensino Fundamental na Escola Farroupilha de Porto Alegre/RS.

Figura 31 – Título: 'O Mar'



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

4.4.2 Digitalização e equipamento

Assim que concluída a definição da pintura texturizada, iniciou-se o processo de digitalização 3D para a captação do modelo tridimensional digital, o procedimento ocorreu no laboratório de Design e Seleção dos Materiais (LDSM - UFRGS). Para o ensaio foi utilizado o equipamento Artec™ Eva (figura 32), um scanner 3D portátil de

luz estruturada. O seu funcionamento se dá pela emissão de flashes de luz para a obtenção dos dados da superfície, como neste caso, a pintura texturizada.

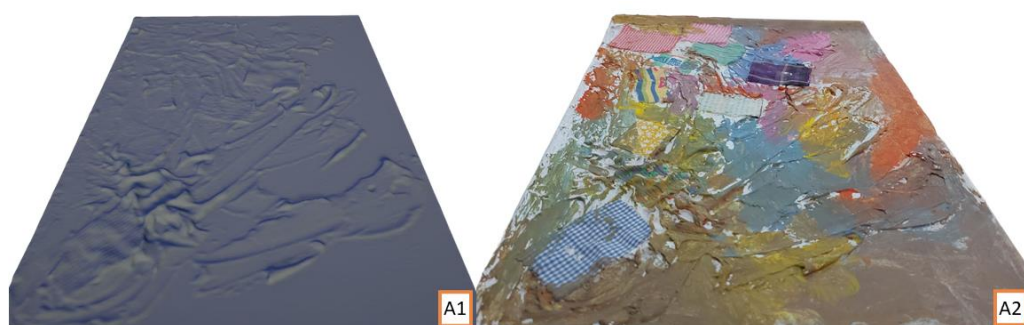
Figura 32 - Scanner tridimensional Artec™ Eva



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Após a captura dos dados pelo scanner, fez-se necessária a utilização de softwares para o processamento dos dados, neste caso foram utilizados os softwares *Geomagic Studio®* e *Artec Studio®*. Assim foi possível reconstruir e alinhar os pontos obtidos pelo aparelho digitalizador e assim constituir o modelo digital final. Em conclusão, o processo de digitalização tridimensional resultou em um exemplar da pintura digital (figura 33) que permite alterações, ajustes, fatiamento, entre outros.

Figura 33 - Superfície da pintura texturizada. (A1) Superfície digitalizada; (A2) Superfície real



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

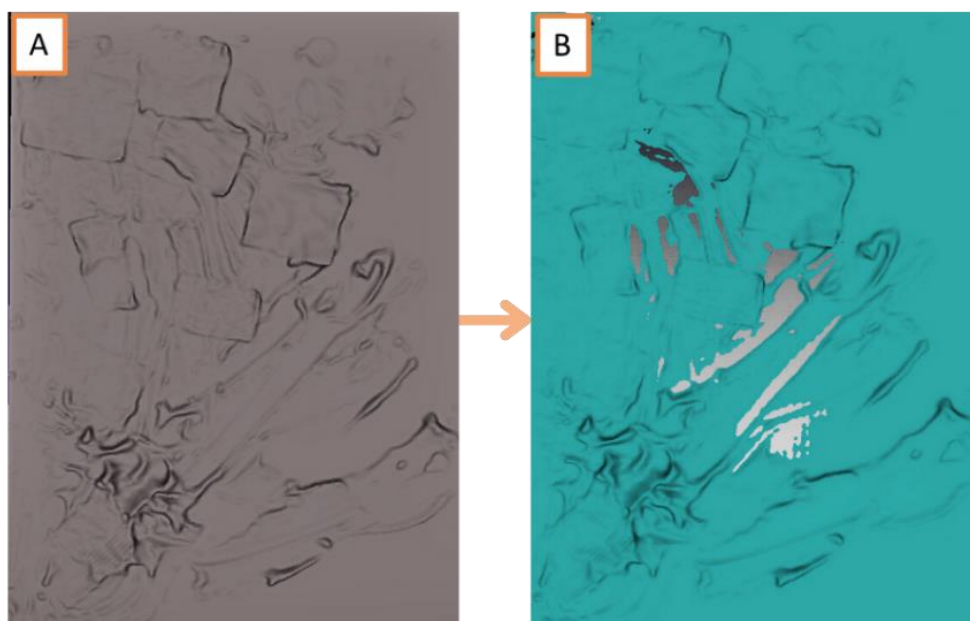
4.4.3 Análise da superfície e ajuste de altura

O arquivo obtido pelo processo de digitalização captou as dimensões reais da pintura, sendo 300 mm de largura e 395 mm de comprimento. Para o processo de

escaneamento, o objeto teve que ser posicionado sobre uma superfície, que teve suas dimensões captadas pelo scanner em conjunto à pintura texturizada. Para realizar o descarte de detalhamentos que não eram pertencentes à pintura, realizou-se cortes sobre o modelo digital e a altura do objeto tridimensional foi de 8.4 mm.

Considerando o propósito da pesquisa, de realizar a impressão do modelo obtido da superfície da pintura texturizada sobre tela de pintura, avaliou-se pertinente o ajuste de altura para que os relevos se destacassem de acordo com o aspecto tátil do artefato. Para este fim, a altura sofre uma redução de 1 mm, resultando em uma altura total de 7.4 mm. O ajuste pode ser visto na figura 34.

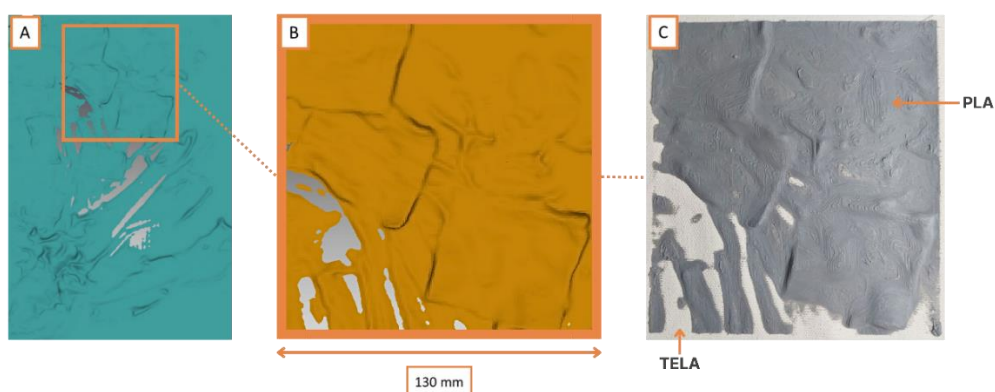
Figura 34 - Ajuste de altura do modelo da pintura (A) Modelo original; (B) Modelo ajustado



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Assim que realizado o ajuste de altura do modelo digital da pintura, foi realizada uma impressão de teste para verificar se os detalhes de superfícies permaneciam após a redução da altura. Para a avaliação, selecionou-se uma parte da do modelo de 130 mm por 140 mm, contendo partes com reentrâncias e as demais em alto relevo. Em seguida, foi realizado o fatiamento de acordo com os parâmetros utilizados para o *dolly 2*, em que a temperatura do bico extrusor foi de 220 °C e a velocidade de impressão de 40 mm/s. A peça foi impressa sobre a tela 1, em escala real e o processo levou em torno de 6 horas para a conclusão. As etapas de teste para ajuste de altura constam na figura 35.

Figura 35 - Teste para ajuste de altura. (A) Seleção da seção da pintura a ser impressa; (B) Modelo da seção a ser impressa; (C) Modelo impresso



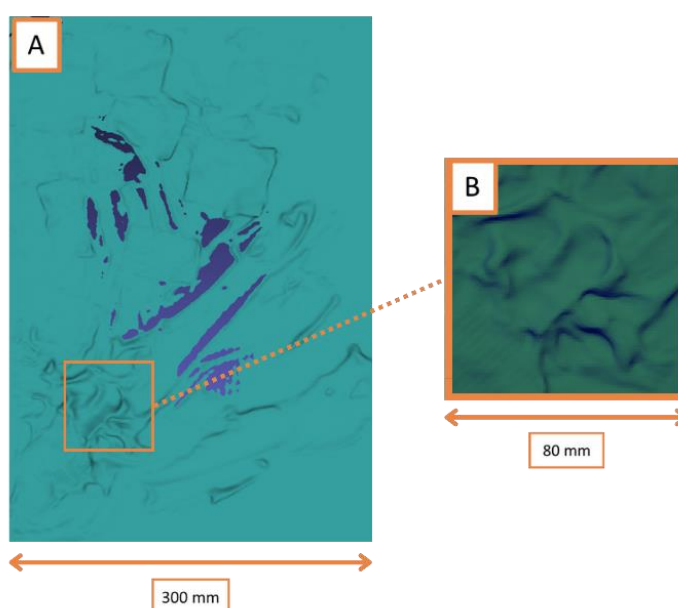
Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

O ajuste de altura manteve as características de uma pintura texturizada sobre uma tela de pintura e não apenas uma peça impressa tridimensionalmente, do mesmo modo que foi capaz de reproduzir detalhes da superfície captados da pintura 'O mar'.

4.4.4 Impressão dos relevos

Na sequência, levando em consideração a etapa do estudo, voltada a demonstrar a capacidade da técnica de reproduzir detalhes de modelos obtidos da digitalização 3D, notou-se a relevância de aprofundar a etapa da pesquisa quanto à qualidade da superfície dos objetos impressos sobre a tela. Para a etapa selecionou-se uma região de alto relevo da pintura 'O mar' (figura 36) para dar sequência à pesquisa.

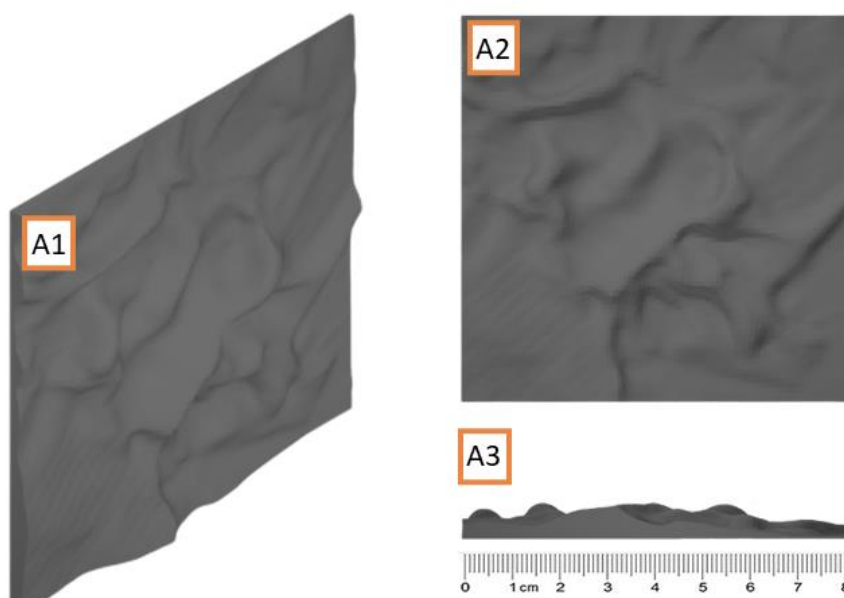
Figura 36 - Determinação da área do relevo



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Quanto aos materiais, foram mantidos os determinados até então, o filamento polimérico PLA e tela 1 (tecimento 2x1). A variação estudada do ensaio levou em consideração as combinações de parâmetros apresentadas anteriormente para as análises de aderência dos *dollys* sobre as telas de pintura. Como o objetivo da etapa consistiu em observar a influência dos parâmetros sobre a qualidade superficial da peça, foi selecionada uma seção do modelo obtido da tela de pintura, em uma região de alto relevo com diversas variações de forma que fornecessem resultados de uma superfície essencial para conduzir a investigação. Quanto à dimensão, foi estabelecido um quadrado de 80 mm para o estudo, com visto nas figuras 36 e 37.

Figura 37 - Relevo: (A1) Vista isométrica do relevo; (A2) Vista em topo do relevo; (A3) Vista lateral do relevo



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Assim que a seção do relevo foi selecionada, foi possível dar sequência aos testes pela seleção dos parâmetros definidos para a impressão dos relevos sobre a tela de pintura. O mesmo modelo foi impresso em quatro condições diferentes, em que a combinação adotada seguiu o padrão estabelecido para os *dollys* 1, 2, 3 e 4, consecutivamente, na etapa de análise visual sobre a aderência. As combinações de parâmetros estão presentes na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a impressão dos relevos

MODELOS DE IMPRESSÃO	RELEVO 1	RELEVO 2	RELEVO 3	RELEVO 4
Temperatura de impressão	200 °C	220 °C	220 °C	200 °C
Velocidade de impressão	40 mm/s	40 mm/s	60 mm/s	60 mm/s
Velocidade de impressão da parede	20 mm/s	20 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Velocidade de impressão da primeira camada	20 mm/s	20 mm/s	30 mm/s	30 mm/s

Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

4.5 TESTES DE ESPESSURA PARA IMPRESSÃO

Ao longo da impressão dos motivos e dos relevos impressos na etapa anterior, notou-se a necessidade de encontrar uma “espessura otimizada” para a impressão sobre a tela de pintura para projetos que queiram manter as características material PLA. Espessuras reduzidas podem apresentar aspectos de imperfeições compatíveis com a combinação do PLA à tela de pintura (figura 38), este fator pode ser contornado por acabamentos como pinturas pela definição de uma espessura mínima para evitar estas intercorrências.

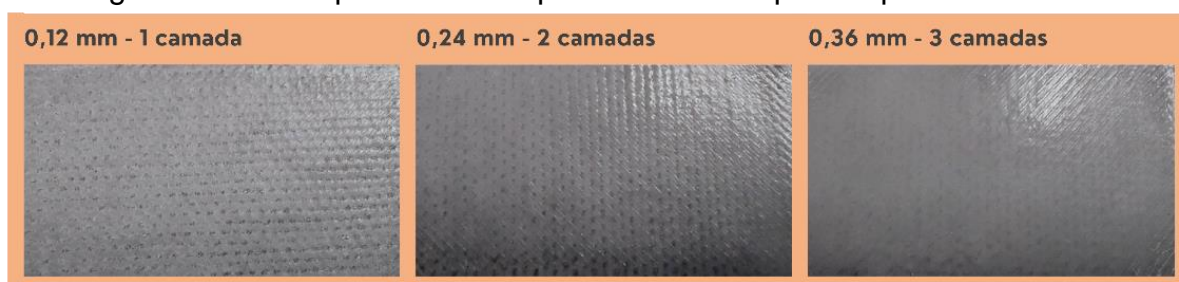
Figura 38 - Imperfeição associada à espessura abaixo da otimizada



Fonte: Elaborada pela Autora (2023)

Com este objetivo, foram realizados testes para definir a espessura que evitasse a imperfeição presente na figura 38, levando em consideração a altura da camada definida para a pesquisa, de 0,12 mm, e foram testadas impressões entre uma (0,12 mm) a três camadas (0,36 mm) de PLA, como visto na figura 39.

Figura 39 - Teste para definir espessura mínima para impressão em PLA

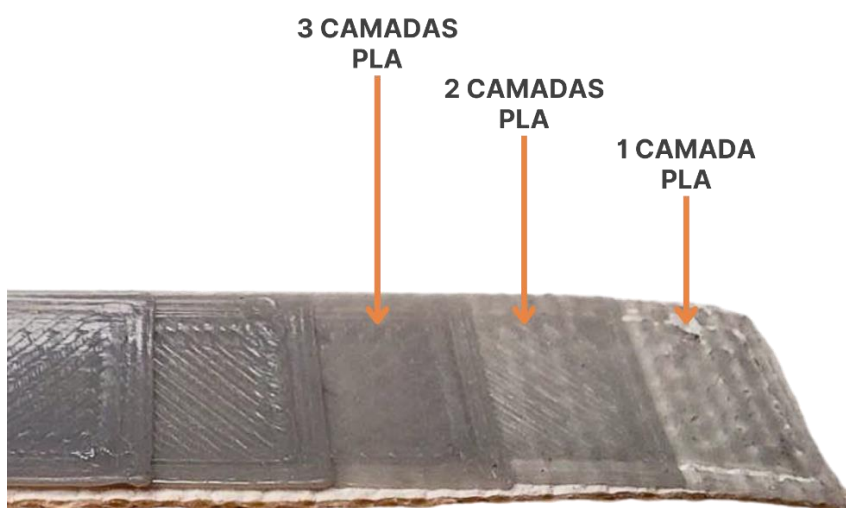


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Conforme as imagens obtidas das impressões de diferentes espessuras, foi possível determinar que 3 camadas de 0,12 mm (0,36 mm) de PLA é suficiente para evitar que a peça apresentasse imperfeições e manter as características visuais do material utilizado para o fim. Esta espessura foi considerada para os modelos seguintes projetados para a pesquisa.

Para os artistas interessados na estética resultante da combinação de PLA com tela de pintura, é viável obter uma variedade de resultados dependendo do número e espessura das camadas aplicadas. Essas variações permitem a criação de geometrias e elementos visuais distintos. A figura 40 ilustra uma peça com um efeito de escada, o que facilita a observação dessas camadas.

Figura 40 - Demonstração visual das camadas da peça



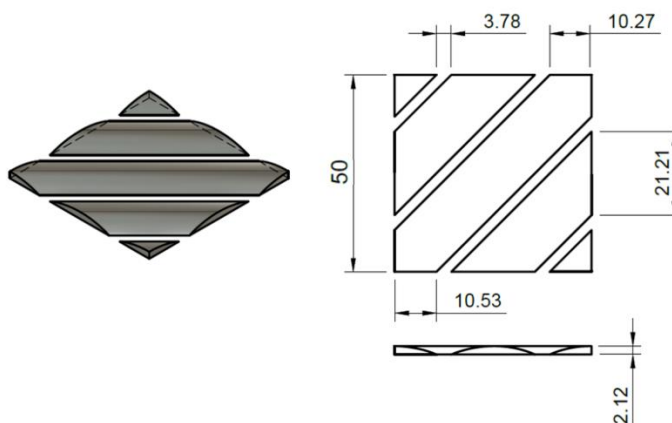
Fonte: Elaborada pela Autora (2023)

4.6 DESIGN DE SUPERFÍCIE

Nesta etapa deste estudo, foi explorada uma nova forma de aplicar a técnica desenvolvida, neste caso com o design de superfície, com o propósito de demonstrar possibilidades de formas adicionais que podem ser usufruídas dos conceitos apresentados. O design de superfície enfatiza as oportunidades de criações de forma utilizando diferentes padrões visuais. Estes padrões são compostos de módulos que compõe os elementos presentes na forma a ser padronizada. Os módulos são o elemento chave do design de superfície, pois permitem a criação de diferentes superfícies complexas com sua repetição. A aplicação de sistemas de repetição resulta em uma composição, indicando como um módulo é repetido para formar um desenho. Esses sistemas podem ser classificados como alinhados, não alinhados e progressivos (RÜTHSCHILLING, 2002).

O design de superfície é frequentemente empregado em superfícies planas, no entanto, no trabalho de Bressan (2018), é explorada a utilização de formas tridimensionais, assim como na presente pesquisa, em que a aplicação dos volumes gerados a partir do design de superfície será realizada por meio da impressão 3D. Com este propósito, elaborou-se um módulo alinhado, baseado no trabalho de Rüttschilling (2002), com a geometria de um quadrado de 50 mm, composto por linhas, situadas ao lado umas das outras respeitando uma determinada distância. Para o objeto elaborado para a primeira representação, foram realizados arredondamentos sobre as arestas presentes entre as linhas, para assim evitar empenamentos durante o processo de impressão. O modelo projetado pode ser observado na figura 41.

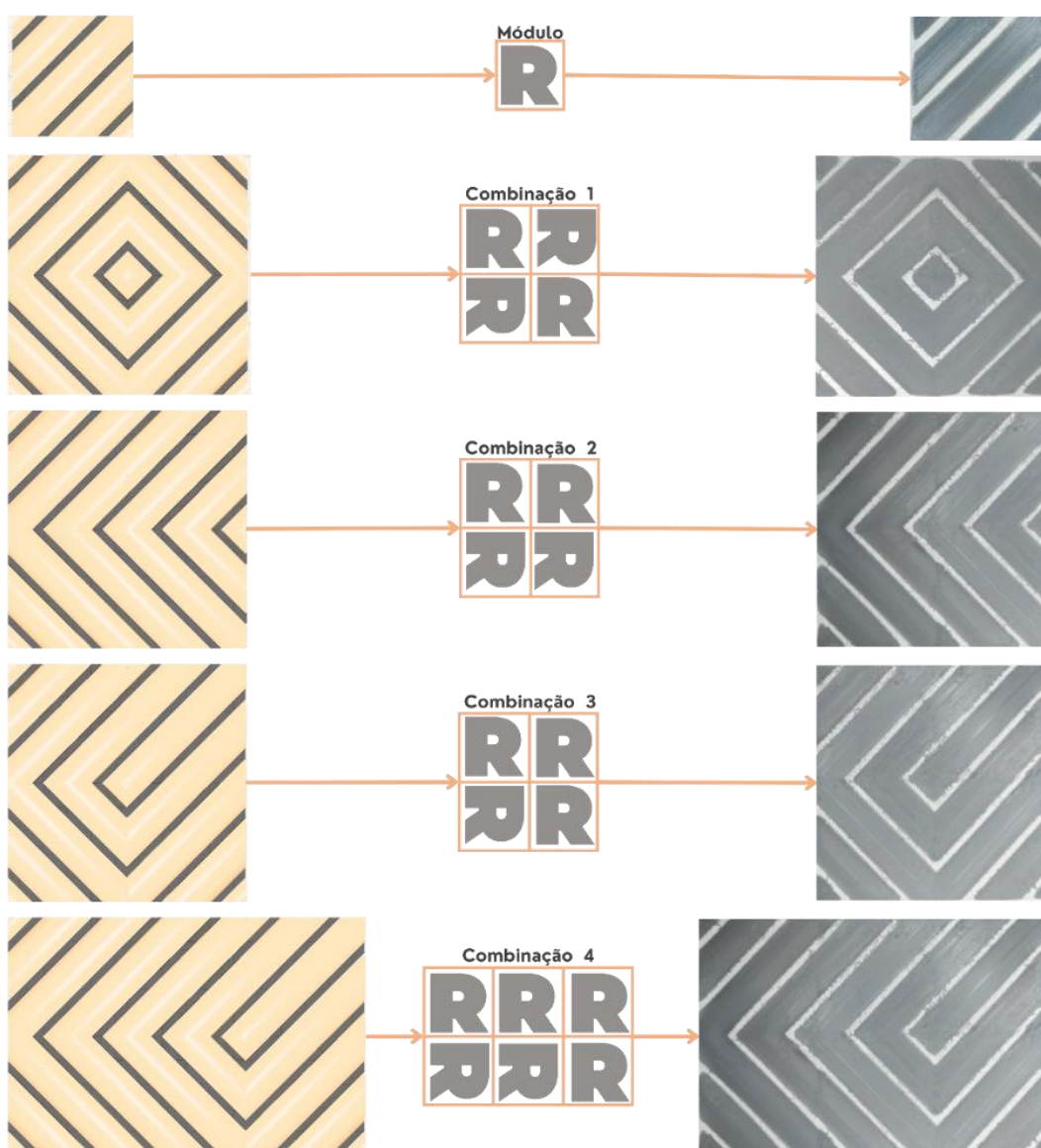
Figura 41 – Projeto do módulo (medidas em mm)



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Utilizando o módulo elaborado, foi possível criar combinações com diferentes propostas estéticas por meio da alteração do número de módulos inseridos no sistema e de seus posicionamentos, como mostrado na figura 42. Inserido em um contexto, os sistemas apresentados buscam demonstrar que o design de superfície possui a capacidade de transmitir uma narrativa, despertar emoções, ser inserido em um contexto cultural ou transmitir uma expressão criativa do artista, mesmo partindo de uma geometria de módulo inicialmente considerada como “simples”. Um sistema formado por módulos mais complexos foi elaborado e se encontra no apêndice B.

Figura 42 - Combinações propostas e impressas para a representação do design de superfície

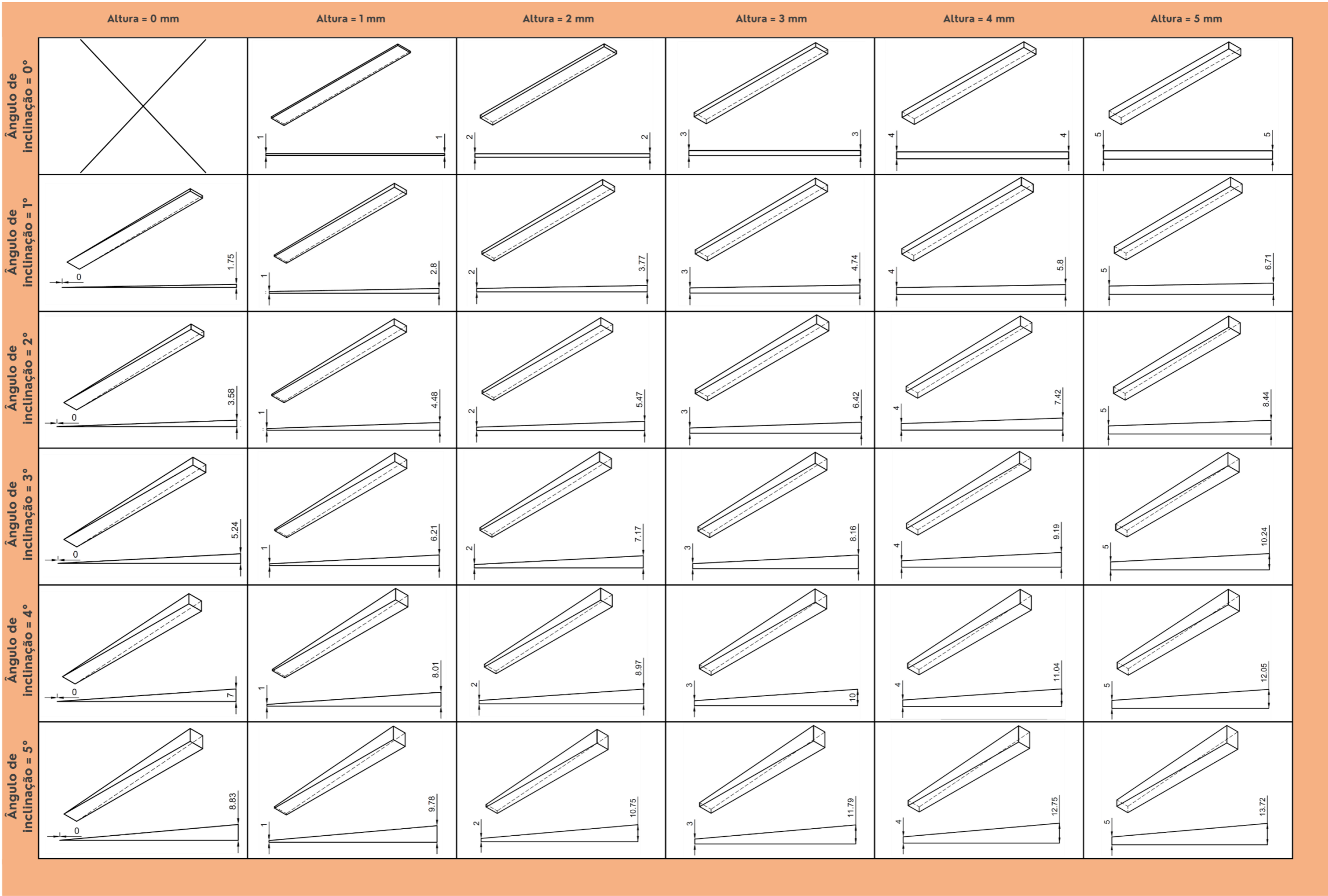


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

4.7 TESTES PARA DEFINIÇÃO DA ALTURA MÁXIMA

Devido ao empenamento das peças impressas sobre a tela de pintura, foi possível notar o descolamento nas extremidades das peças, acentuado em regiões de altura elevada. Este fato estimulou a busca pela definição de uma altura máxima para as extremidades das peças impressas em PLA sobre a tela de pintura. Para analisar os efeitos dos parâmetros e da altura sobre a ocorrência do empenamento, foram projetadas uma série de peças, todas com 100 mm de comprimento e 10 mm de largura. As peças foram variadas pela altura e inclinação, para que fosse possível estudar sua influência sobre o resultado da peça quanto ao empenamento. A altura inicial variou entre 0 e 5 mm e as inclinações entre 0° e 5°. Posteriormente, os modelos foram impressos com as quatro combinações de parâmetros apresentadas para a etapa de impressão dos dollys, realizadas tanto sobre a superfície da mesa de impressão quanto sobre a tela de pintura, permitindo comparações. Imagens macroscópicas foram registradas e as peças foram avaliadas em relação ao empenamento. Os modelos projetados para o ensaio podem ser vistos na figura 43.

Figura 43 - Desenho técnico das peças a serem impressas para os testes de empenamento

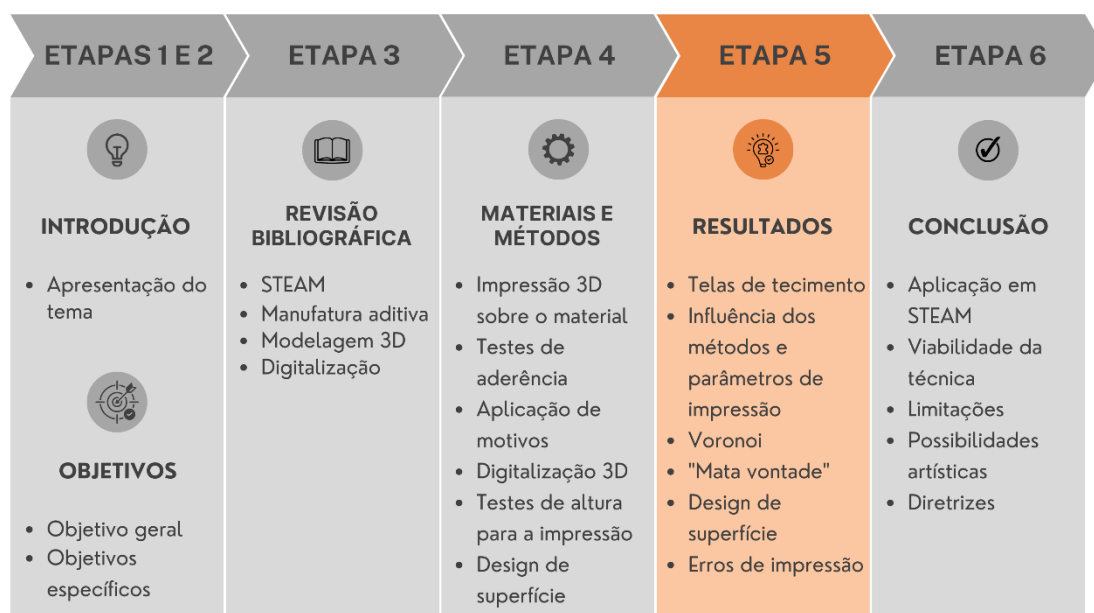


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estágio da pesquisa, apresentado na etapa 5 da figura 44 foram interpretados e discutidos os resultados obtidos ao decorrer da etapa 4, de materiais e métodos. A partir deste ponto do processo, foram determinadas diretrizes para a forma mais adequada para aplicação da técnica de impressão 3D em PLA sobre tela de pintura, utilizando a tecnologia FFF, visando a união das áreas de estudos em STEAM.

Figura 44 - Estrutura da dissertação: Resultados



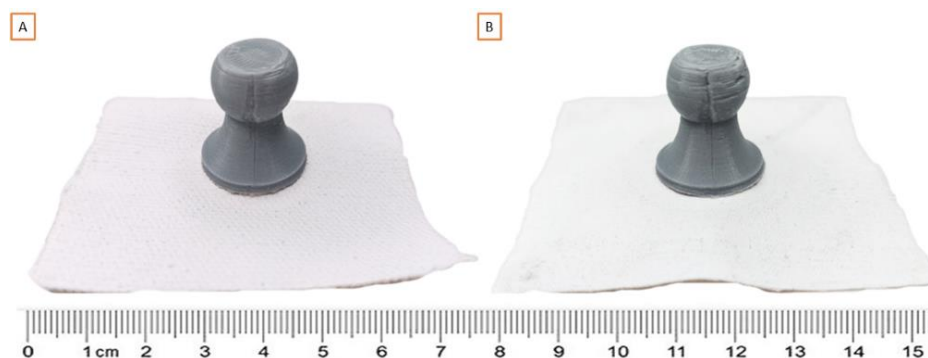
Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

5.1 TELAS DE PINTURA 1 E 2

Ao longo da pesquisa, foram utilizadas duas telas para os testes de aplicação de PLA sobre a tela de pintura, uma sendo composta de um tecimento de 2x1, denominada tela 1 e a seguinte composta por tecimento 1x1, denominada tela 2. Num primeiro momento, a intenção era empregar ambas as telas ao longo de todos os experimentos planejados para a pesquisa. Contudo, durante os primeiros testes, que visavam avaliar a aderência do PLA à tela de pintura, surgiram contratemplos ao utilizar a tela 2.

Na etapa de impressão, a tela 2 exibia dificuldades quanto à aderência do polímero à sua superfície. Os problemas mais frequentes eram descolamentos, tombamentos e deformações causadas pela instabilidade da peça em processo de impressão. O sistema de ajuste do tecido à mesa de impressão, com prendedores, revelava complicações quando utilizado nas impressões sobre a tela 2, não sendo capaz de fixar a tela de forma estável sobre a mesa de impressão. A imagem dos *dollys* impressos sobre as telas pode ser vista na figura 45, onde é possível notar deformidades presentes em ambas as peças, porém mais agravadas sobre a peça aplicada sobre a tela 2.

Figura 45 - (A) *Dolly* impresso sobre tela 1; (B) *Dolly* impresso sobre tela 2



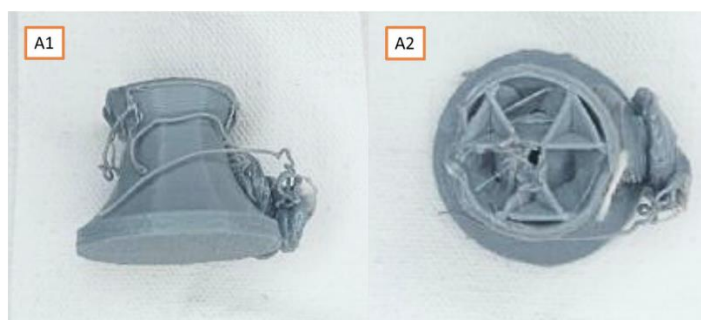
Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Apesar dos dilemas e dificuldades encontrados logo no início do processo de impressão, após diversas peças serem desprezadas por não estarem de acordo com os padrões exigidos para as etapas seguintes, foram concluídas as impressões dos *dollys* para a tentativa de realização do teste *Pull Off*. No entanto, desde o princípio dos testes já foram encontradas incompatibilidades entre as peças impressas sobre a tela 2 e o equipamento. Como demonstrado anteriormente, o dispositivo que realiza o arranque das peças para a realização de medição de deslocamento, conta com um orifício que permite a entrada dos *dollys*, que são previamente fixadas ao material. Os *dollys* impressos sobre a tela 2 impossibilitavam o encaixe no equipamento para a realização do ensaio proposto devido à sua geometria distorcida.

Quanto à utilização da tela 2 para o seguimento da pesquisa, o seu uso foi descontinuado após os testes de análise visual, devido aos defeitos de impressão derivados das dificuldades de aderência do PLA ao substrato, bem

como aos problemas de geometria observados após o encerramento da etapa de impressões (figura 46). Conclui-se que a morfologia do tecido teve influência direta sobre a deformação das peças, visto que durante a impressão havia uma instabilidade do substrato, apesar de ter sua fixação sobre a mesa de impressão realizada da mesma maneira aplicada a tela 1.

Figura 46 - Defeitos associados a utilização da Tela 2. (A1) Vista frontal *dolly*; (A2) Vista de topo *dolly*



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

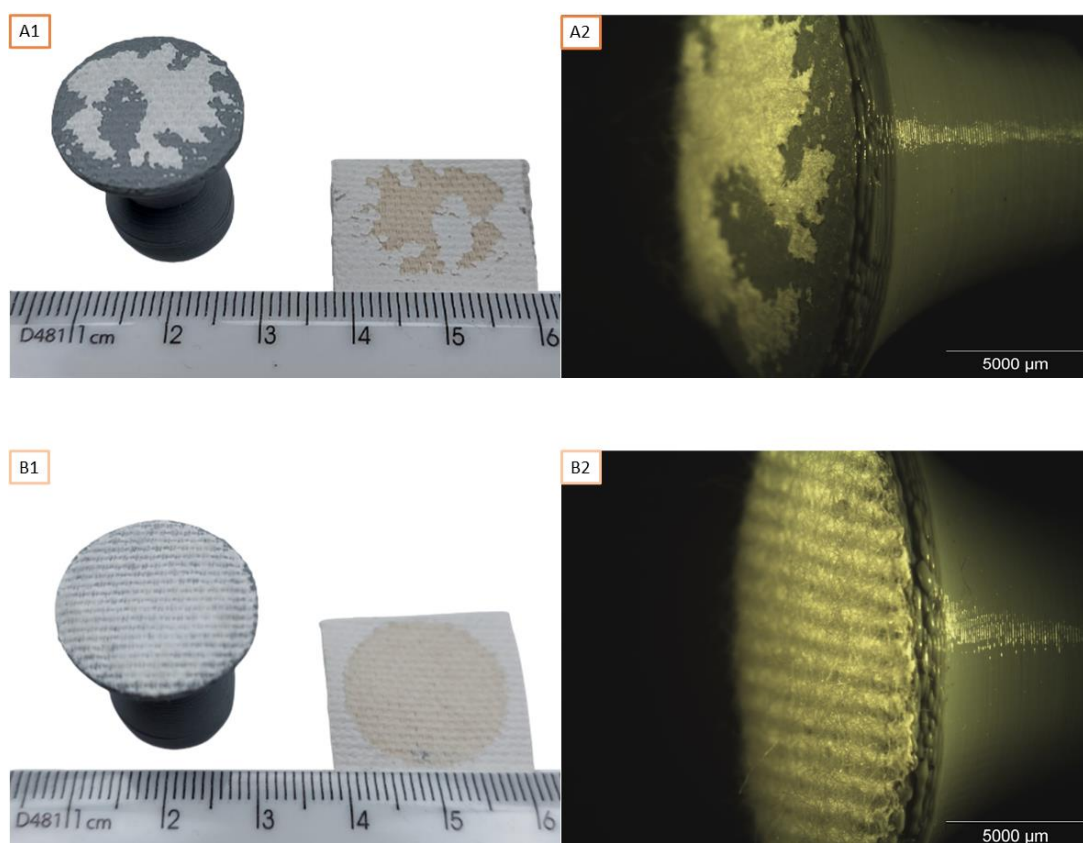
5.2 RESULTADOS QUANTO AOS MÉTODOS DE IMPRESSÃO

Durante o processo inicial de impressão dos primeiros modelos *dolllys*, foi observada a necessidade de modificar o método de impressão. Inicialmente, a abordagem adotada envolvia a impressão da primeira camada diretamente sobre o tecido. Posteriormente, desenvolveu-se um segundo método no qual a primeira camada era impressa sobre a mesa de impressão. Em seguida, a tela era posicionada sobre essa camada inicial para permitir a deposição das camadas subsequentes. Nos testes realizados utilizando o segundo método, designado 'método 2', observou-se que a aderência do PLA à tela era consideravelmente superior, quando comparado aos resultados obtidos após o emprego do método inicial, denominado 'método 1'. Esta melhoria se justificou pelo cessamento de efeitos relacionados a uma baixa aderência, como tombamento e deformações que impossibilitavam a sequência do processo. Desta forma, concluiu-se que a adoção do método 2 permitiu o avanço para a execução da técnica.

Para a demonstração da diferença de aderência relatada quanto ao emprego dos dois métodos de impressão, foram realizadas duas impressões, definidas com a temperatura do bico extrusor de 220 °C, velocidade de impressão de 40

mm/s e temperatura da mesa a 70 °C. Ambos os testes foram realizados com a deposição de PLA sobre a tela 1, sendo diferenciados apenas pelos processos de impressão definidos, em que uma seria impressa de acordo com o método 1 e outra com o método 2. Após a impressão, as peças em PLA foram removidas do substrato de forma manual para que fosse possível observar os detalhes e resultados de aderência em sua superfície de contato. Conforme demonstrado na Figura 47, os testes confirmaram que o "método 2" emergiu como a opção mais adequada para prosseguir com os próximos experimentos. Esta escolha se fundamenta na presença de acabamento acrílico e fibras de algodão aderidas à maior parte da base do *dolly* impresso por meio do segundo método.

Figura 47 - Comparação entre métodos de impressão (A1) Pino impresso pelo método 1, (A2) Imagem ampliada da base do pino, (B1) Pino impresso pelo método 2, (B2) Imagem ampliada da base do pino



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Ao decorrer da pesquisa, ao aplicar o método de impressão 2, foi notada uma possibilidade de otimização durante a execução da etapa. As impressões apresentaram defeitos e o processo de impressão foi dificultado devido a falhas de ajustes de altura exercidos em função da mesa de impressão. Estes defeitos

poderiam ter sido evitados pelo nivelamento da mesa de impressão. Durante o emprego do método de impressão 2 nos testes de aderência, o equipamento era interrompido selecionando-se a opção “*Pause*” para assim permitir o ajuste da tela de pintura sobre a superfície de impressão. Nesta sequência, não foi possível ajustar a altura da mesa de forma adequada, levando em conta a espessura da tela, resultando em um nivelamento inadequado.

Na etapa de impressão dos motivos Voronoi, definiu-se que a interrupção do equipamento ocorreria após a impressão da primeira camada, selecionando a opção “*Stop*”, assim permitindo um melhor ajuste de altura da mesa de impressão, levando assim em consideração a espessura da tela de pintura. Concluiu-se assim que o método 2 executado com estas etapas gerou resultados aprimorados na impressão das peças. Conseqüentemente, este meio de executar o método foi adotado para as impressões subsequentes. Essa abordagem de aplicação do método também possibilita a configuração de parâmetros de impressão distintos para a primeira camada, que estará em contato com a tela de pintura. Isso oferece a oportunidade de otimizar os resultados em termos de aderência.

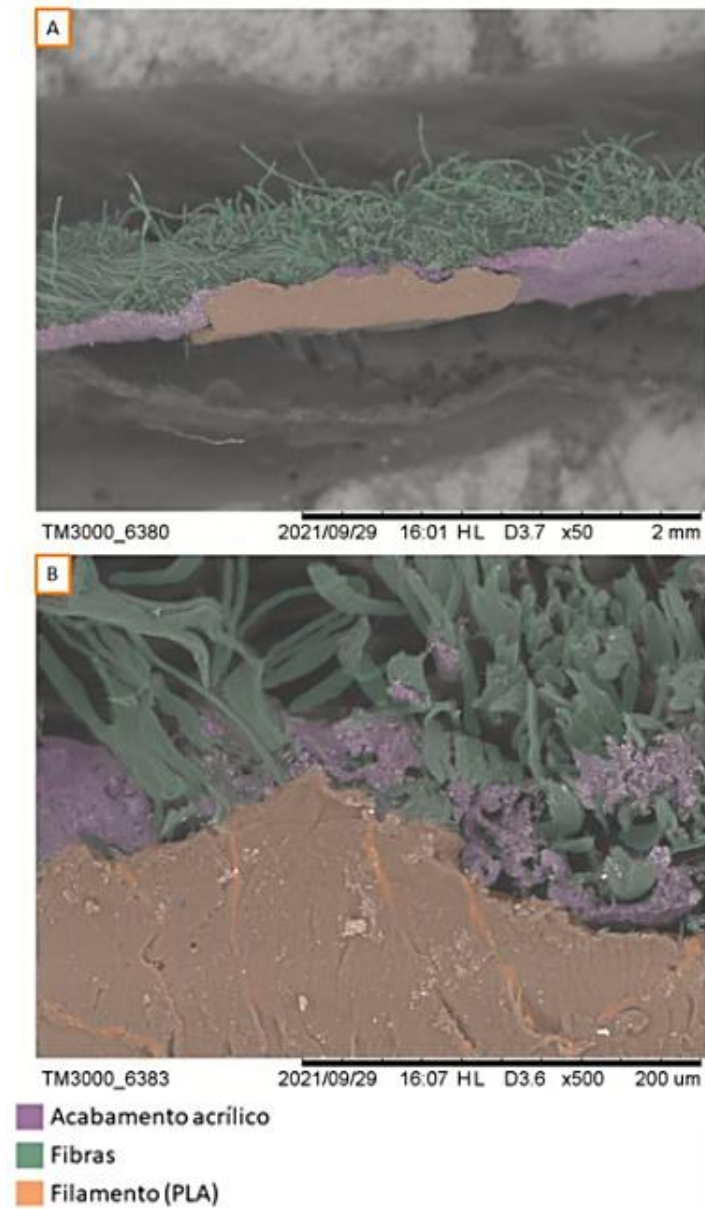
5.3 RESULTADOS QUANTO AOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Ao longo da pesquisa foram obtidos resultados diversos em função da variação dos parâmetros aplicados. Essas variações demonstraram impacto significativo tanto na aderência quanto no acabamento superficial das peças produzidas.

5.3.1 Resultados quanto à aderência

Os primeiros ensaios para avaliar a aderência do PLA ao substrato foram conduzidos utilizando análise visual por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O propósito das imagens adquiridas era examinar a integração dos materiais após a sua união. A análise inicial das imagens (Figura 48) revelou que o PLA demonstrou aderência ao substrato. Durante o processo de impressão, o material aparentemente fundiu-se com o tecido, aderindo tanto ao revestimento acrílico quanto às fibras do tecido.

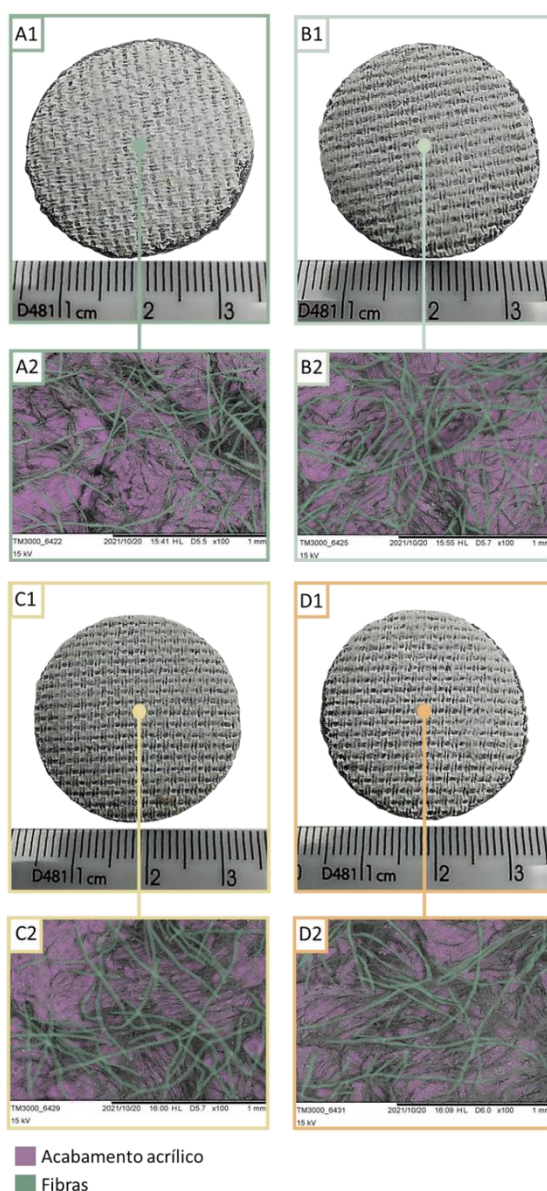
Figura 48 - Capturas obtidas pelo MEV revelando a superfície de contato do PLA ao substrato (A) Imagem com ampliação de 50x; (B) Imagem com ampliação de 500x



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Posteriormente, para examinar visualmente a influência dos parâmetros na aderência, foram analisadas as imagens das bases dos *dollys* que foram impressos de acordo com os parâmetros listados na tabela 5. A representação visual na Figura 49 ilustra os *dollys* impressos sobre a tela 1.

Figura 49 - Análise visual para a determinação de aderência sobre a tela 1 (tecimento 2x1). (A1) *Dolly* 1; (A2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 1; (B1) *Dolly* 2; (B2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 2; (C1) *Dolly* 3; (C2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 3; (D1) *Dolly* 4; (D2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 4

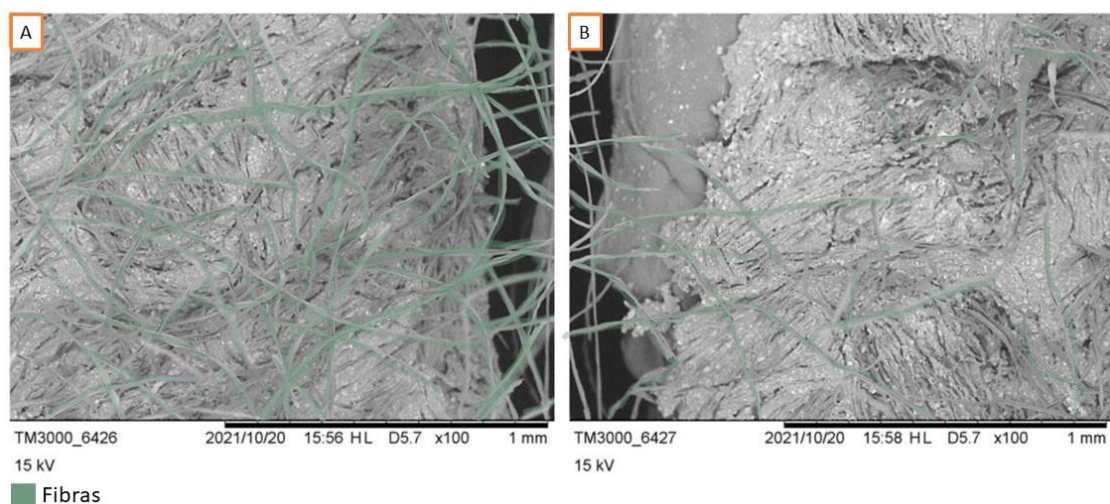


Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

Quando observadas as imagens captadas por câmera convencional, concluiu-se que as quatro combinações de parâmetros diferentes de impressão apresentaram aderência do PLA ao substrato. No entanto, para efeito comparativo, foi fundamental a observação das imagens obtidas por microscópio

eletrônico de varredura. A avaliação foi realizada pela presença do acabamento acrílico, originalmente encontrado na superfície da tela de pintura, em adição às fibras de algodão arrancadas do tecido. No quesito de quantidade de fibras presentes na superfície, destacaram-se os *dollys* 2 e 3, ambos impressos em temperatura de 220°C, porém variando as velocidades de impressão, sendo que o *dolly* 2 fora impresso em velocidade mais baixa (40 mm/s) e o *dolly* 3 em maior velocidade (60 mm/s). Entretanto quando levado em consideração a presença do acabamento acrílico na base da peça, observados na captura das bordas das peças (figura 50), conclui-se que o *dolly* 2 se destaca em relação ao *dolly* 3. Com base nas observações feitas durante a análise visual da aderência das quatro combinações de parâmetros durante a impressão na tela 1, pode-se concluir que o *dolly* 2 obteve o melhor resultado em comparação com os demais.

Figura 50 - Imagens obtidas por MEV, com ampliação de 100x demonstrando as bordas dos corpos de prova. (A) Dolly 2; (B) Dolly 3

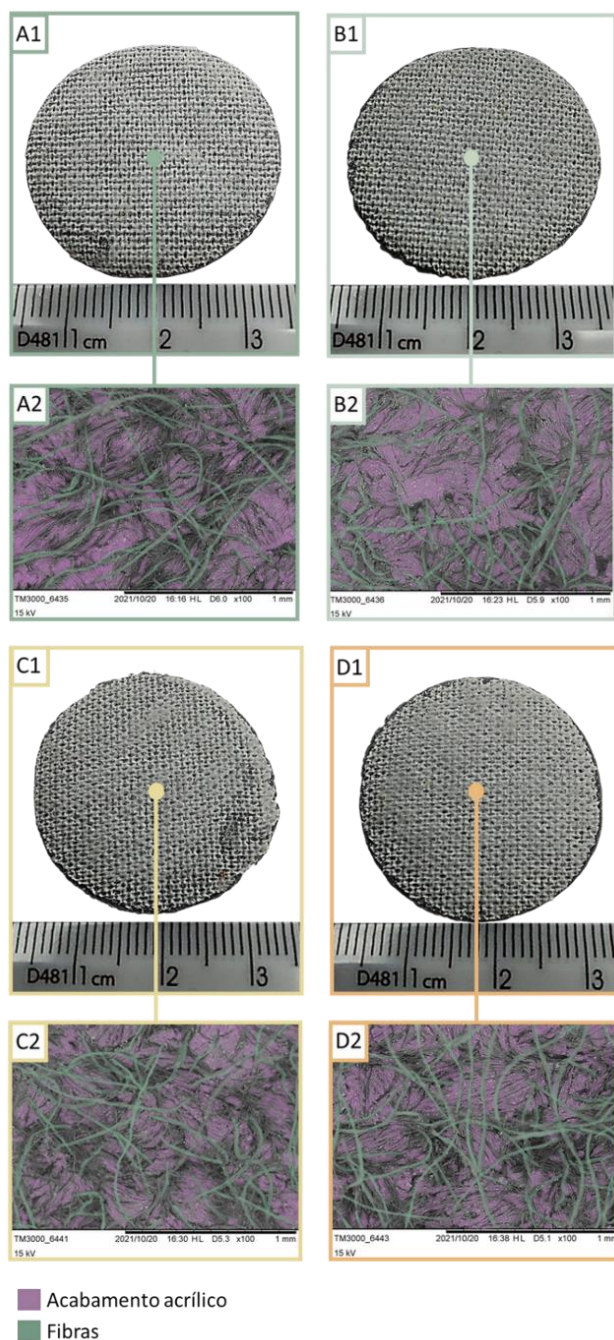


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Na sequência, os testes de impressão dos *dollys* sobre a tela 2 apresentaram dificuldades, indicando não ser suficientemente aderente antes mesmo da conclusão da etapa da análise pelo MEV, visto que durante a execução da impressão ocorreram problemas que seriam justificados pela falta de aderência, como o descolamento e tombamentos das peças no processo de impressão. Considerou-se que as complicações encontradas nesta etapa se justificaram pela característica fina e lisa da tela. Ainda assim, as impressões dos quatro *dollys* foram concluídas e a análise visual foi conduzida conforme os

procedimentos realizados para a tela 1. Na figura 51 são apresentados os registros dos quatro modelos sobre a tela 2.

Figura 51 - Análise visual para a determinação de aderência sobre a tela 2 (tecimento 1x1). (A1) *Dolly* 1; (A2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 1; (B1) *Dolly* 2; (B2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 2; (C1) *Dolly* 3; (C2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 3; (D1) *Dolly* 4; (D2) Imagem ampliada da superfície do *dolly* 4



Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

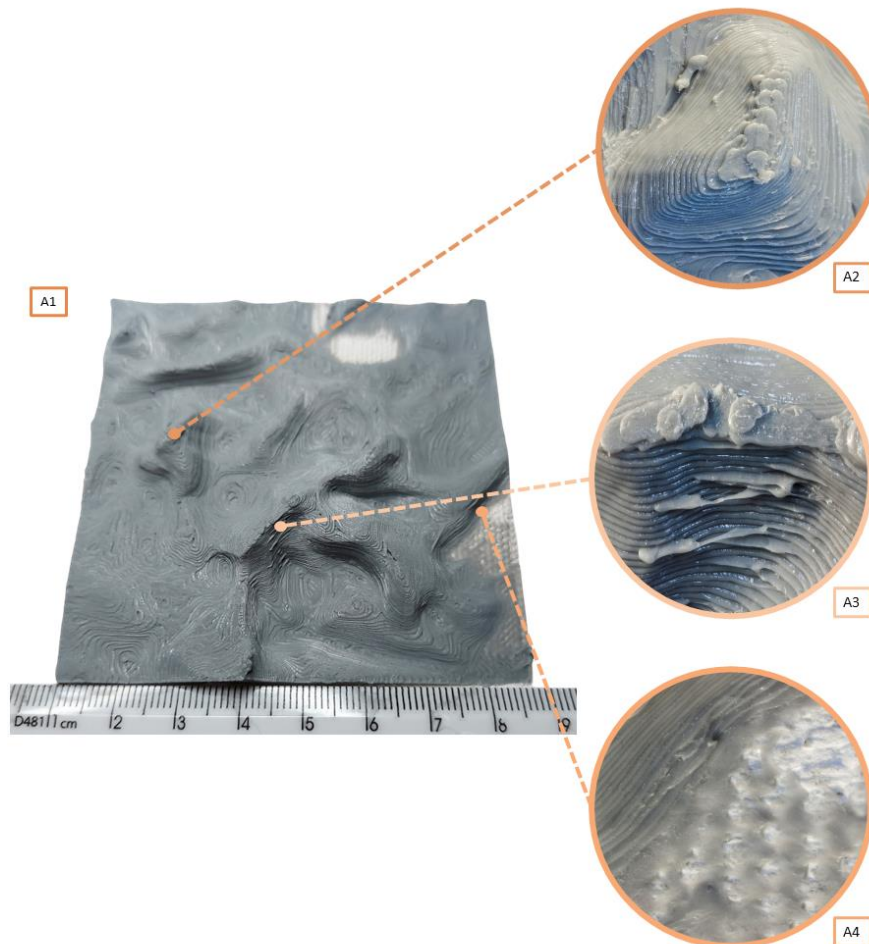
Com relação às imagens derivadas do arrancamento dos *dollys* e considerando a presença de acabamento acrílico e fibras de algodão, é possível inferir que a aderência do PLA à tela 2 é comparável aos resultados obtidos na tela 1. Portanto, de acordo com a análise visual, os resultados de impressão demonstram aderência do PLA à tela, desconsiderando as demais dificuldades enfrentadas. Nas figuras ampliadas, bem como na tela 1, pode-se notar a presença de acabamento acrílico e fibras de algodão aderidos à superfície do PLA. Em relação ao número de fibras, os quatro *dollys* apresentaram resultados similares, com exceção do segundo *dolly*, diferentemente do resultado obtido no teste da primeira tela. Entretanto, quanto à presença de acabamento acrílico na superfície do *dolly*, o que se destacou foi, novamente, o *dolly* 2.

5.3.2 Resultados quanto ao acabamento superficial

Após a conclusão dos testes para avaliar a influência dos parâmetros na aderência do PLA à tela de pintura, tornou-se necessário investigar o impacto desses parâmetros no acabamento superficial das peças impressas sobre o substrato. Para isso, quatro relevos idênticos foram impressos na tela 1, utilizando os parâmetros conforme descritos na tabela 6.

O primeiro relevo foi impresso sobre a tela de pintura, adotando o método 2 para a impressão que durou em média 4 horas e meia seguindo os parâmetros de menor velocidade e menor temperatura. Quanto ao aspecto visual, é possível considerar, conforme a figura 52, que a peça exibiu uma superfície uniforme e lisa, com algumas imperfeições, como excesso de material entre as camadas.

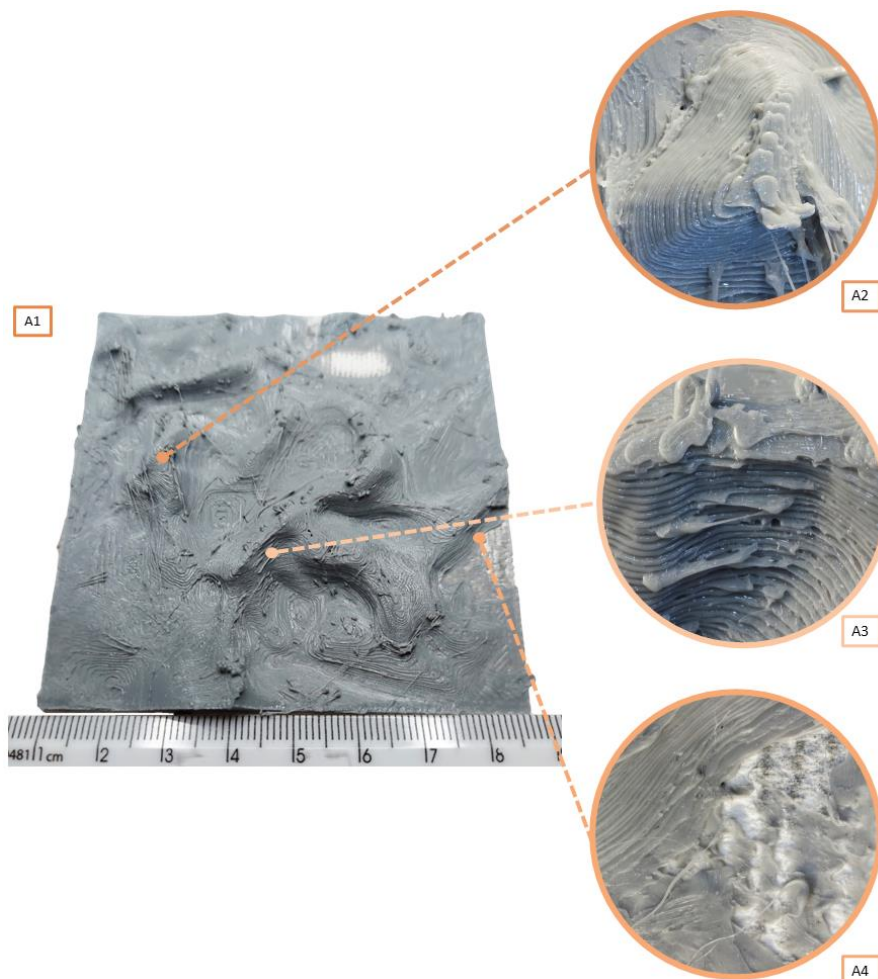
Figura 52 – Relevo 1: (A1) Relevo 1 impresso sobre a tela de pintura; (A2) Imagem ampliada da união do PLA à tela de pintura; (A3) Imagem ampliada das camadas do PLA; (A4) Imagem ampliada do acabamento da peça



Fonte: Imagem relevo elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas por Everton Amaral da Silva (2023)

Em seguida, o Relevo 2 seguiu com os mesmos métodos e materiais utilizados para o Relevo 1, com a mesma duração de impressão. A única alteração realizada foi na temperatura de impressão. Por meio dessa mudança, é perceptível uma diferença considerável no acabamento da superfície do objeto na Figura 53. O deslocamento do material entre as camadas se torna mais evidente, e é possível observar a presença do efeito *stringing* do PLA, que está relacionado às temperaturas de impressão mais altas.

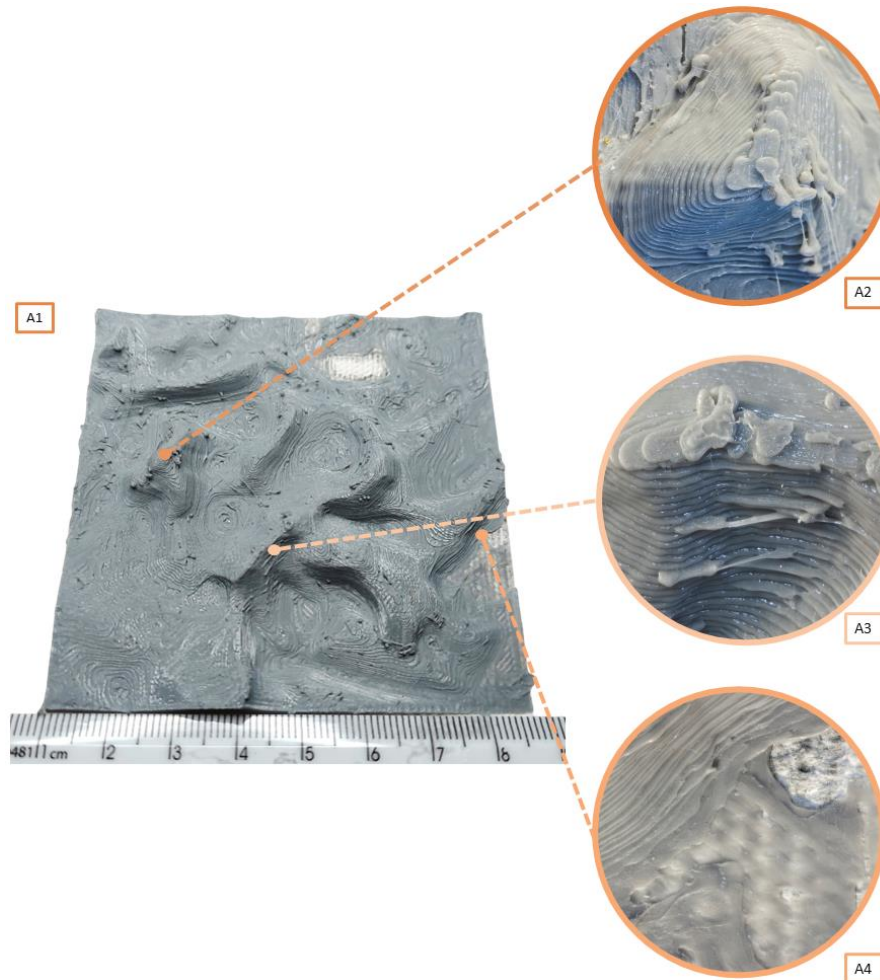
Figura 53 - Relevo 2: (A1) Relevo 2 impresso sobre a tela de pintura; (A2) Imagem ampliada da união do PLA à tela de pintura; (A3) Imagem ampliada das camadas do PLA; (A4) Imagem ampliada do acabamento da peça



Fonte: Imagem relevo elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas por Everton Amaral da Silva (2023)

No prosseguimento das impressões, o próximo da série foi o Relevo 3, que manteve a temperatura adotada para o Relevo 2, porém a velocidade de impressão foi elevada, reduzindo o tempo de impressão para 3 horas e quarenta minutos. De acordo com a percepção visual mostrada na figura 54, o acabamento superficial da peça teve um leve aprimoramento quando comparado à peça anterior, sendo reduzido o efeito de deslocamento de material sobre as camadas e *stringing*.

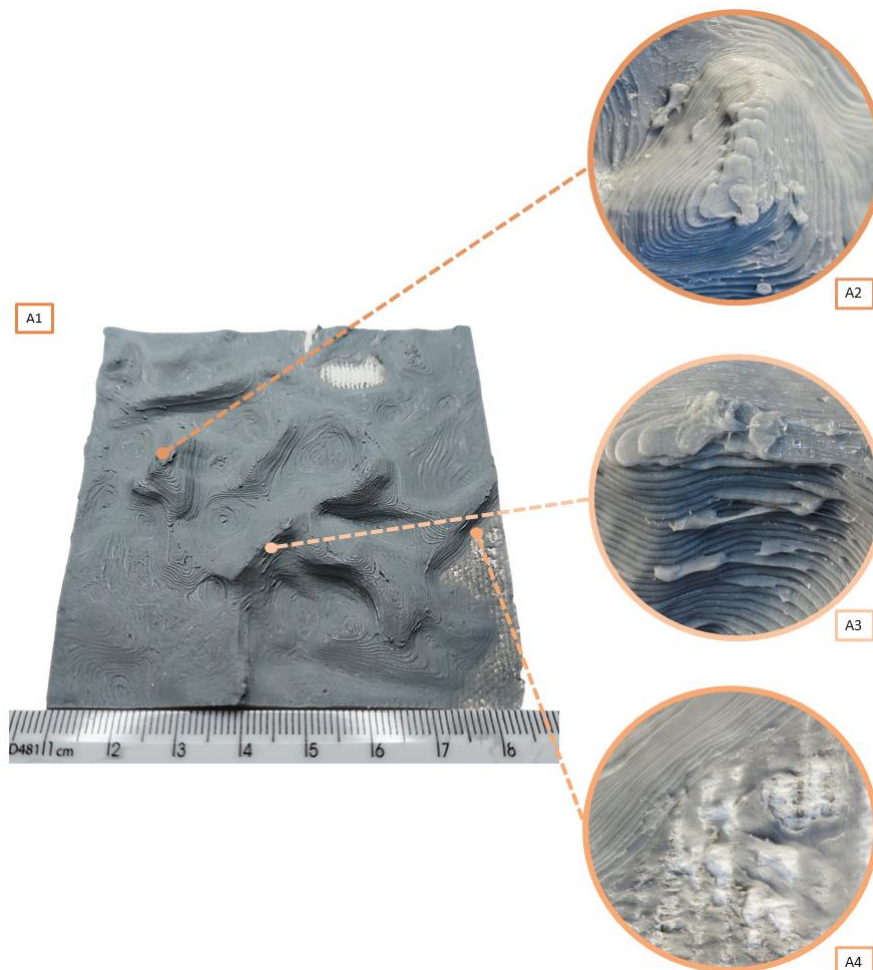
Figura 54 – Relevo 3: (A1) Relevo 3 impresso sobre a tela de pintura; (A2) Imagem ampliada da união do PLA à tela de pintura; (A3) Imagem ampliada das camadas do PLA; (A4) Imagem ampliada do acabamento da peça



Fonte: Imagem relevo elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas por Everton Amaral da Silva (2023)

Por fim, finalizou-se a etapa com a impressão do Relevo 4, que conservou a velocidade adotada para o Relevo 3, porém teve sua temperatura reduzida. Nas imagens macroscópicas, presentes na figura 55, ainda é possível observar defeitos presentes sobre a superfície, porém o aspecto geral da superfície foi otimizado quando comparado aos demais vistos anteriormente.

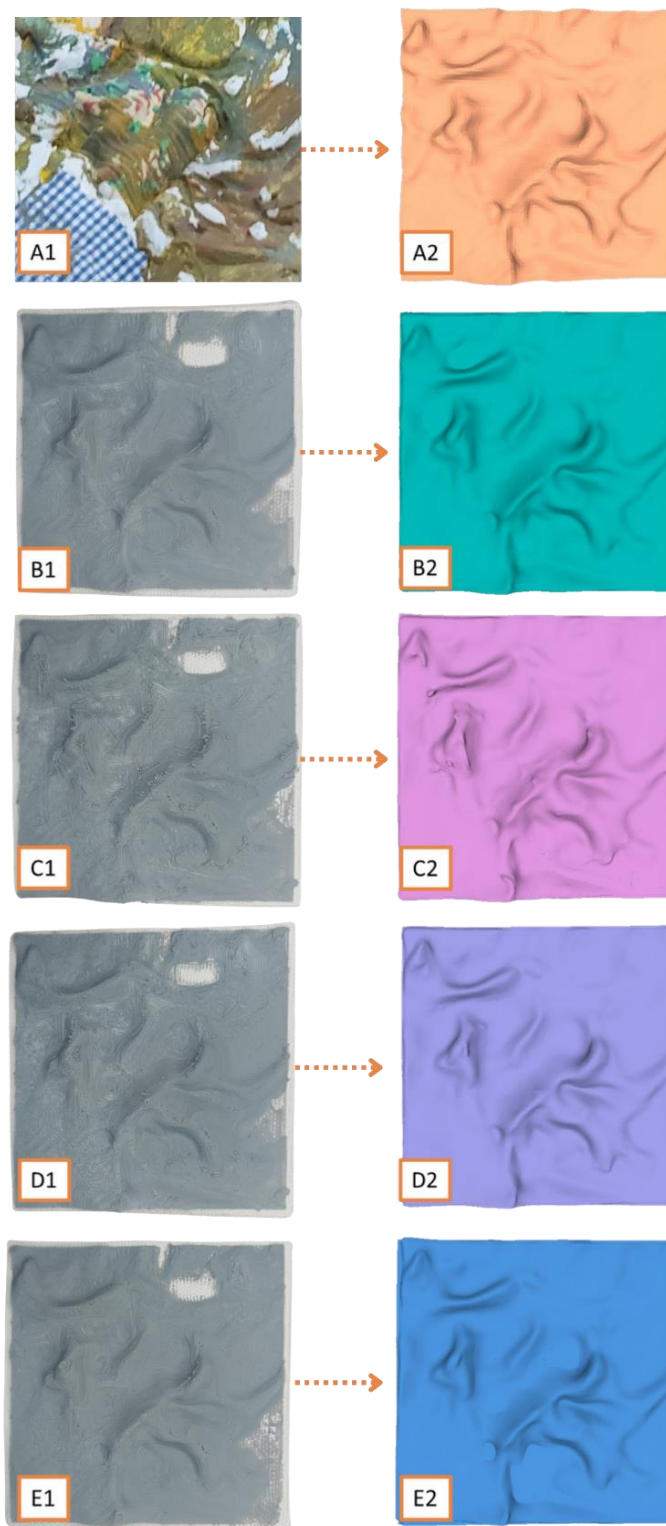
Figura 55 - Relevo 4: (A1) Relevo 4 impresso sobre a tela de pintura; (A2) Imagem ampliada da união do PLA à tela de pintura; (A3) Imagem ampliada das camadas do PLA; (A4) Imagem ampliada do acabamento da peça



Fonte: Imagem relevo elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas por Everton Amaral da Silva (2023)

Em virtude da similaridade dos resultados observados durante a análise visual, foi determinado que esta não fornece resultados adequados para uma conclusão precisa sobre a influência dos parâmetros de impressão quanto ao acabamento superficial do objeto impresso na tela de pintura. Portanto, a etapa seguinte consistiu na digitalização dos relevos impressos para a comparação de malhas, buscando uma conclusão de maior clareza sobre a influência da velocidade e da temperatura sobre a peça. Os modelos digitalizados estão presentes na figura 56.

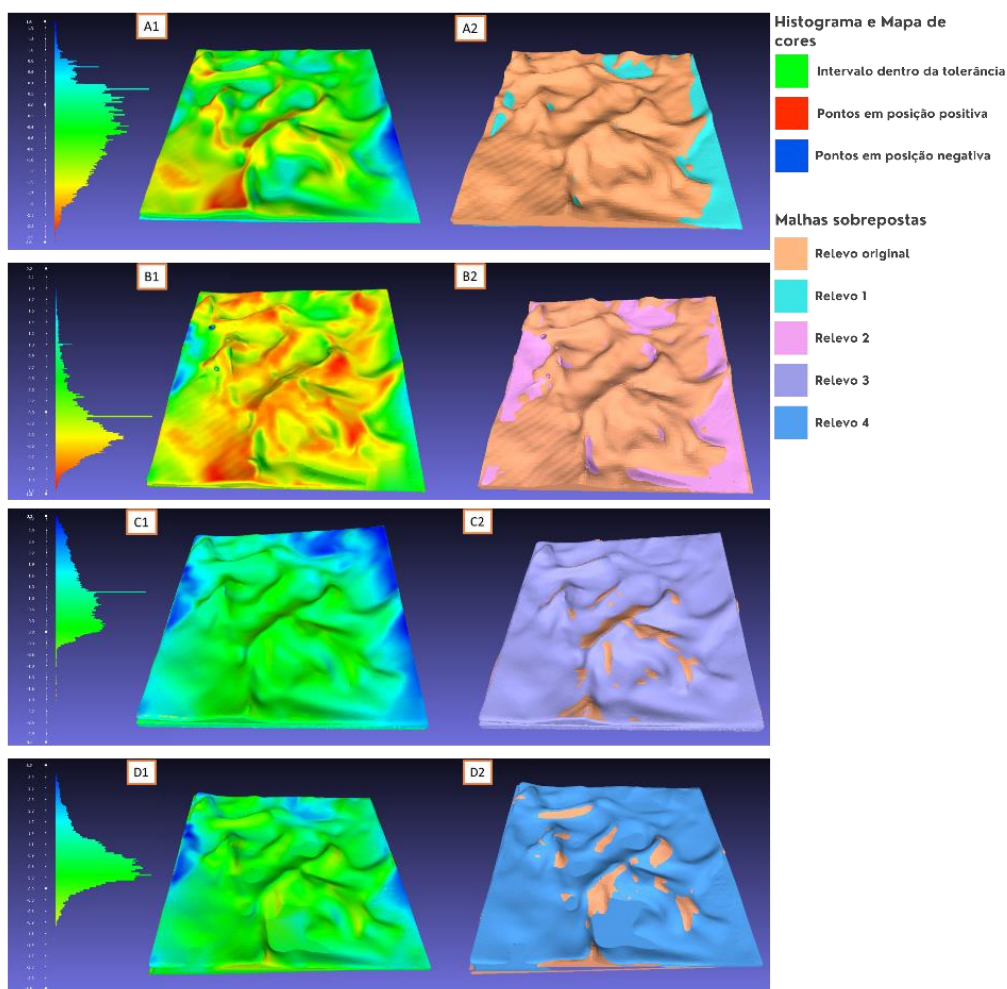
Figura 56 - Modelos digitais e impressos. (A1) Seção da pintura que originou o relevo; (A2) Relevo obtido da pintura (B1) Relevo 1; (B2) Modelo escaneado do Relevo 1; (C1) Relevo 2; (C2) Modelo escaneado do Relevo 2; (D1) Relevo 3; (D2) Modelo escaneado do Relevo 3; (E1) Relevo 4; (E2) Modelo escaneado do Relevo 4



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Com os relevos escaneados e transformados em modelos digitais, foi possível realizar uma comparação entre as malhas obtidas no processo, em que cada relevo foi comparado ao modelo original fornecido para a impressão dos quatro relevos com as combinações de parâmetros determinadas. Por esta comparação, foi realizada a análise da diferença entre os modelos, pelo software de processamento de malha *Meshlab*, pela obtenção de histogramas para cada relevo presente na figura 57.

Figura 57 - Comparação entre malhas digitalizadas e histograma. (A1) Mapa de cores obtido pelo relevo original e Relevo 1; (A2) Relevo original e Relevo 1 sobrepostos; (B1) Mapa de cores obtido pelo relevo original e Relevo 2; (B2) Relevo original e Relevo 2 sobrepostos; (C1) Mapa de cores obtido pelo relevo original e Relevo 3; (C2) Relevo original e Relevo 3 sobrepostos; (D1) Mapa de cores obtido pelo relevo original e Relevo 4; (D2) Relevo original e Relevo 4 sobrepostos



Fonte: Elaborado pela Autora pelo software *Meshlab* (2023)

Vale salientar que pela escala de cores utilizada, a vermelha representa as saliências referente ao relevo original em comparação com a malha do ensaio (Relevo 1, 2, 3 e 4) ou seja, a cor representa os pontos positivos da superfície do relevo. As cores azuis representam reentrâncias do relevo original, pontos que se encontram em posição negativa na malha em comparação ao relevo utilizado. Com base nos histogramas derivados da comparação entre as malhas, e levando em conta a finalidade artística da técnica, manifestada visualmente por meio da expressão criativa, foi possível concluir que o Relevo 4 evidenciou um desempenho superior quando comparado aos demais, referente a qualidade superficial da peça. O mesmo resultado foi observado na etapa de análise visual por meio de capturas macroscópicas. No Relevo 2, impresso com a mesma combinação de parâmetros do *dolly 2*, foi observado um maior número de defeitos relacionados ao acabamento superficial da peça.

Pelas afirmações apresentadas e analisadas, foi possível chegar a conclusões quanto à influência dos parâmetros sobre a técnica de impressão 3D em PLA sobre telas de pintura. A impressão do *dolly 2* e Relevo 2 foi realizada com a temperatura de 220 °C, temperatura que aumenta consideravelmente a fluidez do polímero, facilitando a penetração entre as fibras do tecido e saliências da tela de pintura, este fator associado à baixa velocidade de impressão de 40 mm/s justifica a aderência entre os materiais observada na etapa de análise de aderência realizado por meio de imagens microscópicas. No entanto, como previamente indicado, altas temperaturas associadas a baixas velocidades prejudicam a construção de camadas e aderência entre as mesmas, afetando o aspecto visual e textura do objeto impresso. Adicionalmente, uma alta temperatura já é o bastante para apresentar imperfeições na superfície do objeto, pois está diretamente ligada à ocorrência do fenômeno de *stringing*. No entanto, os parâmetros podem trazer resultados positivos quanto à aderência se aplicados apenas para a impressão da primeira camada.

Ao concluir esta fase, alcançou-se o primeiro objetivo específico estabelecido para a dissertação, definindo as possibilidades quanto a aderência e o parâmetro apropriado para a aplicação da técnica demonstrada.

5.4 POSSIBILIDADES ARTÍSTICAS (VORONOI)

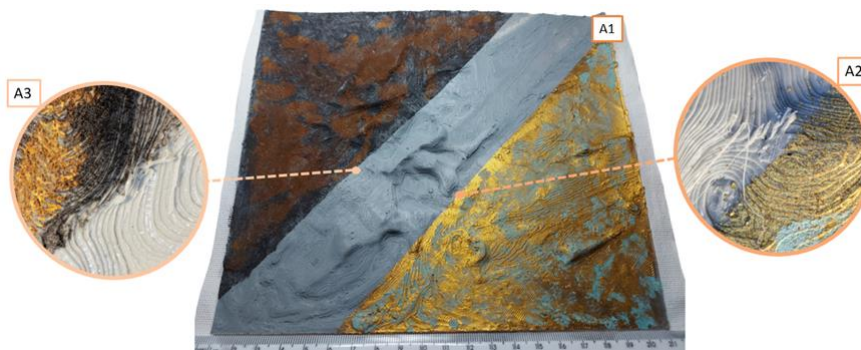
Na sequência da etapa de modelagem dos motivos propostos e anterior à etapa da impressão, foi importante a definição dos parâmetros e método a serem empregados para o ciclo seguinte. Como mencionado anteriormente, definiu-se que a combinação de parâmetros utilizada para a impressão do dolly 4 demonstrou resultados de maior eficácia relacionados a textura e acabamento das peças. Portanto, os motivos 1 e 2 foram impressos a uma velocidade de impressão de 60 mm/s e temperatura do bico extrusor em 200°C.

Quanto ao método a ser empregado, o 'método 2' definido no início da pesquisa foi aplicado para a impressão de ambos os motivos, devido aos resultados sobre a aderência dos materiais. Desta forma, assim que a primeira camada era depositada sobre a mesa de impressão, o processo era interrompido e um novo ajuste da mesa de impressão era realizado, logo a impressão era iniciada novamente com a tela de pintura (tela 1) sobre primeira camada.

Na sequência, foi realizada a impressão do motivo 1 com o material PLA sobre a tela 1, de acordo com o método e conjunto de parâmetros definidos. A impressão durou em média de 7 horas, contando com a aplicação do método 2 e o ajuste da mesa de impressão. No seguimento, os mesmos procedimentos de escolha de parâmetros e métodos de impressão foram adotados para a conclusão do motivo 2. Como a impressão do motivo 1, a impressão do motivo 2 levou em média 7 horas.

Assim que finalizada a etapa da impressão do motivo 1, foram consideradas maneiras de demonstrar a possibilidade da aplicação em um conceito artístico, desta forma foram analisadas formas de dar acabamento aos motivos para facilitar a interpretação artística. Para este fim, foram aplicadas pastas metálicas, uma dourada e outra ferrugem, sobre uma superfície em PLA para a compreensão da viabilidade da adição ao material proposto e a análise do aspecto físico que esta combinação resultaria. Após a aplicação das pastas, foram aplicadas pátinas reagentes que aceleram o processo de oxidação dos materiais como uma finalidade estética. Esta avaliação está presente na figura 58.

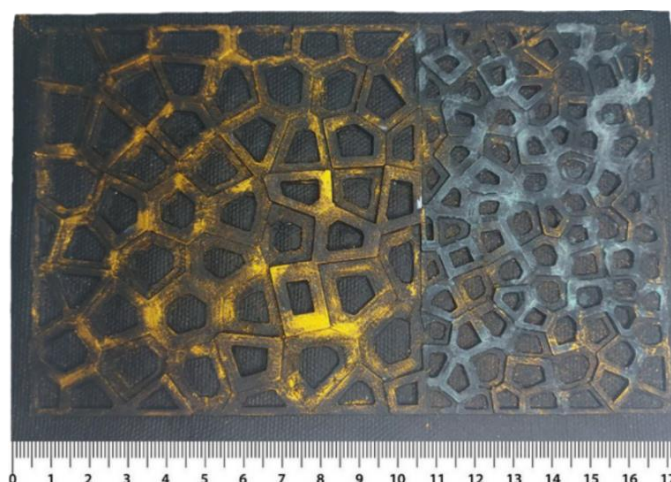
Figura 58 - Superfície em PLA com aplicação de pastas metálicas e pátinas reagentes. (A1) Peça completa; (A2) Imagem ampliada da diferença de acabamento entre o PLA e a pasta metálica dourada. (A3) Imagem ampliada da diferença de acabamento entre o PLA e a pasta metálica ferrugem



Fonte: Imagem relevo elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas por Everton Amaral da Silva (2023)

Para o propósito da pesquisa, o uso da pasta metálica dourada foi considerado mais adequado para os projetos elaborados na sequência. Logo, assim foi realizada a pintura da tela e da peça impressa com tinta acrílica preta e, em seguida, sobreposta uma leve camada de pasta metálica dourada sobre toda peça. Com o propósito de diferenciar as seções do modelo, foi aplicada uma pátina reagente sobre a seção com maior concentração de células. O motivo 1 finalizado pode ser observado na figura 59.

Figura 59 - Motivo 1 impresso sobre a tela 1



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

De acordo com os procedimentos adotados para o motivo 1, foi estabelecido o acabamento semelhante para o motivo 2, porém a pátina

reagente sendo aplicada sobre a região que concentra um menor número de células. Como descrito na etapa de elaboração, o modelo do segundo motivo foi concebido com o objetivo de demonstrar a possibilidade que a impressão sobre a tela de pintura oferece. Na figura 60, é exibido o motivo 2 finalizado, bem como a flexibilidade concedida de acordo com a escolha do material e forma.

Figura 60 - Motivo 2 impresso sobre a tela



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Em relação ao objetivo proposto quanto a elaboração dos motivos, a proposta foi realizada dentro das expectativas, levando em consideração que o propósito não era de fato a produção de um artefato artístico em si, mas uma representação das possibilidades ofertadas pela técnica estudada. A demonstração contou com elementos presentes no STEAM como forma de expressão visual advinda da união de conceitos.

Ao concluir esta etapa, alcançou-se o segundo objetivo específico determinado para a dissertação, este que estabelecia que deveriam ser elaboradas modelagens e impressões de motivos que representassem as possibilidades artísticas oferecidas pela técnica.

5.5 DIGITALIZAÇÃO DA PINTURA TEXTURIZADA (“MATA VONTADE”)

A digitalização 3D que resultou no modelo digital da pintura texturizada ‘O mar’ comprovou ser altamente proveitosa para a realização da pesquisa. A partir desta etapa foi possível exemplificar a possibilidade da reprodução de obras artísticas pela técnica proposta.

A abordagem inicial foi de apresentar uma maneira de otimizar as formas de apreciar peças artísticas, elaborando uma espécie de “Mata Vontade” que permitisse que as pessoas empregassem o sentido do tato ao admirar uma obra de arte. Ainda nesta mesma perspectiva, atualmente há maneiras de trazer acessibilidade para exposições artísticas, sendo estas descrições auditivas, textos em braile, entre outros. No entanto, considerando as dificuldades relacionadas a tradução de sentimentos e sensações que uma produção artística pode transmitir, a técnica de digitalização de obras para a reprodução por meio da impressão 3D sobre telas de pintura foi julgada como uma forma pertinente de praticar a acessibilidade em lugares como museus e exposições de arte.

Além dos fatores mencionados, os relevos obtidos pela superfície da pintura texturizada foram de grande relevância para a análise da influência de parâmetros sobre a técnica utilizada. Por meio desta etapa, foi possível estipular o parâmetro associado ao *dolly* 4 e ao Relevo 4 como o padrão a ser seguido para a sequência do trabalho, estimando uma qualidade superior referente ao acabamento da peça impressa, mantendo-se ainda uma boa aderência do PLA à tela de pintura.

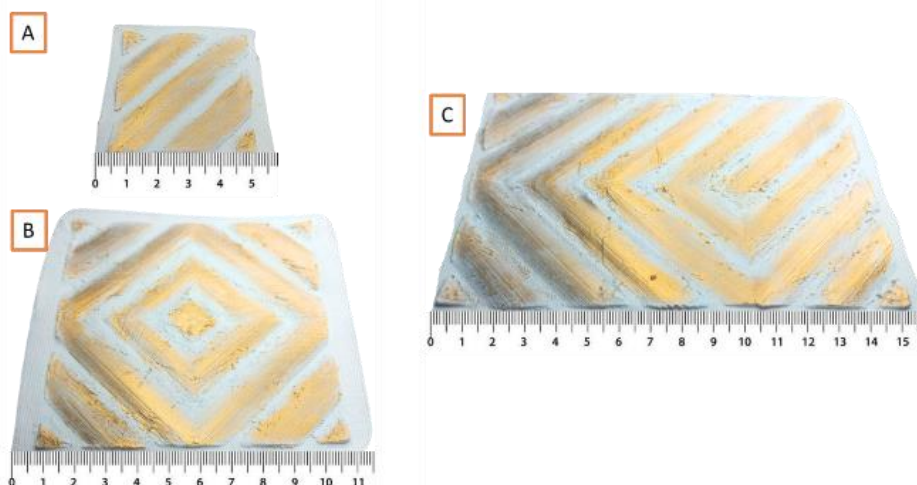
5.6 PROPOSTA ESTÉTICA - DESIGN DE SUPERFÍCIE

O segmento da pesquisa no qual abordou o design de superfície foi de suma importância, pois buscou ilustrar na prática a utilização deste modo de criação aplicado à técnica estudada pela dissertação. As aplicações comuns do design de superfície são na indústria têxtil, na fabricação de produtos decorativos e

diversas áreas em que o design desempenha um papel fundamental ao desenvolvimento. O estudo busca entender o processo de fabricação e demonstrar a importância da sensação tátil de um elemento artístico e, principalmente, o potencial de autoexpressão advindo da estética visual.

Para ilustrar a relevância do design de superfície, as impressões provenientes das combinações de módulos apresentadas na Figura 42 foram aplicadas em uma proposta estética (Figura 61). Nessa proposta, foram integrados elementos visuais dos sistemas com a pintura, aplicando tinta acrílica branca tanto na tela de pintura quanto no material PLA. Posteriormente, uma tintura utilizando pasta metálica dourada foi aplicada sobre o relevo obtido na superfície do PLA. Esta abordagem tem o intuito de exemplificar a interseção entre a arte e o design de superfície no contexto da dissertação.

Figura 61 - Proposta estética associada ao design de superfície. (A) Módulo; (B) Combinação 1; (C) Combinação 4



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

5.7 POSSÍVEIS DEFEITOS DE FABRICAÇÃO

Durante os ensaios e no processo de impressão dos objetos sobre a tela de pintura, ocorreram diversas imprecisões e falhas, associadas a múltiplos fatores que influenciaram em características quanto ao acabamento das peças obtidas pelos ensaios. A seguir são apresentados alguns defeitos de fabricação observados ao longo da pesquisa.

5.7.1 Nivelamento da mesa de impressão

Como visto anteriormente, é fundamental o ajuste preciso da altura da mesa de impressão para alcançar resultados de alta qualidade por meio da fabricação aditiva, pois impacta diretamente na aderência da peça à superfície da mesa. Este fato se mostrou igualmente verdadeiro para as peças impressas sobre a tela de pintura, pois o nivelamento impactou de forma significativa a aderência. Este problema foi notado inicialmente ao decorrer da impressão dos *dollys*, em que aqueles impressos com um ajuste mais alto da mesa, aproximando a mesma do bico extrusor, apresentavam erros de impressão, como tombamento e descolamento, com menos frequência. No entanto, as peças impressas com a mesa de impressão em uma calibração de altura inferior, apresentavam descolamentos frequentes durante o processo de impressão, ou em seguida em seu primeiro manuseio, demonstrando influência direta sobre a aderência da peça impressa com a tela de pintura. Foi possível observar esse fenômeno para todas as combinações de parâmetros utilizadas ao longo da pesquisa. Embora as peças impressas com a mesa de impressão mais próxima do bico extrusor apresentassem aderência desejada, foi perceptível que o ajuste de proximidade excessiva causava deformações na superfície e estrutura do objeto impresso, apresentando marcas e causando aglomeração do material. Este fator ocorria em decorrência da alta temperatura do bico extrusor e sua proximidade ao material, PLA, causando assim o derretimento do material ao longo da impressão. Os erros de impressão mencionados podem ser observados na figura 62.

Figura 62 - Erros de impressão associados à altura da mesa de impressão. (A1) *Dolly 2* após descolamento; (A2) Extremidade do módulo descolada e acúmulo de material; (B1) Marcação da peça (aglomeração de material); (B2) Imagem ampliada das deformações em B1



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Como uma forma de minimizar as ocorrências dos defeitos de impressão em relação à altura da mesa de impressão, por meio do entendimento da causa dos problemas mencionados, foram realizadas alterações no processo de impressão. Logo nas primeiras etapas da pesquisa, definiu-se o de impressão denominado 'método 2. Através da aplicação do método, o mesmo pode ser utilizado para calibrar a altura da mesa de impressão, de forma que assim que a impressão da primeira camada fosse concluída, o processo era interrompido e um novo ajuste de mesa era realizado, levando em consideração a espessura da tela de pintura. Este método resultou em erros menos frequentes, embora ainda persistam, pois, a calibração é feita manualmente, sem um parâmetro fixo a ser seguido.

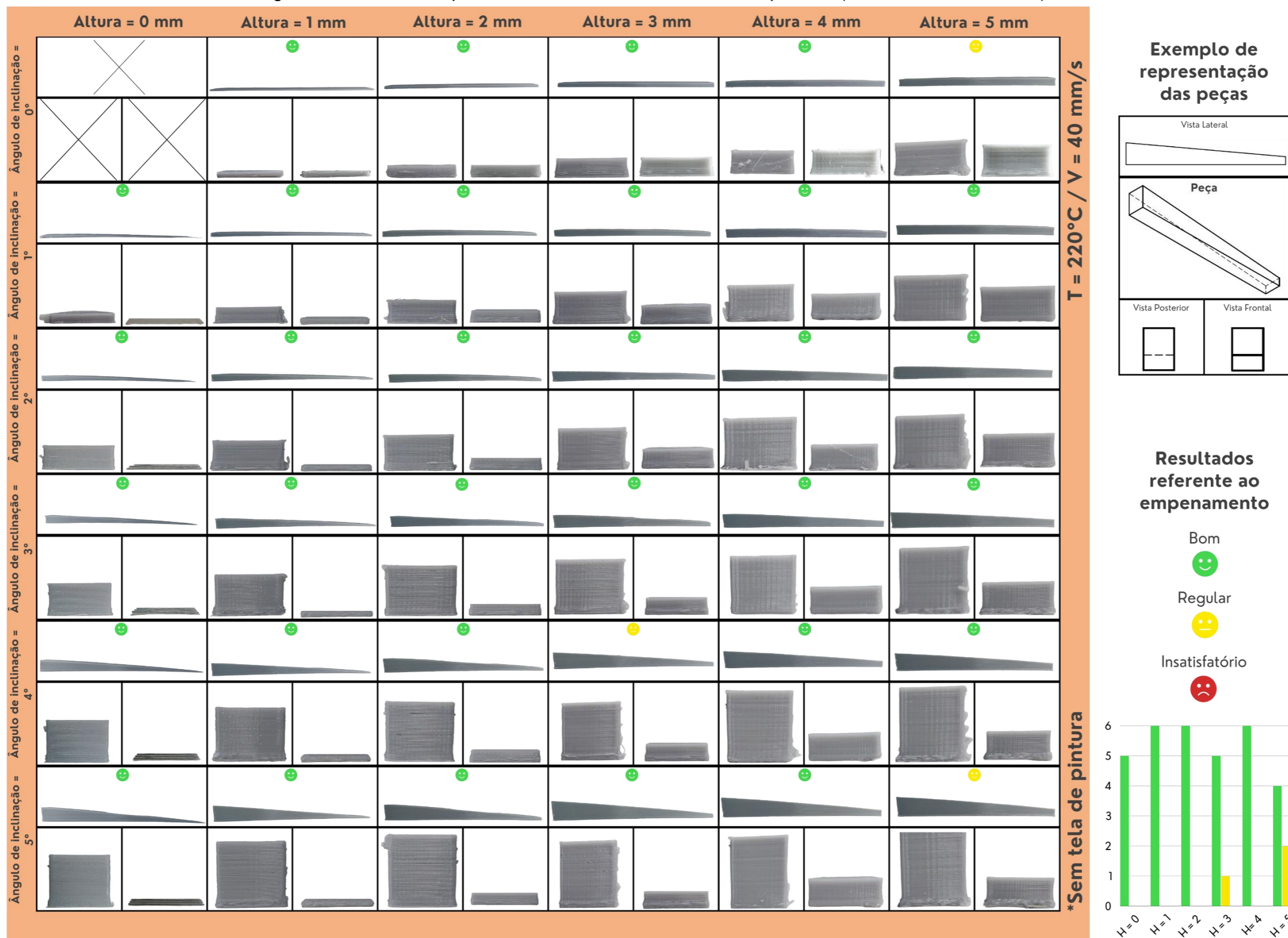
5.7.2 Empenamento

Existe um desafio recorrente em processos de manufatura realizados pela da fusão de polímeros, conhecido como empenamento, ou *warping*. Este tipo de deformação é causado pela contração do material após seu resfriamento, e o efeito normalmente compromete a aderência do material sobre a superfície da

mesa de impressão. O mesmo fenômeno ocorre para peças impressas sobre a tela de pintura, em que foi possível identificar que objetos com certa altura sofriam inconsistências em sua geometria agravadas em suas extremidades.

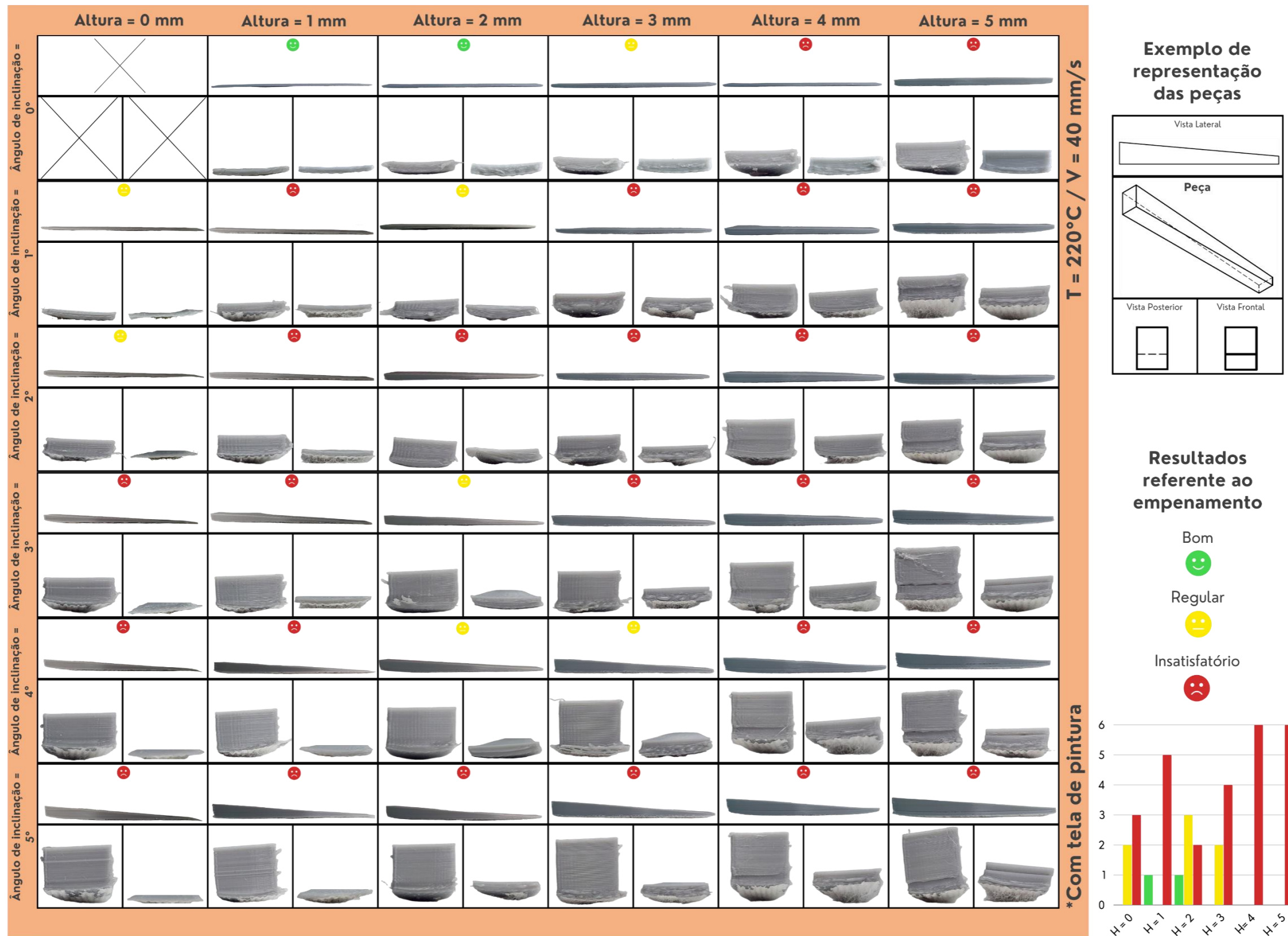
Com o intuito de determinar a altura necessária a ser definida para as extremidades da peça, a fim de prevenir o empenamento, os modelos projetados descritos na Figura 43 foram impressos utilizando os parâmetros estabelecidos para os dollys. Isso possibilitou verificar simultaneamente a influência da temperatura de impressão no empenamento. As imagens dos testes de empenamento, realizados de acordo com os dollys 2 e 4, podem ser visualizadas nas Figuras 63, 64, 65 e 66, enquanto as demais estão disponíveis no Apêndice C.

Figura 63 - Teste de empenamento realizado sobre mesa de impressão (V = 40 mm/s, T = 220°C)



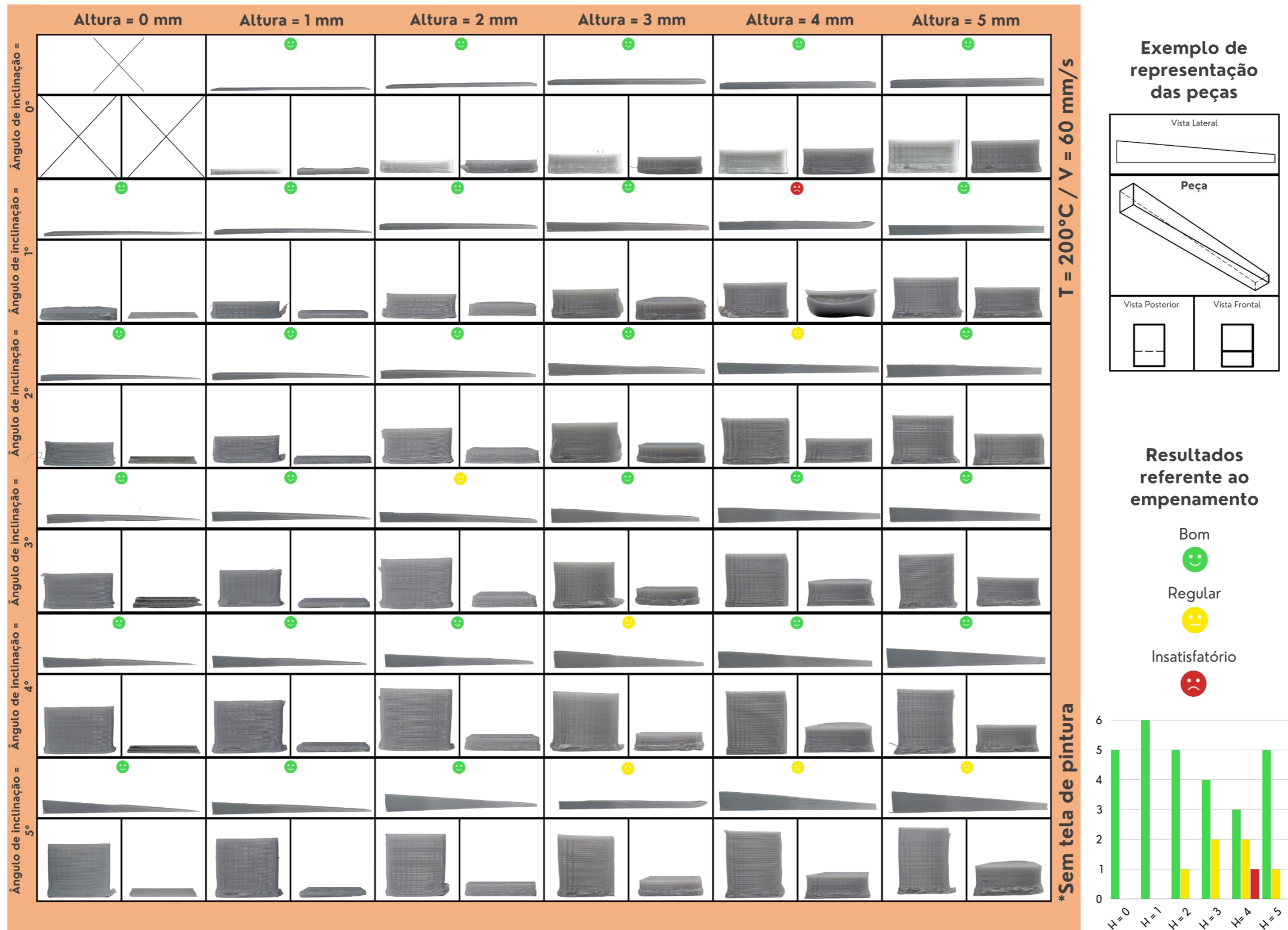
Fonte: Elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas com a colaboração de Everton Amaral da Silva (2023)

Figura 64 - Teste de empenamento realizado sobre tela de pintura (tecimento 2x1) (V = 40 mm/s, T = 220°)



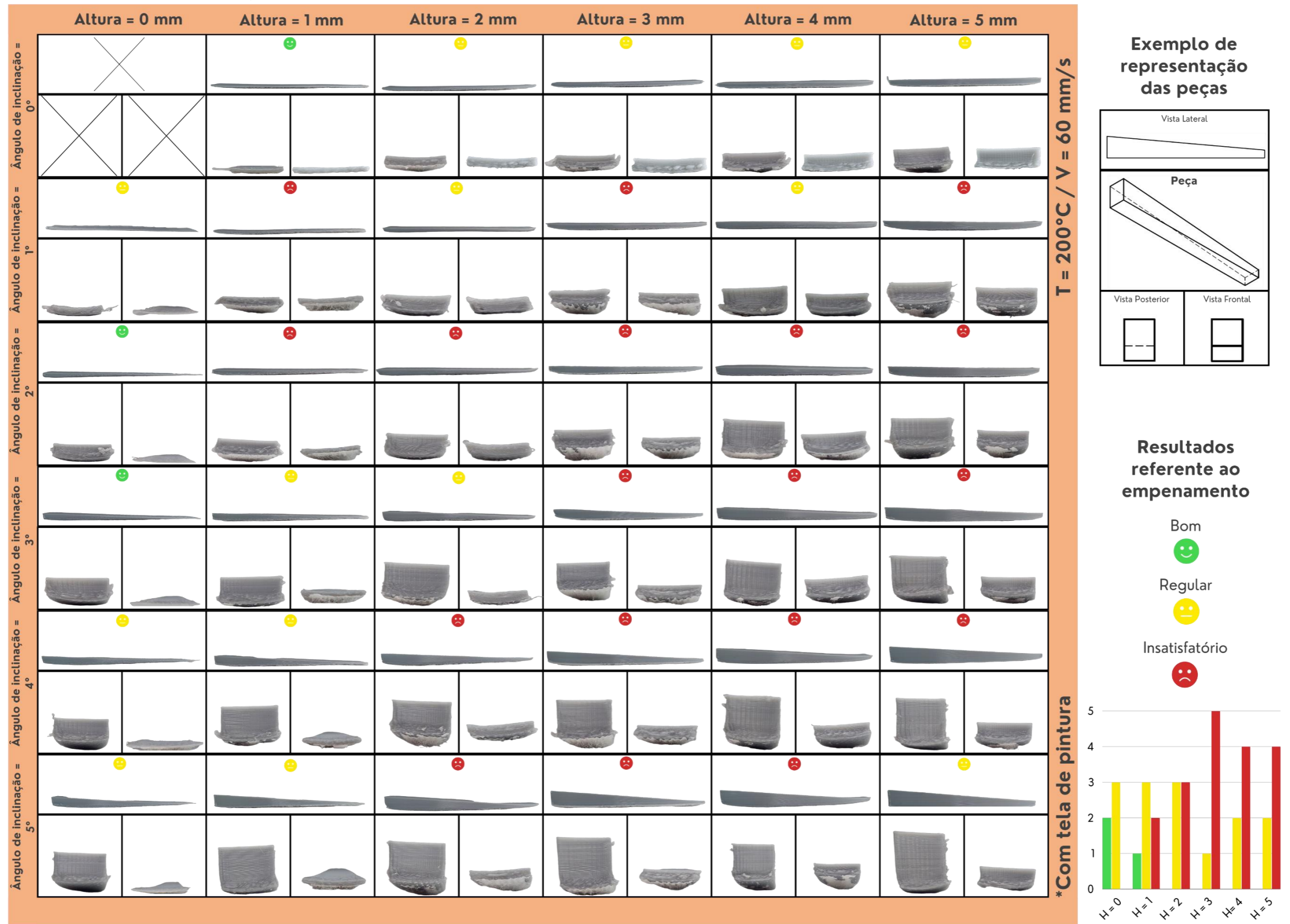
Fonte: Elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas com a colaboração de Everton Amaral da Silva (2023)

Figura 65 - Teste de empenamento realizado sobre mesa de impressão (V = 60 mm/s, T = 200°C)



Fonte: Elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas com a colaboração de Everton Amaral da Silva (2023)

Figura 66 - Teste de empenamento realizado sobre tela de pintura (tecimento 2x1) (V = 60 mm/s, T = 200°)



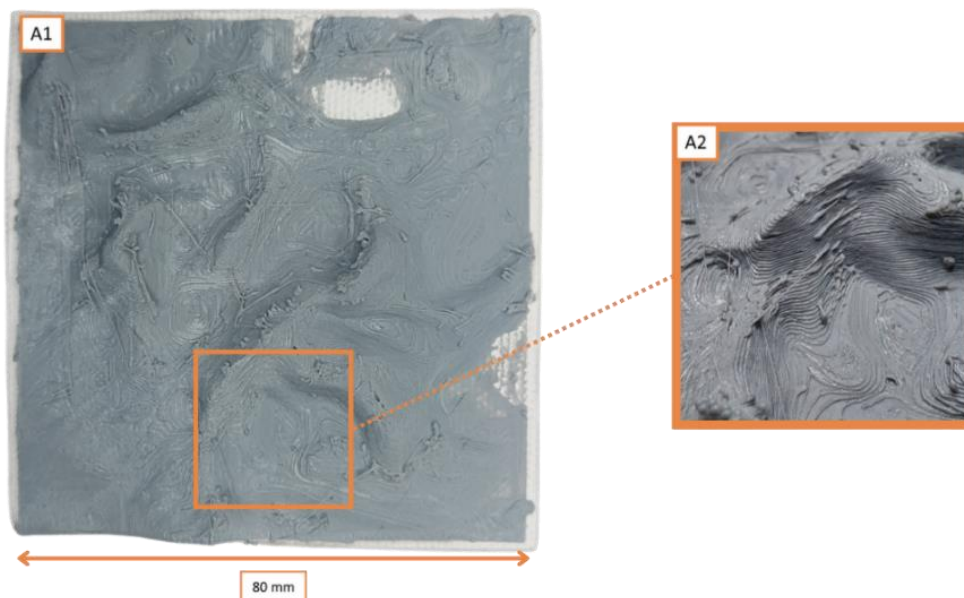
Fonte: Elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas com a colaboração de Everton Amaral da Silva (2023)

Com base na análise das imagens macroscópicas e a análise quanto ao empenamento, foi evidente que o efeito *warping*, ou empenamento, foi mais proeminente nas peças impressas sobre a tela, principalmente quando impressas a 220 °C e com alturas acima de 1 mm. Este resultado confirma a associação do fenômeno com a temperatura de impressão e revela que em peças de maior altura, a deformação foi mais acentuada. Vale salientar que o teste de empenamento foi realizado de forma visual, e os resultados levaram em consideração a menor altura e a geometria de cada peça. Como mencionado anteriormente, além da influência dos parâmetros e da altura de impressão, o fenômeno pode ocorrer devido à falta de aderência do material à superfície de impressão. Isso muitas vezes pode estar relacionado ao nivelamento da mesa de impressão.

5.7.3 Efeito Stringing

Como mencionado anteriormente, o efeito “*stringing*” é um fenômeno associado à alta temperatura de impressão, pois o aumento de fluidez do polímero está relacionado ao aumento da temperatura, ocasionando na formação de fios de material entre as estruturas da peça. Este efeito pode ser observado mais precisamente na etapa de impressão dos relevos, pois o problema ocorre especialmente em áreas localizadas entre os altos relevos, em seus espaços vazios. Ao longo das impressões dos Relevos 2 e 3, executadas a 220 °C, observou-se a maior incidência do fenômeno, evidenciado na figura 67. No entanto, para a impressão dos Relevos 1 e 4, realizadas a 200 °C, o problema não foi detectado, indicando que a redução da temperatura de impressão pode ser uma estratégia para atenuar o problema.

Figura 67 - Efeito "stringing" sobre o Relevo 2



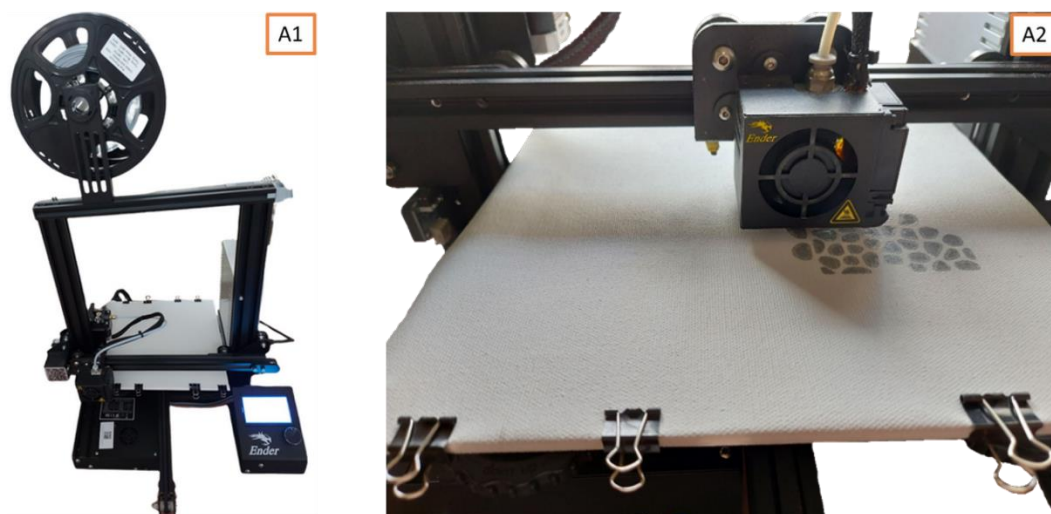
Fonte: Elaborado pela Autora (2022)

5.7.4 Ajuste do tecido sobre a mesa de impressão

Durante o processo de impressão com as telas de pintura, verificou-se que o ajuste preciso da tela sobre a superfície de impressão desempenhou um papel fundamental para a qualidade de impressão. A acomodação do material foi realizada por prendedores, posicionados nas extremidades da tela de pintura, como se pode constatar na figura 68. Ao imprimir sobre a tela 1, o ajuste foi realizado de forma relativamente simples, pois o material demonstrava estabilidade durante o processo de impressão, resultando em poucas intercorrências ou falhas. Os cuidados essenciais para esta fase foram garantir que a superfície da tela permanecesse plana e sem folgas, evitando assim qualquer interferência do material no funcionamento do bico extrusor.

No entanto, ao imprimir sobre a tela 2, a situação ocorreu de forma diferente, pois apesar de realizar um ajuste minucioso, permitido dentro das limitações do equipamento, as características do material, sendo este fino e maleável, fez com que a tela demonstrasse instabilidade ao longo da impressão, resultando em diversas deformações e falhas nos objetos produzidos. Este aspecto foi determinante para a interrupção do uso da tela 2 ao longo da pesquisa.

Figura 68 - Ajuste da tela de pintura sobre a mesa de impressão. (A1) Equipamento; (A2) Área de impressão ao longo do processo



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

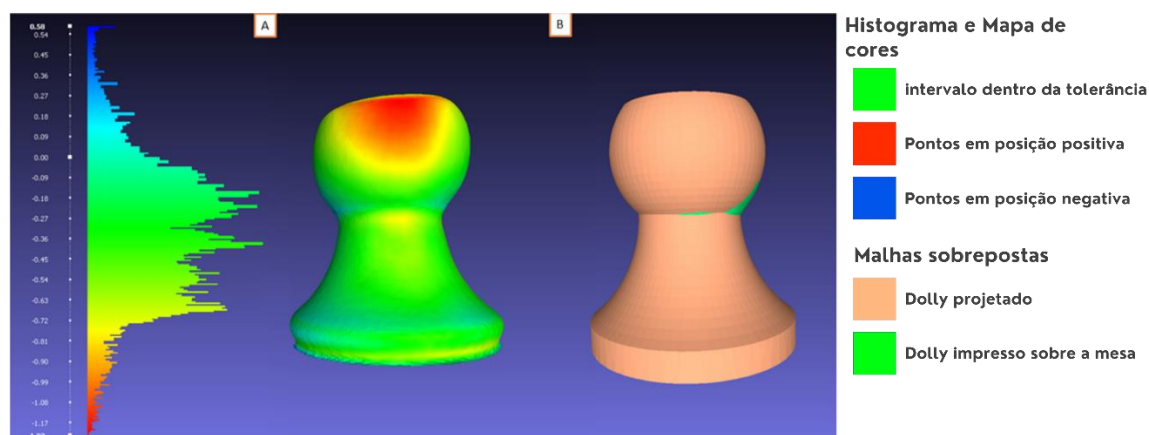
5.7.5 Deformação

Sendo uma limitação da técnica de impressão 3D e do material PLA, as peças apresentaram irregularidades quando impressas diretamente sobre a mesa de impressão, sobre a tela 1 e sobre a tela 2. Porém ao realizar o encaixe dos *dollys* no equipamento *Pull Off*, foi observado que as peças impressas sobre a tela 2 apresentaram maior deformação, assim não permitindo o encaixe no equipamento.

Com o propósito de coletar dados para a comparação referente a deformação entre os modelos impressos, foram conduzidas duas impressões: um *dolly* impresso diretamente sobre a mesa de impressão e outro sobre a tela 2. Após a impressão, procedeu-se à digitalização tridimensional dos *dollys* para permitir a realização da comparação entre as malhas.

Na figura 69, é apresentada a comparação entre as malhas pela sobreposição do modelo projetado *dolly*, utilizado para a impressão, ao modelo digitalizado do *dolly* impresso diretamente sobre a mesa de impressão. Ao analisar o histograma, observa-se que, apesar de exibir alguma irregularidade em seu topo, a impressão do *dolly* sobre a mesa de impressão apresenta um grande número de pontos dentro do intervalo de tolerância quando em comparação ao modelo original projetado.

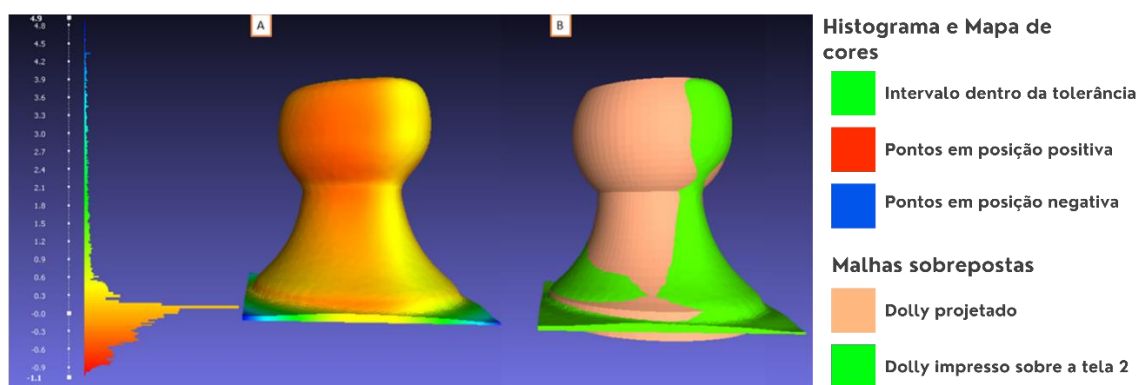
Figura 69 - Comparação entre o projeto do *dolly* ao *dolly* impresso sobre a mesa de impressão. (A) Mapa de cores obtido pela sobreposição dos *dolllys*; (B) *Dolllys* sobrepostos



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Na figura 70, o modelo projetado foi comparado a malha resultante da digitalização do *dolly* impresso sobre a tela 2, com o propósito de evidenciar a deformação na peça, percebida nos ensaios anteriores. A análise evidenciou uma grande quantidade de pontos em posição negativa, quando comparada ao *dolly* projetado. A análise do histograma revela uma clara discrepância em relação à comparação realizada anteriormente (figura 69), onde o modelo impresso diretamente sobre a mesa de impressão foi comparado ao projeto original, validando a constatação de que a tela 2 induz instabilidades e regularidades nos artigos impressos sobre sua superfície.

Figura 70 - Comparação entre o projeto do *dolly* ao *dolly* impresso sobre a tela 2. (A) Mapa de cores obtido pela sobreposição dos *dolllys*; (B) *Dolllys* sobrepostos

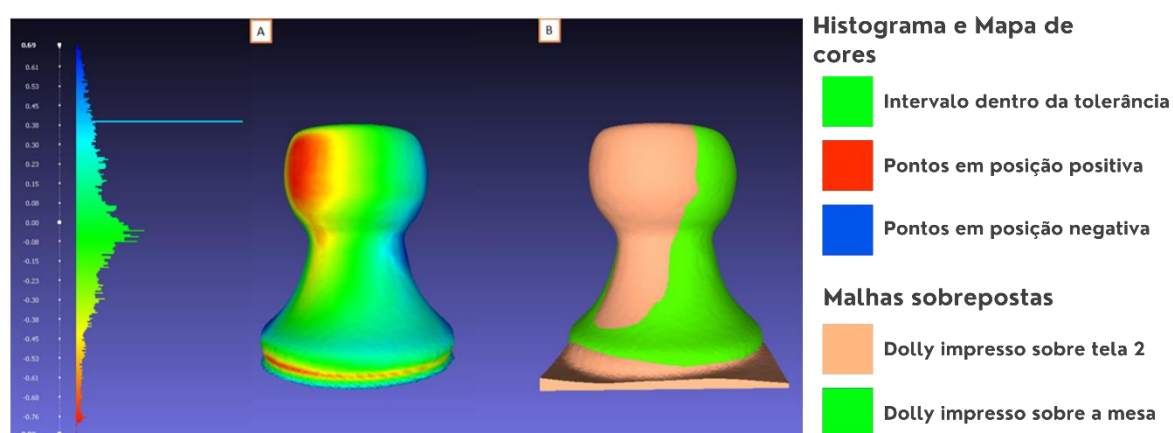


Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Considerando que a impressão 3D conta com irregularidades, especialmente associadas ao PLA, ao método FFF e equipamentos de entrada, com a *Ender 3*, foram

conduzidas comparações entre o *dolly* impresso diretamente sobre a mesa de impressão e o *dolly* impresso sobre a tela 2. O propósito desta análise foi verificar a persistência das irregularidades ao comparar dois modelos impressos, e não apenas em relação ao modelo digital. No histograma apresentado na figura 71, foi possível observar desvios entre os modelos impressos, em que o topo da geometria do *dolly* impresso sobre a tela 2, evidencia a deformação sofrida pela peça.

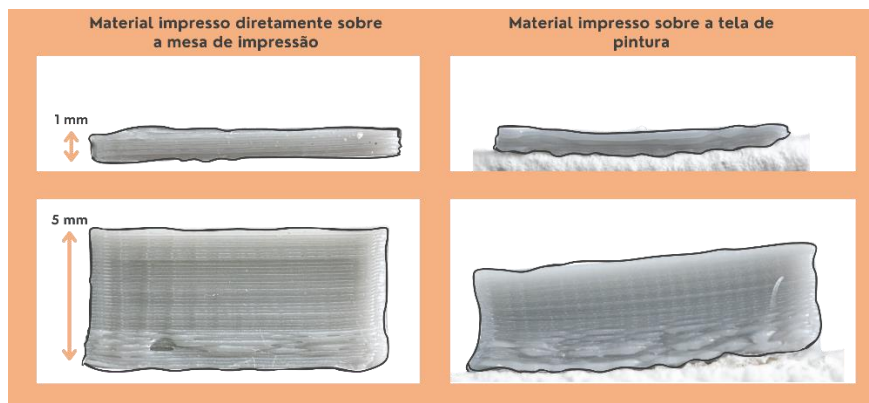
Figura 71 - Comparação entre o *dolly* impresso sobre a mesa de impressão ao *dolly* impresso sobre a tela 2. (A) Mapa de cores obtido pela sobreposição dos *dollys*; (B) *Dollys* sobrepostos



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Tendo em vista que as falhas associadas à deformação não se restringem exclusivamente a impressões realizadas sobre a tela 2, julgou-se pertinente a comparação entre um objeto impresso sobre a mesa de impressão com um objeto impresso sobre a tela 1. A geometria adotada seguiu o padrão dos modelos realizados ao longo do teste de empenamento. Na figura 72, estão retratadas duas peças, uma de altura de 1 mm e outra de altura de 5 mm, ambas inicialmente impressas sobre a superfície da mesa de impressão e posteriormente impressas sobre a tela de pintura designada para os ensaios da pesquisa (tela 1). É evidenciado que os modelos, tanto o mais baixo quanto o mais alto, apresentam irregularidades na estrutura da peça. No entanto, a peça de 5 mm exibe efeitos atenuados quanto a deformação. O resultado está alinhado com os testes realizados ao longo dos ensaios sobre empenamentos, que indicam que quanto maior a altura da peça, mais propensa a deformações ela se torna.

Figura 72 - Comparação entre peças impressas sobre a mesa de impressão e sobre a tela de pintura



Fonte: Elaborado pela Autora; Imagens macroscópicas obtidas por Everton Amaral da Silva (2023)

5.8 PEÇA FINAL – COLAGEM EM 3D

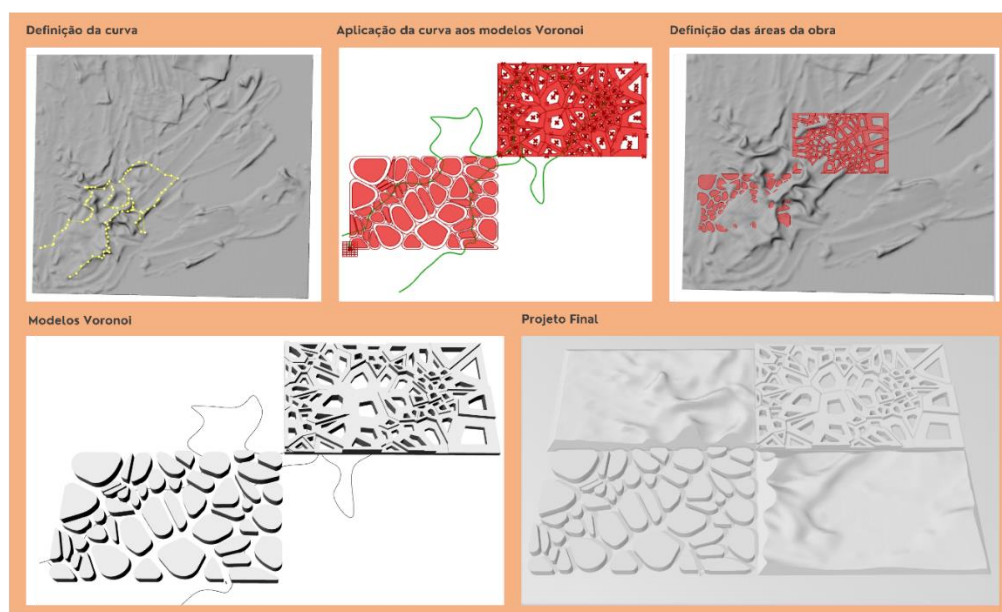
Por fim, ao levar em conta todos os fatores estudados acerca da técnica de impressão de PLA sobre a tela de pintura, usando a tecnologia de manufatura aditiva FFF, foi desenvolvida uma colagem em 3D como peça final da pesquisa. Esta peça englobou as etapas percorridas ao longo da pesquisa e empregou os parâmetros e métodos considerados como fundamentais para alcançar os resultados esperados quando a qualidade e aderência, de acordo com os testes realizados anteriormente.

A peça teve sua origem na pintura texturizada 'O mar', previamente digitalizada. Outro estágio essencial para o avanço da pesquisa contou com a criação dos motivos Voronoi. Dessa forma, a partir da superfície do modelo digitalizado, foi traçada uma curva. Na sequência, os motivos elaborados na fase anterior foram redimensionados e reduzidos para 25% de suas dimensões originais e dispostos em direções opostas. Desta forma, a curva derivada da superfície da pintura digitalizada foi sobreposta aos motivos, sendo associado à sua modelagem, assim modificando a distribuição das células presentes nos mesmos, seguindo a trajetória da curva.

Assim que o projeto dos motivos foi finalizado, a malha da pintura texturizada foi alinhada conforme a posição da curva, e foi cortada de acordo com o retângulo estabelecido para os motivos na etapa inicial, com medidas de 16,18 x 10 cm. As áreas ocupadas pelos motivos foram removidas do modelo, resultando em dois retângulos das mesmas dimensões dos motivos, preenchendo os espaços deixados pelos mesmos.

Após concluir a definição da geometria da pintura e dos motivos, os retângulos pertencentes ao modelo digitalizado e ao motivo 1 foram submetidos a chanfros de 45 graus, considerando os resultados obtidos nos testes de empenamento. Por fim, foi realizada a montagem das partes, resultando no projeto final, visto na figura 73.

Figura 73 - Etapas de elaboração da peça final



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Na sequência, o modelo digital da peça final foi submetido ao processo de fatiamento, adotando os parâmetros utilizados na impressão do Relevo 4 e *dolly* 4. Esta decisão foi embasada nos resultados prévios referentes ao acabamento e à geometria das peças realizados anteriormente. A etapa de impressão seguiu o processo descrito pelo método 2, estabelecido no início dos testes conduzidos ao longo da pesquisa. O modelo foi impresso sobre a tela 1, demandando em média, 10 horas para a sua conclusão. A etapa final consistiu na realização da pintura da peça, com tinta acrílica na cor preta aplicada sobre a tela de pintura e o PLA. Em seguida, a pasta metálica dourada, presente na finalização dos motivos Voronoi, foi aplicada sobre o PLA, com uma pátina reagente usada sobre a região delimitada pela curva no processo de modelagem. O resultado dessa etapa é exibido na figura 74.

Figura 74 - Finalização da peça impressa sobre a tela de pintura



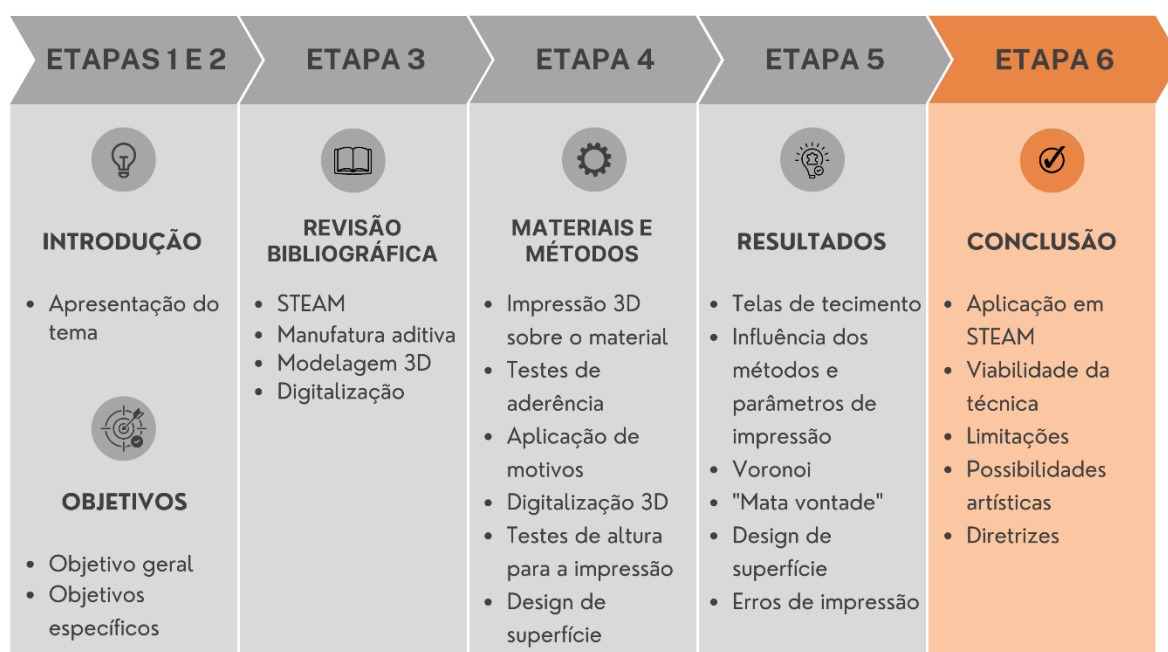
Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Ao finalizar este estágio da pesquisa, conclui-se o terceiro objetivo específico estabelecido para a dissertação, que estipulava a releitura de uma pintura texturizada pela digitalização 3D.

6. CONCLUSÃO

Em síntese, ao decorrer da dissertação foram desenvolvidas e avaliadas maneiras de utilizar a impressão 3D, especificamente a técnica FFF, combinando materiais como o PLA e a tela de pintura, com o intuito de investigar a viabilidade do processo. Para concluir, foi preciso abordar as etapas em diferentes tópicos para a conclusão (figura 75).

Figura 75 - Estrutura da dissertação: Conclusão



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Quanto as aplicações em STEAM:

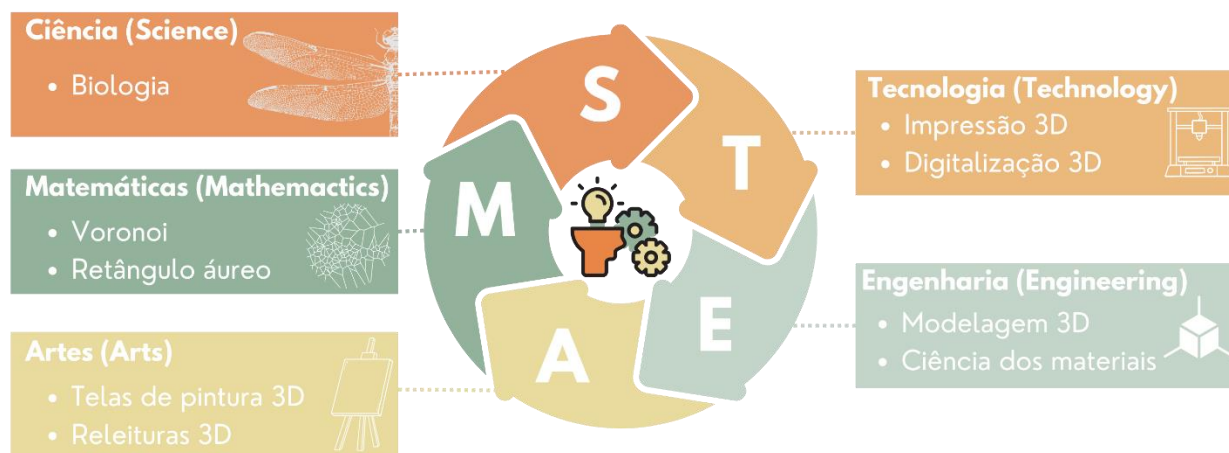
O conceito do STEAM desempenhou um papel essencial na condução da pesquisa, que buscou ir além de um estudo técnico baseado em procedimentos a serem seguidos, estruturados previamente. A dissertação buscou transmitir uma abordagem centrada na arte e no design.

O objetivo principal deste estudo foi apresentar uma abordagem inovadora para o uso de uma ferramenta tecnológica nas artes plásticas. A tela de pintura e a tinta, elementos já consagrados na prática artística, foram incluídos na pesquisa de forma a serem aceitos e utilizados como meios em quais os artistas podem explorar sua criatividade, experimentando com diversas cores, técnicas e estilos. Apesar de haver diversas abordagens para adicionar relevo a uma obra de arte, como o uso de gessos,

tecidos e materiais naturais, este estudo propõe uma estratégia específica que utiliza a tecnologia de modelagem e impressão para esse fim.

A intenção do trabalho foi a integração da tecnologia como uma técnica que poderia ser aplicada com êxito por artistas, desde que utilizando métodos e parâmetros específicos. Neste contexto, a pesquisa explorou conceitos tecnológicos relacionados ao estudo das técnicas de impressão 3D, em paralelo com as artes, além de investigar as potencialidades da digitalização tridimensional pelo aprofundamento nos conceitos de engenharia aplicados à modelagem 3D e ao processo de impressão 3D (FFF) com PLA. Como pode ser visto na figura 76, o desenvolvimento deste trabalho contou com as etapas presentes no processo de *design thinking*, com a complementação e colaboração das áreas de estudo propostas para a pesquisa utilizando o conceito do STEAM, que se mostraram fundamentais para o êxito da dissertação.

Figura 76 - Representação visual do STEAM no desenvolvimento deste trabalho



Fonte: Elaborado pela Autora (2023)

Quanto a viabilidade da técnica e suas limitações:

Em relação aos métodos e parâmetros, alguns se mostraram compatíveis com a técnica desenvolvida, ao passo que outros foram identificados como limitações, requerendo a busca por maneiras de contorná-las ou evitá-las. A pesquisa passou por um processo de retroalimentação pois à medida que os ensaios eram realizados, novas maneiras de estudar os processos se mostravam necessárias.

Em relação aos materiais, o PLA foi utilizado em todas etapas e ensaios. Quanto às telas de pintura, a tela 1 foi a mais adequada para o processo, dado que a sua

utilização junto ao PLA durante o processo de impressão foi possível devido a sua morfologia. A tela 2 revelou-se incompatível com a técnica, apresentando dificuldades para a execução da técnica logo nas primeiras tentativas de aplicações.

Os métodos de impressão foram avaliados. Com a adoção do método 1, com a impressão direta da primeira camada na tela de pintura, não foi possível garantir a aderência adequada para a impressão das peças em PLA. Em contrapartida, o método 2, com o posicionamento do tecido entre duas camadas de polímero, mostrou-se adequado, garantindo uma boa aderência entre os materiais utilizados.

No processo de modelagem, vale ressaltar que a quantidade de camadas de polímero altera o aspecto visual da peça produzida pela técnica. Observou-se que a espessura mínima de 0,36 mm (três camadas de 0,12 mm) foi a mais adequada para o PLA e, para as extremidades da peça, foi observado que alturas superiores a 1 mm tem mais incidência quanto à deformação.

Por último, em relação às combinações de parâmetros avaliadas no estudo, verificou-se que as combinações, quando utilizando o método de impressão 2, demonstraram uma boa aderência do PLA à superfície da tela de pintura. No entanto, após análises visuais, observou-se que as peças produzidas a uma velocidade de 40 mm/s e temperatura de 220 °C exibiram uma melhor aderência. Contudo, nos testes de acabamento superficial, essa combinação de parâmetros resultou na redução de defeitos relacionados ao acabamento. Assim, para garantir uma boa aderência e um acabamento desejável, evitando intercorrências como empenamento e *stringing*, foi estabelecido ao longo da pesquisa que a combinação de parâmetros que resultou em um desempenho superior contou com a velocidade de impressão em 60 mm/s e a temperatura de 200 °C. É viável estabelecer os parâmetros que revelaram a melhor aderência para a impressão da primeira camada, bem como adotar os parâmetros que proporcionaram o melhor acabamento superficial para as camadas subsequentes. Dessa forma, é possível alcançar o melhor resultado possível na impressão 3D sobre tela de pintura.

É importante ressaltar que os desafios encontrados ou os aspectos positivos apresentados ao longo dos testes está associado ao equipamento (Ender-3), ao material (PLA) e ao substrato (tela de pintura), podendo apresentar variações nos

resultados se realizados com o auxílio de outro equipamento ou utilizando outros materiais.

Quanto as possibilidades artísticas:

Ao longo da pesquisa, cada exemplificação visando uma possível aplicação artística teve um propósito singular. A impressão dos motivos representou a primeira incursão da técnica no contexto artístico, visando fundir conceitos matemáticos e científicos para propor uma representação visual, unificando todas as áreas do STEAM. O motivo 2 evidenciou a capacidade do material de se adaptar a uma superfície maleável, como a tela de pintura, demonstrando a liberdade na apresentação em diferentes formas.

Em seguida, na fase de design de superfície, foram exploradas diferentes superfícies com um único padrão geométrico (módulo). Ao rearranjá-lo, várias oportunidades de composições visuais foram geradas, destacando que a expressão artística não depende exclusivamente da elaboração de geometrias complexas, mas sim da concepção e da maneira como essa ideia é comunicada.

Por último, a criação da peça final procurou integrar os conceitos adquiridos e as informações técnicas estudadas ao longo da pesquisa, com o intuito de exemplificar uma criação estética que reinterpretasse uma pintura existente e demonstrar a aplicação do STEAM em um contexto artístico.

Quanto às diretrizes:

Conforme evidenciado durante o estudo, diversas etapas precisam ser seguidas para garantir o sucesso da técnica desenvolvida. Com o intuito de permitir a recriação ou a aplicação dos conceitos discutidos, foram formuladas diretrizes a serem seguidas para assegurar o sucesso da implementação. Estas são:

1. Utilizar um substrato de superfície rugosa com menor maleabilidade (tela de tecido 2x1).
2. Ao projetar, assegurar que a espessura das peças sejam de no mínimo 0,36 mm (3 camadas) para preservar a característica estética do PLA, sem interferência do tecido. Para as extremidades, a altura preferencialmente deverá se manter abaixo de 1 mm para evitar empenamentos.

3. Para impressão com o filamento PLA, é recomendável manter a temperatura de extrusão em 200 °C e a velocidade de impressão em 60 mm/s para garantir um acabamento de qualidade. Para a primeira camada, sugere-se uma temperatura de 200 °C e uma velocidade de impressão de 40 mm/s para garantir uma aderência adequada à superfície de impressão.
4. Fixar o tecido sobre a mesa de impressão firmemente para impedir qualquer folga ou dobra durante o processo de impressão.
5. Aplicar o método 2 no início da impressão, em que uma camada de PLA deve ser impressa sobre a mesa, para em seguida se ajustar a tela sobre a mesa de impressão e então imprimir as camadas subsequentes depositadas sobre a tela.
6. Realizar o nivelamento preciso da mesa de impressão. Assim que a impressão for interrompida a aplicação do método 2, realizar o nivelamento do equipamento para garantir a altura correta, considerando a espessura do substrato.

Ao concluir a definição das diretrizes para a implementação da técnica, alcança-se o quarto e último objetivo específico delineado para esta pesquisa.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a impressão diretamente sobre o algodão, sem interferência do acabamento acrílico.
- Estudar a aplicação de tintas sobre a tela de pintura antes da impressão do PLA.
- Estudar a aplicação de outras cores de PLA sobre a tela de pintura, uma vez que o pigmento pode influenciar nas propriedades do polímero.
- Estudar a aplicação de outros tipos de filamentos sobre a tela de pintura.

REFERÊNCIAS

- ACIU, R.; CIOCARLIE, H. G-Code Optimization Algorithm and its application on Printed Circuit Board Drilling. **9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics**, Romania, 2014.
- ARCE, E.; SUÁREZ-GARCÍA, A.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, J. A.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, M. I. Design Sprint: Enhancing STEM and engineering education through agile prototyping and testing ideas. **Thinking Skill and Creativity**. Ferrol, v. 44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101039>
- ASSIS, M. A. P. **Impressão 3D, modelos de negócios e os novos cenários para a propriedade intelectual**. 2018. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- BACICH, L.; MORAN, J. **Metodologias ativas para uma educação inovadora**. São Paulo: 2018.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação**, v. 1, n.3, 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>
- BLENDER, C. F.; MÜLLER, M. S.; SILVA, F. P.; TEIXEIRA, F. G. Uso da digitalização 3D do corpo humano para desenvolvimento de produtos personalizados: Análise comparativa entre os scanners Artec EVA e o Kinect. **Estudos em Design**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 24 – 43, 2016.
- BONINI, L. A.; SBRAGIA, R. O modelo de design thinking como indutor da inovação nas empresas: um estudo empírico. **Revista de Gestão e Projetos – GeP**, São Paulo, v. 2, n. 1, 03-25, 2011.
- BRESSAN, F. **DESIGN E TECNOLOGIA: ESTRATÉGIAS GENERATIVAS EXPRESSIVAS EM SUPERFÍCIE E VOLUMETRIA**, 2018. Tese (Doutorado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- BUGIN, L. A. K.; FAGUNDES, C. V. M.; BRUSCATTO, U. M.; CÂNDIDO, L. H. A. Exploration of data-driven midsole algorithm design based in biomechanics data and Voronoi 3D to digital manufacturing. **REVISTA DESIGN E TECNOLOGIA**. V. 10, n. 21, 2020. DOI: [10.23972/det2020iss21pp01-10](https://doi.org/10.23972/det2020iss21pp01-10)
- CANDLIN, F. *Art, Museums and Touch*. Londres: 2009.
- CHIEN, Y.; CHU, P. The different learning outcomes of high school and college students on a 3D-printing STEAM engineering design curriculum. **International J of Science and Mathematics Education**, Taiwan, v. 16, 1047-1064, 2018. DOI: [10.1007/s10763-017-9832-4](https://doi.org/10.1007/s10763-017-9832-4)
- CUNICO, M. W. M. **Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo**. Curitiba. Concep3D, 2015.

- DIAS, T. M. S.; Mello, G. J. Análise das competências e habilidades da área de ciências da natureza orientadas através da abordagem STEAM. **REAMEC**. Cuiabá, v. 10, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26571/reamec.v10i1.13094>
- FIGUEIREDO, B. B.; CÉSAR, F. I. G. Um estudo da utilização da impressora 3D na engenharia e na medicina. **RECISATEC – Revista científica saúde e tecnologia**, v. 2, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.53612/recisatec.v2i1.70>
- FIJOL, N.; AGUILAR-SÁNCHEZ, A.; MATHEW, A.P. 3D-printable biopolymer-based materials for water treatment: A review. **Chemical Engineering Journal**, Stockholm, v. 403, n. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132964>
- FLORIO, W. Modelagem paramétrica no processo de projeto em arquitetura. In: **SBQP 2009 – Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído**. São Paulo, 2007.
- GARTH, J. **University of OXFORD**, 2016. Disponível em: <https://www.ox.ac.uk/oxford-heritage-projects/museums-and-blind>
- HAQUE, S. S. **Minimizing Stringing Issues In FDM Printing**. 2020. DOI: [10.13140/RG.2.2.35536.74247](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35536.74247)
- HENRIKSEN, D. Creating STEAM with Design Thinking: Beyond STEM and Arts Integration. **THE STEAM Journal**. Phoenix, v. 3, n. 1, Article 11, 2017. DOI: [10.5642/steam.20170301.11](https://doi.org/10.5642/steam.20170301.11)
- HU, J. STUDY ON STL-BASED SLICING PROCESS FOR 3D PRINTING. **28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference**, v. 28. 2017, Denver, 2022.
- HUANG, T.; LIN C. From 3D modeling to 3D printing: Development of a differentiated spatial ability teaching model. **Telematics and Informatics**. V. 34, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tele.2016.10.005>
- JANDYAL, A.; CHATURVEDI, I.; WAZIR, I.; RAINA, A.; HAQ, M. I. 3D Printing – A review of processes, materials, and applications in industry 4.0. **Sustainable Operations and Computers**. V. 3, 33 – 42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>
- KANTUMUCHU, V. C. Additive Manufacturing for Industrial Applications and Potential Quality Challenges. **Advances in Additive Manufacturing Processes**. 216 – 239, Oklahoma, 2021. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=QZRUEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA216&dq=use+of+3+printing+ford+cars+500000+parts&ots=sFZ4Q9ld7u&sig=UkrT3kAWQn-zdXMPicH1RQsdLww#v=onepage&q=use%20of%203%20printing%20ford%20cars%20500000%20parts&f=false>
- KIJAMA, R.; YANG-YOSHIHARA, M.; MAEKAWA, M. S. Using design thinking to cultivate the next generation of females STEAM thinkers. **International Journal of STEM Education**. Toronto, 8-14, 2021.
- KINDLEIN JÚNIOR, W.; BATISTA RIBEIRO, R. INTEGRAÇÃO DAS CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS, ENGENHARIAS, ARTES E MATEMÁTICA (STEAM) COMO FERRAMENTA DE CONEXÃO DE CONHECIMENTOS VISANDO UMA

- FORMAÇÃO EQUITATIVA, INCLUSIVA E DE ALTA QUALIDADE. In: **I CONGRESSO INTERNACIONAL MULHERES EM STEAM**, v. 1. 2022, São José dos Campos, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55592/ICIMESTEAM.2022.7214216>
- KINDLEIN JÚNIOR, W.; BRESSAN, F.; PALOMBINI, F. L. A importância do STEAM frente aos desafios da formação do ensino superior e da pesquisa multidimensional em Design. **ESTUDOS EM DESIGN**. Rio de Janeiro, v. 29, n. 1, 116-130, 2021.
- KORGER, M.; BERGSCHEIDER, J.; LUTZ, M.; MAHLTIG, B.; FINSTERBUSCH, K; RABE, B. Possible Applications of 3D Printing Technology on Textile Substrates. In: **48th Conference of the International Federation of Knitting Technologists**, 2016. DOI: [10.1088/1757-899X/141/1/012011](https://doi.org/10.1088/1757-899X/141/1/012011)
- KUMAR, V.; DUTTA, D. An assessment of data formats for layered manufacturing. In: **Advances in Engineering Software**, v. 28., p151-164 1997, Ann Arbor, 1997.
- LIRA, V. M. **PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR IMPRESSÃO 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3d**. Ed. Edgard Blücher Ltda., 2021.
- MAEDA, J. STEAM + Art = STEAM. **The STEAM Journal**. Rhode Island, v. 1, n. 34, mar. 2013.
- MAFIPOUR, M. S.; VILGERTSHOFER, S.; BORRMANN, A. Automated geometric digital twinning of bridges from segmented point clouds by parametric prototype models. **Automation in Construction**, v. 156, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105101>
- MAIA, D. L.; CARVALHO, R. A.; APPELT, V. K. Abordagem STEAM na educação básica brasileira: uma revisão de literatura. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 17, n. 49, p 68-88, 2021. DOI: [10.3895/rts.v17n49.13536](https://doi.org/10.3895/rts.v17n49.13536)
- MARÍN, J. **SetienymarinCursos**. 2021. Disponível em: <https://setienymarincursos.com/diagrama-de-voronoi/>
- NG, O. Exploring the use of 3D Computer-Aided Design and 3D printing for STEAM learning in Mathematics. **Digital Experiences in Mathematics Education**, online, v. 3, 257-263, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40751-017-0036-x>
- PEI, E.; SHEN, J.; WATLING, J. Direct 3D printing of polymers onto textiles: experimental studies and applications. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, p. 556 - 571, 2015.
- PERIGNAT, E.; KATZ-BUONINCONTRO, J. STEAM in practice and research: An integrative literature review. **Thinking Skills and Creativity**, Filadélfia, v. 31, 31-43, 2019.
- PESTANO, V.; POHLMANN, M.; SILVA, F. P. Avaliação da suavização da superfície de peças impressas em ABS com vapor de acetona: estudo de caso de textura bioinspirada. In: OLIVEIRA, G. G.; de NÚNES, G. J. Z.; PASSOS, J.E.; **Design em pesquisa – Volume 5**, Porto Alegre: Marcavisual, 2022, cap. 5, p. 9-21. E-book.
- REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D Printing Handbook – Technologies, Design and Applications**. Coers&Roest© 3D Hubs B.V., 2017.

ROCHA, L. B. R.; GARCIA, A. L. S. STEM e design thinking: ferramentas transdisciplinares no ensino de inglês. **Revista Polyphonia**. Goiânia, v. 31, n.2, 137-148, 2020. DOI: [10.5216/rp.v31i2.67100](https://doi.org/10.5216/rp.v31i2.67100)

RÜTHSCHILLING, E. A. **Design de Superfície: prática e aprendizagem mediadas pela tecnologia digital**, 2002. Tese (Doutorado em Informática da Educação) Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SILVA, F. P. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, F. P. **Usinagem de Espumas de Poliuretano e Digitalização Tridimensional para Fabricação de Assentos Personalizados para Pessoas com Deficiência**. 2011. Tese (Doutorado em Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T. C.; RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials and Applications. In: **2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing**, v. 35, 1286 – 1296, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

SKOWRONEK, M.; GILBERTI, R. M.; PETRO, M.; SANCOMB, C.; MADDERN, S.; JANKOVIC, J. Inclusive STEAM education in diverse disciplines of sustainable energy and AI. **Energy and AI**, v. 7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100124>

SPAHIU, T.; GRIMMELSMANN, N.; EHRMANN, A.; PIPERI, E.; SHEHI, E. Effect of 3D Printing on textile fabric. **1st International Conference “Engineering and Entrepreneurship”**, 2017.

SUDBRACK DA FONTE, R. **A utilização da fabricação digital para personalização de próteses mamárias externas para mulheres pós-mastectomizadas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

TAŞCIOĞLU, E.; ÖZHAN, K.; KESKIN, A. O.; KAYNAK, Y. Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 44, n. 139, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03429-7>

VALERGA, A. P.; BATISTA, M.; FERNANDEZ-VIDAL, S. R.; GAMEZ, A. J. Impact of Chemical Post-Processing in Fused Deposition Modelling (FDM) on Polylactic Acid (PLA) Surface Quality and Structure. 2019. **Polymers**, v. 11, n. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11030566>

VALERGA, A. P.; FERNANDEZ-VIDAL, S. R.; BATISTA, M.; GIROT, F. Fused deposition modelling interfacial and interlayer bonding in PLA post-processed parts.

2020. **Rapid Prototyping Journal**, v. 26, n. 3. Disponível em:
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-06-2019-0176/full/html>

VIEIRA FAGUNDES, H. A. **DESIGN E TECNOLOGIA: BIOMORFOSE DE FRUTOS DE CASCA DURA APLICADA à GRAMÁTICA DE FORMA**, 2021. Tese (Doutorado em Design) Programa de Pós-graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

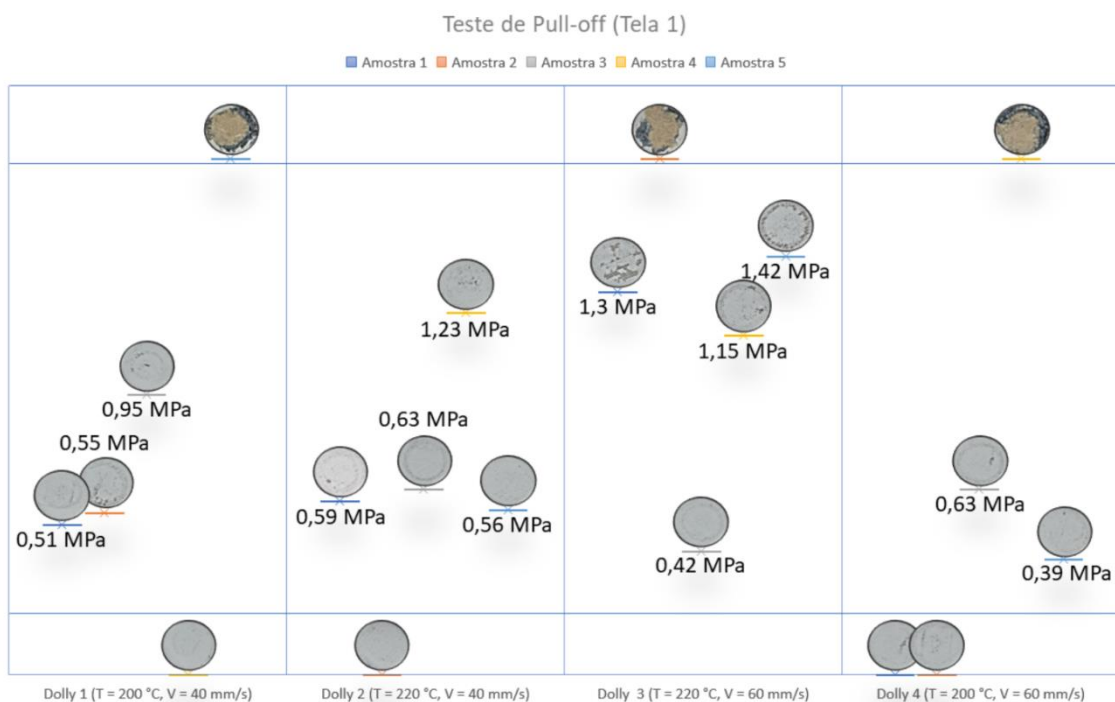
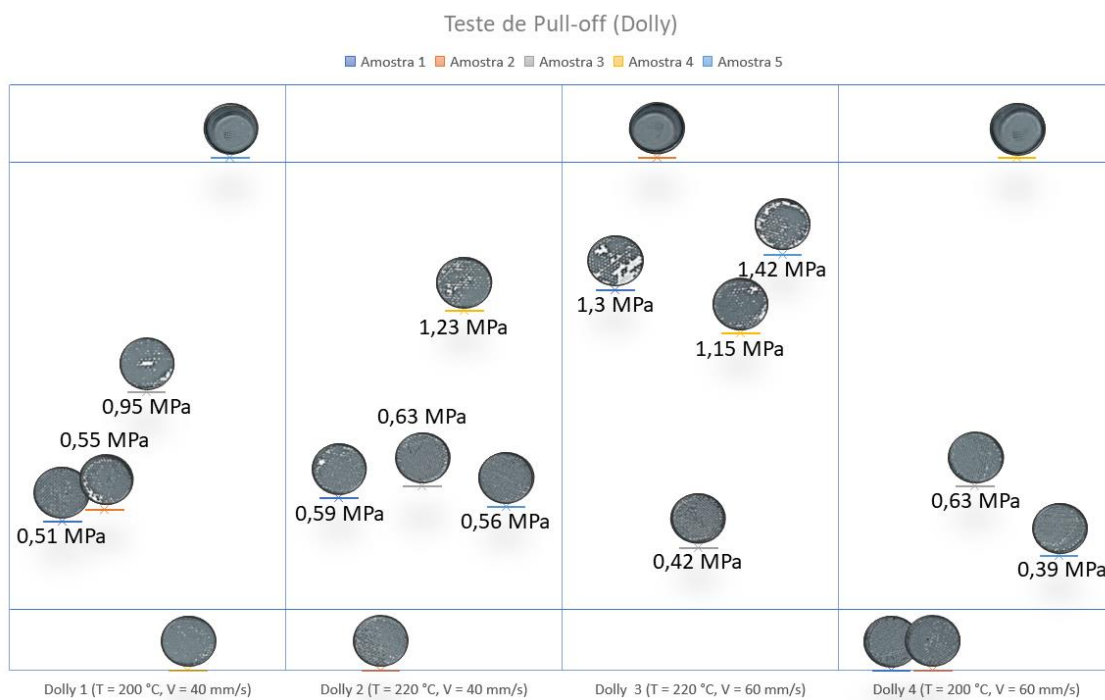
VIJAY, P.; DANAIHAH, P.; RAJESH, K. V. D. Critical Parameters Effecting the Rapid Prototyping Surface Finish. **Journal of Mechanical Engineering and Automation**, v.1, 17-20, 2011. DOI: 10.5923/j.jmea.20110101.03

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and perspective. **Composites Part B**, v. 110, 442-458, 2017.

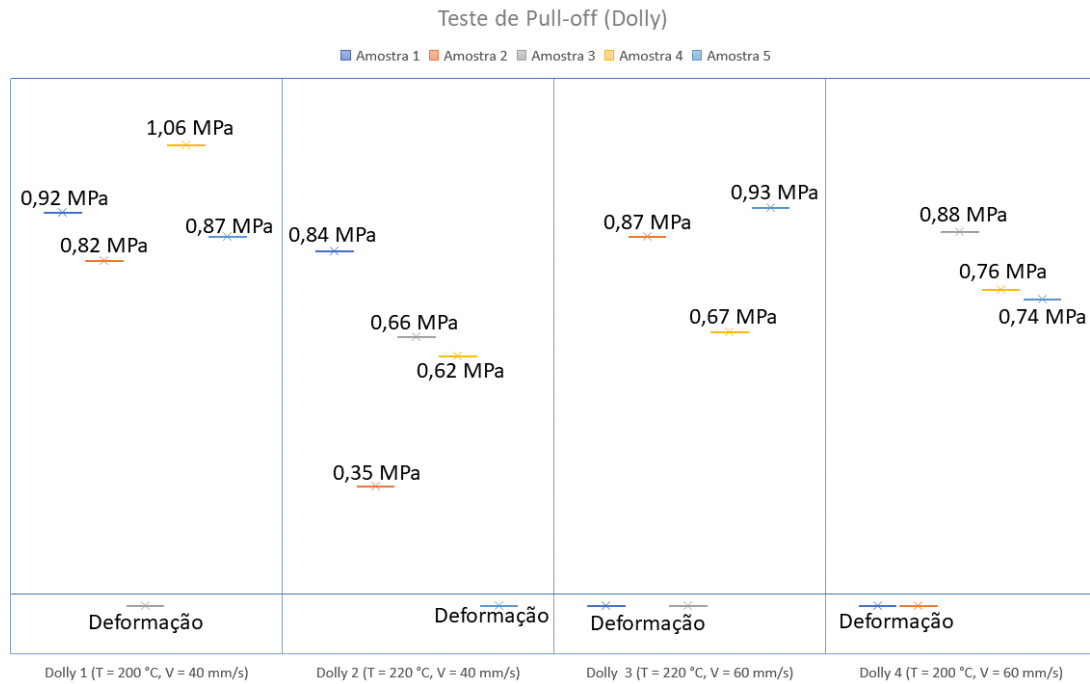
WU, Z. Understanding teachers' cross-disciplinary collaboration for STEAM education: Building a digital community of practice. **Thinking Skills and Creativity**, Melbourne, v. 46, 2022.

APÊNDICE A – Gráfico de resultados numéricos obtidos pelo teste de Aderência *Pull Off*

Tela 1

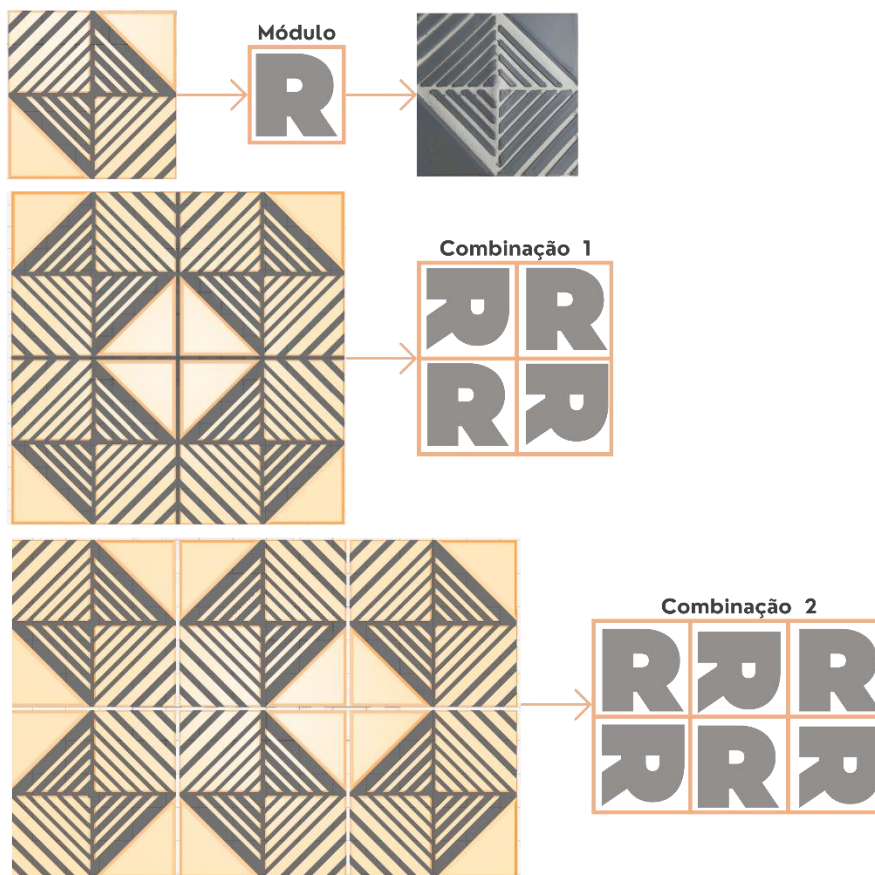
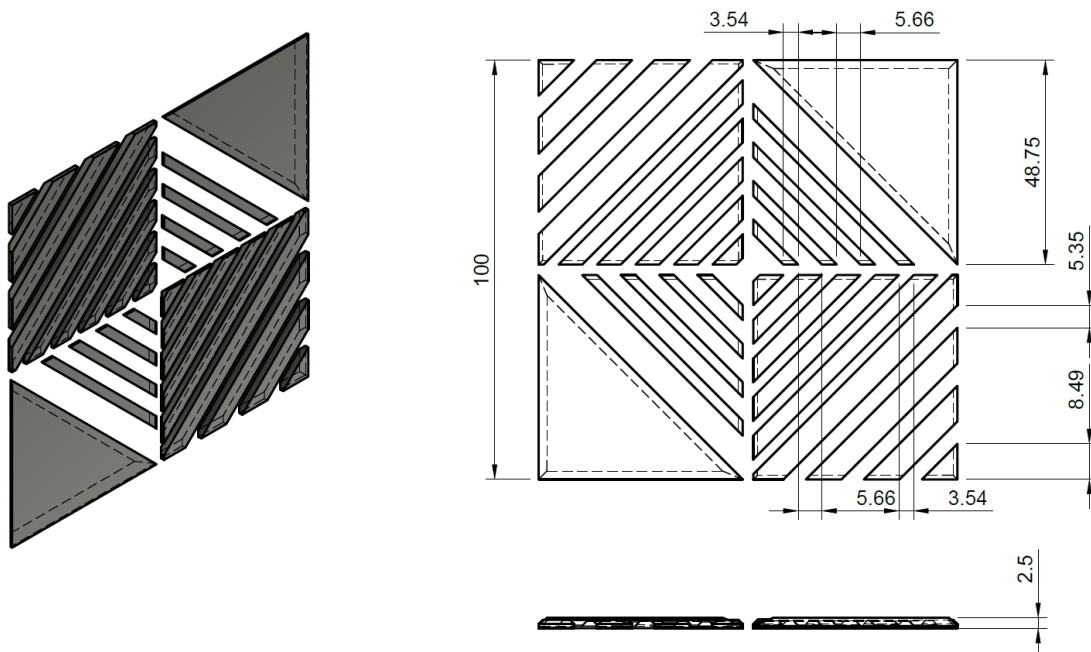


Tela 2



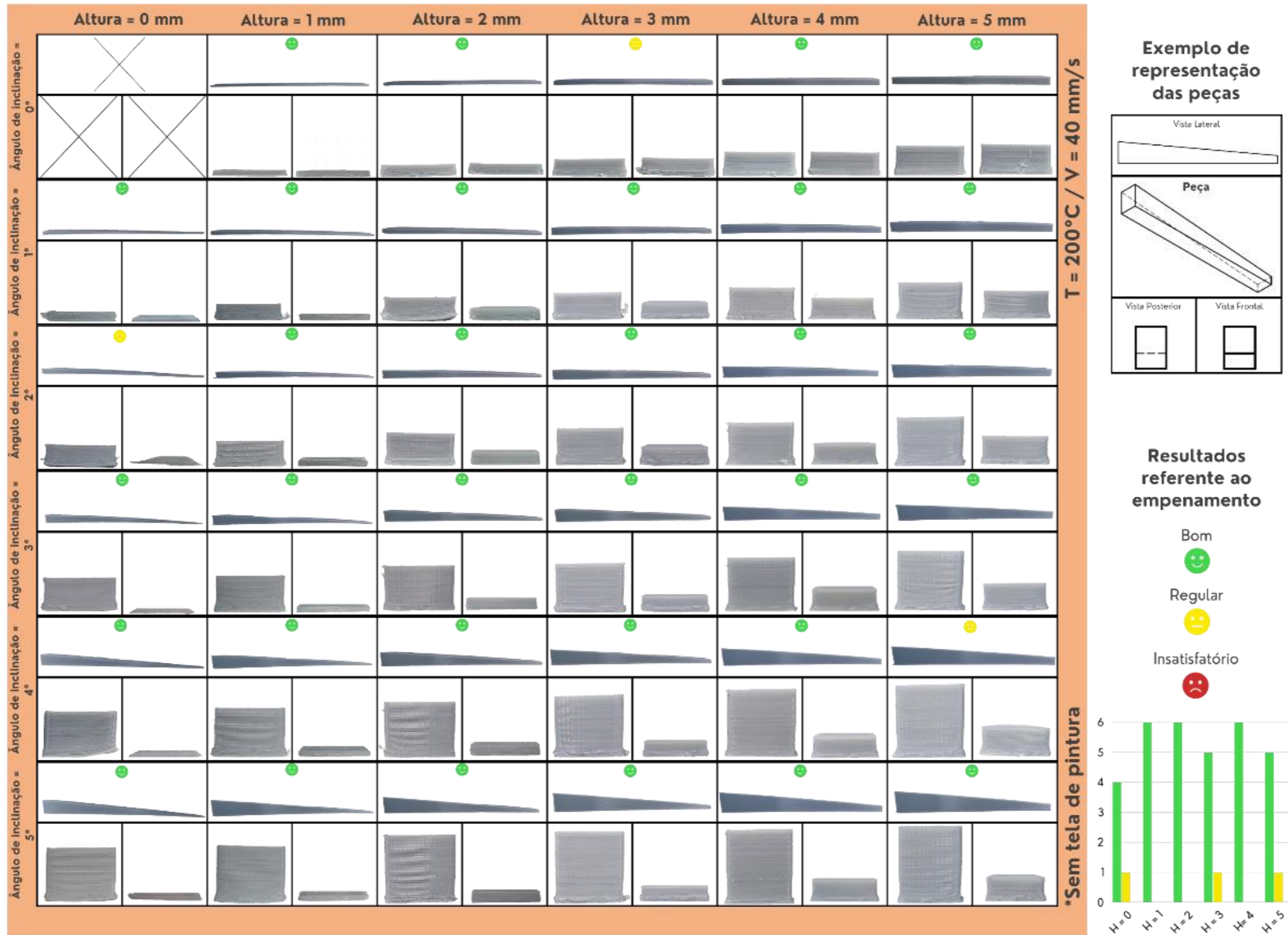
Não constam imagens nos resultados para a Tela 2 devido à dificuldade de registrar a base dos *dollys* devido a interferência da cola.

APÊNDICE B – Proposta de sistema secundário para etapa de design de superfície

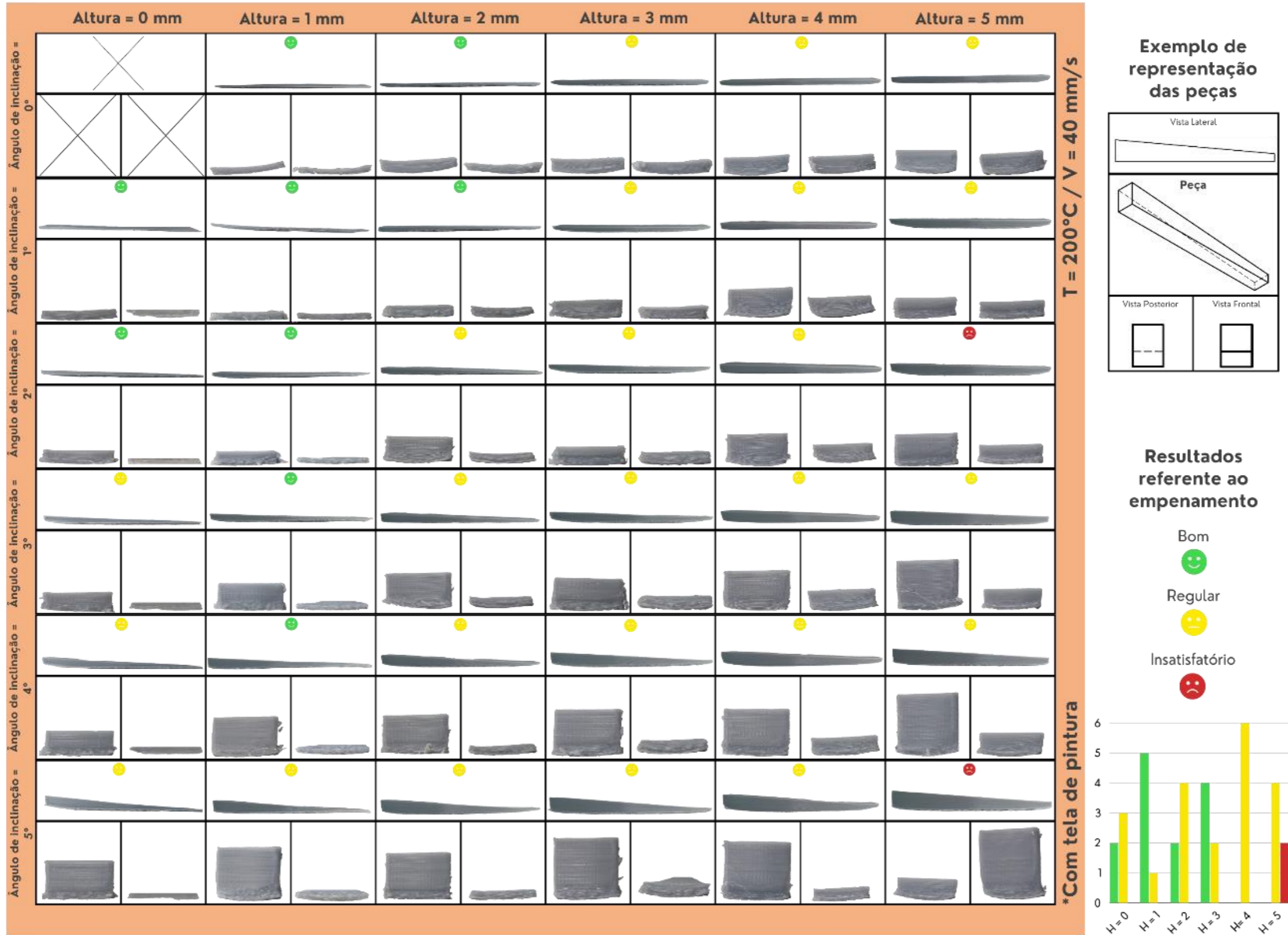


APÊNDICE C – Resultados adicionais dos testes de empenamentos (*Dollys 1 e 3*)

Teste de empenamento realizado sobre mesa de impressão – *Dolly 1*: ($V = 40 \text{ mm/s}$, $T = 200^\circ\text{C}$)



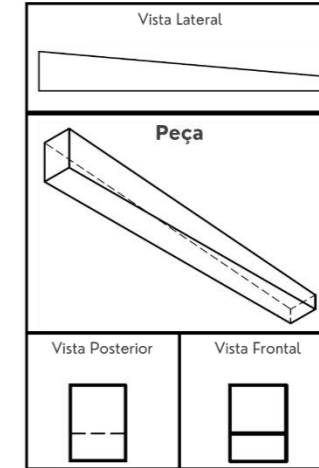
Teste de empenamento realizado sobre tela de pintura (tecimento 2x1) – Dolly 1: (V = 40 mm/s, T = 200°C)



Teste de empenamento realizado sobre mesa de impressão – Dolly 3: (V = 60 mm/s, T = 220°C)



Exemplo de representação das peças



Resultados referente ao empenamento

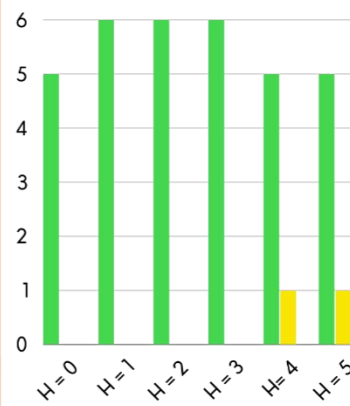
Bom



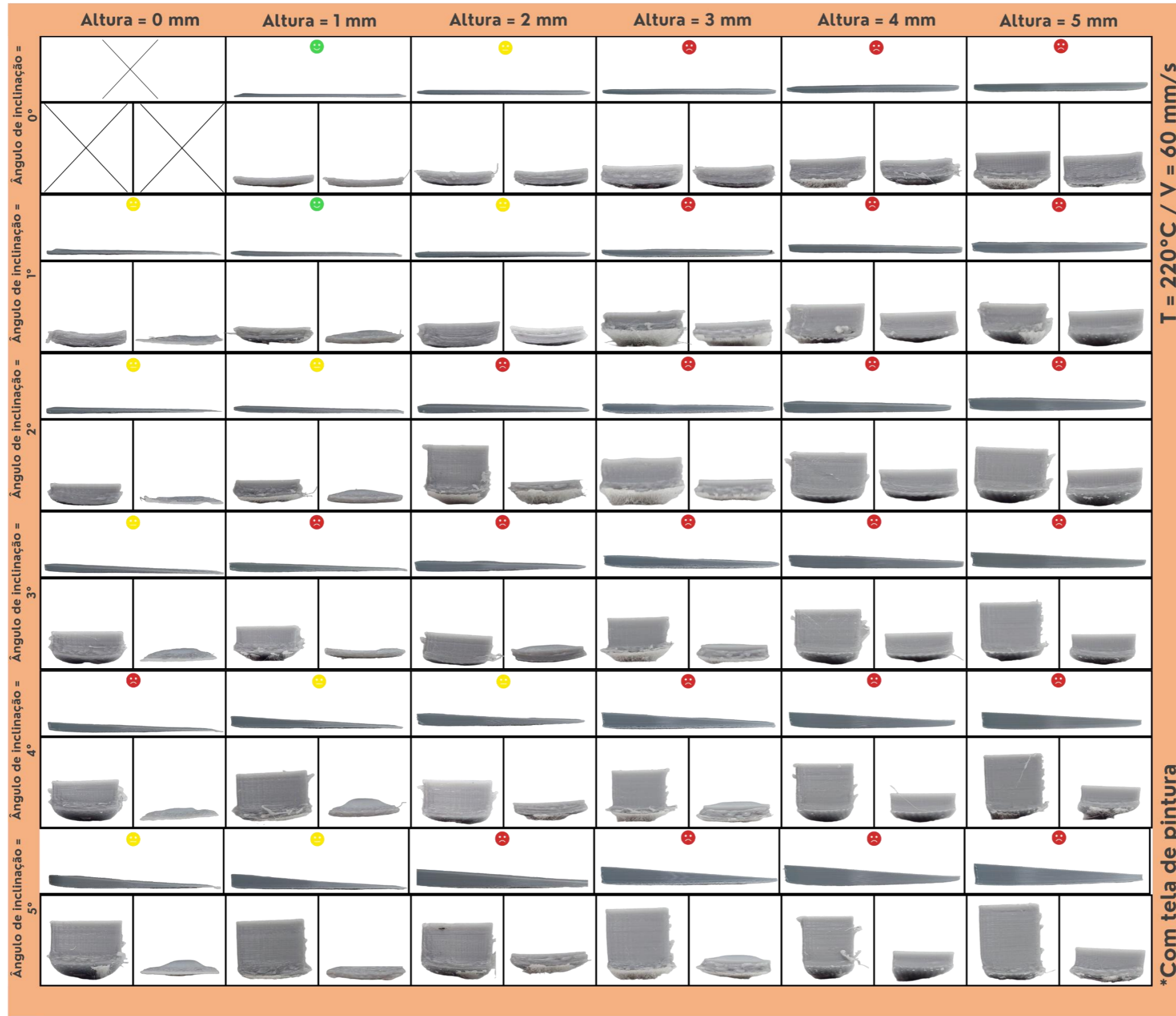
Regular



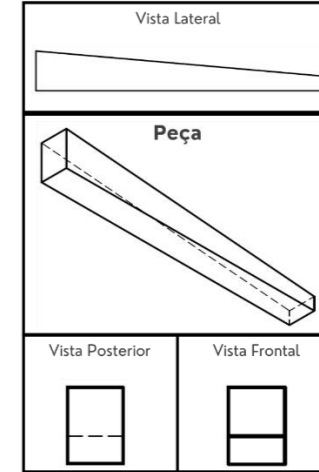
Insatisfatório



Teste de empenamento realizado sobre tela de pintura (tecimento 2x1) – Dolly 3: (V = 60 mm/s, T = 220°C)



Exemplo de representação das peças



Resultados referente ao empenamento

- Bom
- Regular
- Insatisfatório

