



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**MANUFATURA ADITIVA MSLA: ESTUDO DA VARIAÇÃO DO TEMPO  
DE EXPOSIÇÃO EM PARÂMETROS SUPERFICIAIS E  
DIMENSIONAIS VISANDO APLICAÇÕES EM STEAM**

Ivan de Lima e Silva Penz  
Matrícula: 00243762

Professor Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior  
Professor Coorientador: Prof. Dr. Felix Bressan

Porto Alegre  
Maio de 2022

Dedico esse trabalho à Márcia, à Clara, à Natasha e ao  
Rubem

## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é o resultado de anos de altos e baixos. É também o fruto de um recomeço. Para tanto, sou grato a todas as pessoas que ajudaram na transformação em quem eu sou hoje.

Agradeço a minha amada família e ao seu apoio incondicional. Em especial à minha mãe Márcia Ivana, meu pai Rubem, minha irmã Clara, minha parceira Natasha, às minhas avós Ione e Isolde e aos meus sogros Nádia e Geraldo.

Agradeço aos meus amigos. Alguns conheci durante a faculdade e me ajudaram a passar por esses momentos de forma mais leve. Agradeço ao Martini, à Carol, ao Lorenzo, à Maju, ao Guido, à Gabi, assim como à Janine e ao Wagner. Aos meus amigos que conheci no colégio, e continuo nutrindo afeto. Ao Giodando, à Duélen, à Barbara, ao Marcus, como também ao Volker, ao Cepik, ao Mutti, ao Pastel, à Lara, ao Pedro e ao Strack. Aos amigos que conheci na PrintUp. Ao Henrique, ao Jongh, ao Leo, ao André ao Marcelo e ao Frodo.

Um agradecimento especial aos meus professores orientadores que caminharam comigo nessa reta final.

Ao meu orientador Wilson por me ensinar seu pensamento divergente, que pesquisa nós fazemos não só colocando a mão na massa, mas escrevendo também, terminar etapas com um ponto e vírgula;

Ao meu coorientador Felix pelo conhecimento, pelas máquinas de impressão 3D e por estar sempre solícito quando eu precisava fazer uma impressão, independente do horário.

Agradeço ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais por ser um espaço acolhedor às minhas ideias e demandas. Agradeço as amizades que eu fiz durante o longo tempo que eu fiz parte dele. Aos todos seus colaboradores, em especial ao prof. Fabio e ao João Rogério.

Agradeço aos professores e técnicos do curso de Engenharia de Materiais, que foram os catalizadores do meu desenvolvimento no curso de graduação.

Agradeço à UFRGS por me receber em sua casa de pesquisa e ensino de excelência.

Muito obrigado.

## RESUMO

Atualmente os processos de manufatura aditiva têm ocupado um espaço cada vez maior na concepção de novos produtos. Não obstante, também existem desafios vinculados aos novos materiais e processos de impressão 3D. Neste sentido, o presente trabalho de conclusão de curso – TCC – estuda os aspectos superficiais e dimensionais da manufatura aditiva MSLA, visando o entendimento das possibilidades e limitações do processo quanto à precisão dimensional. Para tanto, o estudo usa uma rotina e um objeto (corpo) de calibração bem como confecção de objetos de estudos escultóricos para a parametrização do tempo de exposição, importante variável da técnica. O estudo realizado permite inferir que é possível desenvolver texturas e superfícies de cunho escultórico, técnico e mesmo produtos lúdicos, desde que sejam observados os devidos parâmetros de processo. Como indicativo para iniciar possíveis objetos impressos que demandem detalhes superficiais tais como textura, reentrâncias, saliências, o escopo do presente trabalho indica a resina 70/30 com o tempo de exposição de 2 segundos, assim como uma rotina de calibração do tempo de exposição, boas práticas de processo e métodos de contornar erros comuns da técnica.

**Palavras-chave:** STEAM. Manufatura aditiva. Impressão 3D. Materiais & Design. Seleção de materiais. MSLA. LCD-SLA. Estereolitografia.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Pirâmide de produto, forma, material e processo, parte integral na seleção e ciência dos materiais e processos, relacionada com o escopo do trabalho. ....	16
<b>Figura 2.</b> Campos do conhecimento formando o STEAM. ....	19
<b>Figura 3.</b> Design como fio condutor dos conceitos de STEAM.....	19
<b>Figura 4.</b> Impressora MSLA <i>Mars 2 Pro</i> da empresa <i>Elegoo®</i> , máquina utilizada no escopo desse trabalho. ....	23
<b>Figura 5.</b> Princípio básico do funcionamento da técnica de Laser SLA.....	24
<b>Figura 6.</b> Princípio básico do funcionamento da técnica de DLP SLA.....	25
<b>Figura 7.</b> Princípio básico do funcionamento da técnica de MSLA.....	26
<b>Figura 8.</b> Temas abordados no trabalho.....	36
<b>Figura 9.</b> Parâmetros usados nas impressões. ....	38
<b>Figura 10.</b> Etapas de limpeza e cura .....	39
<b>Figura 11.</b> Primeiro modelo de estudo gerado. Notam-se furações sextavadas, diferentes geometrias de <i>overhang</i> e ressaltos cilíndricos.....	42
<b>Figura 12.</b> Segundo projeto do modelo de estudo. Padrões sinuosos, ressaltos em [a], rebaixos em [b], guia de tamanhos (mm) em [c] e escala (régua) em [d].....	43
<b>Figura 13.</b> Terceira geometria de estudo: [A]- Ressalto, [B] - Rebaixo, [C] - Guia de tamanhos, [D] - Régua e [E] - Estrutura Voronoi. ....	44
<b>Figura 14.</b> Espaçamentos da região sinuosa da peça de estudo. ....	45
<b>Figura 15.</b> Mapa com as localizações de cada região ampliada na figura 16. ....	47
<b>Figura 16.</b> Ampliações. [1] - Números miúdos, [2] - Curvas concêntricas, [3] - Região de intersecção entre ressaltos e rebaixos, [4] - Rampas e [5] - Estrutura Voronoi. ....	47
<b>Figura 17.</b> Quarta geometria de estudo: [A] – Ressalto, [B] – Rebaixo, [C] – Guia de tamanhos, [D] – Régua, [E] – Estrutura Voronoi, [F] – Cilindro e furo para medição dimensional, [G] – Pequenos ressaltos e rebaixos cilíndricos, [H] – Encontro da região sinuosa, [I] – Convergência em ângulo e [J] – Exposição da camada. ....	48
<b>Figura 18.</b> Regiões em foco: [F] – Cilindro e furo para medição dimensional, [G] – Pequenos ressaltos e rebaixos cilíndricos, [H] – Encontro da região sinuosa, [I] – Convergência em ângulo e [J] – Exposição da camada.....	50
<b>Figura 19.</b> Modelos 3D dos objetos de estudo escultórico usados no trabalho.....	51
<b>Figura 20.</b> Locais analisados com paquímetro na região [F] do modelo. ....	53

<b>Figura 21.</b> Comparação das malhas digitalizadas. ....	56
<b>Figura 22.</b> Impressões com 1 segundo (verde) e com 3 segundos (cinza) para mostrar diferenças de acabamento. ....	56
<b>Figura 23.</b> Comportamento das regiões [G], [H] e [I] em diferentes tempos para a resina <i>Spin green</i> . ....	58
<b>Figura 24.</b> Impressão com 1,63 s, o tempo considerado “calibrado” para a resina verde. ....	58
<b>Figura 25.</b> Comportamento das regiões [G], [H] e [I] em diferentes tempos para a resina <i>70/30 skin</i> . ....	60
<b>Figura 26.</b> Impressão com 2 s, o tempo considerado “calibrado” para a resina alaranjada.....	60
<b>Figura 27.</b> Comportamento das regiões [G], [H] e [I] em diferentes tempos para a resina <i>RPG grey</i> . ....	62
<b>Figura 28.</b> Impressão com 1,25 s, o tempo considerado “calibrado” para a resina cinza. ....	62
<b>Figura 29.</b> Gráfico com valores medidos na espessura da região [F]. ....	64
<b>Figura 30.</b> Gráfico com valores medidos de diâmetro do cilindro da região [F]. ....	64
<b>Figura 31.</b> Gráfico com valores medidos de diâmetro do furo cilíndrico da região [F]. ....	66
<b>Figura 32.</b> Defeitos de fabricação. ....	67
<b>Figura 33.</b> Regiões de interesse dos objetos de estudo escultórico. ....	70
<b>Figura 34.</b> Objeto 1 fabricado em diferentes tamanhos. ....	71
<b>Figura 36.</b> Título: Corset Voronoi da série “O corpo ausente”. Resina fotopolimérica 2015 – 2022. 43 x 27 x 11 cm. ....	73
<b>Figura 37.</b> Título: Pássaro “crinolina colheres” da série “O corpo ausente”. Resina fotopolimérica 2006 – 2022. 27 x 43 x 14 cm. ....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LDSM – Laboratório de Design e Seleção de Materiais

3D – Tridimensional

SMET / STEM - Ciências, Matemática, Engenharia e Tecnologia, do inglês *Science, Mathematics, Engineering e Technology*)

STEAM – Ciências, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática, (*Science, Technology, Engineering, Arts e Mathematics*),

FFF – Fabricação por Filamento Fundido (do inglês *Fused Filament Fabrication*) outro nome dado para a técnica FDM Modelagem por Deposição Fundida (do inglês *Fused Deposition Modeling*)

SLS – Sinterização Seletiva a Laser (do inglês *Selective Laser Sintering*)

SLA – Aparato de Estereolitografia (do inglês *Stereolithography Apparatus*)

Laser-SLA – Estereolitografia a Laser

DLP-SLA – Estereolitografia por Processamento Digital de Luz (do inglês *Digital Light Processing*)

MSLA / LCD-SLA – Estereolitografia Mascarada por Tela de Cristal Líquido (do inglês *Liquid Crystal Display e Masked SLA*)

STL – Linguagem Padrão de Triângulos (do inglês *Standard Triangle Language*) ou Linguagem Padrão de Tesselação (do inglês *Standard Tessellation Language*).

CAD – Desenho Assistido por Computador (do inglês *Computer-Aided Design*)

FEP – Etileno-Propileno Fluorado (do inglês *fluorinated ethylene propylene*)

RGB – Vermelho, verde e azul (do inglês *Red, green, blue*)

TSMC – Controle de Movimento em Dois Estágios (do inglês *Two-Stage Motion Control*)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivos Específicos .....	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
3.1	STEAM .....	18
3.2	Princípios da Manufatura Aditiva .....	20
3.3	Estereolitografia (SLA).....	21
<b>3.3.1</b>	<b>Tipos de equipamentos.....</b>	<b>21</b>
3.3.1.1	Laser-SLA .....	23
3.3.1.2	DLP-SLA .....	24
3.3.1.3	MSLA.....	25
<b>3.3.2</b>	<b>Resinas fotopoliméricas .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Principais parâmetros de impressão .....</b>	<b>28</b>
3.3.3.1	Tempo de exposição da camada .....	29
3.3.3.2	Altura de camada .....	30
3.3.3.3	Posicionamento da peça na plataforma .....	30
3.3.3.4	Suporte.....	31
3.3.3.5	Parâmetros das primeiras camadas .....	32
3.3.3.6	Velocidade e altura de subida da plataforma .....	33
<b>3.3.4</b>	<b>Limpeza da peça .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Pós-cura .....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
4.1	Impressoras, parâmetros e rotina de impressão .....	36
4.2	Equipamentos e rotinas de lavagem e cura.....	38
4.3	Resinas fotopoliméricas usadas .....	40
4.4	Geometria de estudo .....	40

4.4.1	<b>Modelagem 3D</b> .....	40
4.4.2	<b>Primeira versão do corpo de calibração</b> .....	41
4.4.3	<b>Segunda versão do corpo de calibração</b> .....	42
4.4.4	<b>Terceira versão do corpo de calibração</b> .....	43
4.4.5	<b>Quarta versão do corpo de calibração (versão final)</b> .....	48
4.4.6	<b>Modelos 3D do objeto de estudo escultórico</b> .....	50
4.5	<b>Método de variação de tempo de exposição</b> .....	52
4.6	<b>Métodos de análise</b> .....	52
4.6.1	<b>Inspeção visual</b> .....	52
4.6.2	<b>Análise dimensional (medições)</b> .....	53
4.6.3	<b>Digitalização a laser por holografia conoscópica</b> .....	54
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	55
5.1	<b>Resina <i>Spin green</i> (verde)</b> .....	57
5.2	<b>Resina <i>70/30 Skin</i> (alaranjada)</b> .....	59
5.3	<b>Resina <i>RPG Grey</i> (cinza)</b> .....	61
5.4	<b>Análise Dimensional (Medições)</b> .....	63
5.5	<b>Outros erros de impressão e possíveis métodos de contorná-los</b> .....	67
5.5.1	<b>Descolamento dos suportes</b> .....	67
5.5.2	<b>Empenamento</b> .....	68
5.5.3	<b>Regiões onduladas</b> .....	68
5.5.4	<b>Regiões esbranquiçadas</b> .....	68
5.5.5	<b>Defeitos superficiais nas camadas de topo</b> .....	68
5.5.6	<b>Variação de cor entre modelos</b> .....	68
5.5.7	<b>Descolamento da plataforma</b> .....	69
5.6	<b>Impressões dos objetos escultóricos</b> .....	69
6	<b>CONCLUSÕES</b> .....	75
6.1	<b>Sobre o tempo de exposição e limites da técnica</b> .....	75

6.2	Sobre as resinas.....	75
6.3	Sobre o processo de impressão e calibração.....	76
6.4	Sobre STEAM como abordagem metodológica.....	77
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o manual de Oslo (Manual de Oslo, 2004), uma inovação tecnológica é a implantação de um produto ou processo novos, com características de desempenho aprimoradas de modo a fornecer objetivamente ao consumidor serviços novos ou aperfeiçoados. A manufatura aditiva, ou impressão 3D, é um processo inovador que vem gradualmente ganhando espaço na indústria. Dentro desse processo, um dos métodos mais recentes, a estereolitografia mascarada por LCD (MSLA), está popularizando o uso da técnica devido ao excelente balanço entre complexidade morfológica alcançada em relação aos seus custos operacionais. Setores como odontologia, joalheria, áreas biomédicas e industriais estão se beneficiando do uso de tal tecnologia.

Uma inovação tecnológica de produto é a implantação/comercialização de um produto com características de desempenho aprimoradas de modo a fornecer objetivamente ao consumidor serviços novos ou aprimorados. Uma inovação de processo tecnológico é a implantação/adoção de métodos de produção ou comercialização novos ou significativamente aprimorados

O presente trabalho aborda o uso da técnica sob uma óptica de transdisciplinaridade entre conceitos técnicos e artísticos, visando ampliar e extrapolar as possibilidades de uso da tecnologia. Para isso, se utiliza de fundamentos obtidos durante o curso de graduação em Engenharia de materiais, como seleção de materiais, processos de fabricação e design. Coloca-se em prática o entendimento dos fragmentos que consistem na produção de um produto ou conhecimento, na integração e interdependência entre produto, material, processo e forma, como está esquematizado na figura 1. Esse amálgama de conhecimentos é um conceito recente e inovador conhecido como STEAM, que concebe ao trabalho uma espécie de “combo de inovação”, expondo temas emergentes em método e aplicação.

**Figura 1.** Pirâmide de produto, forma, material e processo, parte integral na seleção e ciência dos materiais e processos, relacionada com o escopo do trabalho.



Fonte: Adaptado de WALTER (2018)

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como principal objetivo explorar os limites qualitativos e quantitativos dimensionais e de detalhamento de peças fabricadas pelo método de impressão 3D MSLA, tendo em vista aplicações escultóricas, técnicas e lúdicas, uma vez que as peças de interesse têm componentes e texturas com reentrâncias e saliências que permitem explorar a criatividade bem como criar peças de alta precisão.

### 2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Expor uma metodologia de ajuste de tempo de exposição por meio de um corpo de calibração.
- b) Analisar geometrias delicadas impressas por meio da técnica de impressão 3D MSLA, bem como limites da técnica.
- c) Verificar parâmetros de impressão que são determinantes para a impressão dessas peças e avaliar o impacto de mudanças desses parâmetros nos resultados da precisão dimensional.
- d) Discutir erros de impressão da técnica MSLA e métodos de contorná-los.
- e) Oferecer parâmetros iniciais de processo bem como um entendimento inicial de tais parâmetros para iniciativas que usam da técnica MSLA.
- f) Explorar a prática de transdisciplinaridade no desenvolvimento do estudo, abrangendo os conceitos de STEAM.

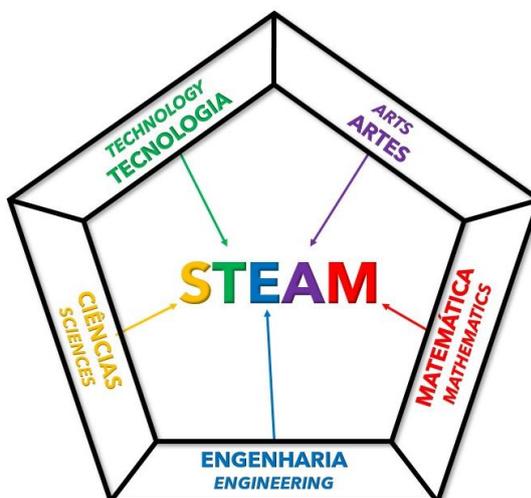
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 STEAM

Transdisciplinaridade é o conceito mais moderno, para nomear as antigas práticas de interdisciplinaridade e multidisciplinaridade. Quando se fala em multidisciplinaridade ou pluridisciplinaridade na educação, refere-se ao conceito tradicional de abordagem em que diversas áreas do conhecimento são envolvidas, porém de forma fechada e independente. Já o conceito de interdisciplinaridade fornece uma experiência mais rica, uma vez que há uma troca de conhecimentos e um dinamismo entre as áreas do conhecimento. A transdisciplinaridade é a mistura completa das disciplinas a um ponto em que não exista mais segmentação. O foco desta filosofia é a relação complexa entre cada um dos conceitos diferentes, por isso prega uma equidade na importância de todos os saberes (NICOLESCU, 2000).

A transdisciplinaridade vem tomando espaço na área dos ensinos básico e médio (LEWIS, 2016; HARRIS, 2017), e, mais recentemente, começou-se a analisar a aplicação de tais metodologias no ensino superior (KINDLEIN JUNIOR, BRESSAN, PALOMBINI, 2021). Uma dessas metodologias que agrega diversas áreas do saber e visa abrandar as fronteiras entre elas é o SMET (acrônimo advindo das palavras Ciências, Matemática, Engenharia e Tecnologia, do inglês *Science, Mathematics, Engeneering e Technology*) que teve origem no *National Science Foundation* (NSF) na década de 1990. Seu acrônimo foi reordenado para STEM na década seguinte por Judith Ramaley, uma bióloga estadunidense, e tal mudança teve respaldo da comunidade científica. Mais tarde houve a adição do termo “Arte” do inglês “*Arts*”, originando o atual STEAM (*Science, Technology, Engeneering, Arts e Mathematics*), como mostra o esquema na figura 2.

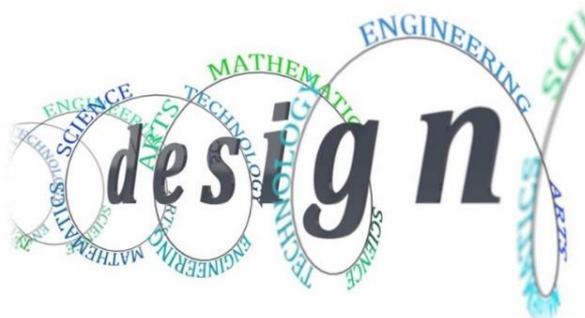
**Figura 2.** Campos do conhecimento formando o STEAM.



Fonte: Adaptado de KINDLEIN JUNIOR, BRESSAN, PALOMBINI (2021)

A prática de STEAM vem sendo muito difundida e defendida por educadores por proporcionar uma experiência pedagógica muito ampla que engloba conhecimentos técnicos com uma visão criativa que a arte acomoda. A adição do termo “Artes” na metodologia representa a inovação criativa e, para alguns autores (LIAO, 2016), por englobar as áreas das humanidades como um todo. Não obstante, outros defendem que o design possa ser um possível elo entre as diferentes disciplinas, como representado na figura 3 (KINDLEIN JUNIOR, BRESSAN, PALOMBINI, 2021).

**Figura 3.** Design como fio condutor dos conceitos de STEAM.



Fonte: KINDLEIN JUNIOR, BRESSAN, PALOMBINI (2021)

### 3.2 Princípios da Manufatura Aditiva

A impressão 3D vem se popularizando cada vez mais com o decorrer do tempo. Ela é considerada por alguns autores a quarta revolução industrial (SCHWAB, 2016). Diferente de métodos tradicionais como usinagem, modelagem, conformação, corte, moldagem, fundição, junção e fresagem, o método de impressão 3D se baseia na tecnologia de manufatura aditiva (do inglês *additive manufacturing*), que consiste em construir um objeto camada por camada, adicionando material gradualmente para que se tenha o objeto finalizado (VOLPATO, 2017). O nome “manufatura aditiva” vem de um contraponto para os métodos tradicionais de “manufatura subtrativa” como usinagem e corte, já a nomenclatura “impressão 3D” é a denominação mais comercialmente difundida (DE ASSIS, 2018).

A técnica foi originada entre o final da década de 1970 e início da década de 1980 em um movimento emergente da necessidade de empresas de acelerar a prototipagem de produtos, a prototipagem rápida (do inglês *rapid prototyping*). Hoje em dia ela deixou de ser uma técnica exclusivamente empresarial e industrial e se tornou mais acessível para o público, principalmente ao grupo adepto da cultura *maker* (conceito baseado na autonomia do indivíduo em fabricar, reparar e modificar as mais diversas “coisas” com as próprias mãos), que notaram sua utilidade e se apropriaram da técnica.

Para realizar uma impressão 3D, primeiro é preciso “criar” a peça de interesse em um software de desenho assistido por computador (CAD) e passar tal peça para um software de fatiamento (*slicer*). O *slicer* “corta” ou “fatia” a peça em diversas camadas e cria um “mapa” de coordenadas ou imagens, então a máquina fabrica a peça projetada seguindo as coordenadas.

Os principais métodos de fabricação aditiva são a fabricação por filamento fundido (do inglês *Fused Filament Fabrication*) outro nome dado para a técnica FDM modelagem por deposição fundida (do inglês *Fused Deposition Modeling*), método que funde um filamento polimérico e o deposita apenas nas regiões de interesse;

estereolitografia (SLA), que utiliza luz para polimerizar uma resina líquida; e sinterização seletiva a laser (SLS) que usa laser para fundir o pó do material. Por se tratar de métodos de manufatura aditiva, todos eles se valem da premissa de formar volume criando camada sobre camada.

### 3.3 Estereolitografia (SLA)

Apesar de ter sido a primeira técnica criada de impressão 3D, a tecnologia de impressão por fotopolimerização, também chamada de estereolitografia, ainda não é tão difundida ao público quanto a técnica de FFF, pelo menos até o presente momento. Foi patenteada por Charles W. Hull em 1984 (HULL, 1984). Dessa tecnologia, Hull criou a empresa 3DSystems®, a primeira empresa de impressão 3D do mundo, uma das gigantes no setor até hoje. Acredita-se que tal empresa foi a responsável por tirar do laboratório o conceito de manufatura aditiva criado na década anterior e inseri-lo na indústria e posteriormente no mercado como um todo (DE ASSIS, 2018).

#### 3.3.1 Tipos de equipamentos

Os três principais e mais difundidos tipos de equipamentos do que chamamos de estereolitografia são o Laser-SLA, DLP-SLA e o MSLA. Tais artefatos têm como elementos fundamentais uma cuba para o armazenamento da matéria prima polimérica – também chamada pelo seu termo em inglês “*vat*”, a qual é responsável por outra nomenclatura pela qual essa tecnologia é conhecida, *vat polymerization* –, uma plataforma que permite movimentação no eixo Z (para cima e para baixo) e uma fonte de luz UV de comprimento de onda entre 395 e 405nm (nanômetros), o último varia de acordo com o tipo do equipamento.

A cuba é feita de metal ou plástico, mas seu elemento principal é o filme polimérico liso e transparente em seu fundo. Tal filme pode ter uma ou mais camadas e é normalmente feito do polímero etileno-propileno fluorado (FEP, do inglês *fluorinated ethylene propylene*), devido ao seu alto grau de transparência, para

permitir que o UV passe desimpedido, de seu baixo coeficiente de atrito e reatividade, para que haja uma menor adesão entre a resina e o filme, e de sua maleabilidade, para facilitar o processo de descolamento (*peeling*) da peça impressa.

A plataforma (também chamada de mesa) normalmente é feita de um material metálico e, diferente do filme FEP, é interessante uma máxima adesão da resina curada em sua superfície, por isso a plataforma comumente é áspera e rugosa. Um motor rotaciona um fuso que gera o movimento vertical da plataforma. Esse movimento é o responsável pela definição do eixo Z da peça impressa e o passo de elevação da plataforma é um parâmetro importante nessa técnica, denominado altura de camada (ou *layer height* em inglês).

Além desses elementos fundamentais, os equipamentos normalmente contam com mais alguns componentes, sendo alguns deles descritos a seguir: toda a eletrônica embarcada para o funcionamento adequado das funções; um método de interface com o usuário, seja por tela ou diretamente pelo computador; uma cobertura com filtro UV, normalmente na cor laranja ou vermelha, como pode-se visualizar na figura 4; um pequeno ventilador interno com um filtro de carbono ativado para diminuir as emissões de gases possivelmente nocivos.

Existem também processos periféricos que se fazem úteis, se não indispensáveis, para se ter uma impressão adequada. Dentre eles, é possível destacar um fluido de limpeza (usualmente isopropanol) para a remoção de qualquer resina não curada que haja na superfície da impressão. Também é possível destacar uma fonte de UV para a finalização do processo de cura da peça, sendo um equipamento dedicado à cura ou mesmo à luz solar.

**Figura 4.** Impressora MSLA *Mars 2 Pro* da empresa *Elegoo*®, máquina utilizada no escopo desse trabalho.



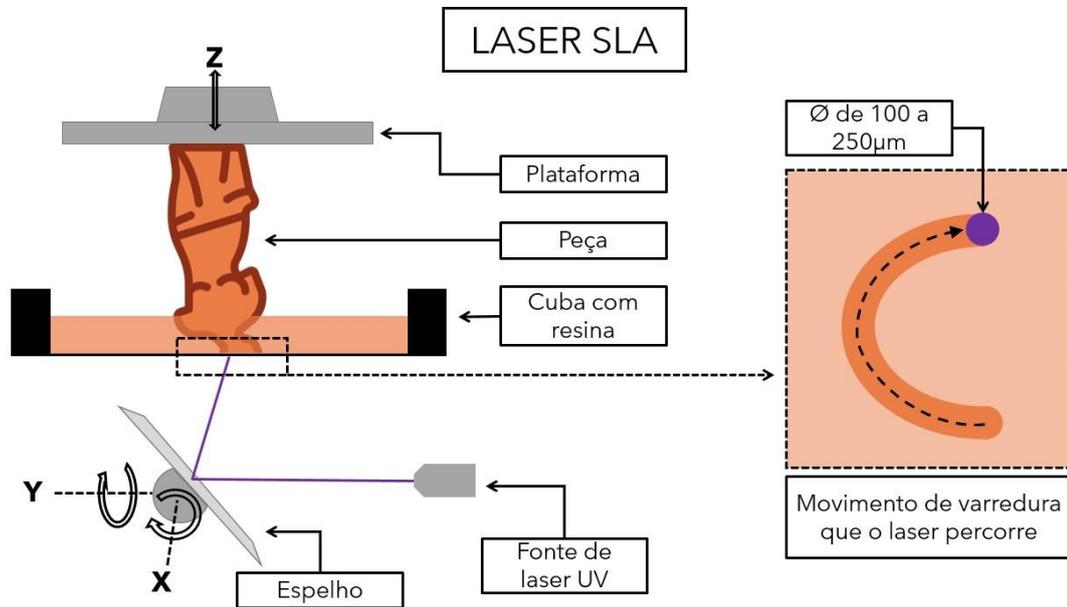
Fonte: Elegoo® (2022)

#### 3.3.1.1 Laser-SLA

A laser-SLA, como o nome diz, usa a varredura de um laser para seletivamente solidificar os pontos que formam a peça. O laser é direcionado aos pontos da camada por um espelho que é a estrutura motorizada responsável pelo movimento da varredura do feixe. Essa varredura confere um caráter fluido à camada, ideal para estruturas mais orgânicas. Na figura 5, é possível visualizar uma imagem esquemática do funcionamento básico da técnica.

A qualidade das impressões, deste modo, se relaciona com o diâmetro do feixe de laser, uma vez que quanto menor seu tamanho, mais finas e detalhadas e possível de se fazerem as estruturas da peça. Em contrapartida, um feixe com diâmetro ( $\emptyset$ ) muito pequeno eleva o tempo de fabricação da peça, uma vez que é necessário um deslocamento linear maior para percorrer a superfície completa da camada. A faixa de diâmetro de feixe mais comumente utilizada é de 100 a 250 $\mu$ m (micrômetros).

**Figura 5.** Princípio básico do funcionamento da técnica de Laser SLA.



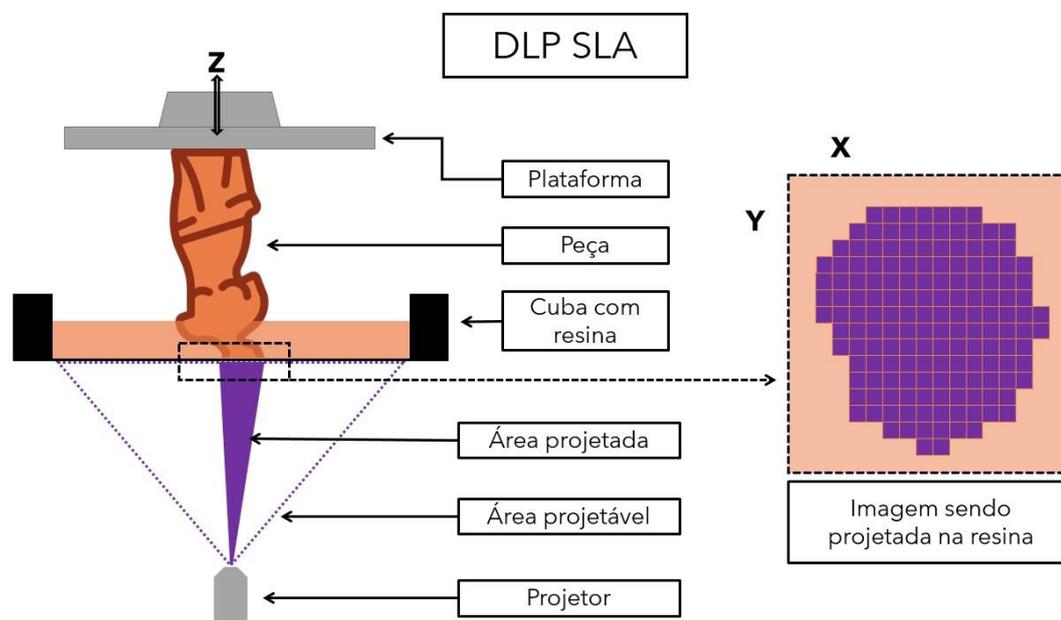
Fonte: Autor (2022).

### 3.3.1.2 DLP-SLA

Esse método de cura faz uso de um projetor que utiliza processamento digital de luz (DLP-SLA), que usa um dispositivo que conta com espelhos microscópicos para criar uma imagem da camada a ser formada. Na figura 6, nota-se uma imagem esquemática do funcionamento básico da técnica.

Tal técnica, assim como a mais adiante citada MSLA, utiliza *pixels* como formadores dos eixos X e Y, característica que pode gerar um traço quadriculado à camada, ausente na técnica de laser SLA.

**Figura 6.** Princípio básico do funcionamento da técnica de DLP SLA.



Fonte: Autor (2022).

### 3.3.1.3 MSLA

Não muito distante, existe a exposição seletiva mascarada por LCD (MSLA ou LCD-SLA), que se baseia em mascarar a luz com uma tela LCD (ecrã). O LCD se baseia em múltiplos *pixels* que, quando acionados, deixam a luz UV passar formando os eixos X e Y do equipamento. Na figura 7, pode-se observar um esquema do comportamento básico da técnica em questão.

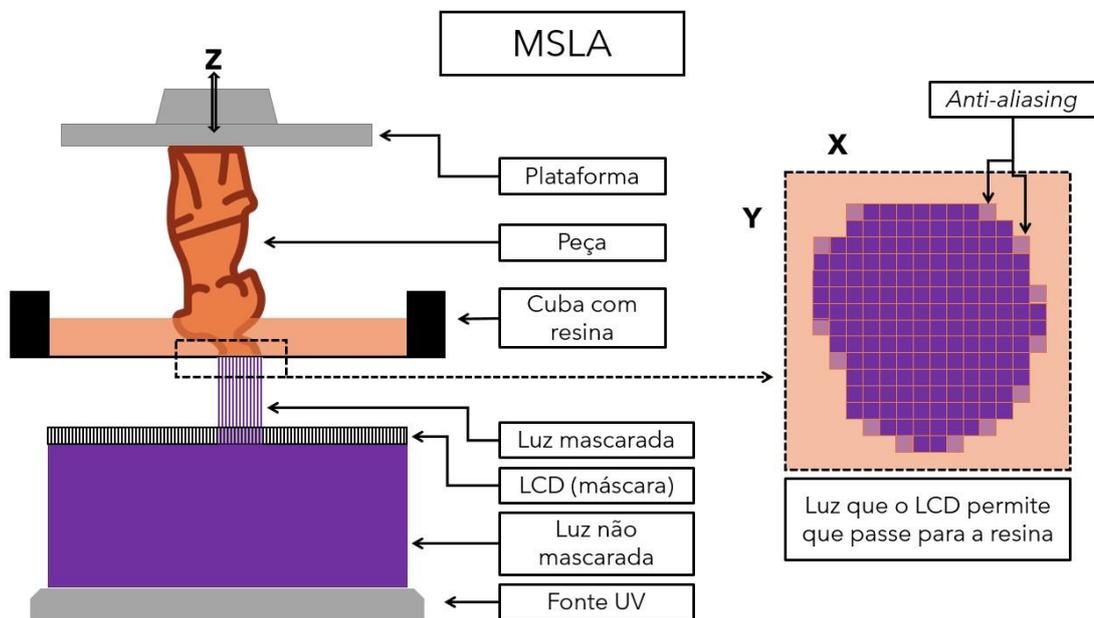
A técnica de MSLA – assim como a técnica de DLP-SLA – tem como principal diferença da técnica de Laser SLA o fato de que cada ponto da camada é feito de forma simultânea; o equipamento projeta a imagem do recorte da sessão transversal da peça, que nada mais é do que a camada a ser criada.

Existe, portanto, certas vantagens dessa técnica em relação à primeira. A redução do tamanho dos *pixels*, assim como o conseqüente aumento da resolução e qualidade da peça, não afeta o tempo em que cada camada é fabricada. Outro fator que tem mínimo impacto no tempo de fabricação da camada é sua área transversal.

O equipamento tem capacidade de acender todos os *pixels* ao mesmo tempo; logo o tempo de fabricação depende quase exclusivamente da altura da peça, pouco importando a área de sua sessão transversal.

A tecnologia de impressão 3D por LCD, no entanto, foi introduzida como um próximo avanço em comparação à técnica DLP e apresenta as seguintes vantagens: o custo da tela LCD é mais baixo do que o do dispositivo de projeção; a tela mascara a luz de forma perpendicular que suprime a distorção causada pelo caráter oblíquo que o único ponto de fonte de luz proporciona; e, por último, o LCD permite o bloqueio o passagem da luz mas também a filtragem individual da intensidade de cada pixel; isso possibilita o processo de *anti-aliasing* que reduz a intensidade dos *pixels* na volta de cantos, o que reduz o efeito serrilhado e deixa a impressão mais orgânica (“Impressoras de Resina 3D: SLA, DLP e LED-LCD”).

**Figura 7.** Princípio básico do funcionamento da técnica de MSLA.



Fonte: Autor (2022).

### 3.3.2 Resinas fotopoliméricas

Segundo IUPAC (1997), resina é definida como um sólido macio ou uma substância de alta viscosidade que normalmente contenha pré-polímeros com grupos reativos. Os dois grupos de polímeros mais frequentemente usados como base para as resinas de impressão 3D são acrilatos em primeiro, seguidos por epóxis, assim como misturas entre os dois. As resinas são formadas, principalmente, por monômeros (célula unitária da polimerização), oligômeros (cadeias curtas de monômeros), agentes fotoiniciadores e outros aditivos como corantes, pigmentos.

Quando mencionado o termo “fotopolimerização”, geralmente refere-se ao processo de iniciar uma reação de polimerização pela ação da luz, normalmente UV. Um fotoiniciador (FI) absorve a radiação de determinada frequência e libera um espécime reativo (radicais livres ou cátions) que possibilita as novas ligações químicas. Os monômeros e oligômeros da resina, então, polimerizam e formam ligações cruzadas (*cross-links*). Ambas as vias de polimerização apresentam fotoiniciadores adequados na faixa de comprimento de onda UV.

Acrilatos e metacrilatos têm geralmente sua polimerização por radical livre. São monômeros com taxa de polimerização alta e costumam ser de mais descomplicada fabricação (LANTEAN et al, 2018). Tais monômeros, entretanto, sofrem de inibição por oxigênio, fragilidade, taxas altas de contração volumétrica e baixo controle sobre a distribuição do peso molecular do produto polimérico (NAVARUCKIENE, 2021).

Por outro lado, os monômeros de reação catiônica – epóxis – tem suas vantagens quase diametricamente opostas aos radicalares: não possuem inibição por oxigênio, têm boa resposta mecânica e térmica e baixa contração volumétrica. Suas desvantagens se mostram aparentes, quando diz respeito à velocidade de reação lenta das espécies ativas, além de ter uma “imprimabilidade” (tradução livre do termo em inglês “*printability*”, definido pela capacidade de um material ser fabricado por manufatura aditiva), inferior aos acrilatos (GODOI et al, 2016).

Uma resina para impressão 3D costuma ter outros agentes misturados para desempenhar outras funções de interesse. Não é incomum resinas terem em sua composição o que são chamados de agentes opacificantes, que têm como finalidade barrar a luz de “vazar” para partes indesejadas da peça e, como consequência, aumentar a qualidade das impressões. É comum, também, se colocar corantes ou até pigmentos nas resinas para modificar sua aparência.

Costuma-se usar óxidos metálicos e cargas à base de carbono para melhorar as propriedades mecânicas e térmicas do polímero a um custo baixo, podendo eles serem micro ou nanoestruturados. Os produtos à base de carbono mais usados são grafite, nanotubos e grafeno. Alguns dos cerâmicos mais utilizados são sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de ferro III ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), óxido de titânio ( $\text{TiO}$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ) (TAORMINA, 2018).

### **3.3.3 Principais parâmetros de impressão**

Como a maioria dos processos de fabricação, a impressão 3D por MSLA depende de vários fatores para se obter bons resultados. Vale ressaltar algumas boas práticas do processo de impressão com resinas fotopolimerizáveis:

- Antes de colocar a resina na cuba, agitá-la em seu recipiente para que ela se encontre da forma mais homogênea possível. É comum, com o tempo, alguns dos elementos decantarem por serem mais densos que os demais.
- O operador deverá usar luvas, roupas adequadas e máscara no manuseio da resina. As resinas em questão costumam ser irritantes aos olhos e mucosas, além de liberarem um odor forte. Lavar as mãos com frequência também é recomendado.
- Calibrar a plataforma de forma periódica ou sempre que uma impressão sair do padrão. Isso previne erros dimensionais nas impressões, descolamento de peças da plataforma, possíveis danos na fonte de UV, no vidro de interface, ou no filme FEP.

- Manter a plataforma limpa, com a rugosidade adequada e sem nenhum ressalto advindo de impressões não removidas ou mesmo de danos feitos pela espátula no momento da retirada das peças. Previne possíveis danos na fonte de UV, no vidro de interface, ou no filme FEP, além de eventuais erros nas impressões.
- Ao retirar a resina da cuba, filtrar o remanescente de volta para a garrafa para assegurar que nenhum corpo ou partícula sólida entre para o recipiente e, eventualmente, para uma futura impressão.

A seguir, uma breve explicação de alguns dos principais parâmetros da fabricação com a técnica. Muitos dos parâmetros podem ser descritos e observados como um balanço entre o que se pode chamar de probabilidade de sucesso da peça impressa (às vezes visto como qualidade final do produto) e o tempo de fabricação dela (muitas vezes atrelado juntamente com a quantidade de matéria-prima usada).

#### 3.3.3.1 Tempo de exposição da camada

Visto como um dos fatores mais importantes da técnica, tempo de exposição (do inglês *exposure time*) consiste no tempo que cada camada fica exposta à luz UV. Tal parâmetro deve ser ajustado para o par máquina/resina, uma vez que fatores de composição química da resina e intensidade da fonte de luz agem diretamente nessa variável.

Tempos de exposição curtos demais levam larguras e comprimentos de estruturas da peça a ficarem menores do que o esperado, é possível também que estruturas mais finas fiquem estruturalmente comprometidas, não aderirem ao modelo ou mesmo de não terem tempo de serem criadas em primeiro lugar. Tal efeito é chamado de subexposição ou subcura (tradução livre dos termos em inglês *under exposure* e *undercure*).

Já tempos de exposição elevados demais avolumam a peça, fazendo estruturas ficarem maiores em seu comprimento e sua largura, gerando a chamada sobre-exposição ou sobrecura (tradução livre dos termos em inglês *over exposure* e

*overcure*). Efeitos adversos que o excesso de tempo pode gerar são buracos e desaparecimento de estruturas finas semelhantes.

### 3.3.3.2 Altura de camada

O parâmetro denominado “altura de camada” (do inglês *layer height*) se refere à distância entre a plataforma e a lâmina de resina dentro da cuba em meio a cada camada da polimerização. Esse parâmetro define a resolução do eixo Z da impressão, ao passo que, quanto menor for esse espaçamento, maior será a resolução vertical.

Valores costumeiros de altura de camada são 0,25 mm, 1 mm e 0,5 mm, porém valores maiores, menores ou intermediários são possíveis de serem configurados. Os valores de 1 mm ou maiores são comuns para peças com menos detalhamento e/ou que exijam uma fabricação mais ágil. Para peças que tenham estruturas especialmente finas, ou detalhes muito importantes, são usadas altura de 0,25 mm ou menos. O padrão a ser usado é a altura de meio milímetro, ou 0,5 mm, por fazer um bom balanço de tempo de fabricação e detalhamento da peça final fabricada.

### 3.3.3.3 Posicionamento da peça na plataforma

Diferente da técnica de impressão 3D por filamento, SLA tende a gerar resultados muito próximos da isotropia, termo usado quando um material tem as propriedades mecânicas iguais em todas as direções (COSMI, 2020). Dito isso, a orientação na plataforma não é definida de acordo com as propriedades mecânicas, mas sim visando a reduzir a altura total do modelo a ser impresso, a melhorar o detalhamento e “imprimabilidade” da peça, adicionalmente a deixar mais eficaz a alocação de suportes.

Como já mencionado, a altura da peça determina em quantas camadas o objeto será fabricado. Uma vez que, em MSLA, cada camada demora a mesma quantidade de tempo para ser feita, um posicionamento com uma altura menor irá agilizar a fabricação da peça. Tal fato só é válido tendo em vista a fabricação de uma

peça individual, dado que é possível distribuir múltiplas peças na área de impressão sem aumentar o tempo de cada camada.

Geralmente mais importante do que o tempo de fabricação é a “imprimabilidade” e o detalhamento do objeto impresso. Exemplos de posicionamento estratégico para uma melhor “imprimabilidade” são:

- Posicionar a peça de forma que as áreas mais importantes não precisem receber suporte.
- Posicionar a peça alguns milímetros acima da plataforma de modo a evitar que as primeiras camadas façam parte do objeto, além de evitar o contato direto com a plataforma.
- Posicionar a peça de modo que a impressão como um todo requeira o mínimo de suporte possível.
- Posicionar para que geometrias específicas se alinhem com os *pixels* da tela para usar de sua característica matricial.

#### 3.3.3.4 Suporte

Essa variável conta com diversos outros parâmetros incorporados dentro do que é chamado de ‘suporte’. A razão da existência dos suportes é o sustento de partes do modelo que não estão conectadas à plataforma por outra estrutura da peça ou partes que teriam dificuldade de ser puxadas (retiradas da cuba, descoladas do filme FEP) sem ter sua integridade afetada.

Uma estrutura criada entre dois apoios é chamada de *bridge* (inglês para ponte) e uma estrutura criada apenas engastada de um lado é chamada de *overhang* (inglês para pender ou pairar). Essas duas distâncias são importantes, uma vez que é necessário saber qual é o comprimento que uma *bridge* pode ter até gerar defeito, o que influencia o espaçamento dos suportes, mas também verificar se suportes são de fato necessários em dada estrutura, sabendo até qual espaçamento de *overhang* a impressão atinge sem problemas estruturais.

A estrutura padrão de suporte consiste em uma base mais larga para garantir a adesão com a plataforma, em um tronco grosso o suficiente para sustentar os esforços e em uma ponta mais fina para contato com a peça com o mínimo de vestígios; múltiplos desses suportes, então, são distribuídos em regiões de interesse do modelo (PIEDRA-CASCÓN, 2021). Cada um desses três elementos se desdobra em mais possíveis variações de diâmetros, comprimentos, tipos de estruturas, tipos de arranjo, entre outras. Alguns dos mais frequentes parâmetros de suporte:

- Base – altura da base, diâmetro do topo, diâmetro do fundo, geometria da base, existência de uma estrutura que unifica as bases de todos os suportes (*raft*).
- Tronco ou meio – diâmetro do tronco, forma, ramificações e ligações com outros troncos e seu ângulo, troncos em treliças, tronco simples, taxa de decréscimo do diâmetro pela altura.
- Ponta ou topo – Diâmetro da ponta de contato, profundidade de contato, presença de esfera na ponta, ângulo da ponta, comprimento da ponta.
- Dispersão dos suportes – Espaçamento entre suportes, suporte nas superfícies e/ou nas bordas do modelo, dispersão orientada ou aleatória, ângulo crítico para colocação de suportes, *bridge* e *overhang* críticos para colocação de suportes.

#### 3.3.3.5 Parâmetros das primeiras camadas

Os parâmetros de primeiras camadas, ou também chamadas de camadas da base, são os responsáveis pela adequada adesão da peça impressa na plataforma, usando-se de uma sobrecura nas camadas iniciais da peça. Tal parâmetro tem a finalidade de prover uma adesão que seja forte o suficiente para manter a impressão inteira na plataforma ao descolar a camada recém-formada do filme FEP.

Os dois parâmetros que regem esse fenômeno são o tempo de exposição das camadas da base (do inglês *bottom layers exposure time*) e o número de camadas da base (do inglês *bottom layer count*).

O primeiro parâmetro se refere ao tempo de exposição, medido em segundos, a que as camadas da base serão expostas com o UV; isso permite a cura completa da resina para a adesão na plataforma. É recomendado um mínimo de dez vezes o tempo de exposição padrão para tal parâmetro.

Já o número de camadas da base, como o próprio nome sugere, se refere à quantidade de camadas a serem expostas dessa maneira. Um número muito pequeno pode comprometer a adesão, já um número muito grande eleva o tempo de fabricação, e pode até gerar defeitos na peça. A fim de se evitar tais defeitos, é comum elevar a peça alguns milímetros para que as camadas da base não façam parte do objeto e sim dos suportes. É comum usar entre 3 e 8 camadas de base.

Um fator benéfico paralelo que o tempo de camada elevado das primeiras camadas proporciona é o aumento leve de temperatura da resina. Uma temperatura entre 30 e 40°C pode facilitar no processo de polimerização e diminuir a viscosidade da resina, aumentando sua fluidez (DALL'ARGINE, 2020).

#### 3.3.3.6 Velocidade e altura de subida da plataforma

Quando se refere à altura de subida da plataforma, é levada em conta a distância que a plataforma irá subir após cada camada terminar sua cura. Tal parâmetro deve ser elevado o suficiente para possibilitar que a resina líquida facilmente preencha os espaços vazios recém deixados pela camada impressa e para que ocorra o completo descolamento da peça do filme FEP (também chamado de seu termo em inglês *peeling*), uma vez que o filme pode manifestar indevida elasticidade e permanecer grudado na peça em alguns pontos. Valores entre 5 e 8 milímetros são os normalmente vistos em SLA.

Já a velocidade de subida da plataforma tenta, principalmente, garantir que o já mencionado *peeling* (descolamento da camada do filme FEP) ocorra de forma

suave para não “agredir” nem o filme FEP nem a peça fabricada. Valores usuais de velocidade de subida são 120 mm/min (2 milímetros por segundo) em parâmetros mais conservadores até 240 mm/min em momentos que o tempo de impressão mais ágil pesa mais na tomada de decisão.

Tais parâmetros têm direta relação com o tempo de tela desligada. Nota-se que quanto mais alta for a distância de subida ou mais lenta estiver a velocidade da plataforma, maior será esse tempo ocioso de cura e maior o tempo entre cada camada formada. O tempo de tela desligada, quando bem regulado, atua como um impedimento para o aumento exacerbado da temperatura, mantendo-a na temperatura adequada. Além disso, esse parâmetro também expande a vida útil da fonte UV, permitindo um “descanso” para o dispositivo.

#### **3.3.4 Limpeza da peça**

Uma vez finalizada e retirada do aparato de fabricação, a peça permanece com resina não curada em sua superfície, conseqüentemente remover esse excesso se faz necessário para o adequado ciclo de fabricação. Uma completa limpeza da peça é fundamental para que o processo seguinte, a saber a pós-cura, não cure resina que não faça parte do modelo impresso. Um tempo exacerbado na lavadora, entretanto, pode ocasionar queda na resistência mecânica do material impresso (NOWACKI, 2021).

Para a limpeza, usualmente é imerso o modelo em um líquido em que a resina seja solúvel, sendo álcool isopropílico (IPA) o produto mais amplamente recomendado e utilizado. Além da imersão, se faz necessária a agitação do fluido para a completa remoção da resina de todas as partes do modelo, reentrâncias tendem a acumular resina, por exemplo. Tal agitação pode se dar na forma de uma cuba com ultrassom, uma cuba com agitação rotativa, ou apenas agitação manual do operador.

### 3.3.5 Pós-cura

Uma vez com o modelo limpo e seco, é indicado que se faça a pós-cura. Essa etapa do processo consiste em incidir a peça com UV com intuito de finalizar a polimerização do material. Tal processo também tem como consequência deixar a peça com um aspecto tátil mais agradável, considerando que a superfície com resina mal curada tem toque “pegajoso”.

A pós-cura pode ser aplicada por meio de duas fontes distintas, podendo ser ela fonte natural, ou seja, a luz do sol, ou também de fonte artificial, ou seja, UV proveniente de LEDs ou lâmpadas. A fonte artificial é a mais recomendada para aplicações mais rigorosas em termos dimensionais ou mecânicos, devido ao seu caráter controlado e reprodutível (KIM, 2020).

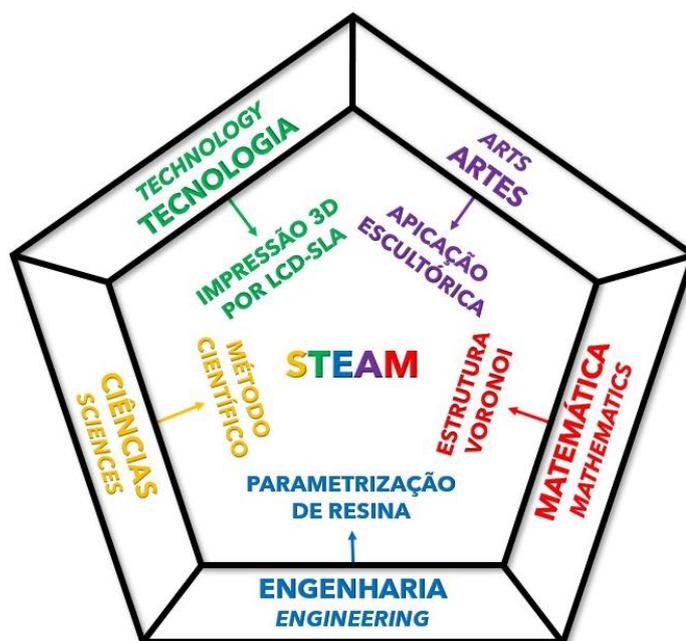
O tempo de exposição varia dependendo da intensidade da fonte. Para luz natural, são comumente utilizados tempos de quinze minutos para dias muito ensolarados a até uma hora para momentos de incidência mais indireta. Já quando se fala em fontes UV artificiais, os tempos dependem muito da intensidade da fonte em questão. Equipamentos dedicados à pós-cura UV costumam vir com um certo guia de tempo de exposição. São observados tempos tão baixos quanto 2 minutos e raramente são vistos períodos maiores que 20 minutos, porque tempos muito elevados de pós-cura ocasionam fragilização e empenamento da peça.

Vem ganhando espaço ultimamente a técnica de fazer a pós-cura da peça submersa em água. Tal método tem como benefício diminuir, em média, o tempo de pós-cura necessário pela metade, devido ao menor índice de oxigênio na água quando comparada ao ar. Resinas de polimerização radicalar como as acrílicas se beneficiam bastante dessa propriedade, uma vez que sua reação é inibida por oxigênio, como já mencionado. Outro benefício da cura em água é a cura mais homogênea da peça, em razão do índice de refração da água ser mais elevado do que o do ar, ou seja, a luz incidida consegue atingir um ângulo maior de projeção de luz e, conseqüentemente, uma maior superfície da peça. (NOWACKI, 2021).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são explicados materiais, equipamentos, técnicas e abordagens utilizados no escopo desse trabalho de conclusão. O processo de desenvolvimento teve como fio condutor o STEAM como uma tentativa de agregar para o ensino superior uma técnica, como previamente comentado, já difundida no ensino básico em alguns países. A figura 8 exemplifica alguns conceitos aplicados de cada área do conhecimento referente a STEAM que foram utilizados na presente monografia.

**Figura 8.** Temas abordados no trabalho.



Fonte: Adaptado de KINDLEIN JUNIOR, BRESSAN, PALOMBINI (2021)

### 4.1 Impressoras, parâmetros e rotina de impressão

Os corpos de prova foram impressos diretamente colados na plataforma por dois principais motivos. O primeiro e principal motivo foi a agilidade na impressão das peças coladas na plataforma, afinal a peça é um corpo de calibração e sua principal função é transmitir o máximo de informação útil para uma parametrização de tempo

de exposição em um curto período, tendo em vista que em uma rotina de calibração são produzidos múltiplos corpos em sequência. O segundo ponto foi manter a peça paralela com a plataforma para que as estruturas fossem construídas retas e as superfícies de cima ficassem lisas, tendo isso em mente; foram impressos testes da peça paralela com suporte, mas eles com frequência descolavam (parcialmente ou completamente) da estrutura de suporte, inviabilizando a impressão. Dito isso, foi possível diminuir quase pela metade o tempo de impressão das peças, fazendo-as sem ângulo ou suportes.

Para o presente trabalho, foi utilizado o equipamento modelo *Mars 2 Pro* da marca *Elegoo* (figura 3). A máquina conta com um LCD 2K monocromático de 6,08 polegadas e uma área de impressão de 130x82x160 mm. Comparados aos LCDs RGB (LCDs que trabalham com as três cores do espectro) o LCD monocromático deixa passar uma maior quantidade de luminosidade com uma maior precisão e durabilidade (ZUCHOWICZ 2022). O comprimento de onda do conjunto de LEDs é de 405nm (nanômetros), o que o coloca no espectro ultravioleta visível. O equipamento conta com uma tela inicial navegável por meio de *touch* e tem três principais menus, um para a seleção e impressão das peças, um de ferramentas pertinentes ao processo de fabricação e outro de configurações de máquina e *firmware*.

O software de fatiamento utilizado foi o *Chitubox*® v1.9.0 da *CTB-Technology*. Os parâmetros utilizados para o estudo foram os mostrados na figura 9. Com exceção do tempo de exposição, que foi variado nas análises, os outros parâmetros não sofreram variação, com a finalidade de haver condições de contorno fixas e adequadas para a análise das amostras. Visto que não foi usado o recurso de TSMC (do inglês *two-stage motion control*), as caixas da coluna da extrema direita observadas na figura 9 foram definidas em zero.

**Figura 9.** Parâmetros usados nas impressões.

Altura camada:	<input type="text" value="0,050"/>	mm	Dist elevação inferior:	<input type="text" value="6,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Camadas de base:	<input type="text" value="6"/>		Distância elevação:	<input type="text" value="6,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Tempo exposição:	<input type="text" value="2,000"/>	s	Distância de ...ção inferior:	<input type="text" value="6,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Tempo exposição base:	<input type="text" value="40,000"/>	s	Distância de retração:	<input type="text" value="6,000"/>	+	<input type="text" value="0,000"/>	mm
Modo de esper... a impressão:	<input type="text" value="Retar..."/>		Vel. elevação inferior:	<input type="text" value="180,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
Retardo desligar UV:	<input type="text" value="0,500"/>	s	Vel. elevação:	<input type="text" value="180,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
Retardo desl. UV da base:	<input type="text" value="0,500"/>	s	Velocidade d...ão inferior:	<input type="text" value="210,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min
			Vel. retração:	<input type="text" value="240,000"/>	&	<input type="text" value="0,000"/>	mm/min

Fonte: captura de tela do software *Chitubox*® feita pelo autor.

## 4.2 Equipamentos e rotinas de lavagem e cura

A lavagem e cura das peças foi mantida padrão para minimizar a interferência da variação desse fator importante. Foi utilizada a estação de cura e limpeza *Mercury Plus* da marca *Elegoo*. O equipamento conta com leds UV para a cura das peças, um tanque para preencher com fluido de limpeza desejado e um rotador magnético para a agitação do fluido e homogeneização da cura. A rotina de limpeza aplicada é descrita a seguir:

1. Após a finalização da impressão, foi deixado escorrendo o excesso de resina da plataforma, deixando-a inclinada por cerca de 5 minutos, tempo suficiente para que a resina pare de gotejar (foto 1 da figura 10).
2. As peças ainda na plataforma foram colocadas em tanque de álcool isopropílico. É ligada a rotação do tanque por 3min (foto 2 da figura 10). Depois disso é borrifado na peça isopropanol puro para retirar qualquer sujidade restante.
3. Depois de terminada a limpeza, as peças foram retiradas do tanque, retiradas da plataforma de forma cuidadosa com uma espátula e deixadas ao ar para secar por cerca de 5 minutos ou mais (foto 3 da figura 10).

4. Secas, as peças foram colocadas em um pequeno suporte improvisado para que a maior área possível da peça seja irradiada com a luz do equipamento e deixadas na cura por 3 minutos (foto 4 da figura 10).

A mesma lógica de priorizar agilidade de operação também foi levada para a lavagem e cura dos corpos de calibração. A exemplo disso pode-se citar que peças tendem a apresentar menos defeitos de empenamento sendo curadas ainda na plataforma.

**Figura 10.** Etapas de limpeza e cura



Fonte: Autor (2022).

### 4.3 Resinas fotopoliméricas usadas

Foram usadas resinas diferentes para esse trabalho, todas da fabricante brasileira *Quanton3D*<sup>1</sup>. Tais resinas foram selecionadas, pois são amplamente usadas pelo público *maker* e são seguidas de uma breve descrição de cada. Para todas as resinas a seguir, o tempo de exposição recomendado pelo fabricante é de 2 segundos.

As resinas utilizadas foram:

- *Spin green* (verde) – mais barata.
- *70/30 skin* (alaranjada) – preço intermediário.
- *RPG grey* (cinza) – mais cara.

Espectros de infravermelho das amostras foram obtidos por Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR, do inglês Fourier-transform infrared spectroscopy) em um espectrômetro Perkin-Elmer Spectrum 100 (números de onda 4000 – 650  $\text{cm}^{-1}$ ) usando a técnica de reflexão total atenuada (ATR) à temperatura ambiente (21 C° a 23 C°). As curvas FTIR das resinas (tanto curadas quanto líquidas) se encontram disponíveis no apêndice A e informações sobre composição das resinas bem como o preço por litro podem ser visualizadas no anexo A.

### 4.4 Geometria de estudo

A seguir a descrição do processo de desenvolvimento dos modelos usados como amostra para as análises realizadas no presente estudo, assim como as técnicas utilizadas para a obtenção de tais modelos.

#### 4.4.1 Modelagem 3D

Para materializar a ideia, é preciso ter um modelo tridimensional da peça em questão. Há dois métodos principais de se obter tais modelos. O primeiro é procurar

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.quanton3d.com.br/>

modelos pagos ou gratuitos em acervos *online*. O segundo método, que foi o empregado nesse estudo, é projetá-lo e desenhá-lo em algum software CAD 3D (desenho auxiliado por computador).

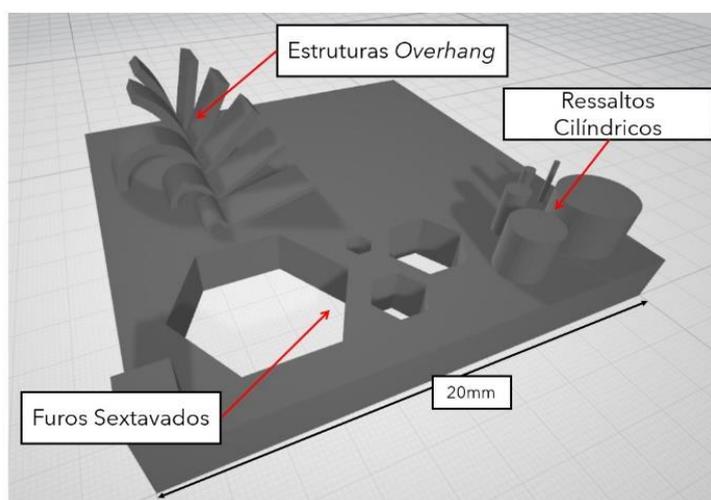
Para o presente estudo, foi utilizado o software *Autodesk Fusion360*® para fazer a modelagem das amostras. Tal software foi acessado por meio de uma licença estudantil pelo autor do trabalho.

Os objetos de estudo escultórico foram projetados e cedidos para esse trabalho pelo escultor e professor Dr. Felix Bressan. Tais texturas e geometrias foram feitas no software *Rhinoceros Rhino7*® em conjunto com o *Grasshopper*®.

#### **4.4.2 Primeira versão do corpo de calibração**

Foram analisados alguns modelos de parametrização disponibilizados por *makers* e fabricantes na internet, e notou-se que um padrão comum são ressaltos e rebaixos cada vez mais finos para observar o detalhamento na impressão. Também foram observados alguns padrões de furação e protuberâncias de diferentes geometrias e tamanhos, diferentes ângulos e comprimentos de *overhang* etc. O primeiro modelo foi projetado especificamente para esse trabalho, levando em consideração as observações feitas acima. A figura 11 mostra o corpo de calibração resultante de tais observações que foi projetado para que se possa simular diferentes situações hipotéticas de uso prático.

**Figura 11.** Primeiro modelo de estudo gerado. Notam-se furações sextavadas, diferentes geometrias de *overhang* e ressaltos cilíndricos.

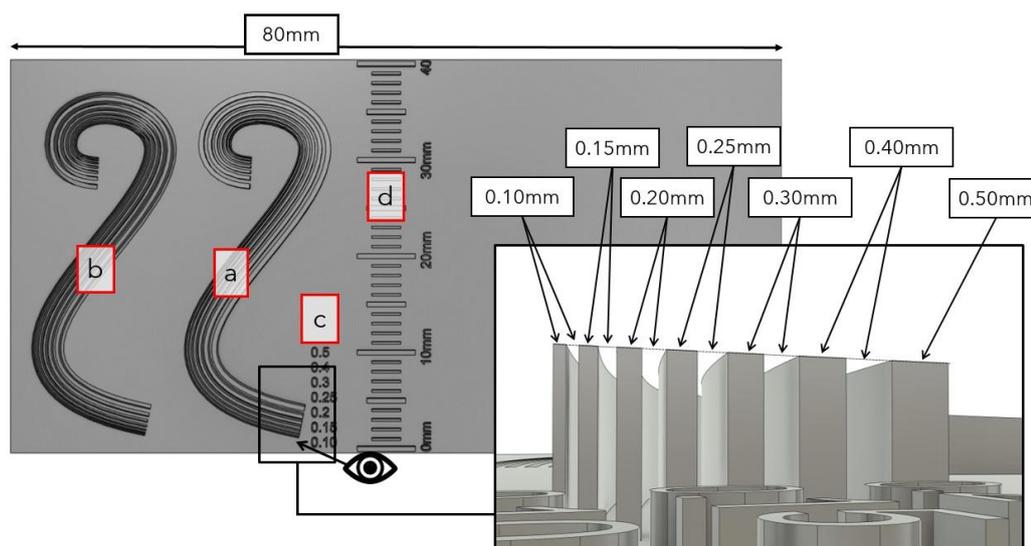


Fonte: Autor (2022)

#### 4.4.3 Segunda versão do corpo de calibração

Para se focar em observar demandas (geometrias) de uso limítrofe de impressão 3D com resinas, foi decidido seguir um caminho de execução e análise de estruturas finas, deixando fora do escopo geometrias que visam analisar *overhangs*. Foram estudadas na literatura formas geométricas comuns nesse tipo de estudo em SLA. Foram analisados, também, padrões estudados por outras técnicas, como gravação a laser (CIDADE, 2017). Uma vez entendida essa conjuntura, foi modelado um padrão sinuoso com várias estruturas cada vez mais finas em sequência. Além de as estruturas estarem se estreitando, o espaçamento entre elas diminuía na mesma taxa. Como mostra a figura 12, a primeira delas tem 0,5 mm e a segunda 0,4 mm, a distância entre elas foi de 0,4 mm; a distância entre a segunda e a terceira foi de mesmo calibre da terceira, de 0,3 mm. Esse padrão se repete para todas as seguintes, de 0,25 mm, 0,2 mm, 0,15 mm e 0,10 mm. Já que se quer avaliar parâmetros de ressalto e rebaixo, foi pensado um conjunto acima da superfície e outro abaixo, como mostra a figura 12 [a] e [b]. Ao lado, uma escala (régua) descrita como [d] e um guia dos tamanhos das estruturas descrita como [c].

**Figura 12.** Segundo projeto do modelo de estudo. Padrões sinuosos, ressaltos em [a], rebaixos em [b], guia de tamanhos (mm) em [c] e escala (régua) em [d].



Fonte: Autor (2022)

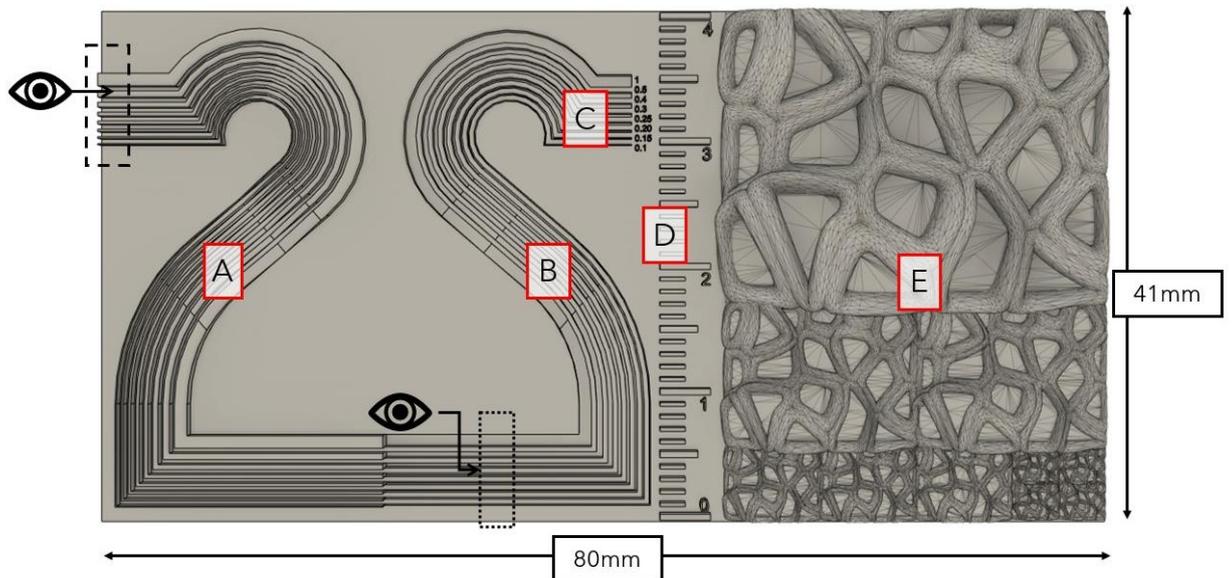
#### 4.4.4 Terceira versão do corpo de calibração

Depois de impressas algumas peças com esse padrão, foi notado que existiram margens para algumas melhorias no corpo de calibração. Decidiu-se manter um distanciamento uniforme entre estruturas de 0,4 mm; isso permite uma melhor visualização do comportamento individual de cada tamanho, como se pode notar na figura 14.

Foi modificada a região sinuosa para contemplar múltiplas possíveis geometrias. Na parte de baixo foi criado um caminho linear até um canto vivo, colocou-se uma região com rampas em diferentes angulações e foram modificadas as curvas para serem circulares. Foi também espelhada a região de rebaixo para criar uma interface entre as duas regiões e foram invertidas suas posições a fim de criar uma interface do ressalto com a borda da peça.

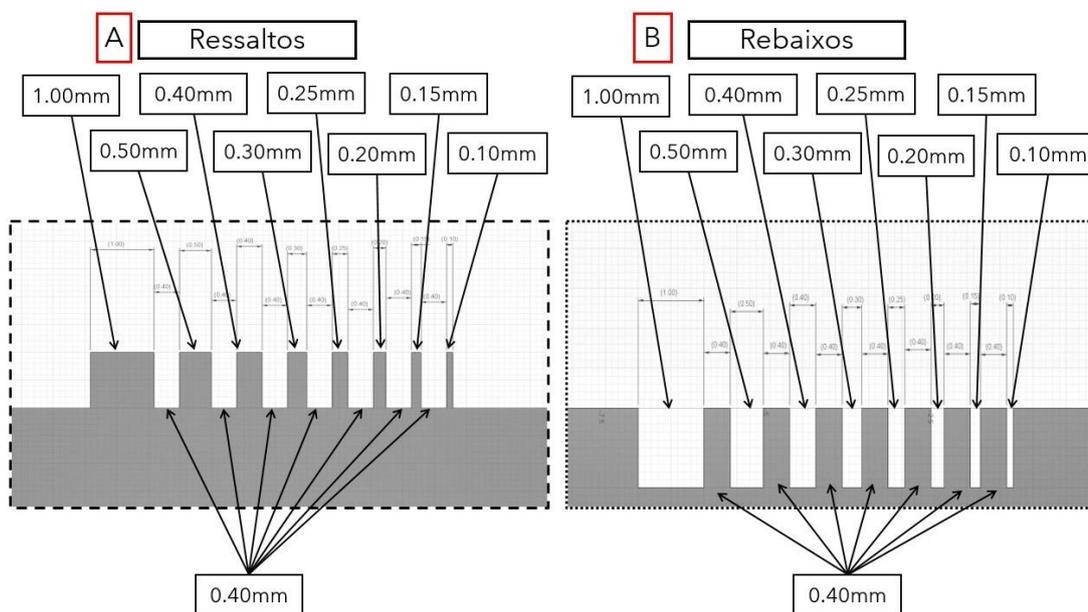
Na parte lateral direita, foi adicionada uma estrutura com uma textura do tipo Voronoi tridimensional com três subseqüentes reduções de tamanho para simular um exemplo de superfície texturizada. As escalas da textura da peça ficaram então: 100% em cima, 50% logo abaixo, 25% na região inferior esquerda e 12,5% no canto inferior direito. Tal estrutura é semelhante à morfologia dos objetos de estudo escultórico (apresentados mais adiante como exemplos de caso), que foram modelados e cedidos para esse estudo pelo escultor Prof. Dr. Felix Bressan. Imagens da terceira versão podem ser visualizadas nas figuras 13 a 16.

**Figura 13.** Terceira geometria de estudo: [A]- Ressalto, [B] - Rebaixo, [C] - Guia de tamanhos, [D] - Régua e [E] - Estrutura Voronoi.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 14.** Espaçamentos da região sinuosa da peça de estudo.



Fonte: Autor (2022)

As estruturas a receberem atenção no estudo, seguindo a figura 13 e as ampliações nas figuras 15 e 16:

[A] - Região sinuosa com elevação positiva (ressaltos).

- As estruturas vão se tornando cada vez mais finas para a observação do quão bem se criam estruturas de tamanhos regressivos: 1 mm, 0,5 mm, 0,4 mm, 0,3 mm 0,25 mm, 0,2 mm, 0,15 mm e 0,1 mm, totalizando 8 estruturas. Estrutura vista com detalhe na figura 14 [A].
- Rampas com diferentes ângulos, como pode ser visto no quadro [4] da figura 16, para observar o serrilhado característico das camadas.
- Curvas concêntricas circulares, como podem ser notadas no quadro [2] da figura 16, para observar possíveis diferenças de comportamento entre regiões curvas e retas.
- Área de encontro dos ressaltos com o fim da peça, com a finalidade de ter uma vista lateral do resultado.

[B] - Região sinuosa com elevação negativa (rebaixos).

- Estruturas similares à região de ressalto (com exceção ao encontro com o fim do modelo) são encontradas na região de rebaixos com objetivo de se observar o contraponto com a região de ressalto. Estrutura vista com detalhe na figura 14 [B].
- Área de encontro entre o ressalto e o rebaixo, como pode ser observado com detalhe na figura 16 [3].

[C] - Região com os guias dos tamanhos das regiões sinuosas escrita em ressalto.

- Letras miúdas com fim de se observar a legibilidade, quadro ampliado pode ser observado na figura 16 [1]. Tamanho do traço da letra de 0,061 mm e altura de 0,5 mm.

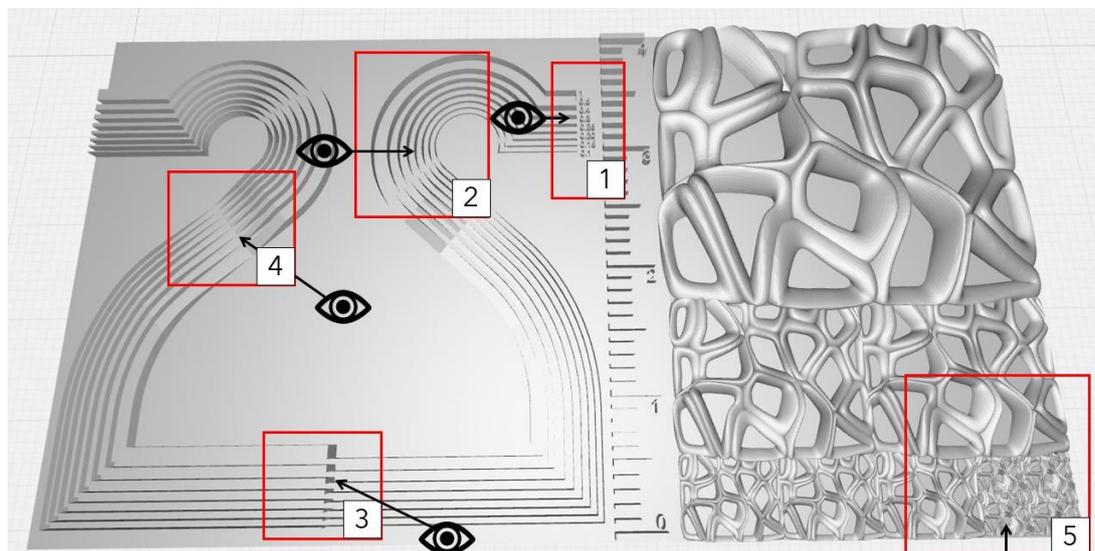
[D] - Região com uma escala de tamanho em ressalto.

- Escala em formato de régua. Tem finalidade de contextualizar a escala da peça em eventuais fotos.
- Cada traço tem um espaçamento de 1 mm de centro a centro, totalizando 40 mm (4cm) da escala.
- Largura do traço da letra de 0,123 mm e altura de 1 mm. Linhas da régua com comprimento variando entre 4 mm (dezenas), 3 mm e 2 mm (unidades) e espessuras de 0,5 mm para os maiores e 0,3 mm para os menores.

[E] - Região com estruturas do tipo Voronoi em escala decrescente.

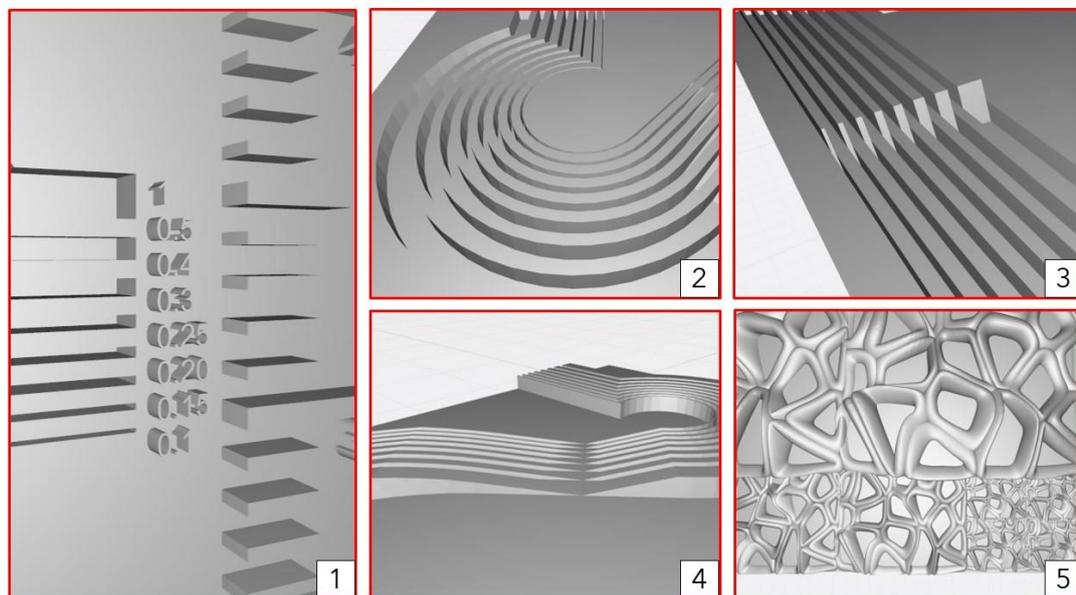
- Estruturas Voronoi tridimensionais similares às encontradas no objeto de estudo escultórico. Tem a finalidade de traçar um paralelo direto com o exemplo de aplicação do trabalho.

**Figura 15.** Mapa com as localizações de cada região ampliada na figura 16.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 16.** Ampliações. [1] - Números miúdos, [2] - Curvas concêntricas, [3] - Região de intersecção entre ressalto e rebaixo, [4] - Rampas e [5] - Estrutura Voronoi.

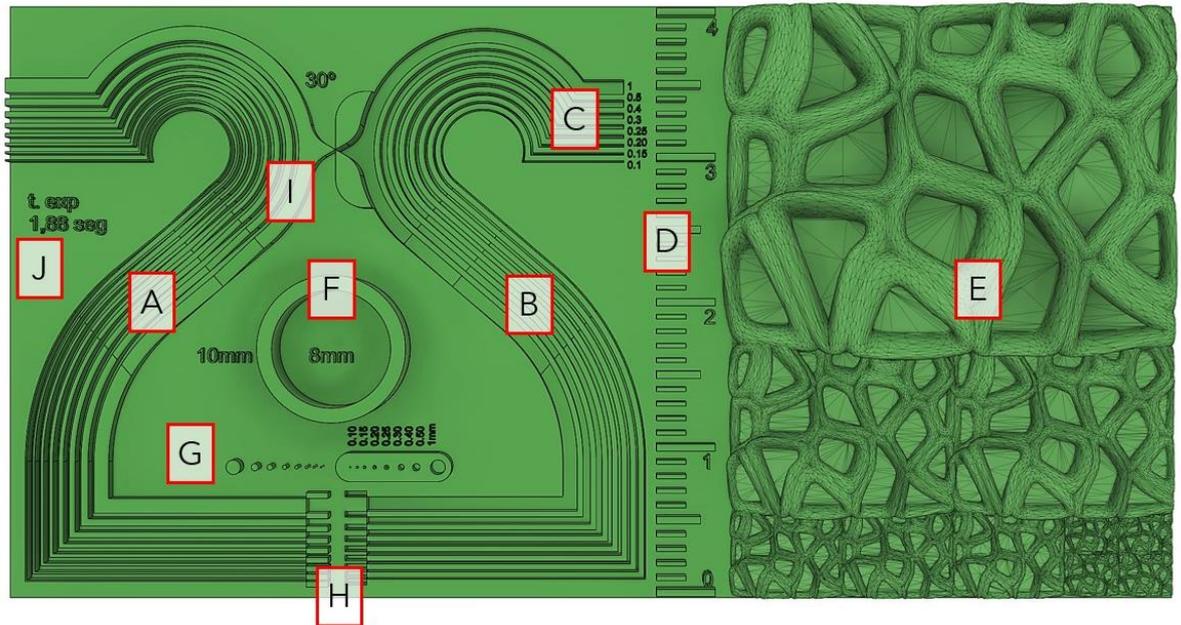


Fonte: Autor (2022)

#### 4.4.5 Quarta versão do corpo de calibração (versão final)

A demanda por testes diferentes impulsionou a alteração do projeto do corpo de calibração. As regiões [A] a [E] se mantiveram praticamente inalteradas do terceiro projeto. Foram adicionadas mais regiões que possibilitam uma melhor observação, a análise de novos comportamentos ou o mais fácil entendimento da amostra. As novas regiões e estruturas podem ser vistas na figura 17.

**Figura 17.** Quarta geometria de estudo: [A] – Ressalto, [B] – Rebaixo, [C] – Guia de tamanhos, [D] – Régua, [E] – Estrutura Voronoi, [F] – Cilindro e furo para medição dimensional, [G] – Pequenos ressaltos e rebaixos cilíndricos, [H] – Encontro da região sinuosa, [I] – Convergência em ângulo e [J] – Exposição da camada.



Fonte: Autor (2022)

Em suma, o modelo foi projetado para possibilitar a observação e o estudo do comportamento do material em diferentes estruturas de interesse frente à variação do tempo de exposição. Além das estruturas de [A] a [E] abordadas no item “4.4.4

Terceira versão do corpo de calibração”, descrevem-se a seguir as novas estruturas a receberem atenção no estudo, seguindo a figura 17 e as ampliações na figura 18:

[F] - Cilindro com furo no meio.

- Cilindro de 10 mm de diâmetro com um furo de 8 mm de diâmetro, resultando em uma espessura de 1 mm. Altura da estrutura é de 3 mm.
- A principal função dessa região é a medição dimensional das estruturas impressas com um paquímetro.

[G] - Pequenos cilindros positivos e negativos

- Todos têm 1 mm de altura e seguem a mesma progressão de diminuição ao ressalto e rebaixo. (1 mm, 0,5 mm, 0,4 mm, 0,3 mm, 0,25 mm, 0,2 mm, 0,15 mm e 0,1 mm), totalizando 8 estruturas. O guia da região [C] foi colocado para ajudar na visualização.
- Observação de maneira fácil da criação dos cilindros e furos nas diferentes peças impressas. Avaliação feita primariamente de forma binária: cria ou não.

[H] - Região de encontro entre ressaltos e rebaixos.

- Foi modificada essa estrutura do projeto anterior para a melhor observação do comportamento individual de cada uma das estruturas.

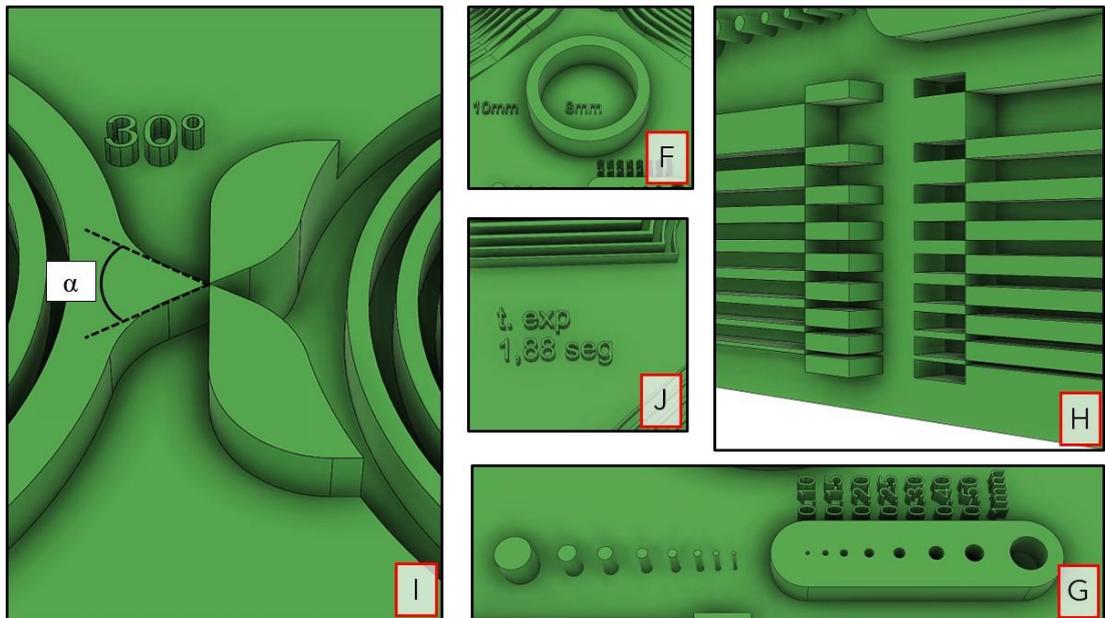
[I] - Região de convergência em ângulo.

- Região com um encontro de ressalto e rebaixo em ângulo de  $\alpha$  de  $60^\circ$ , sendo que o ângulo  $\alpha = 30^\circ * 2$ . Quanto mais finas saírem as pontas, mais adequado tende a ser o tempo de exposição usado.

[J] - Tempo de exposição de camada.

- Texto em ressaltado com o valor de tempo de exposição usado na impressão de cada uma das amostras, a fim de facilitar ao reconhecimento das diferentes amostras.
- Tamanho do traço da letra de 0,123 mm e altura de 0,5 mm.

**Figura 18.** Regiões em foco: [F] – Cilindro e furo para medição dimensional, [G] – Pequenos ressaltos e rebaixos cilíndricos, [H] – Encontro da região sinuosa, [I] – Convergência em ângulo e [J] – Exposição da camada.



Fonte: Autor (2022)

#### 4.4.6 Modelos 3D do objeto de estudo escultórico

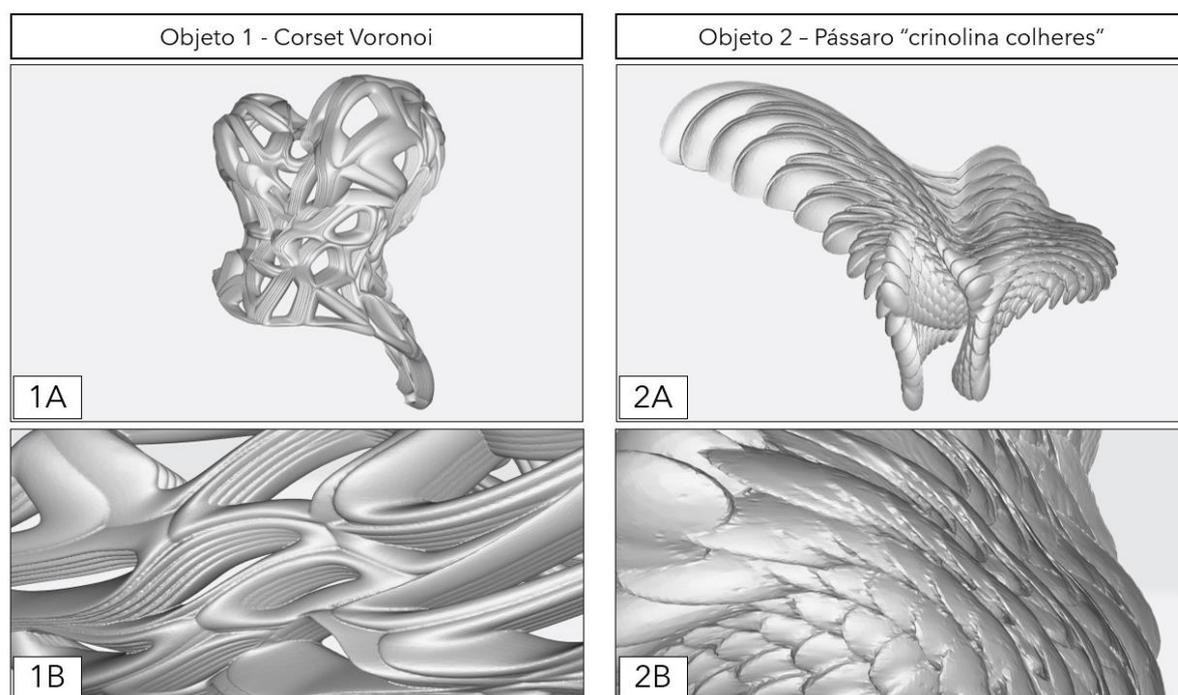
Foram utilizados como exemplo de aplicação os objetos de estudo escultórico apresentados na figura 19, disponibilizados pelo escultor e professor Felix Bressan para esse trabalho de conclusão.

Os objetos contêm geometrias que se utilizaram das observações e conhecimentos advindos da modelagem descrita anteriormente. Podem se citar como

paralelos entre as geometrias dos objetos de estudo e do corpo de calibração: as regiões [A] e [B] (ressaltos e rebaixos) do corpo de calibração foram inspiradas pelos objetos 1 e 2 no que diz respeito ao seu caráter sinuoso, uma vez que os objetos apresentam curvas orgânicas e ângulos ousados, e no que diz respeito à própria geometria de linhas em ressaltado e rebaixado, já que é possível notar morfologias semelhantes em ambos os objetos de estudo escultórico, como pode ser observado na figura 19 1B e 2B.

Serão impressos os objetos em diferentes tamanhos para se observar a reprodução das estruturas de interesse em diferentes escalas.

**Figura 19.** Modelos 3D dos objetos de estudo escultórico usados no trabalho.



Fonte: Autor (2022), modelos escultóricos fornecidos pelo escultor Felix Bressan.

#### 4.5 Método de variação de tempo de exposição

Foi aplicada uma metodologia iterativa de variação do tempo de exposição de cada camada que visa calibrar o parâmetro em poucas impressões e adicionalmente fornecer dados consistentes para uma análise científica.

O método aplicado consiste em imprimir com o tempo recomendado pelo fabricante (2 segundos para todas as resinas) e em imprimir amostras para servirem como exemplo de falta e excesso de cura: no presente estudo, foram usados 1 e 3 segundos. Então é avaliado e comparado por meio das geometrias de análise se a redução ou o aumento do tempo recomendado fará com que a amostra atinja de forma mais adequada os critérios estipulados. Diante disso, é impresso um novo corpo de calibração com um tempo intermediário (no caso da amostra se beneficiar de uma redução no tempo, é impresso com 1,5 segundos). Então essa iteração é repetida duas outras vezes (por exemplo 1,75 e depois 1,88 segundos), resultando em 6 amostras impressas. No caso desse trabalho, foi impressa uma amostra a mais na última iteração, resultando em 7 corpos impressos. Em caso de tempos distintos apresentarem resultados análogos, o critério de desempate utilizado foi a eficiência, ou seja, amostras com o menor valor de tempo foram preferidas.

#### 4.6 Métodos de análise

Para analisar quantitativa e qualitativamente as peças impressas, os métodos, sistemáticas e equipamentos descritos a seguir foram aplicados.

##### **4.6.1 Inspeção visual**

Foram realizadas múltiplas inspeções visuais de caráter qualitativo utilizando-se das múltiplas estruturas da peça como referência, como mencionado no tópico “geometria de estudo”.

Para tanto, se começou fazendo uma análise a olho nu das estruturas em questão. Em seguida foi utilizado um equipamento de visualização, captura e análise

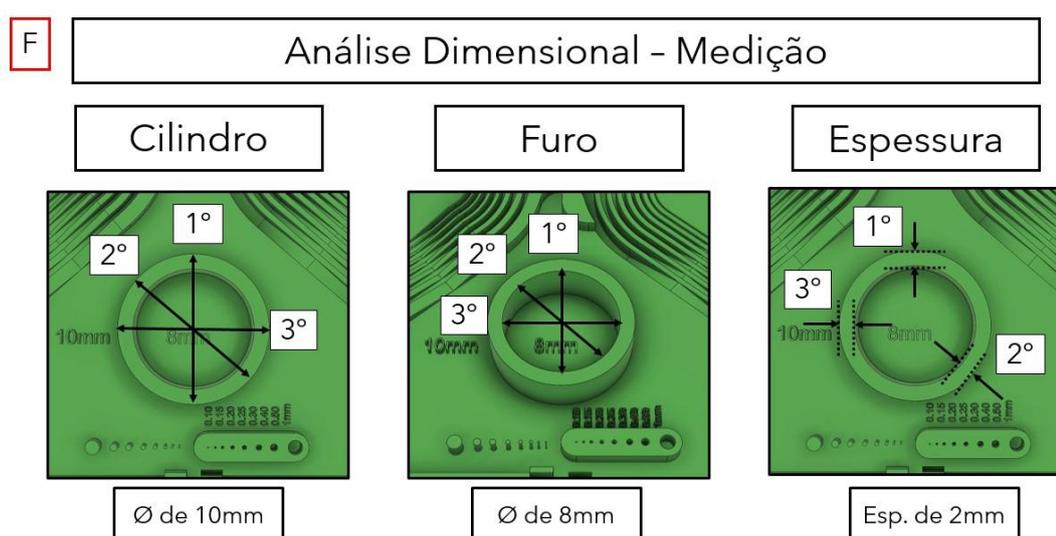
de imagens, a Lupa Estereoscópica *Olympus® SZX16* com uma câmera acoplada *Lumenera® Infinity-1*, disponível no LDSM.

#### 4.6.2 Análise dimensional (medições)

Para a verificação de certas medidas, foi utilizado um paquímetro digital com duas casas decimais de precisão. O intuito dessas análises é traçar um possível paralelo quantitativo com as análises qualitativas abordadas previamente. As medições dimensionais foram realizadas em certos pontos específicos do modelo, como mostra a figura 20. Os valores, então, foram distribuídos em um gráfico. O tipo de linha de tendência usado foi o que gerava o maior  $R^2$ , e, portanto, a linha que mais se adequava à distribuição em questão.

Medições do eixo Z (subida e descida da plataforma) não foram feitas, uma vez que o parâmetro abordado no presente estudo, tempo de exposição, não é um dos fatores determinantes para a precisão dimensional desse eixo, principalmente para peças feitas diretamente na base. Podem-se citar fatores como calibração da plataforma, suporte e altura de camada que costumam ter mais impacto nesse tópico.

**Figura 20.** Locais analisados com paquímetro na região [F] do modelo.



Fonte: Autor (2022).

### **4.6.3 Digitalização a laser por holografia conoscópica**

Outras análises foram feitas no LDSM utilizando um equipamento de digitalização a laser por holografia conoscópica da marca *Digimill3D®*. As digitalizações tiveram o foco de estudar o comportamento da estrutura Voronoi projetada na parte lateral direita das peças (figura 17 [E]). Tais análises têm o intuito de comparar a precisão dimensional das peças impressas com o modelo 3D. O software utilizado para as comparações de malha digitalizada com a malha do arquivo 3D original foi o *Geomagic Qualify 2013* da *Geomagic Inc®*.

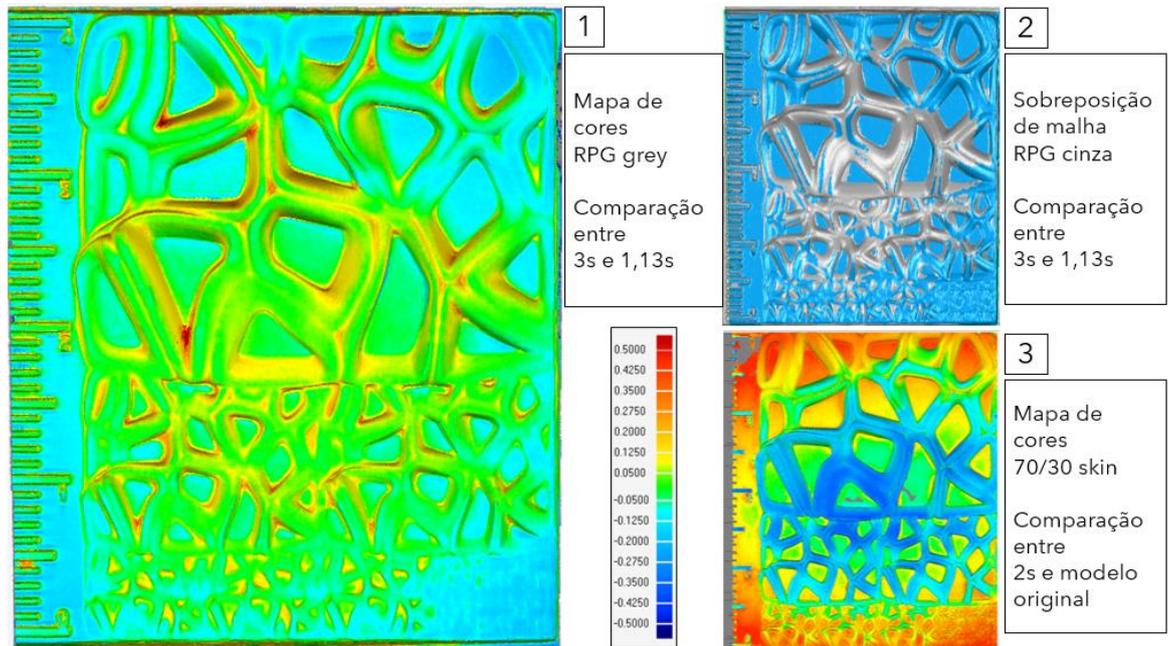
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resposta à variação do tempo de exposição ocorreu dentro das expectativas para as três resinas estudadas. Um tempo menor gerou estruturas menores do que o projetado, a criação de mais reentrâncias e a ausência de certas estruturas salientes. O oposto foi observado para tempos elevados, estruturas ficaram mais espessas de forma geral e furos se dilataram até fechar. Exemplos de tais efeitos podem ser notados na figura 22.

Tal fato foi verificado por meio da digitalização a laser. Tal medição permitiu verificar o alargamento das estruturas e a supressão de outras. É possível de ser visualizado que as regiões avermelhadas da peça 1,13 na figura 21 [1] chegaram a obter variação de 0,5 mm entre a peça feita com 3 s. Na figura 21 [2] é possível notar a matéria em excesso cinza contrastada com o azul da peça menos curada.

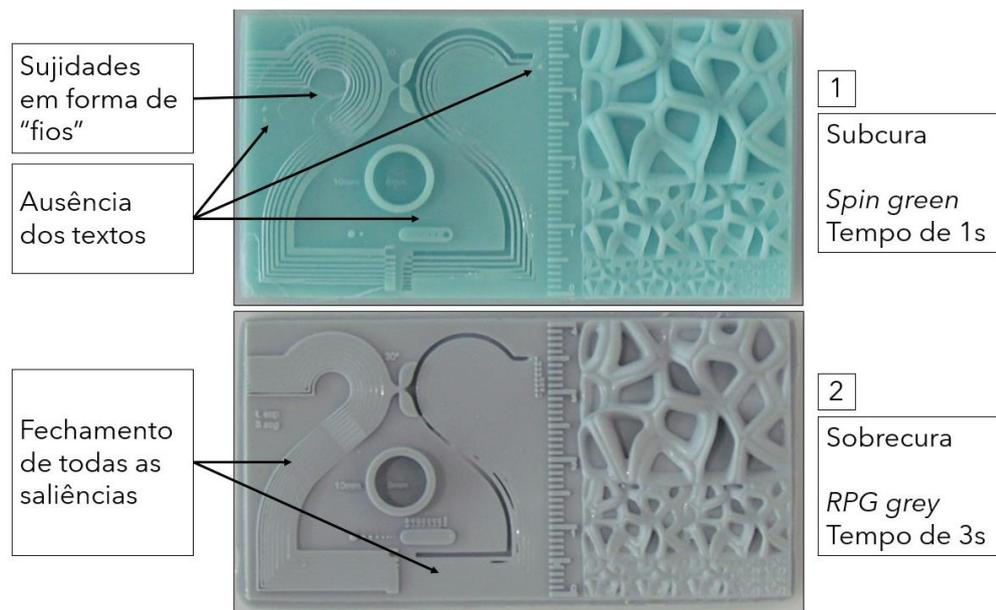
Pode ser visualizado na figura 21 [3] a comparação entre uma das peças menos empenadas (70/30 Skin impressa com o tempo de 2 s). Devido ao empenamento recorrente das peças, entretanto, as comparações ao modelo 3D original ficaram comprometidas. Tal comparação pôde avaliar o grau de empenamento da peça, entre 0,8 e 1 mm de desvio na extremidade.

**Figura 21.** Comparação das malhas digitalizadas.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 22.** Impressões com 1 segundo (verde) e com 3 segundos (cinza) para mostrar diferenças de acabamento.



Fonte: Autor (2022)

### 5.1 Resina *Spin green* (verde)

Primeiramente, a resina *Spin green* verde apresentou a maior susceptibilidade a empenamento dentre as três estudadas. Dito isso, decidiu-se manter a metodologia de impressão padronizada.

No caso do tempo de 2 segundos, notou-se que a peça aparentava estar mais bem equilibrada em termos de criação de estruturas, comparado com os tempos de 1 e 3 segundos. Como pode ser observado na figura 23, sete dos oito ressaltos cilíndricos da região [G] se formaram e os furos de 1 mm, 0,5 mm e 0,4 mm se criaram, em contrapartida com dois ressaltos cilíndricos formados no tempo 1 s e o furo de 0,5 mm quase se fechando na impressão de 3 s. Além disso, na amostra de 1 s nenhuma região de texto foi criada e apresentou sujidades com aspecto de “fios” na região sinuosa saliente [A], devido a uma má formação e eventual descolamento dos elementos mais finos da peça, como pode ser visualizada na figura 22 [1].

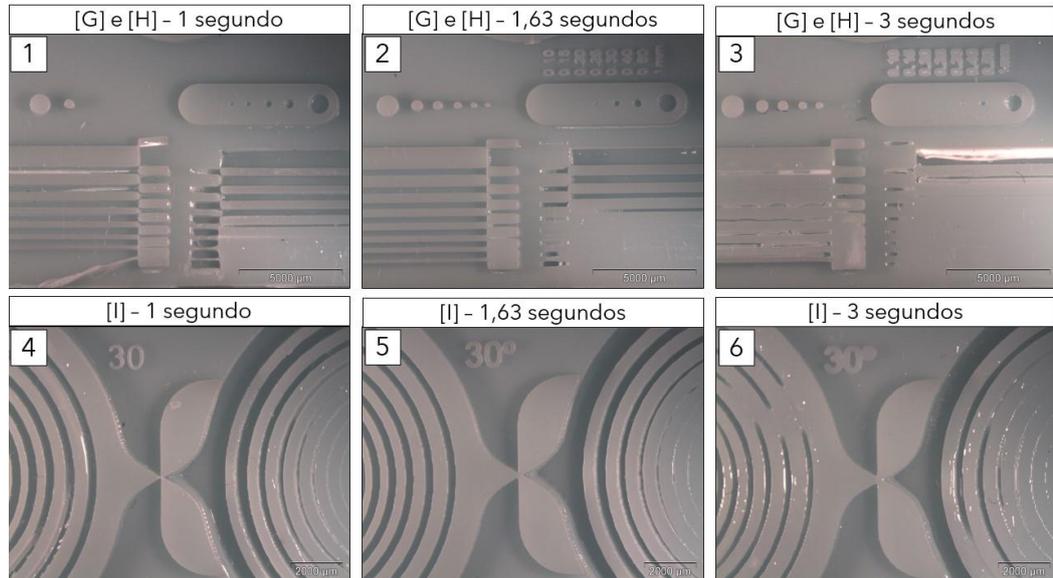
Decidiu-se, então, fabricar com o tempo intermediário de 1,5 s, para se tentar criar quatro furos como observado na peça de 1 s (0,3 mm e maiores). Leve mudança na região dos furos e rebaixos foi observada, porém, apenas 5 dos cilindros ([G]) se criaram, resultado aquém do ideal.

Fez-se, então, a impressão dos tempos de 1,63 s, 1,75 s e 1,88 s. A impressão de 1,88 s apresentou resultados comparáveis aos de 2 s. A impressão de 1,63 s criou 6 cilindros e furos com qualidade similar à impressão de 1,5 s. Já a de 1,75 criou 7 cilindros, mas os seus furos não estavam nítidos como a anteriormente citada.

A região [H] (interface entre saliências e reentrâncias) das amostras da resina *Spin* foram as que apresentaram os resultados mais satisfatórios, com mais nitidez, definição e coerência na criação das estruturas de interface.

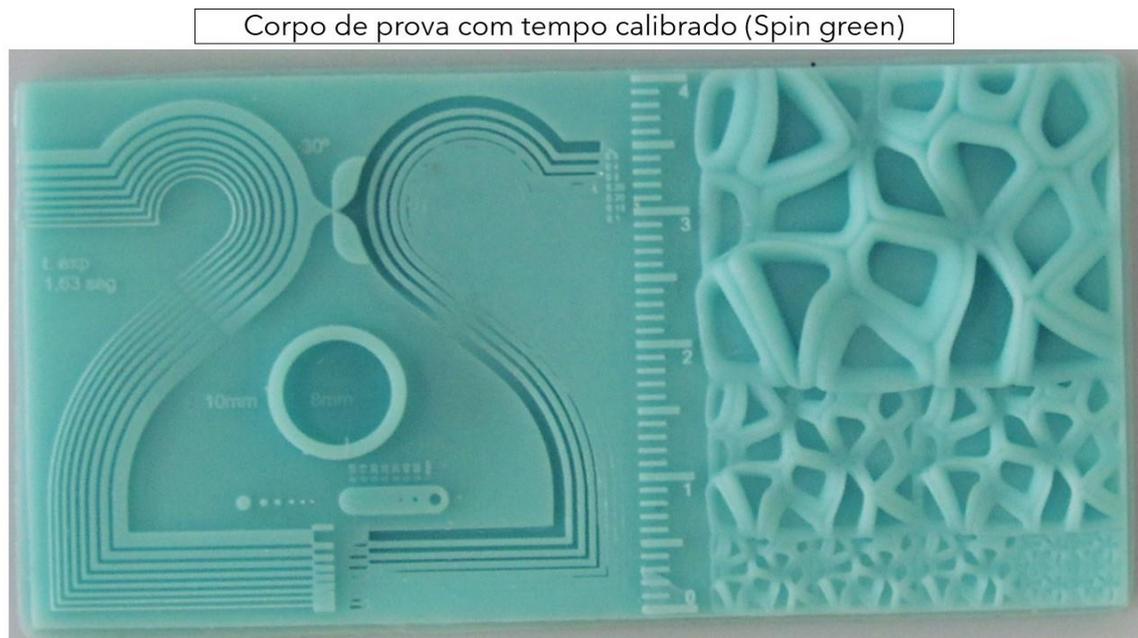
Dito isso, o tempo julgado como “calibrado” para a resina *Spin* foi o de 1,63 s, tempo abaixo do recomendado pelo fabricante, observado na figura 24.

**Figura 23.** Comportamento das regiões [G], [H] e [I] em diferentes tempos para a resina *Spin green*.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 24.** Impressão com 1,63 s, o tempo considerado “calibrado” para a resina verde.



Fonte: Autor (2022)

## 5.2 Resina 70/30 Skin (alaranjada)

Dentre as três resinas, essa foi a que apresentou menos propensão a empenamento, sendo que as amostras de tempos menores apresentaram graus mais acentuados desse efeito adverso. Todas as amostras das três resinas, entretanto, apresentaram algum grau de empenamento, mesmo que pequeno.

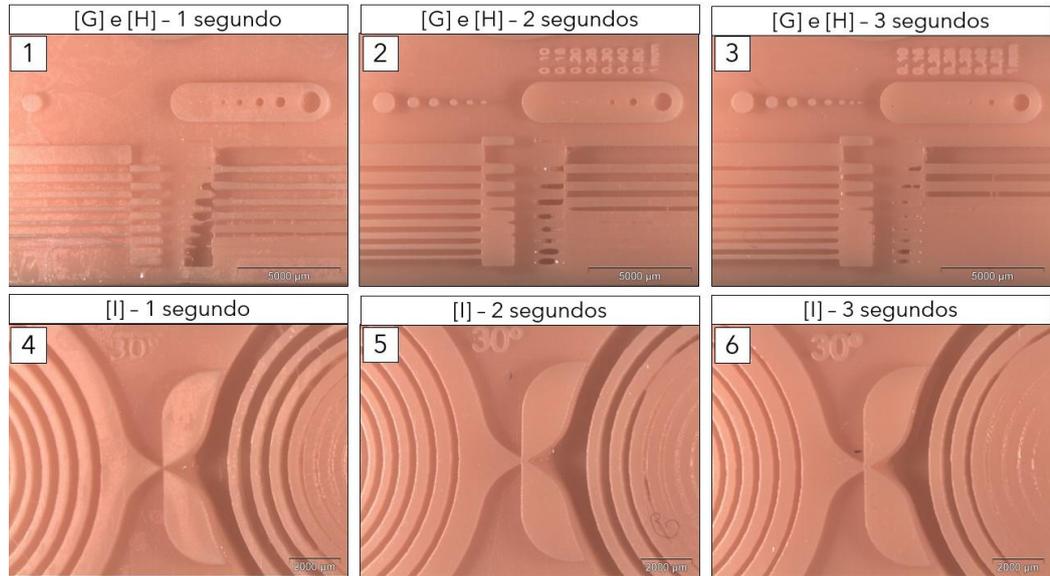
Como se pode notar pela figura 25 [1], a amostra de 1 s da resina em questão foi a que apresentou subexposição mais acentuada dentre as três resinas. Apenas o cilindro de 1 mm se criou, várias estruturas da região [H] (interface da região de saliência com reentrância) ficaram comprometidas (figura 25), sujidades em formas de “fios” também se fizeram presente e foi a única peça em que 5 furos puderam ser observados com clareza (0,20 mm e maiores). Já a amostra de 3 s criou todos os cilindros e a amostra de 2 s criou seis dos oito.

A resina 70/30 apresentou o maior desafio no momento de se decidir qual rota estabelecida de calibração seria tomada. Optou-se por reduzir o tempo, por ser o critério de desempate estipulado. Foram feitas amostras em 1,5 s, 1,63 s, 1,75 s e 1,88 s.

Ambas as impressões de 1,63 s, 1,75 s e 1,88 s apresentaram resultados muito similares. Os dois últimos, entretanto, apresentaram más formações inesperadas nos textos, problema ausente mesmo em tempos menores, levando-se a crer que seja devido a algum erro de processo (mesa descalibrada, filme FEP avariado, etc.). As três amostras apresentaram três furos cilíndricos e a criação de toda a região sinuosa ressaltada, apesar da camada mais externa ter um aspecto frágil.

Tendo isso em vista, o tempo julgado como “calibrado” para a resina 70/30 foi o de 2 s, observado na figura 26, que coincidiu com o tempo recomendado pelo fabricante.

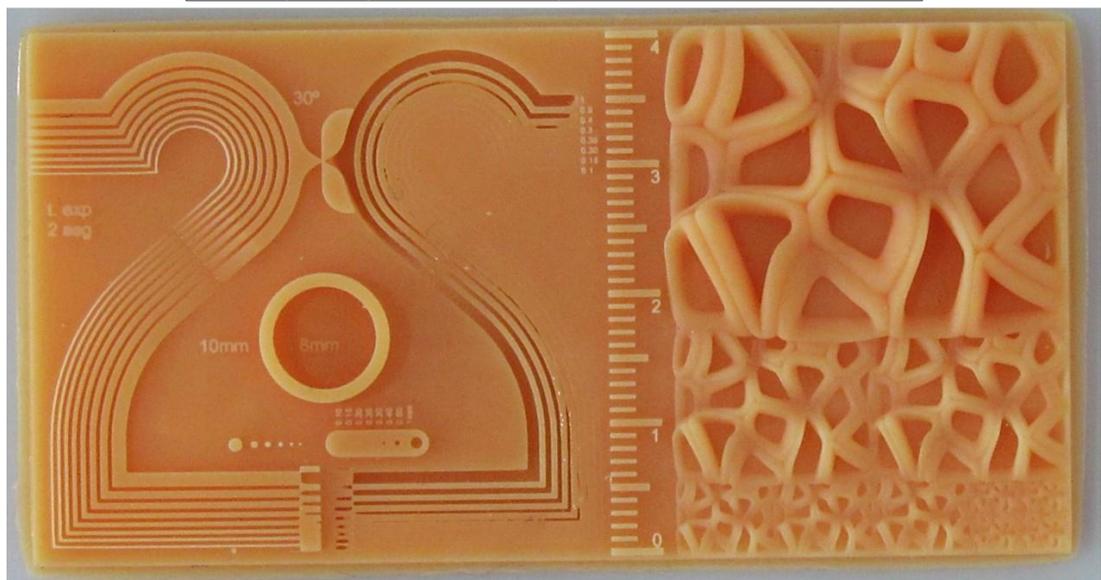
**Figura 25.** Comportamento das regiões [G], [H] e [I] em diferentes tempos para a resina 70/30 skin.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 26.** Impressão com 2 s, o tempo considerado “calibrado” para a resina alaranjada.

Corpo de prova com tempo calibrado (70/30 skin)



Fonte: Autor (2022)

### 5.3 Resina *RPG Grey* (cinza)

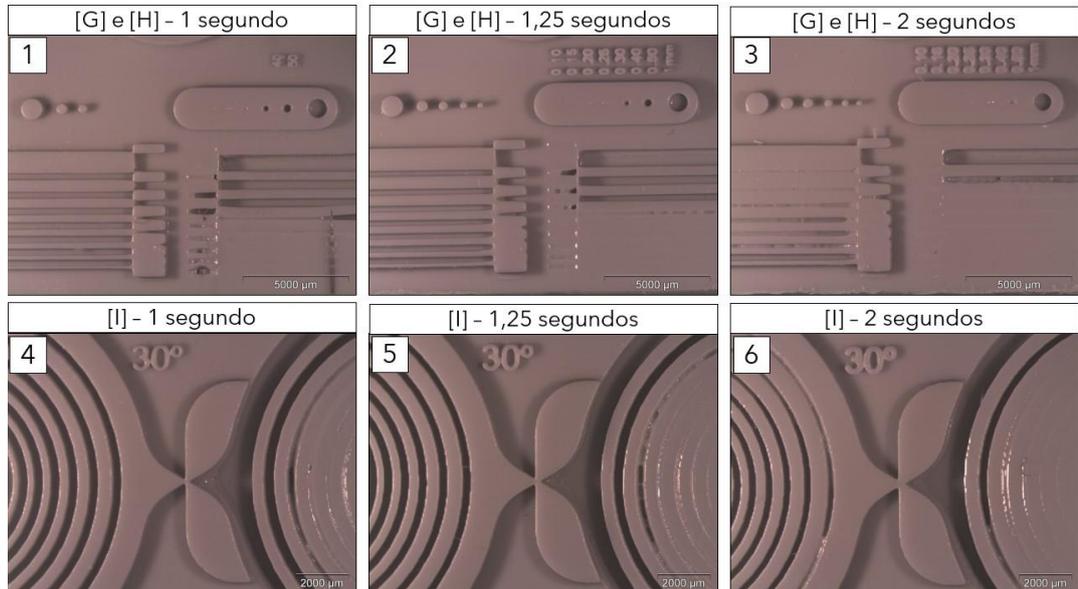
Já a resina *RPG grey* cinza apresentou os resultados mais discrepantes. A sobrecura observada na resina *RPG* foi a mais acentuada, outras resinas apresentaram resultados similares com exposição 1 segundo mais elevada. A amostra de 3 s fechou cavidades menores ou igual a 0,5 mm do modelo, como pode ser visualizado na figura 22 [2].

A amostra seguinte foi a de 1,5 s que ainda apresentou sobre-exposição, visto que a maioria das saliências de [B] se fecharam e apenas os furos de 0,5 mm e 1 mm [G] permaneceram. E mais, apenas 6 dos 8 cilindros [G] puderam ser visualizados.

As amostras finais feitas foram de 1,13 s, 1,25 s e 1,38 s. Dentre elas a de 1,13 s obteve resultados mais consistentes comparados a de 1 s, a maioria dos textos se formaram, algo que não foi observado na de tempo menor, como pode ser observado na figura 27 [1]. As estruturas finas, entretanto, ficaram finas em demorado, causando incerteza em sua integridade estrutural. Os dois mais robustos resultados observados foram os de 1,25 s e 1,38 s. Dentre as diferenças entre os dois, foi observada, na amostra de 1,25 s, uma melhor formação dos furos em [G] e [B], com nenhum comprometimento aparente das estruturas de resalto.

Uma vez observados tais fatores, o tempo julgado como “calibrado” para a resina *RPG* foi o de 1,25 s, observado na figura 28, tempo quase 40% inferior ao recomendado pelo fabricante.

**Figura 27.** Comportamento das regiões [G], [H] e [I] em diferentes tempos para a resina *RPG grey*.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 28.** Impressão com 1,25 s, o tempo considerado “calibrado” para a resina cinza.



Fonte: Autor (2022)

#### 5.4 Análise Dimensional (Medições)

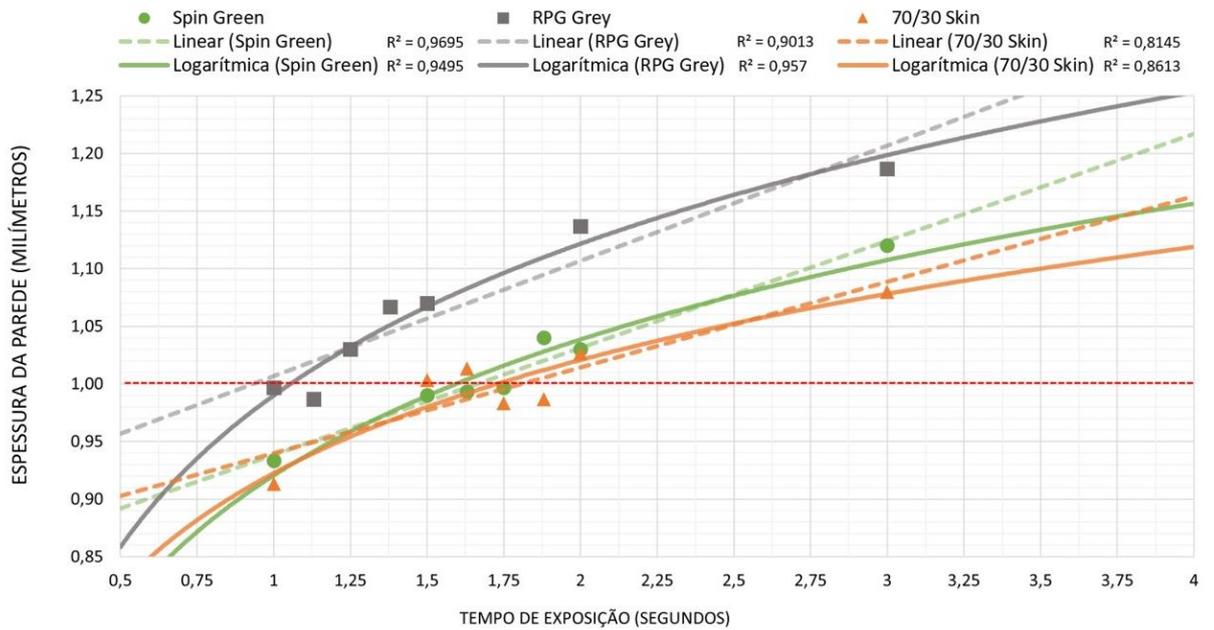
As medições com o paquímetro tiveram o intuito de traçar um paralelo entre os resultados analisados pelas geometrias de estudo e a dimensão das estruturas. O método de estipulação do tempo calibrado por meio dessa análise pode ser feito tanto pela criação de uma linha de tendência com os valores adquiridos, ou simplesmente a escolha do valor de tempo que se aproximou mais do modelado.

A medida de espessura (figura 29) e, em menor valência, a medida do diâmetro do cilindro (figura 30) se mostraram adequadas quando comparadas com os resultados qualitativos. As resinas apresentaram uma tendência linear na espessura que pode se relacionar com a calibração. O material que apresentou o resultado mais consistente para tal comparação foi a *spin green*, pois tanto o teste qualitativo quanto a linha de tendência indicaram resultados próximos.

A resina *RPG grey* cinza gerou resultados inesperados. A espessura da amostra de 1 s foi maior do que a de 1,13 s, valores confirmados depois de se refazer a peça em caso de alguma falha de fabricação (os arquivos de impressão para cada tempo foram os mesmos usados nos testes das três resinas).

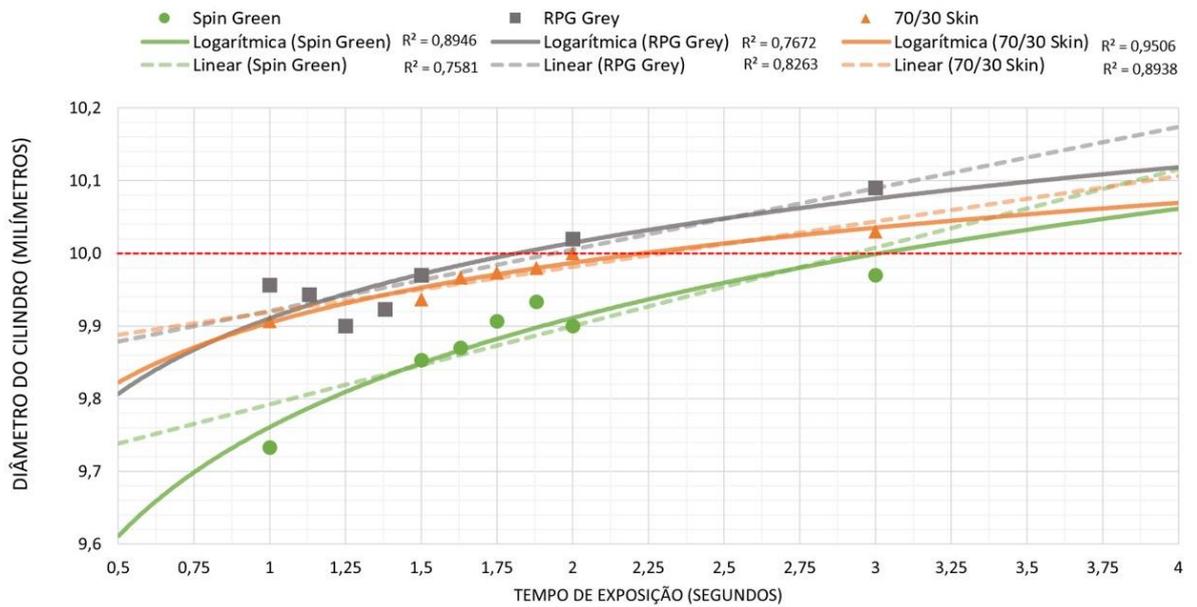
De forma geral, é possível relatar que a espessura da região [F] conseguiu quantificar a tendência observada nas análises anteriores para as resinas analisadas. Não obstante, nota-se que a simples reta entre os valores de 1 s e 3 s gerariam uma linha aproximada da feita com diversos pontos, e necessitando de apenas duas amostras. É importante ressaltar, todavia, que medidas anômalas como as observadas na RPG podem ocorrer e comprometer o resultado.

**Figura 29.** Gráfico com valores medidos na espessura da região [F].



Fonte: Autor (2022)

**Figura 30.** Gráfico com valores medidos de diâmetro do cilindro da região [F]



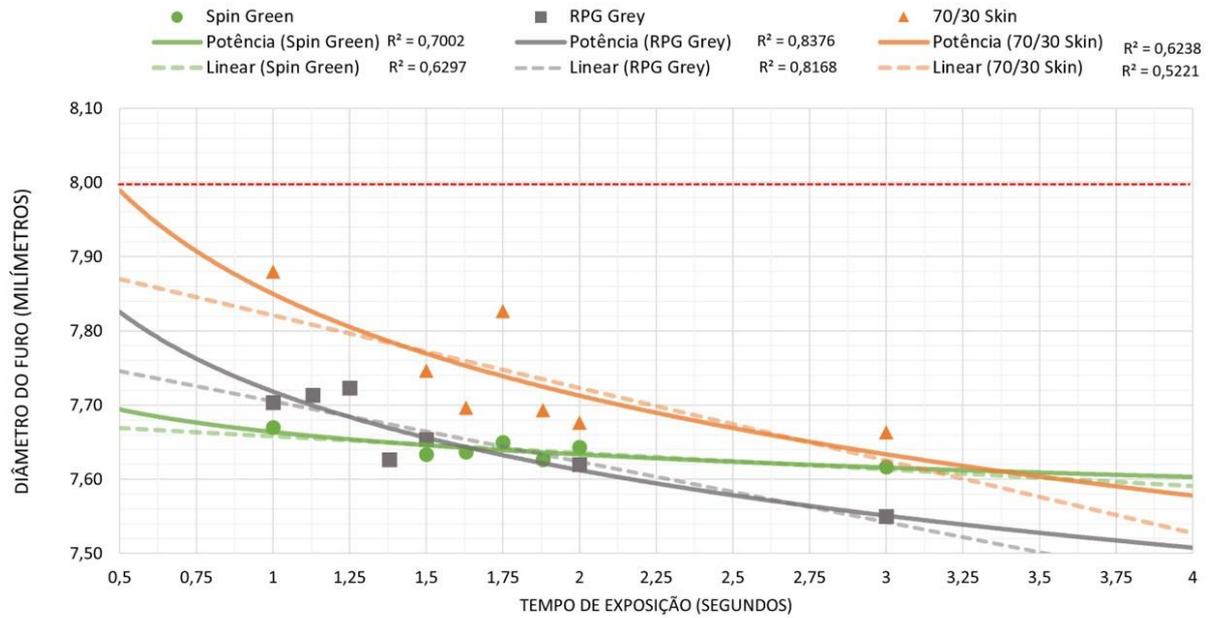
Fonte: Autor (2022)

O gráfico da figura 31 elucidou uma limitação da técnica. Nota-se que nenhuma medida alcançou o valor de 8 mm. As linhas de tendência sugerem que esses valores, caso possível, serão alcançados apenas em tempos baixos demais. A maioria dos resultados geraram um erro de aproximadamente 0,3 mm, mesmo nos tempos considerados calibrados. Uma possível solução para tal efeito seria a mudança das medidas no modelo 3D para levar em conta o fechamento de 0,3 mm na impressão.

Por ser um furo, existe um espaço limitado para as paredes internas crescerem até se fecharem completamente. Então, sutis diferenças de dimensionamento podem acarretar desaparecimento catastrófico de estruturas de rebaixo. Diferentemente de uma estrutura de ressalto que usufruem de espaço para serem criadas, a maior barreira para a criação da estrutura parece ser a aderência com as camadas anteriores bem como o tamanho do *pixel*.

Outro motivo do recorrente fechamento pode ser devido ao enclausuramento característico dessas estruturas gerar algum efeito favorável à polimerização. Pode-se citar possíveis causas de tal efeito o aumento local de temperatura, o confinamento de espécies reativas, o alastramento de fótons de luz UV no local ou algum outro efeito físico-químico.

**Figura 31.** Gráfico com valores medidos de diâmetro do furo cilíndrico da região [F].

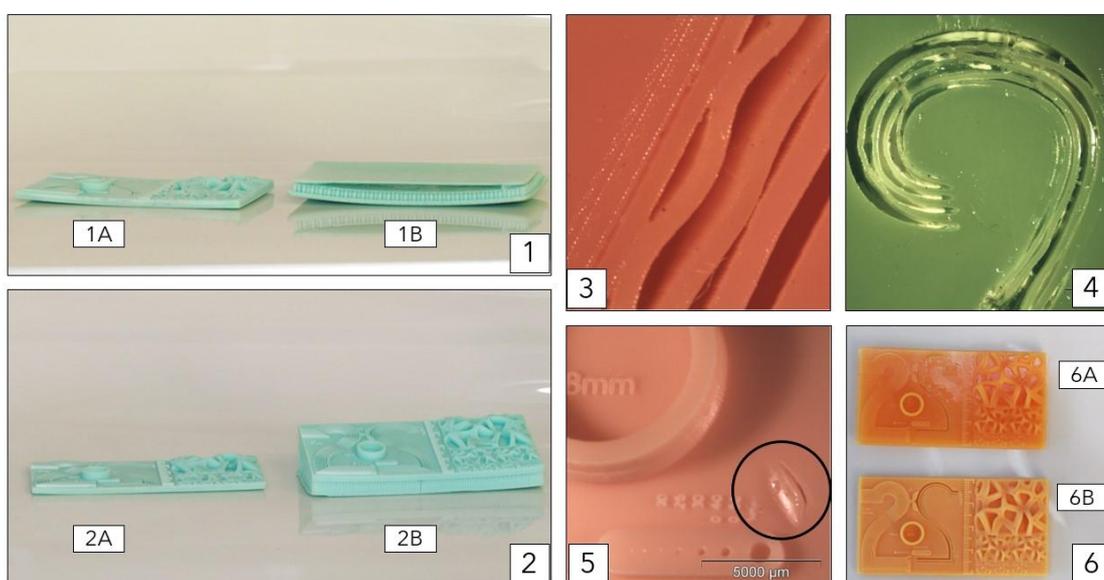


Fonte: Autor (2022)

### 5.5 Outros erros de impressão e possíveis métodos de contorná-los

A seguir, são descritos os erros de fabricação ocorridos durante o desenvolvimento do trabalho, assim como formas encontradas de se mitigar tais defeitos. Imagens dos erros podem ser visualizadas na figura 32.

**Figura 32.** Defeitos de fabricação.



Fonte: Autor (2022)

#### 5.5.1 Descolamento dos suportes

Diferentemente das peças vistas na figura 32 [2] em que ambas as peças [2A] e [2B] foram fabricadas em um ângulo de  $15^\circ$  da plataforma, a peça [1B] foi feita paralela à plataforma e descolou dos suportes que a sustentavam. Esse frequente defeito foi ocasionado devido à incapacidade de os suportes ficarem aderidos a uma área de camada subitamente grande, significativamente maior do que a área curada anteriormente. Não se recomenda imprimir peças com uma face que exija suportes paralelos à plataforma.

### **5.5.2 Empenamento**

Como pode ser observado na peça da esquerda da figura 32 [1A], ocorreu empenamento nas peças, muito devido ao fato de terem sido impressas diretamente coladas na plataforma e terem recebido a pós-cura depois de retiradas da base.

Formas de se mitigar tal defeito podem ser visualizadas na figura 32 [2]; a amostra [2B] foi curada ainda com os suportes, e a [2A] recebeu pós-cura depois da retirada dos suportes. A amostra menos empenada foi a [2A].

### **5.5.3 Regiões onduladas**

Regiões onduladas podem ser vistas na figura 32 [3]. Tal fenômeno ocorre em elementos delgados da peça depois da etapa de lavagem. Caso seja feita a pós-cura da peça sem esperar o tempo adequado de secagem, a estrutura “congela” na posição ondulada.

### **5.5.4 Regiões esbranquiçadas**

Regiões esbranquiçadas, como podem ser observadas na figura 32 [4], ocorrem devido à limpeza inadequada da peça.

### **5.5.5 Defeitos superficiais nas camadas de topo**

Um rebaixo indesejado pode ser visualizado na área circulada da figura 32 [5]. Tal defeito ocorreu devido a uma imperfeição no filme FEP. Sugere-se a troca do filme, ou evitar posicionar a peça sob a região defeituosa.

### **5.5.6 Variação de cor entre modelos**

Como pode ser visto na figura 32 [6], a mesma resina da mesma garrafa imprimiu peças com cores distintas. Isso foi devido à falta de homogeneização do líquido antes da impressão da peça [6A]. A peça [6B] é o resultado de uma agitação feita corretamente.

### 5.5.7 Descolamento da plataforma

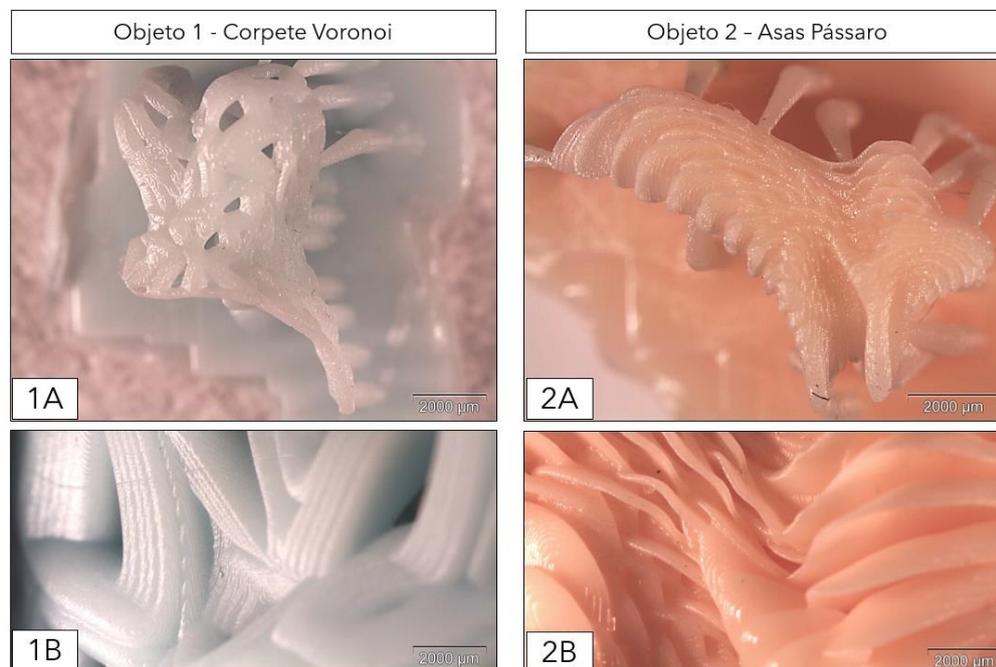
Descolamento do modelo completa ou parcialmente da plataforma. Tal erro se deve a um ou mais dos seguintes fatores: plataforma descalibrada, plataforma com rugosidade inadequada (pouco rugosa), tempo de exposição das primeiras camadas insuficiente, área da base do suporte estreita demais.

### 5.6 Impressões dos objetos escultóricos

No final da parametrização, foram impressos os objetos de estudo escultórico nos tempos definidos, primeiro e várias escalas reduzidas para se avaliar os resultados em uso prático. Vale ressaltar que se optou por utilizar um objeto escultórico como exemplo de aplicação. É possível se extrapolar as texturas finas e a geometrias complexas para outras aplicações, como odontológica, joalheira, biomédica e até mesmo peças técnicas industriais.

O objeto de estudo escultórico 1, que se assemelha a um corpete, foi impresso na resina verde, já o segundo, na resina *70/30 skin* alaranjada. Na figura 32 [1B] e [2B], é possível notar a fabricação dos elementos finos presentes nos modelos observados na figura 19 [1B] e [2B], sugerindo a adequada calibração das resinas.

**Figura 33.** Regiões de interesse dos objetos de estudo escultórico.



Fonte: Autor (2022)

Foram impressos objetos escultóricos em miniatura (10 mm) vistos na figura 32 [1A] e [2A], uma vez que está se analisando limites da técnica, mas os objetos eram miúdos demais para se reproduzirem as ranhuras desejadas.

As figuras 34 e 35 mostram as peças de estudo escultórico impressas no estudo. Foi possível notar a reprodução das estruturas de ranhura no objeto 1 a começar da peça de 30 mm de altura. Já as estruturas de ressalto maiores presentes no objeto 2 puderam ser vistas em todas as peças impressas, mas as mais finas apenas observadas a começar de 40 mm de comprimento.

Foram fabricados, enfim, objetos escultóricos em uma escala maior: Em resina *Skin green* com 190 mm de altura no caso do Corset Voronoi, observado na figura 36, e em *70/30 skin* 260 mm de comprimento no caso do Pássaro “crinolina colheres”, observado na figura 37. As impressões foram partidas, impressas com o tempo calibrado para cada resina e depois alocadas em uma montagem de acrílico.

Figura 36.

Título: Corset Voronoi da série “O corpo ausente”

Resina fotopolimérica 2015 – 2022

43 x 27 x 11 cm

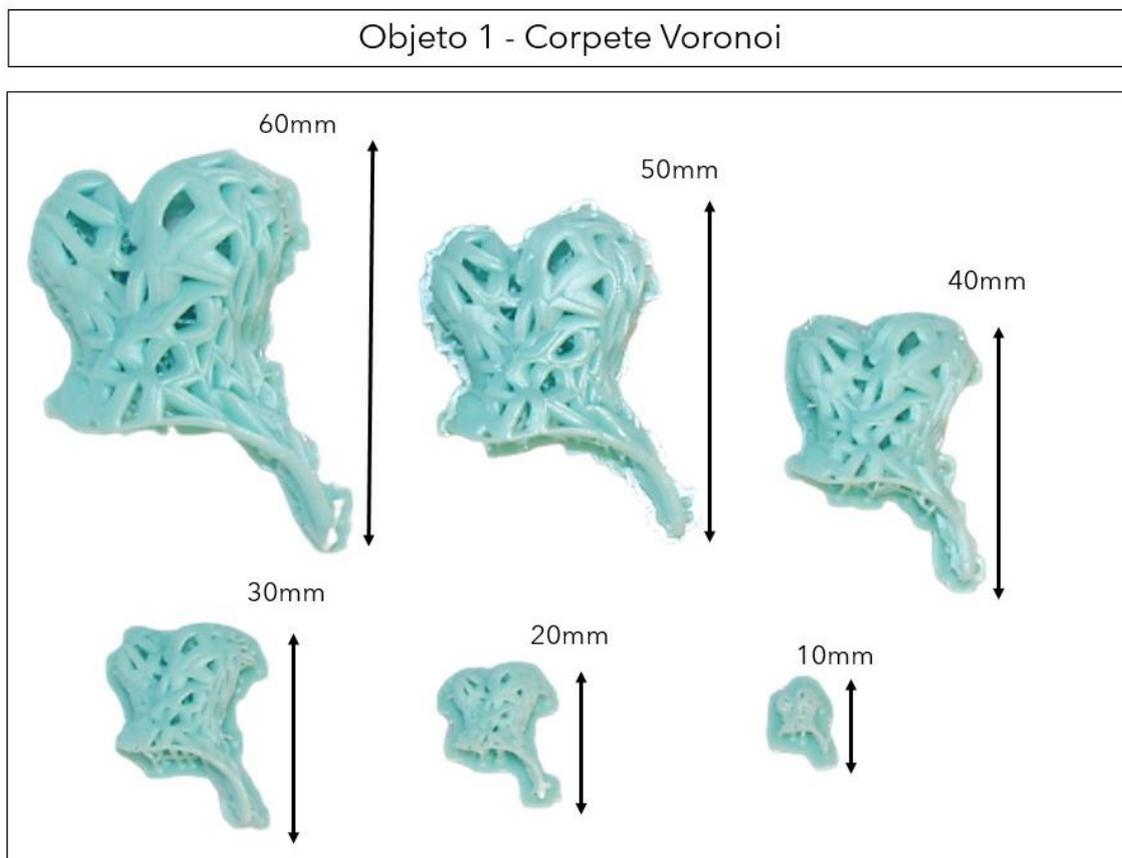
Figura 37.

Título: Pássaro “crinolina colheres” da série “O corpo ausente”

Resina fotopolimérica 2006 – 2022

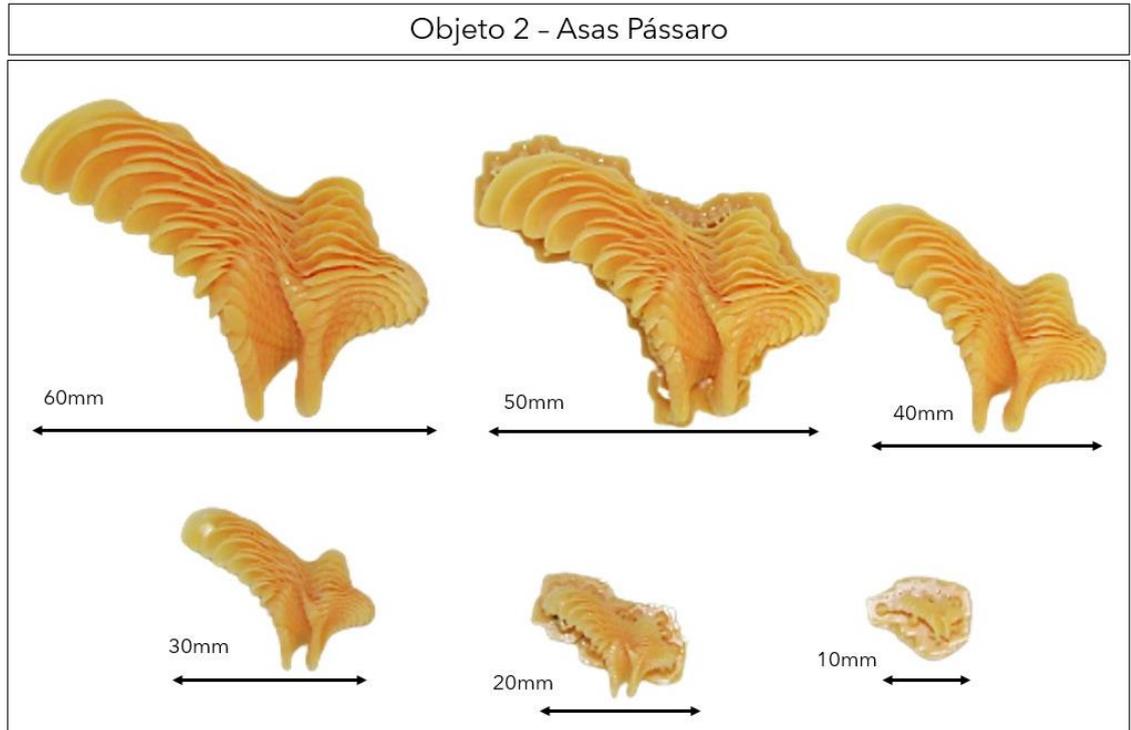
27 x 43 x 14 cm

**Figura 34.** Objeto 1 fabricado em diferentes tamanhos.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 35.** Objeto 2 fabricado em diferentes tamanhos.



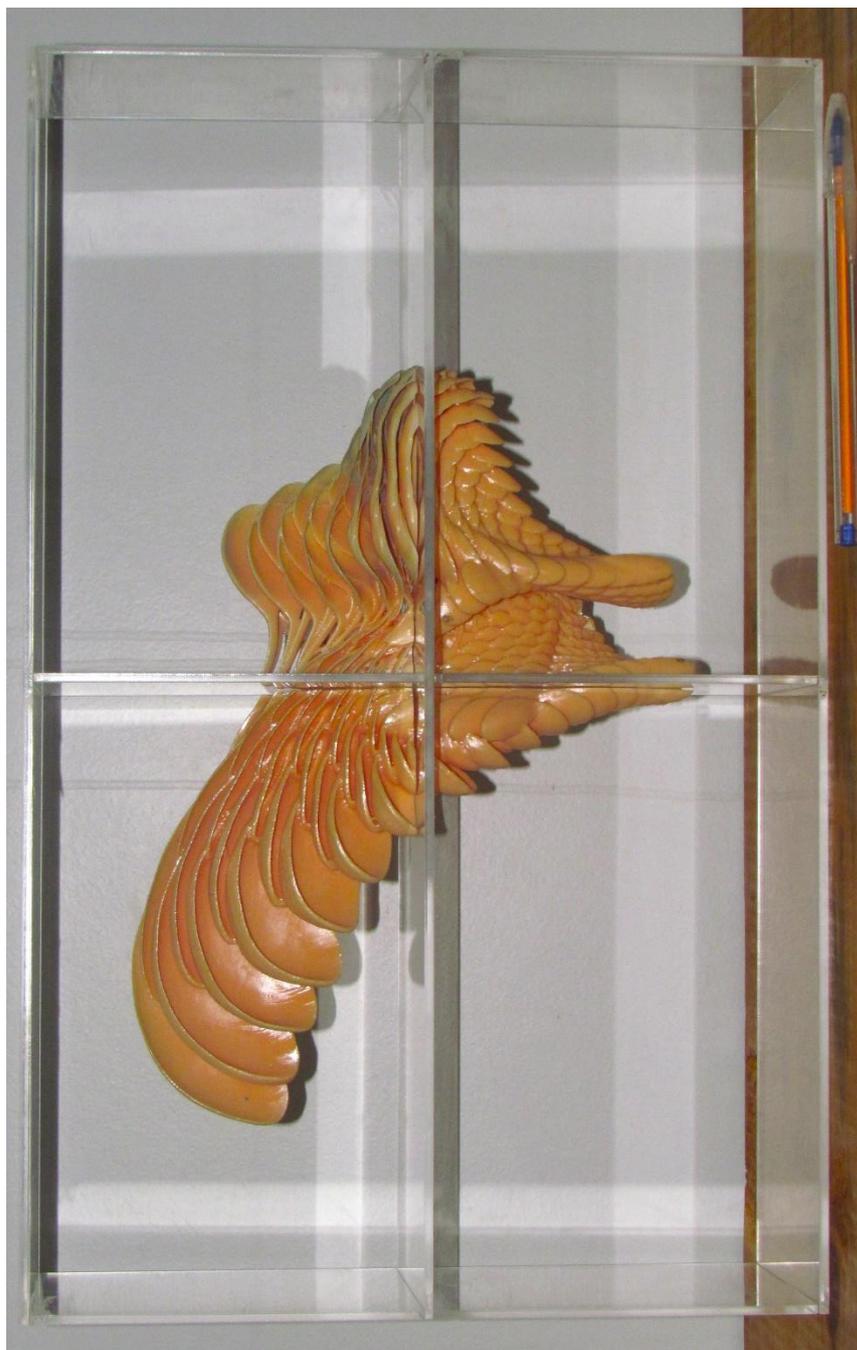
Fonte: Autor (2022)

**Figura 36.** Título: Corset Voronoi da série “O corpo ausente”. Resina fotopolimérica  
2015 – 2022. 43 x 27 x 11 cm.



Fonte: Autor (2022)

**Figura 37.** Título: Pássaro “crinolina colheres” da série “O corpo ausente”. Resina fotopolimérica 2006 – 2022. 27 x 43 x 14 cm.



Fonte: Autor (2022)

## 6 CONCLUSÕES

Após a pesquisa e o trabalho de impressão, foi possível concluir que:

### 6.1 Sobre o tempo de exposição e limites da técnica.

A calibração das resinas resultou nos seguintes valores: Para a resina Spin Green (verde) tempo de 1,63 segundos, para a resina 70/30 Skin (alaranjada) tempo de 2 segundos e para a resina RPG Grey (cinza) tempo de 1,25 segundos.

A técnica apresentou limitações de fabricação. Não foi observado em nenhuma amostra a criação de todas as estruturas de ressalto e rebaixo simultaneamente. Os casos considerados “calibrados” por esse estudo criaram ressaltos de 0,2 mm e furos de 0,4 mm. Logo, se recomenda cuidado na fabricação de estruturas mais finas que as citadas.

Foi observada muita dificuldade na fabricação de furos e saliências menores do que 0,3 mm. Em nenhuma das amostras se conseguiu criar tais estruturas, nem mesmo nos casos de subexposição deliberada (tempos de 1 segundo). É recomendada a correção dos furos no projeto 3D, pois furos e rebaixos apresentaram um estreitamento médio de 0,3 mm (0,15 mm de cada lado), ou seja, para alcançar um diâmetro de furo de 8 mm, recomenda-se modelar o furo com 8,3 mm, por exemplo.

O fabricante das resinas, em geral, recomendou um tempo de exposição maior do que o considerado “calibrado” por esse estudo. O autor acredita que essa decisão é intencional com a finalidade de garantir a formação completa da maioria das estruturas, assim como atestar mais segurança que os suportes das peças permaneçam aderidos o suficiente na peça.

### 6.2 Sobre as resinas.

A resina alaranjada (70/30 Skin) foi a que gerou os resultados equilibrados em questão de propriedades, apresentou facilidade em replicar as estruturas desejadas e obteve baixo empenamento. Recomenda-se essa resina para casos gerais, mas em

especial casos em que o dimensional seja o ponto mais importante, tal como estruturas com encaixes, peças técnicas de engenharia e odontologia.

As amostras feitas na resina Spin green apresentaram o maior grau de empenamento. Peças tendem a empenar mais quando curadas depois de retiradas da plataforma, tal fenômeno é especialmente presente em peças delgadas e fabricadas diretamente na base, como é o caso do presente estudo. A resina verde, entretanto, apresentou esteticamente o melhor detalhamento dentre as analisadas. Recomenda-se ela para aplicações de detalhes muito finos, como joalheria e outras peças miúdas.

A resina RPG Grey apresentou os menores refino nos detalhes entre as analisadas, entretanto ela apresentou a maior agilidade na impressão. Segundo a fabricante, tal resina deveria “entregar detalhes sem comprometer a resistência a impactos”, então se faz crer que o principal atributo dela é sua resistência. Recomenda-se tal resina em aplicações que a agilidade de fabricação seja fundamental, em aplicações mecânicas que necessitem de impacto, bem como em peças manipuladas com frequência como figuras de jogos de tabuleiro e brinquedos.

### 6.3 Sobre o processo de impressão e calibração.

Foi possível se criar um corpo de calibração bem como uma metodologia adaptado para o ajuste de tempo de exposição adequado para o par resina/máquina. O método consiste em 5 impressões de 30 minutos ou menos que é possível de ser realizado em um turno de trabalho dedicado gastando pouca matéria prima. O método se fez eficaz para as três resinas e acredita-se que seja verdade para qualquer outro par resina/máquina.

A fabricação de peças com suporte que tenham uma superfície grande e paralela à plataforma se mostrou especialmente desafiadora. Todas as peças desse estudo que foram impressas de tal maneira (seja amostra de corpo de calibração ou objeto de estudo escultórico) apresentaram falha de fabricação, a peça permaneceu

colada no filme FEP. Recomenda-se um leve ângulo para evitar tal problema, uma vez que uma superfície menor é mais fácil de ser puxada e descolada do filme FEP.

Limpeza e cura adequadas se mostram vitais nas características superficiais das peças. Impressões que receberam boas limpeza e cura não só apresentaram menos erros de impressão – como superfícies enrugadas, regiões com variação de brilho, toque pegajoso – como também apresentaram, em caráter subjetivo, estética mais apresentável, fator importante para uma aplicação escultórica.

É importante entender a finalidade do objeto impresso para fazer a calibração. Dependendo do objetivo da peça impressa, o mesmo par resina/máquina pode ter valores diferentes de tempo que seja considerado “calibrado”, dependendo da ênfase dada para cada estrutura de calibração. Caso o foco da impressão seja a criação de furos e rebaixos, um tempo menor pode ser mais adequado comparado com casos em que o destaque esteja na criação de ressaltos e saliências.

Finalmente, observou-se que a técnica consegue, quando bem calibrada, reproduzir texturas e elementos finos, que podem ser aplicados não só nas artes, mas como extrapolados para ramos que exijam tais detalhes e precisão como o joalheiro, odontológico, biomédicos e certas peças do setor industrial.

#### 6.4 Sobre STEAM como abordagem metodológica.

A união de ciência, matemática, engenharia e tecnologia tende a parecer um encontro intuitivo. O presente trabalho deu um passo adiante e incorporou as artes meio da parceria com o Instituto de Artes representado pelo professor Felix Bressan. As visões distintas de todas as partes envolvidas agregaram profundidade e humanidade a áreas vistas muitas vezes como insensíveis das ciências exatas. Uma das maiores contribuições da abordagem foi desafiar o senso comum e gerar um propósito de caráter altamente subjetivo e pessoal para a estrita objetividade do material e do processo comumente vistos no decorrer do curso de engenharia.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar as propriedades mecânicas das diferentes resinas através de testes de tração e choque-flexão.
- Relacionar composição química das diferentes resinas com os resultados dimensionais e mecânicos.
- Variar outros parâmetros de máquina tais como velocidade de subida da plataforma, temperatura da resina durante a impressão, tempo de lavagem e pós-cura da peça.
- Avaliar parâmetros de suporte na construção dos modelos.

## REFERÊNCIAS

- BÁRTOLO, Paulo Jorge (ed). **Stereolithography: materials, processes and applications**. Springer Science & Business Media, 2011.
- BONADA, J. et al. **Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive materials used in additive manufacturing**. *Procedia Manufacturing*, v. 13, p. 762-769, 2017.
- COSMI, Francesca; DAL MASO, Alberto. **A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications**. *Materials Today: Proceedings*, v. 32, p. 194-201, 2020.
- DALL'ARGINE, Corrado et al. **Hot-Lithography SLA-3D Printing of Epoxy Resin**. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 305, n. 10, p. 2000325, 2020.
- DE ASSIS, Marley Alisson Perdigao. **Impressão 3D, modelos de negócios e os novos cenários para a propriedade intelectual**. 2018.
- GODOI, Fernanda C.; PRAKASH, Sangeeta; BHANDARI, Bhesh R. **3d printing technologies applied for food design: Status and prospects**. *Journal of Food Engineering*, v. 179, p. 44-54, 2016.
- HALLINEN, J. **STEM**. Disponível em: <https://www.britannica.com/topic/STEMeducation>. Acesso em 16 out. 2020.
- HARRIS, A., & de BRUIN, L. R. (2017). **Secondary school creativity, teacher practice and STEAM education: An international study**. *Journal of Educational Change*, 19(2), 153–179. doi:10.1007/s10833-017-9311-2.
- HULL. Charles W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. US4575330 A. Dep. 08 ago 1984. Pub. 11 mar 1986 <Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US4575330>> Acesso em: 12 maio. 2022.
- IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.*

KIM, Dohyun et al. **Effects of post-curing time on the mechanical and color properties of three-dimensional printed crown and bridge materials.** *Polymers*, v. 12, n. 11, p. 2762, 2020.

KINDLEIN JÚNIOR, W.; BRESSAN, F; PALOMBINI, L. F. (2021). **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 [2021], p. 116 – 130.

KOMJATY, A., WISZNOVSZKY, E.S.and CULDA, L.I., 2021. **Study on the Influence of Technological Parameters on 3D Printing with Sla Technology.** *Les Ulis: EDP Sciences Publicly Available Content Database*. DOI <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/202134301003>.

LANTEAN, Simone et al. **Development of new hybrid acrylic/epoxy DLP-3D printable materials.** *Inventions*, v. 3, n. 2, p. 29, 2018.

LEWIS, A. L. (2015). **Putting the “H” in STEAM: Paradigms for Modern Liberal Arts Education.** *Emerging Technologies for STEAM Education*, 259–275. doi:10.1007/978-3-319-02573-5\_14.

LIAO, C. **From Interdisciplinary to Transdisciplinary: An Arts-Integrated Approach to STEAM Education.** *Art Education*, v. 69, n. 6, p. 44–49, 18 nov.2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/00043125.2016.1224873>.

**Manual de Oslo: proposta de diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação tecnológica.** Tradução da Financiadora de Estudos e Projetos. Paris: OCED, 2004. Disponível em: <[http://www.finep.gov.br/images/a-finep/biblioteca/manual\\_de\\_oslo.pdf](http://www.finep.gov.br/images/a-finep/biblioteca/manual_de_oslo.pdf)>. Acesso em: 08 maio. 2022.

NAVARUCKIENE, Aukse et al. **Influence of vanillin acrylate-based resin composition on resin photocuring kinetics and antimicrobial properties of the resulting polymers.** *Materials*, v. 14, n. 3, p. 653, 2021.

NICOLESCU, Basarab et al. Um novo tipo de conhecimento: transdisciplinaridade. **Educação e transdisciplinaridade**, v. 1, n. 2, 2000.

NOWACKI, Bartłomiej et al. **Effect of Post-Process Curing and Washing Time on Mechanical Properties of mSLA Printouts.** *Materials*, v. 14, n. 17, p. 4856, 2021.

PIEDRA-CASCÓN, Wenceslao et al. **3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization**

**additive manufacturing technologies: A narrative review.** Journal of Dentistry, v. 109, p. 103630, 2021.

**Profissões do futuro: cargos que vão emergir dos desafios na era digital.** Disponível em: <<https://forbes.com.br/carreira/2022/04/saiba-quais-profissoes-vaio-emergir-com-os-desafios-da-era-digital/?amp>> Acesso em 16 abr. 2022.

**Impressoras de Resina 3D: SLA, DLP e LED-LCD.** Disponível em: <[https://filament2print.com/pt/blog/99\\_imprensoras-3d-resina-SLA-DLP-LED-LCD.html](https://filament2print.com/pt/blog/99_imprensoras-3d-resina-SLA-DLP-LED-LCD.html)> acesso em 19 abr. 2022.

SCHWAB, Klaus. **A Quarta Revolução Industrial.** Trad. Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

TAORMINA, Gabriele et al. **3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends.** Journal of applied biomaterials & functional materials, v. 16, n. 3, p. 151-160, 2018.

VOLPATO, Neri (org). **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Edgard Blücher, 2017.

WALTER, Y.; JUNIOR, W. K.; DA SILVA, F. P. **Assessing small craft's boatbuilding sustainability: A materials selection chart's approach: Nachhaltiger Bootsbau für Handwerker: Werkstoffauswahldiagramm.** Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, v. 49, n. 11, p. 1409-1416, 2018.

ZUCHOWICZ, Nikolas C. et al. **Low-Cost resin 3-D printing for rapid prototyping of microdevices: Opportunities for supporting aquatic germplasm repositories.** Fishes, v. 7, n. 1, p. 49, 2022.

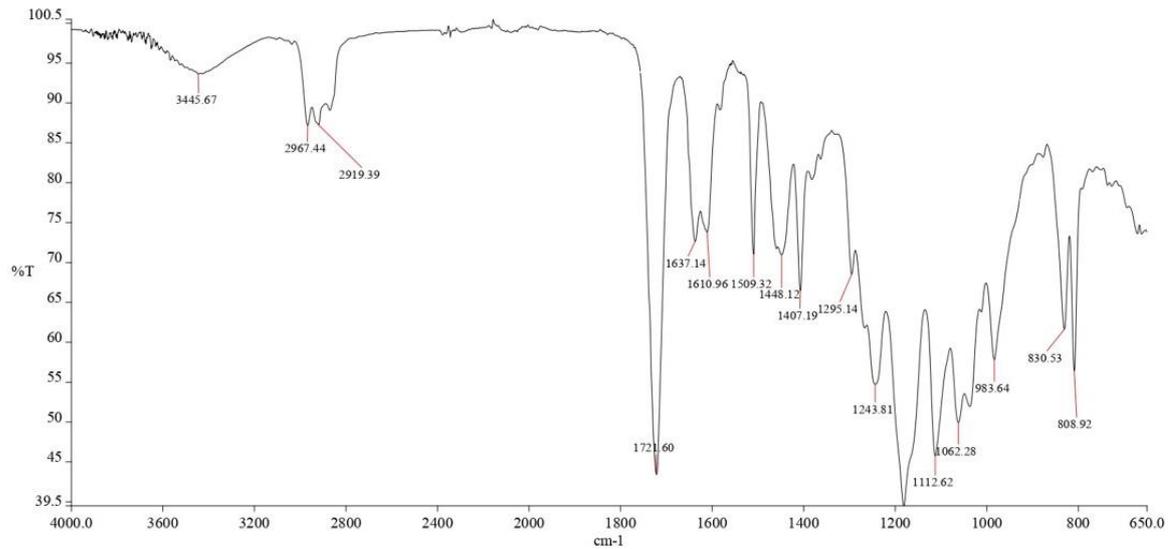
## APÊNDICE A – Curvas FTIR das resinas, líquidas e curadas.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Departamento de Engenharia de Materiais  
Laboratório de Design e Seleção de Materiais

Date: Wednesday, May 04, 2022

Time: 9:23 AM E. South America Standard Time

Resina Spin Green (verde) - curada

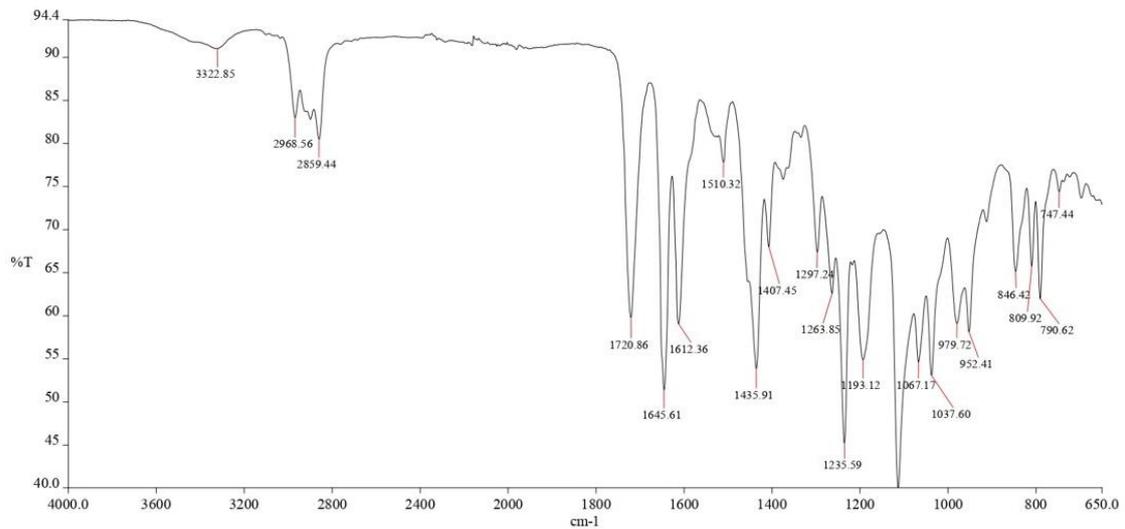


Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Departamento de Engenharia de Materiais  
Laboratório de Design e Seleção de Materiais

Date: Wednesday, May 04, 2022

Time: 9:45 AM E. South America Standard Time

Resina RPG Grey (cinza) - líquida

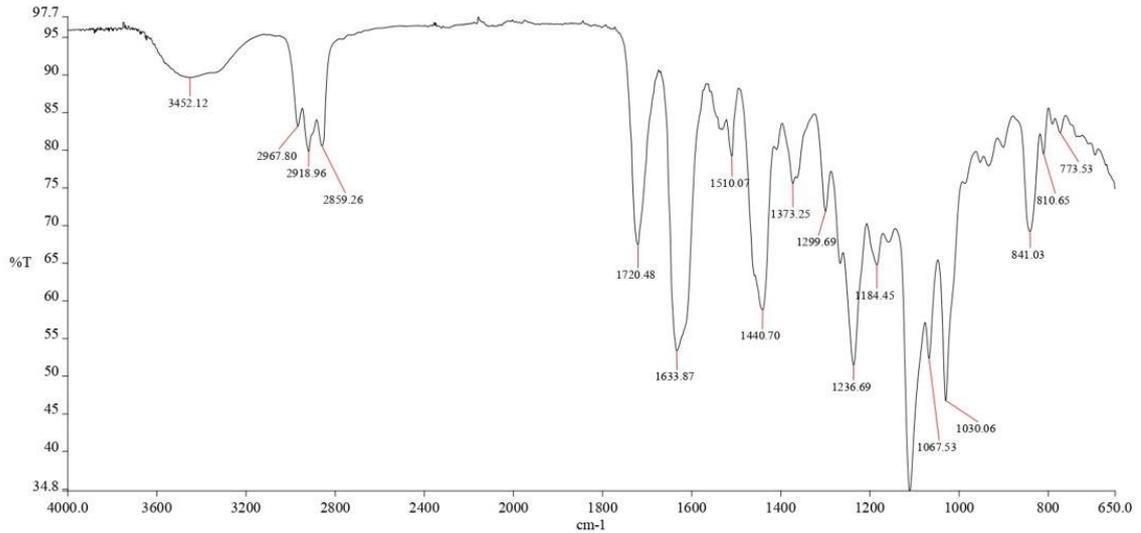


**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Departamento de Engenharia de Materiais**  
**Laboratório de Design e Seleção de Materiais**

Date: Wednesday, May 04, 2022

Time: 9:37 AM E. South America Standard Time

Resina RPG Grey (cinza) - curada

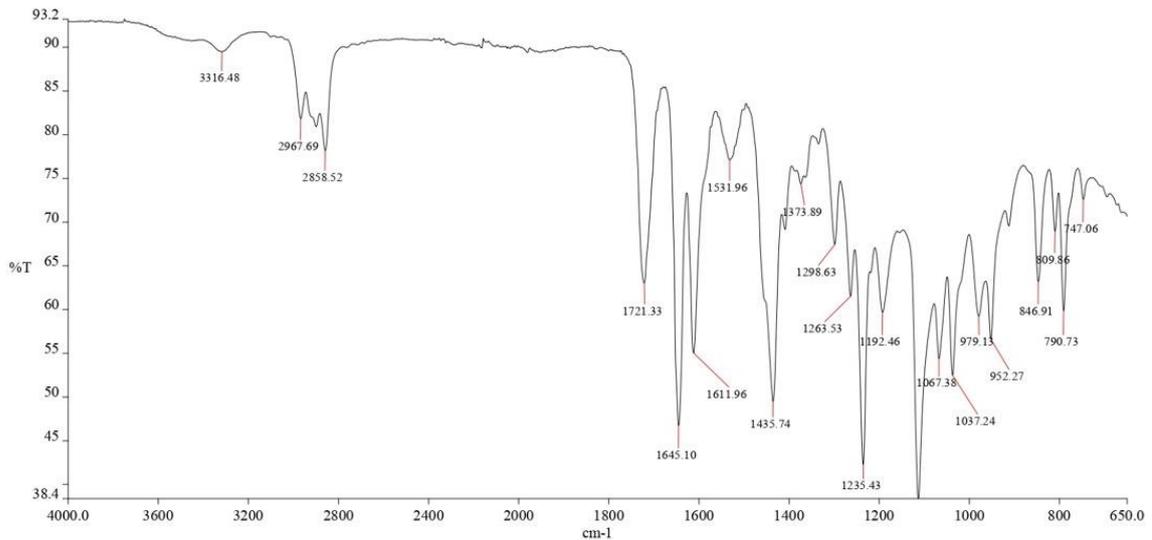


**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Departamento de Engenharia de Materiais**  
**Laboratório de Design e Seleção de Materiais**

Date: Wednesday, May 04, 2022

Time: 10:00 AM E. South America Standard Time

Resina 70/30 Skin (alaranjada) - líquida

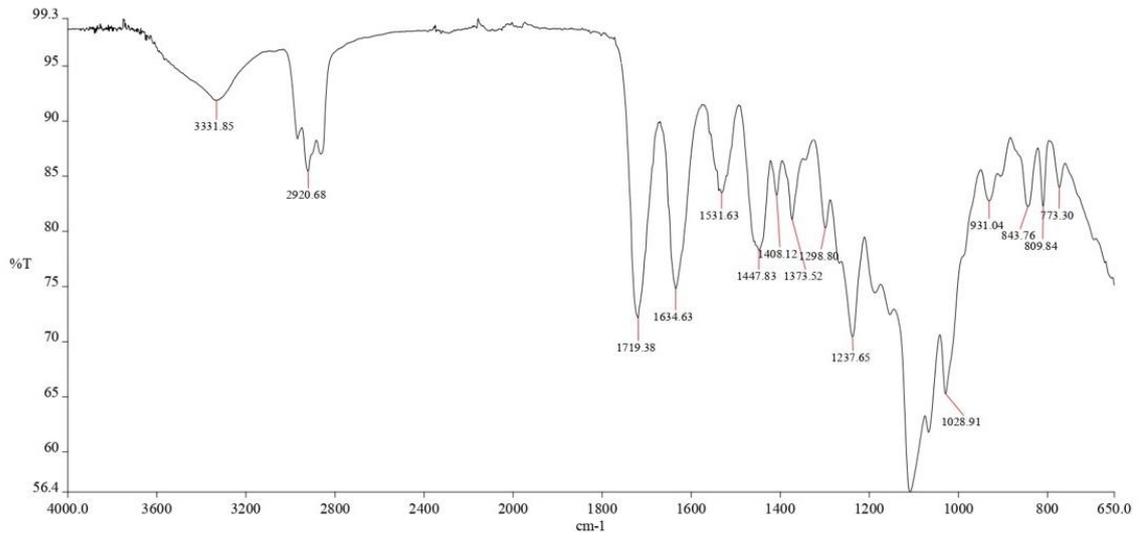


**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Departamento de Engenharia de Materiais**  
**Laboratório de Design e Seleção de Materiais**

Date: Wednesday, May 04, 2022

Time: 9:32 AM E. South America Standard Time

Resina 70/30 Skin (alaranjada) - curada

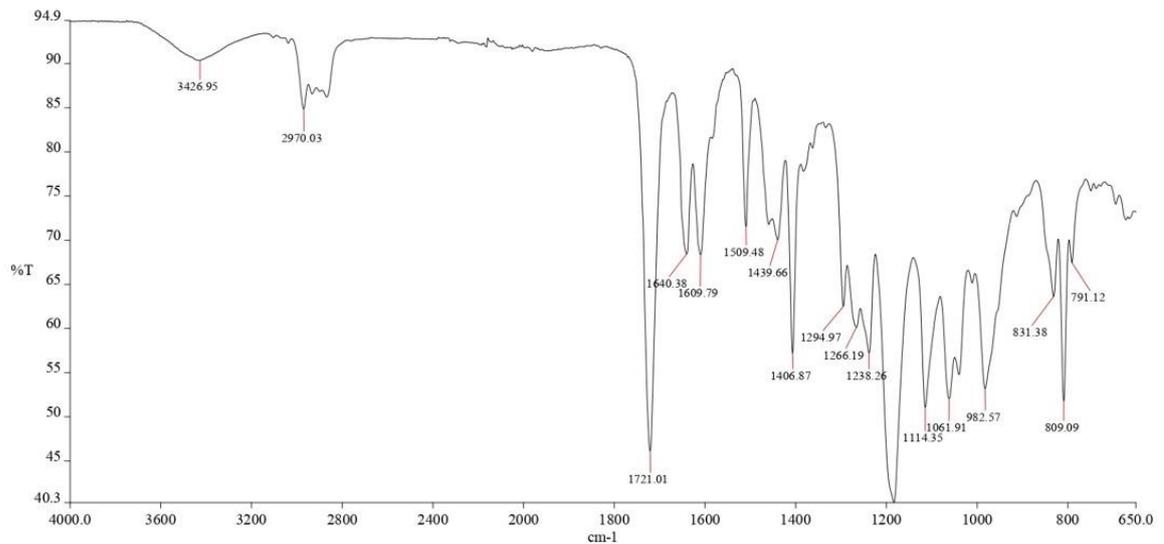


**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Departamento de Engenharia de Materiais**  
**Laboratório de Design e Seleção de Materiais**

Date: Wednesday, May 04, 2022

Time: 9:54 AM E. South America Standard Time

Resina Spin Green (verde) - líquida



## APÊNDICE B – Tabelas com os valores das análises dimensionais

Tabela 1 - Medidas do diâmetro externo do cilindro da região [F], referente à figura 20 do presente estudo.

<b>Cilindro (mm)</b>				
<b>Spin Green</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	9,74	9,74	9,72	9,73
<b>1,5</b>	9,88	9,84	9,84	9,85
<b>1,63</b>	9,88	9,86	9,87	9,87
<b>1,75</b>	9,93	9,91	9,88	9,91
<b>1,88</b>	9,92	9,94	9,94	9,93
<b>2</b>	9,93	9,89	9,88	9,90
<b>3</b>	10,01	9,97	9,93	9,97
<b>RPG Grey</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	9,95	9,96	9,96	9,96
<b>1,13</b>	9,97	9,89	9,97	9,94
<b>1,25</b>	9,92	9,9	9,88	9,90
<b>1,38</b>	9,92	9,95	9,90	9,92
<b>1,5</b>	9,96	9,96	9,99	9,97
<b>2</b>	10,03	10,02	10,01	10,02
<b>3</b>	10,12	10,08	10,07	10,09
<b>70/30 Skin</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	9,9	9,9	9,92	9,91
<b>1,5</b>	9,92	9,95	9,94	9,94
<b>1,63</b>	9,96	9,96	9,98	9,97
<b>1,75</b>	9,95	9,99	9,98	9,97
<b>1,88</b>	9,96	9,96	10,02	9,98
<b>2</b>	10,00	10,00	10,00	10,00
<b>3</b>	10,03	10,04	10,02	10,03

Tabela 2 - Medidas do diâmetro interno do furo cilíndrico da região [F], referente à figura 20 do presente estudo.

<b>Furo (mm)</b>				
<b>Spin Green</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	7,68	7,68	7,65	7,67
<b>1,5</b>	7,63	7,62	7,65	7,63
<b>1,63</b>	7,62	7,65	7,64	7,64
<b>1,75</b>	7,65	7,63	7,67	7,65
<b>1,88</b>	7,62	7,60	7,66	7,63
<b>2</b>	7,65	7,62	7,66	7,64
<b>3</b>	7,61	7,61	7,63	7,62
<b>RPG Grey</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	7,71	7,68	7,72	7,70
<b>1,13</b>	7,70	7,72	7,72	7,71
<b>1,25</b>	7,73	7,72	7,72	7,72
<b>1,38</b>	7,64	7,58	7,66	7,63
<b>1,5</b>	7,63	7,63	7,70	7,65
<b>2</b>	7,61	7,64	7,61	7,62
<b>3</b>	7,56	7,57	7,52	7,55
<b>70/30 Skin</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	7,88	7,89	7,87	7,88
<b>1,5</b>	7,73	7,77	7,74	7,75
<b>1,63</b>	7,71	7,71	7,67	7,70
<b>1,75</b>	7,80	7,85	7,83	7,83
<b>1,88</b>	7,70	7,66	7,72	7,69
<b>2</b>	7,70	7,66	7,67	7,68
<b>3</b>	7,69	7,65	7,65	7,66

Tabela 3 - Medidas da espessura da região [F], referente à figura 20 do presente estudo.

<b>Espessura (mm)</b>				
<b>Spin Green</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	0,93	0,94	0,93	0,93
<b>1,5</b>	1,04	0,98	0,95	0,99
<b>1,63</b>	1,03	0,96	0,99	0,99
<b>1,75</b>	1,02	0,99	0,98	1,00
<b>1,88</b>	1,06	1,02	1,04	1,04
<b>2</b>	1,04	1,03	1,02	1,03
<b>3</b>	1,13	1,09	1,14	1,12
<b>RPG Grey</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	1,00	0,99	1,00	1,00
<b>1,13</b>	0,98	0,99	0,99	0,99
<b>1,25</b>	1,04	1,05	1,00	1,03
<b>1,38</b>	1,07	1,07	1,06	1,07
<b>1,5</b>	1,07	1,08	1,06	1,07
<b>2</b>	1,13	1,13	1,15	1,14
<b>3</b>	1,19	1,19	1,18	1,19
<b>70/30 Skin</b>				
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>
<b>1</b>	0,92	0,91	0,91	0,91
<b>1,5</b>	0,99	1,01	1,01	1,00
<b>1,63</b>	1,02	1,02	1,00	1,01
<b>1,75</b>	0,98	0,97	1,00	0,98
<b>1,88</b>	1,02	0,98	0,96	0,99
<b>2</b>	1,03	1,01	1,04	1,03
<b>3</b>	1,09	1,07	1,08	1,08

Tabela 4 - Medidas da espessura da região [F] a partir do cálculo da metade da diferença entre diâmetro do cilindro (tabela 1 desse anexo) e o diâmetro do furo (tabela 2 desse anexo). Delta Esp. é a comparação do valor calculado por essa maneira com o valor medido com paquímetro (tabela 3 desse anexo).

<b>Diferença de Espessura (Cilindro - Furo) (mm)</b>					
<b>Spin Green</b>					
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>	<b>Delta Esp.</b>
<b>1</b>	1,03	1,03	1,04	1,03	-0,10
<b>1,5</b>	1,13	1,11	1,10	1,11	-0,12
<b>1,63</b>	1,13	1,11	1,12	1,12	-0,12
<b>1,75</b>	1,14	1,14	1,11	1,13	-0,13
<b>1,88</b>	1,15	1,17	1,14	1,15	-0,11
<b>2</b>	1,14	1,14	1,11	1,13	-0,10
<b>3</b>	1,20	1,18	1,15	1,18	-0,06
<b>RPG Grey</b>					
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>	<b>Delta Esp.</b>
<b>1,00</b>	1,12	1,14	1,12	1,13	-0,13
<b>1,13</b>	1,14	1,09	1,13	1,12	-0,13
<b>1,25</b>	1,10	1,09	1,08	1,09	-0,06
<b>1,38</b>	1,14	1,19	1,12	1,15	-0,08
<b>1,50</b>	1,17	1,17	1,15	1,16	-0,09
<b>2,00</b>	1,21	1,19	1,20	1,20	-0,06
<b>3,00</b>	1,28	1,26	1,28	1,27	-0,08
<b>70/30 Skin</b>					
<b>Tempo (s)</b>	<b>1º</b>	<b>2º</b>	<b>3º</b>	<b>Média</b>	<b>Delta Esp.</b>
<b>1</b>	1,01	1,01	1,03	1,01	-0,10
<b>1,5</b>	1,10	1,09	1,10	1,10	-0,09
<b>1,63</b>	1,13	1,13	1,16	1,14	-0,12
<b>1,75</b>	1,08	1,07	1,08	1,07	-0,09
<b>1,88</b>	1,13	1,15	1,15	1,14	-0,16
<b>2</b>	1,15	1,17	1,17	1,16	-0,14
<b>3</b>	1,17	1,20	1,19	1,18	-0,10

## ANEXO A – Informações sobre as resinas

Composição das resinas – Informações disponibilizadas pela empresa Quanton3D por solicitação via email no dia 18/03/2022.

Classificação segundo as regulamentações (EC) nº 1272/2008

Nome Químico	Porcentagem em Peso (%)	Classificação segundo as regulamentações (EC) nº 1272/2008
<b>Monômeros Acrilados</b>	≥ 50%	Irrit. Olhos 2A(H319) Sens. Pele 1(H317) Irrit. Pele 2(H315) Aquático Cron. 2(H411)
<b>Epoxi Acrilada</b>	≤ 50%	Irrit. Olhos 2A(H319) Sens. Pele 1(H317) Irrit. Pele 2(H315) Aquático Cron. 2(H411)
<b>Pigmento</b>	≤ 1%	Irrit. Olhos 2A(H319) Sens. Pele 1(H317)
<b>Bis(2,4,6-trimetilbenzoil) - Fenilfosfineóxido</b>	≤ 10%	Irrit. Olhos 2A(H319) Sens. Pele 1(H317) Irrit. Pele 2(H315) Aquático Cron. 2(H411)

Preço de compra por litro das resinas:

*Spin green* (verde) – R\$200,00.

*70/30 skin* (alaranjada) – R\$259,00.

*RPG grey* (cinza) – R\$299,00.

Valores obtidos pelo site <<https://www.quanton3d.com.br>> no dia 05/05/2022