



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Viviane Pestano

**PROCESSO DE SUAUIZAAÇÃO COM VAPOR DE ACETONA APLICADO A
SUPERFÍCIES IMPRESSAS POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO DE ABS**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2022

VIVIANE PESTANO

**PROCESSO DE SUAUIZAÇÃO COM VAPOR DE ACETONA APLICADO A SUPERFÍCIES
IMPRESSAS POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO DE ABS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Pinto da Silva

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação da Publicação

Pestano, Viviane

Processo de suavização com vapor de acetona aplicado a superfícies impressas por extrusão de filamento de ABS / Viviane Pestano. -- 2022.

91 f.

Orientador: Fábio Pinto da Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Design e tecnologia. 2. Design de superfície. 3. Textura bioinspirada. 4. Impressão 3D por extrusão de filamento. 5. Digitalização 3D. I. Silva, Fábio Pinto da, orient. II. Título.

Viviane Pestano

**PROCESSO DE SUAUIZACÃO COM VAPOR DE ACETONA APLICADO A SUPERFÍCIES
IMPRESSAS POR EXTRUSÃO DE FILAMENTO DE ABS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 02 de Dezembro de 2022.

Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva**

Programa de Pós-Graduação em Design (PGDESIGN/UFRGS)

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Programa de Pós-Graduação em Design (PGDESIGN/UFRGS) - Examinador Interno

Prof. Dr. Fábio Gonçalves Texeira

Programa de Pós-Graduação em Design (PGDESIGN/UFRGS) - Examinador Interno

Prof. Dr. Everton Sidnei Amaral da Silva

Departamento de Design e Expressão Gráfica (DEG/UFRGS) - Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) —, Programa de Demanda Social. Além desse, não poderia deixar de agradecer ao meu orientador o Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva que sempre esteve presente quando precisei de direcionamento no meu trabalho. Também não poderia deixar de agradecer a todo corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Mestrado e Doutorado da UFRGS (PGDESIGN) que, de alguma forma, influenciaram na minha qualificação profissional. Dentre esses professores dedicados, minha imensa gratidão a todos os docentes do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM), onde tive a honra de trabalhar como bolsista de iniciação científica (BIC UFRGS, PIBITI Cnpq-UFRGS e IE-MULTI) durante muitos anos de minha graduação. Nesta fase específica peguei apreço a pesquisa e inovação, motivo pelo qual, estou me tornando Mestra em Design.

Continuo alongando meus agradecimentos a todos colegas do LDSM, pois com a ajuda deles estou concluindo esta etapa e alguns nomes precisam ser citados. Obrigada Jaqueline Dilly pela parceria que criamos, desde quando eu era tua bolsista, e hoje és minha irmã de coração, ao Gabriel Barbieri que sempre compartilhou seus conhecimentos e pelos desabafos trocados, Fernando Ximenes sempre tão solícito, a Prof. Dr^a. Mariana Pohlmann de Oliveira que sempre foi amiga e me deu um gás na reta final e ao Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior que sempre me estimulou a ser pesquisadora científica e, além disso, me deu a honra de realizar meu estágio docência com sua orientação construtiva. Quero também estender um abraço bem apertado a todos os colegas da Pós-Graduação com quem compartilhei trabalhos e momentos bons durante este período.

Para concluir, não poderia deixar de agradecer ao meu maior incentivador deste longo percurso, o meu companheiro de todas as horas, Lissandro Cantídio de Souza, pois sem ti, meu amor, nada disso teria acontecido. Te amo.

RESUMO

PESTANO, V. **Processo de suavização com vapor de acetona aplicado a superfícies impressas por extrusão de filamento de abs.** 2022. 91 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Pesquisas recentes indicam que as tecnologias em Manufatura Aditiva (MA) serão protagonistas da nova revolução industrial. Dentro dos sistemas existentes o mais conhecido é o de fabricação por extrusão de filamento. Contudo, o grande entrave comercial para a utilização da extrusão de filamento é o acabamento superficial final do produto impresso, devido ao aspecto escadaria característico do processo. Por esse motivo, muitos estudos estão focados em solucionar a questão superficial. A principal matéria prima escolhida, nos estudos encontrados na revisão literária é o polímero ABS (*acrilonitrila butadieno estireno*). Essas pesquisas indicam que podem ocorrer distorções dimensionais ao objeto impresso após a exposição de alisamento com o uso de solventes apolares (acetona). Desta forma, e tendo em vista que texturas tridimensionais propositivas em objetos impressos 3D podem deformar quando em contato com a acetona. Por isto, foi realizado um estudo metodológico para a criação de novas texturas tridimensionais bioinspiradas. As conclusões deste trabalho foram que a técnica de suavização do efeito escada com os vapores de acetona fria proporciona uma superfície bem alisada; porém, é imperativo cuidar o tempo de aplicação, pois acima dos 30 minutos a deformação das geometrias são maiores. Também é necessário observar o ângulo de inclinação da peça antes da suavização para que não ocorra acúmulo de polímero dissolvido após a secagem. Além disso, é importante observar o sentido de impressão da textura bioinspirada, uma vez que foi notado que a impressão no sentido vertical das formas geométricas projetadas ficam mais intactas.

Palavras-chave: design e tecnologia, design de superfície, textura tátil, textura bioinspirada, impressão 3D por extrusão de filamento, digitalização 3D.

ABSTRACT

PESTANO, V. **Smoothing process with acetone vapor applied to printed surfaces by extruding ABS filament**. 91 f. Dissertation (Master in Design) – School of Engineering / Faculty of Architecture, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Recent researches indicate that technologies in Additive Manufacturing (AM) will be the protagonists of the new industrial revolution. Among the existing systems, the best known is filament extrusion manufacturing. However, the major commercial obstacle to the use of extrusion manufacturing is the final surface finish of the printed product, due to the staircase characteristic of the process. For this reason, many studies are focused on solving the superficial issue. The main feedstock chosen in the studies found in the literature review is the ABS polymer (acrylonitrile butadiene styrene). These studies indicate that dimensional distortions may occur to the printed object after exposure to smoothing with the use of non-polar solvents (acetone). In this way, and considering that propositional three-dimensional textures in 3D printed objects by FFM can deform when in contact with acetone. For this reason, a methodological study was carried out for the creation of new bioinspired three-dimensional textures. The conclusions of this work were that the staircase effect smoothing technique with cold acetone vapors provides a well smoothed surface; however, it is imperative to take care of the application time, as over 30 minutes the deformation of the geometries is bigger. It is also necessary to observe the angle of inclination of the part before smoothing so that there is no accumulation of melted polymer after drying. In addition, it is important to observe the sense of impression of the bioinspired texture, since it was noticed that the impression in the vertical sense of the projected geometric shapes get more intact.

Keywords: design and technology, surface design, tactile texture, bioinspired texture, 3D printing by extrusion manufacturing, 3D scanning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema construtivo da impressora 3D por filamento fundido. -----	21
Figura 2: Esquema da suavização da superfície utilizando vapor de acetona. -----	22
Figura 3: Representação figurativa da técnica de imersão realizada pelos pesquisadores Galantucci, Lavecchia e Percoco (2009). -----	24
Figura 4: Imagem da estação de suavização Finishing Touch. -----	25
Figura 5: Imagens dos modelos de implantes de quadril e de fêmur. -----	26
Figura 6: Representação figurativa da técnica de suavização da superfície com vapor aquecido de acetona. -----	27
Figura 7: Ilustração do corpo de prova do estudo de Cunico <i>et al.</i> (2017). -----	27
Figura 8: Representação da técnica de suavização da superfície com vapor frio de acetona. -----	28
Figura 9: Peças e orientações da impressão 3D por extrusão de filamento em três sentidos construtivos das peças: vertical, perpendicular, horizontal. -----	29
Figura 10: Imagem da peça de teste projetada por Lalehpour; Janeteas; Barari (2017). -----	29
Figura 11: Imagem do corpo de prova do estudo do Neff; Trapuzzano; Crane (2018). -----	30
Figura 12: Componentes que contribuem para a criação de texturas em superfícies. -----	33
Figura 13: Sistema de repetição com suas possíveis variâncias. -----	34
Figura 14: Texturas aplicadas em mouse via fabricação por usinagem.-----	35
Figura 15: Alguns acabamentos disponibilizados pela Kurz.-----	35
Figura 16: Formas de manejo. -----	36
Figura 17: Objetos texturizados catalogados por tipos de manejo – fino, grosso, fino/grosso. -----	37
Figura 18: Esquema do contato entre o dedo e a superfície texturizada do objeto e da posição dos mecanorreceptores na pele. -----	40
Figura 19: Imagens macroscópica do carrapicho e microscópica do Velcro.-----	43
Figura 20: Exemplo de texturas extraídas de formas naturais. -----	45
Figura 21: Fluxograma das etapas da dissertação. -----	46
Figura 22: Ilustração do sentido construtivo da amostra na mesa de impressão-----	47

Figura 23: . Peça teste com picos e vales de 5 mm e dimensões externas totais de 30x30x15 mm (largura, profundidade e altura).-----	47
Figura 24: Imagem das amostras testes com geometrias concavas e convexas com picos e vales de 4 mm, 3 mm, 2 mm.-----	49
Figura 25: Sentido construtivo das amostras com picos e vales de 2 mm, 3 mm e 4 mm. -----	49
Figura 26: Análise de rugosidade do efeito escada deixado pela impressão 3D. ----	50
Figura 27: Análise visual das peças originais e após exposição ao vapor de acetona. -----	52
Figura 28: MEV das peças impressas no sentido horizontal com picos e vales de 2 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona. -----	54
Figura 29: MEV das peças impressas no sentido horizontal com picos e vales de 3 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona. -----	55
Figura 30: MEV das peças impressas no sentido horizontal com picos e vales de 4 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona. -----	56
Figura 31: MEV das peças impressas no sentido vertical com picos e vales de 2 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona. -----	58
Figura 32: MEV das peças impressas no sentido vertical com picos e vales de 3 mm originais e após exposição ao vapor de acetona. -----	59
Figura 33: MEV das peças impressas no sentido vertical com picos e vales de 4 mm originais e após exposição ao vapor de acetona. -----	60
Figura 34: Comparação 3D das amostras com picos e vales de 5 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona. -----	62
Figura 35: Comparação 3D entre as peças antes e depois da exposição ao vapor de acetona. -----	65
Figura 36: Malha gerada após a montagem das nuvens de pontos.-----	67
Figura 37: Ilustração das principais formas extraídas da concha bivalve para a criação do módulo por simplificação da forma.-----	69
Figura 38: Ilustração do sentido de impressão da textura teste e imagem após impressão. -----	73
Figura 39: Imagem da amostra da textura bioinspirada após 30 minutos de exposição ao vapor de acetona fria.-----	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Escalonamento das texturas táteis com dimensões em mm, percebidas pelo toque humano.-----	41
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Palavras chaves utilizada na RBS. -----	23
Quadro 2: Prós e contras de cada técnica aplicada na suavização do efeito escada com o uso de acetona. -----	31
Quadro 3: Tempo de exposição das amostras ao vapor de acetona -----	48
Quadro 4: Elemento natural que traduziu os adjetivos esperados em uma macrotextura tátil — a concha do molusco Bivalve da família Cardiidae. -----	66
Quadro 5: opções de <i>rappports</i> utilizando múltiplas geometrias.-----	68
Quadro 6: Opções de <i>rappports</i> utilizando volumetria plana.-----	71
Quadro 7: Imagens de MEV e Lupa Estereoscópica da amostra da textura bioinspirada antes e depois da suavização com os vapores de acetona fria. -----	75
Quadro 8: Análise da comparação 3D da amostra com a textura bioinspirada. -----	76

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Computer-Aided Design
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
JCR	Journal Citation Report
MA	Manufatura Aditiva
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NURBS	Non-Uniform Rational Bézier Splines
OBJ	Object File Wavefront 3D
P.A.	Pura para análise
PP	Polipropileno
RMS	(Root Mean Square) ou raiz quadrática média
SL	estereolitografia
STL	Standard Triangle Language
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema de pesquisa	16
1.2	Hipótese	17
1.3	Objetivos	17
1.4	Justificativa	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Manufatura aditiva e impressão 3D	19
2.2	Suavização do ABS com vapor de acetona	21
2.2.1	Imersão em solução de acetona	24
2.2.2	Vapor de acetona aquecido	25
2.2.3	Vapor de acetona fria	28
2.2.4	Comparação entre as técnicas	30
2.3	Texturas em objetos para uso manual	31
2.4	Percepção: Sentido Tátil e Sistema Háptico	38
2.5	Usando os princípios da Biomimética para a inspiração e criação de texturas.	41
2.6	Digitalização 3D como método de extração das texturas bioinspiradas	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Estudo dos parâmetros da suavização do efeito escada com os vapores de acetona fria com as peças testes padrões.	46
3.2	Corpos de prova: produção e suavização da superfície	46
3.3	Corpos de prova: análises superficiais e análise dimensional	50
3.3.1	Análise de rugosidade	50
3.3.2	Análise visual por meio de equipamentos	51
3.3.3	Análise do desvio dimensional	51
4	RESULTADOS	52
4.1	Índice de rugosidade	52
4.2	Análises visuais por lupa estereoscópica e MEV	52
4.2.1	Peças impressas na orientação horizontal	53
4.3	Peças impressas na orientação vertical	57
4.4	Análise do desvio geométrico	61
5	ESTUDO DE CASO: TEXTURAS BIOINSPIRADAS EM OBJETOS PARA USO MANUAL	66
5.1.1	Inspirações na natureza	66
5.1.2	Digitalização 3D da concha do molusco bivalve	67
5.1.3	Criação do <i>rapport</i> bioinspirado	68
5.1.4	Impressão da amostra com o <i>rapport</i> definido	72
5.1.5	Suavização com os vapores de acetona fria na amostra da textura bioinspirada.	73
6	CONCLUSÃO	78
6.1	Sugestões para estudos futuros	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A – Detalhamento do método de suavização com vapor de acetona fria.	90

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia da manufatura aditiva (MA) foi desenvolvida em 1986 por Charles Hull e hoje é considerada a tecnologia que mais tem se desenvolvido devido a sua ampla aceitação em vários segmentos da indústria. A tecnologia de MA traz consigo agilidade de construção, redução de desperdício de material e liberdade de design e automação em alguns processos construtivos. Um dos maiores motivos do impulsionamento e da disseminação dessa tecnologia se deve aos vencimentos das patentes, possibilitando, assim, a fabricação de equipamentos com custos mais reduzidos que hoje estão chegando às universidades, escolas e residências (NGO *et al.*, 2018).

As impressoras 3D detêm grandes benefícios quanto aos custos e prazos de produção de modelos, protótipos e maquetes devido a sua agilidade construtiva. Contudo, algumas indústrias já apostam neste processo como meio de produção, não somente de produtos exclusivos, como também para a linha de produção em massa, sendo uma excelente forma de redução de estoques ociosos (BERMAN, 2012). As pesquisas de Berman (2011) e Jiang; Kleer; Piller (2017) identificam as impressoras 3D como o meio produtivo que mais crescerá nas próximas décadas, não somente para os meios industriais, mas também nos meios domiciliares.

Nesse contexto, o processo que mais vem se popularizando é o fabricação por extrusão de filamento que utiliza material polimérico como matéria-prima. Um dos polímeros utilizados nesse processo de fabricação é o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), que também é muito empregado na indústria automotiva para a fabricação dos para-choques, assentos, painel de controle, entre outros. Porém, a impressão 3D por extrusão de filamento possui limitações a serem resolvidas, como agilidade de fabricação e acabamento superficial; esta segunda é identificada como a principal barreira, já que a superfície final do objeto impresso apresenta um aspecto de escada devido às camadas de deposição do fio extrudado (ZHANG, 2017).

Buscando melhorar o acabamento superficial das peças produzidas pelo processo fabricação por extrusão de filamento, vários estudos vêm sendo realizados (LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2018; SINGH, R. *et al.*, 2017; etc.). O ABS é o principal alvo dessas pesquisas, pois este polímero possui uma característica amorfa, ou seja, não possui ponto de fusão verdadeiro, fazendo com que sua interação com

solventes polares seja fraca. Dos solventes polares, a acetona é o agente químico mais utilizado nos procedimentos de suavização da superfície em ABS, pois é mais seguro devido seu baixo nível de toxicidade, além do custo reduzido (LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2018).

Singh; Singh; Singh (2017); Singh, R. *et al.* (2017); Singh; Singh; Singh Boparai (2018) e Chohan; Singh; Boparai (2018, 2020) fizeram testes com próteses ortopédicas visando identificar a perda dimensional das peças após a suavização com o vapor de acetona, com objetivo de prever os desvios e ajustá-los no desenho CAD (Projeto Auxiliado por Computador, do inglês, *Computer-aided Design*) antes de realizar a impressão 3D. Esta questão mensural foi alvo do presente estudo, pois as texturas em superfícies são caracterizadas como geometrias, com picos e vales, introduzidas nas faces de um objeto sólido com alturas e formas diferenciadas, as quais podem ser bastante influenciadas por este tipo de tratamento superficial (TYMMS; ZORIN; GARDNER, 2018).

As texturas proporcionam vários atributos tangíveis e intangíveis aos objetos. A idealização das texturas é dada através da técnica de *rapport* – fator resultante de um padrão com detalhes estruturados ou distribuídos aleatoriamente (HOLLINS *et al.*, 2000; SCHIFFERSTEIN; SONNEVELD, 2008). Esses padrões podem variar trazendo aspectos orgânicos, geométricos e funcionais. Um exemplo de texturas funcionais são as inspiradas na natureza (biomimética) que, quando introduzidas ao objeto, elas podem, por exemplo, diminuir o brilho da superfície, proporcionar autolimpeza, entre outros (ARRUDA, 2018; LÓSS; JANSEN, 2015).

A bioinspiração está inserida ao macro conceito que integra a biônica e a biomimética: aprender com a natureza e utilizá-la como fonte de inspiração. O Design bioinspirado é o estudo da forma de um elemento natural e de suas possíveis soluções para um determinado problema (MORENO GRANDAS *et al.*, 2015). As texturas criadas inspiradas na natureza, em suas devidas escalas, podem proporcionar às superfícies características funcionais (nano/microtextura), ou figurativas (macro/megatextura) (DISCHINGER, 2009; DETANICO; TEIXEIRA; SILVA, 2010; MALSHE *et al.*, 2013; REIS, 2013; CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015; SANTOS, 2018).

Este estudo pretende integrar, de forma científica, o uso da impressora 3D por extrusão de filamento como meio construtivo dos protótipos de novos produtos com

texturas tridimensionais bioinspiradas, cuja interação tátil é indispensável. Além desses, pretende-se utilizar os vapores da acetona para minimizar o efeito escada característico do processo fabricação por extrusão de filamento. Com esses conceitos definidos, realizou-se uma pesquisa exploratória que identificou uma lacuna que relacionasse os três assuntos referidos.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A impressão 3D por fabricação por extrusão de filamento, apesar de sua popularização e baixo custo, produz peças com uma rugosidade característica devido à deposição de material em camadas. Este aspecto áspero pode influenciar negativamente as características táteis de objetos, principalmente quando sua superfície foi projetada com textura tridimensional.

Os parâmetros de suavização do efeito escada, deixada pela impressão 3D por extrusão de filamento, utilizando o vapor de acetona são diferentes para cada metodologia. Por exemplo, quando se utiliza vapor de acetona quente é necessário utilizar menor tempo de exposição com maiores números de ciclos, pois o calor faz o polímero reagir mais rápido, podendo assim, deformar a forma do objeto. Já na exposição de acetona fria os tempos podem ser maiores, sem a necessidade de repetição da técnica. Desta forma, conhecer essas diferenças pode auxiliar na escolha da técnica que melhor se enquadra ao escopo do projeto.

Além disso, as texturas bioinspiradas podem ser um elemento de dificuldade, já que essas geometrias estruturais muitas vezes se mostram complexas e diminutas. Desta forma, há uma dificuldade tanto para reproduzi-las via impressão 3D por extrusão de filamento, quanto para sua posterior suavização com vapor de acetona.

Mediante o exposto, a pergunta é: como os parâmetros de suavização, por meio dos vapores de acetona, influenciam no acabamento das peças impressas e no dimensionamento final em texturas obtidas por digitalização 3D suavizadas com vapor de acetona?

1.2 HIPÓTESE

Como os parâmetros de suavização do ABS com o vapor de acetona podem minimizar o efeito escada característico da impressão 3D por extrusão de filamento e também tornar mínima a perda dimensional de detalhes superficiais, permitindo, assim, a utilização de texturas em protótipos ou produtos produzidos por impressão 3D.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da suavização da superfície de peças produzidas em impressão 3D por extrusão de filamento com vapor de acetona, a fim de obter objetos com texturas bioinspiradas. Para que esse objetivo seja alcançado, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Entender os métodos e parâmetros — tempo de exposição, temperatura do ambiente e volume de acetona — atualmente utilizados para a suavização do efeito escada resultante da impressão 3D por extrusão de filamento;
- b. Identificar parâmetros de suavização do ABS com vapor de acetona e analisar a perda dimensional de peças impressas por fabricação por extrusão de filamento após a aplicação do procedimento;
- c. Aplicar a técnica com melhor resultado em uma texturas bioinspiradas.

1.4 JUSTIFICATIVA

As características positivas da impressão 3D são responsáveis por seu crescimento e sua importância no futuro da revolução industrial (BERMAN, 2012; JIANG; KLEER; PILLER, 2017). Do mesmo modo, suas limitações são responsáveis por vários estudos científicos. Um exemplo é o acabamento superficial das impressoras 3D por extrusão de filamento, pois este tipo de fabricação deixa ao longo do objeto um aspecto rugoso devido às camadas de deposição (ZHANG, 2017). A técnica de tratamento com vapor de acetona vem sendo estudada e praticada para solucionar esta questão em filamentos de polímeros em ABS (GALANTUCCI; LAVECCHIA; PERCOCO, 2009; LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2018).

Conhecer os parâmetros que integram a impressão 3D por extrusão de filamento e a suavização por vapor de acetona possibilitará o uso de protótipos finalizados em diversas aplicações, como, por exemplo: na fundição e modelagem a vácuo, corpos de sacrifícios para moldes e em outros processos de produção. Contudo, cabe salientar que a fabricação dos protótipos a serem testados (*marketing teste*) necessitam um acabamento superficial mais próximo ao produto final. Todas as possibilidades visam um método que proporcione custo e tempo de produção reduzidos (BERMAN, 2011; SINGH *et al.*, 2017).

O acabamento superficial é particularmente importante no design de produtos (SILVA, 2006; SILVA *et al.*, 2009). A maioria das pesquisas em texturas inspiradas na natureza orbitam estudos em escalas nano e micro, buscando alguma funcionalidade (MALSHE *et al.*, 2018). Em vista à escassa literatura sobre texturas bioinspiradas, destaca-se a importância de conduzir estudos que contribuam para a criação deste tipo de elemento em projetos de objetos, principalmente os de uso manual como mouses, embalagens, ferramentas e etc.

Segundo Lida e Guimarães (2016), as ferramentas de uso manual, como facas, alicates, martelos, etc., são os maiores causadores de acidentes domésticos. Eles também apontam que questões ergonômicas, como uma boa pega, podem reduzir os ferimentos por manuseio dessas ferramentas. Da mesma forma, tanto as texturas, quanto o acabamento superficial, influenciam, positiva ou negativamente, na usabilidade de ferramentas (IIDA, 2005).

Unindo esses dois campos de pesquisa — Impressão 3D com posterior suavização da superfície mais texturas bioinspiradas — servirá como uma ótima ferramenta de trabalho tanto na área acadêmica, quanto na criação de protótipos e produtos bem definidos e de fácil fabricação. À vista disso, esta pesquisa irá conectar os assuntos, pois assim, um leque de possibilidades será aberto para criação de novos produtos com texturas propositivas sem a interferência do meio produtivo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo versa sobre tópicos relacionados à impressão 3D por extrusão de filamento e seu processo de suavização com vapor de acetona. Esse embasamento fornece subsídios para a criação de texturas bioinspiradas passíveis de serem aplicadas em objetos de uso manual.

2.1 MANUFATURA ADITIVA E IMPRESSÃO 3D

O termo “impressão 3D” é vinculado, cada vez mais, com as tecnologias de Manufatura Aditiva (MA), no entanto, apesar de ambas as tecnologias terem se inspirado em processos 2D (litografia e impressão) que se estende para a terceira dimensão (eixo Z), os dois termos descrevem tecnologias diferentes.

Historicamente a estereolitografia (SL) é o primeiro método construtivo que segue o conceito do processo da MA e foi desenvolvida pela empresa americana 3D Systems. Já a impressão 3D obteve um salto tecnológico por meio dos pesquisadores da MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), que se inspiraram nas impressoras jato de tinta. Contudo, a ideia de uma impressão tridimensional faz mais sentido ao usuário, desta forma o termo “Impressão 3D” popularizou-se e vem criando uma junção entre as duas tecnologias (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2019).

Existem várias classificações para os processos de MA. A mais popular é fazê-lo de acordo com a tecnologia da linha base: processo a laser, tecnologia de impressão, tecnologia de extrusão, etc. Porém, também há outras classificações advindas por tipo de matéria prima utilizada. Contudo, de acordo com a segunda edição do comitê de norma técnica ASTM F42 e ISO/TC 261, a melhor classificação, e a mais atual, é a separação por grupos, cujos processos de fabricação sejam comuns ao tipo de máquina de transformação. Logo, esses grupos podem utilizar matérias-primas diferentes (polímero, metal, resina, etc.), desde que sejam separados pelo seu mecanismo de transformação (VOLPATO, 2017):

Segundo Berman (2012, 2020), a impressão 3D será a nova tecnologia disruptiva que permitirá às empresas alcançarem pequenos segmentos de mercado de maneira lucrativa, e, por este motivo, a MA tem sido cada vez mais estudada e introduzida pelas indústrias.

A principal vantagem de utilizar a impressão 3D permeia a produção de produtos personalizados, nesta, a produção é caracterizada como baixa e média escala. Outra vantagem interessante é o *Bridge Manufacturing* — transformar um produto de produção reduzida em produção de larga escala —, com a garantia de um projeto bem solucionado (BERMAN, 2012). Para os pesquisadores Jiang, Kleer e Piller (2017), os estudos constantes dentro das academias auxiliam nas soluções dos problemas que ainda existem neste meio produtivo, esses estudos ajudarão na introdução da tecnologia da MA nas grandes indústrias, criando novas oportunidades de mercado.

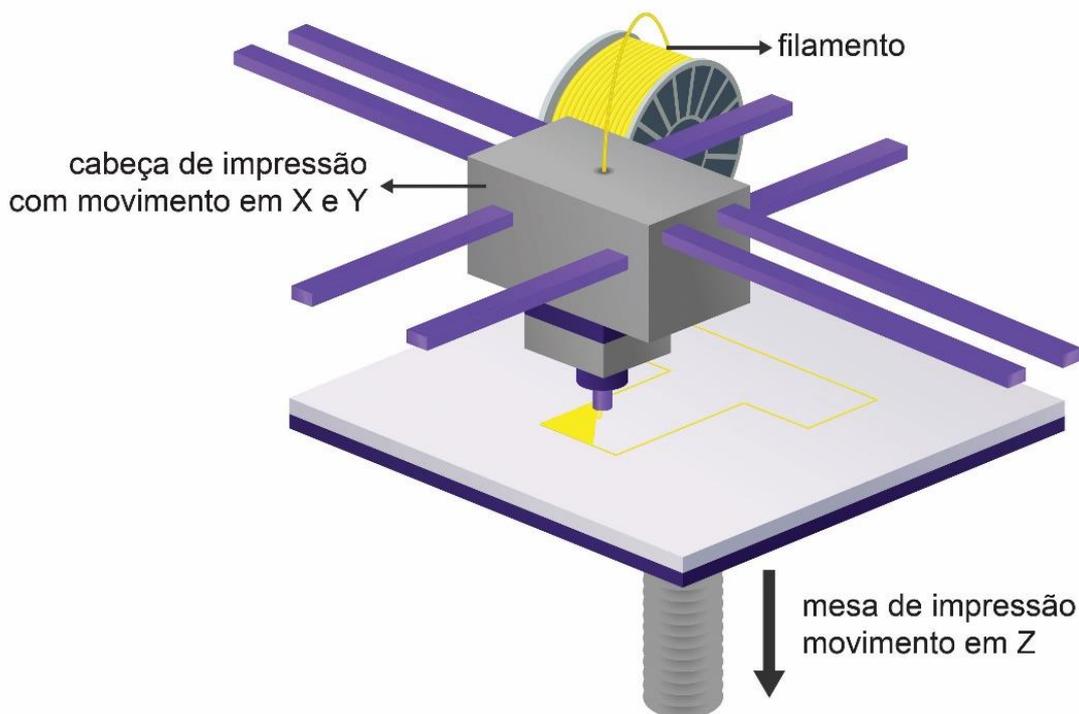
Das tecnologias mais conhecidas no processo de impressão 3D por extrusão de material estão a Modelagem por Fusão e Deposição — FDM (*Fused Deposition Modeling*) — e a Fabricação por Filamento Fundido — FFF (*Fused Filament Fabrication*) — (KILLI, 2017).

A Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) é uma tecnologia desenvolvida pelo fundador da empresa Stratasys - Scott Crump em 1990. Esse tipo de processo construtivo utiliza filamento de material polimérico, em estado sólido, que, ao passar por um cabeçote aquecido, é fundido e, na sequência, é depositado por meio de um bico extrusor. Este percorre o plano da mesa de impressão no sentido X e Y, ao fim da extrusão a mesa de deposição se desloca no eixo Z para começar a camada superior (Figura 1), seguindo assim, até concluir a forma final programada (CAMPOS, 2011).

A Fabricação por Filamento Fundido (FFF) foi gerada pela RepRap, após o vencimento da patente de Scott Crump. Trata-se de um equipamento de prototipagem rápida de código aberto e autorreplicadora, ou seja, é possível imprimir suas peças para a reposição, ou construção, e seu programa é gratuito. A forma construtiva da FFF é a mesma do processo FDM (Figura 1) (JONES *et al.*, 2011).

Devido a facilidade de acesso e o crescimento das impressoras 3D por extrusão de filamento este tipo de equipamento foi utilizado neste trabalho.

Figura 1: Esquema construtivo da impressora 3D por filamento fundido.

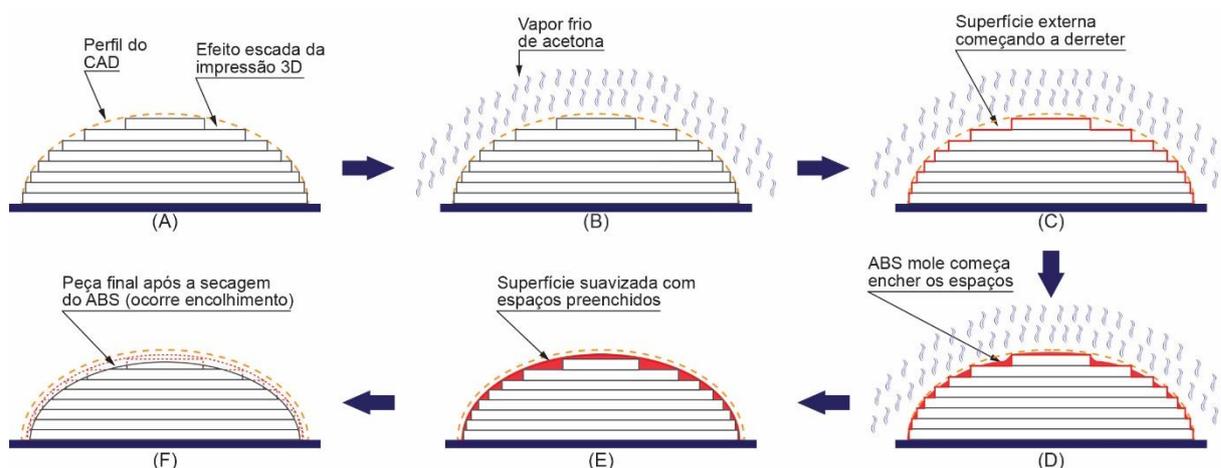


Fonte: adaptado de Additive (2019).

2.2 SUAVIZAÇÃO DO ABS COM VAPOR DE ACETONA

O processo de fabricação por filamento fundido possui algumas barreiras, uma delas é o efeito escada deixado na superfície do objeto finalizado (GALANTUCCI; LAVECCHIA; PERCOCO, 2009). Muitos pesquisadores vêm buscando uma solução viável para tornar o acabamento dos produtos impressos mais alisados. Uma técnica muito utilizada é o vapor da dimetilcetona, ou acetona dimetílica (acetona). Segundo Garg *et al.* (2017), os vapores de acetona reagem dissolvendo as camadas de ABS, tanto na superfície da amostra quanto na sua estrutura interna (Figura 2). Isto ocorre porque a butanona da acetona e o butadieno do ABS correspondem à mesma família e à mesma estrutura orgânica; essa similaridade dos solventes possibilita a quebra das cadeias carbônicas do ABS. Quando isto acontece, as cadeias poliméricas do ABS escorregam lentamente umas sobre as outras, procurando um arranjo mais estável (Figura 2D). Desta forma, o polímero amolecido alisa a superfície texturizada do ABS impresso (Figura 2E). Por fim, ao retirar a amostra do meio com o vapor de acetona, o ABS volta à sua dureza inicial, e suas camadas internas estarão bem ligadas à superfície externa. Contudo, cabe salientar que ao final do processo existirá uma redução dimensional final do objeto impresso (Figura 2F).

Figura 2: Esquema da suavização da superfície utilizando vapor de acetona.



Nota: (A) partes construídas; (B) introdução do vapor frio de acetona; (C) início da suavização; (D) preenchimento dos espaços vazios; (E) superfície suavizada; e (F) peça finalizada.

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

Na busca por estudos que analisaram a suavização superficial com vapor de acetona em peças impressas em ABS, foram identificadas onze publicações. Para tal, optou-se pelo roteiro estipulado por Conforto; Amaral; Silva, (2011), denominada como Revisão Bibliográfica Sistemática *Roadmap*. Para os artigos sobre impressão 3D os critérios de inclusão e qualificação foram o material de extrusão — ABS — e o meio de suavização — acetona —, todos de livre acesso via portal capes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Outro fator de corte dos artigos foi a relevância das revistas/jornais publicados seja por sua classificação via Capes, ou pela relevância de seu Fator de Impacto JCR (*Journal Citation Reports*).

A pesquisa foi realizada em outubro de 2018, Usando os filtros do portal de periódicos da CAPES. Um desses filtros foi a linha de tempo de abrangência da pesquisa — 2016 a 2018 —. Além da cronológico temporal foi usado 16 palavras chaves (Quadro 1) na língua portuguesa e inglesa. Por fim, foi estipulado que a conclusão da RBS seria em Janeiro de 2019.

A fim de atualização da pesquisa foi realizada uma nova busca e as referências encontradas foram complementadas ao corpo do trabalho.

Após a leitura dos artigos que passaram nas fases de processamento e das referências cruzadas, identificadas durante este processo, foram separados dez artigos referenciais.

Quadro 1: Palavras chaves utilizada na RBS.

STRINGS	LÍNGUA INGLESA	LINGUA PROTUGUESA
FDM process and vapor smoothing	FDM	FDM
	Fused deposition modelling	Modelagem por deposição de material fundido
	3D print	Impressão 3D
	Additive manufacturing	Manufatura aditiva
	Rapid prototyping	Prototipagem rápida
	ABS	ABS
	Acrylonitrile butadiene styrene	Acrilonitrila butadieno e estireno
	Vapour smoothing	Suavização com vapor
	Surface roughness	Rugosidade da superfície
	Mechanical properties	Propriedades mecânicas
	Surface finish	Acabamento de superfície
	Chemical vapor smoothing	Suavização de vapor químico
	FDM, dimensional Accuracy	FDM, precisão dimensional
	Material extrusion	Extrusão de material
	Product design	Projeto de produto
Industrial design	Desenho industrial	

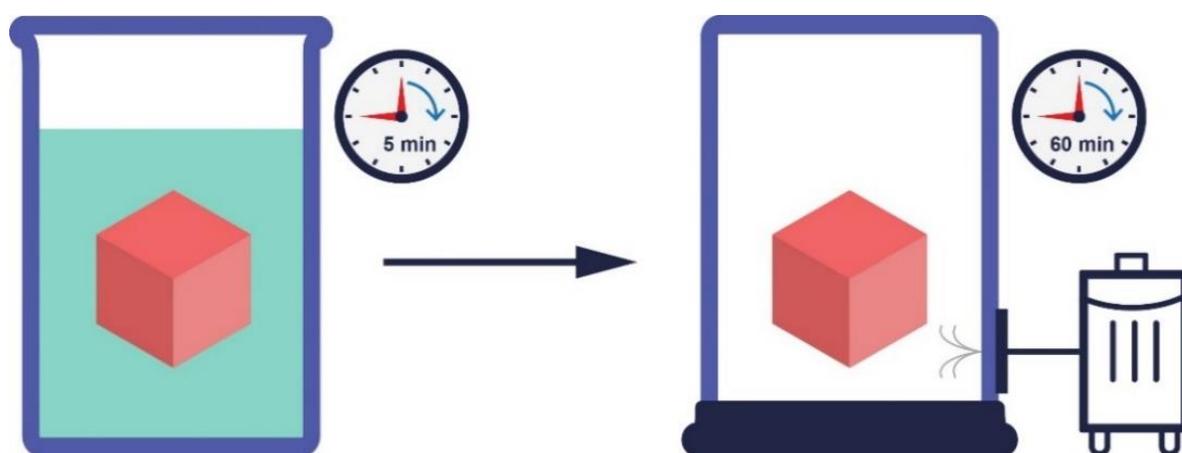
Fonte: Autora.

Um trabalho que utilizou a imersão da peça em uma mistura de 90% de acetona com 10% de água (GALANTUCCI; LAVECCHIA; PERCOCO, 2009). Seis utilizaram algum sistema de vapor aquecido com temperaturas variando entre os 30 °C e 70 °C (CHOHAN; SINGH; BOPARAI, 2016, 2018; CUNICO *et al.*, 2017; PIETANZA; SORGENTE; PERCOCO, 2018; SINGH; SINGH; SINGH, 2017; SINGH *et al.*, 2017); cinco utilizando vapor de acetona com temperaturas mais frias, variando de 18 °C a 22 °C (GARG; BHATTACHARYA; BATISH, 2017; LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2018; NEFF; TRAPUZZANO; CRANE, 2018; POPESCU *et al.*, 2021; ROMERO *et al.*, 2021),

2.2.1 Imersão em solução de acetona

Os pesquisadores Galantucci, Lavecchia e Percoco (2009) foram identificados nos artigos mais recentes, como os precursores nesse tipo de estudo. Sua técnica foi a imersão das peças impressas 3D por extrusão de filamento em uma mistura de 10% de água com 90% de acetona por 5 minutos (Figura 3). A secagem e a estabilidade dos objetos impressos em ABS foram dadas por meio de um recipiente com vácuo em temperatura ambiente por uma hora.

Figura 3: Representação figurativa da técnica de imersão realizada pelos pesquisadores Galantucci, Lavecchia e Percoco (2009).



Fonte: Autora.

Foram realizadas 3 repetições no total de 24 de experimentos em uma peça retangular de 18 mm x 18 mm x 8 mm. Para a medição da rugosidade foram utilizados dois equipamentos: o rugosímetro (de contato físico) e o sensor de medição óptico (sem contato físico).

Suas conclusões foram que houve melhorias satisfatórias no nível de rugosidade com esse processo, e, na época, identificaram essa técnica como uma boa opção para o meio comercial.

Esse procedimento mostra uma fragilidade quanto a sua produtividade em larga escala, pois, além de maior quantidade de acetona, é necessário um recipiente com vácuo e boa agilidade em sua aplicação, uma vez que a forma final do objeto pode ser comprometida se os tempos não forem respeitados.

2.2.2 Vapor de acetona aquecido

Dentre os seis trabalhos identificados que utilizaram vapor de acetona aquecido, três usaram a estação de suavização Finishing Touch - Stratasys (CHOHAN; SINGH; BOPARAI, 2016; SINGH; SINGH; SINGH, 2017; SINGH *et al.*, 2017). Trata-se de um equipamento com dois compartimentos, sendo que um deles é resfriado e serve para o pré-tratamento e pós-tratamento, a segunda cabine possui sistema de aquecimento a vácuo e pressão atmosférica controlada (Figura 4), onde o vapor de acetona é inserido para a suavização da peça. A temperatura e o tempo do processamento são administrados pelo operador.

Figura 4: Imagem da estação de suavização Finishing Touch.



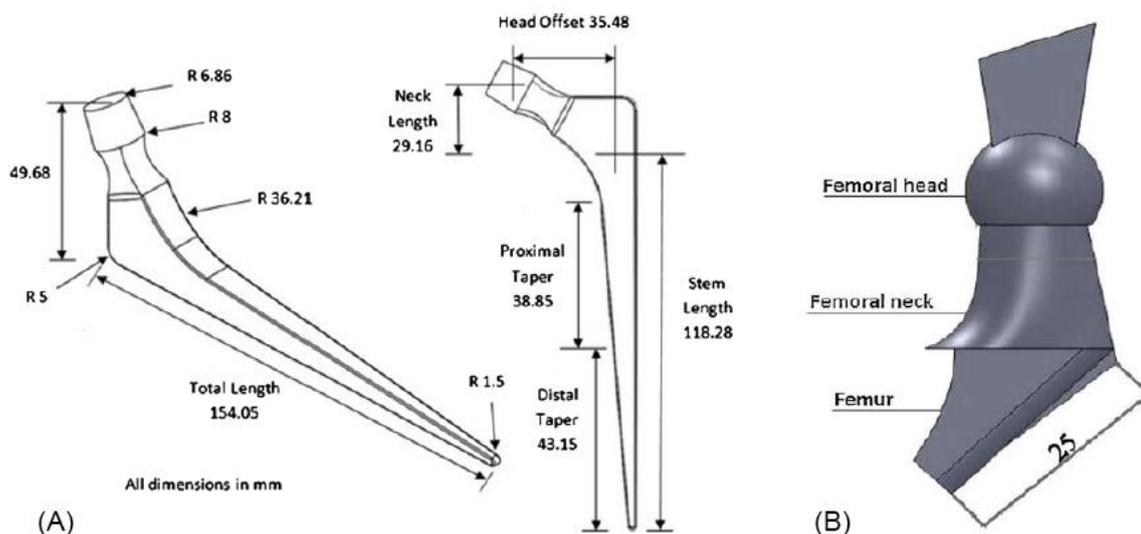
Fonte: Catálogo da estação de suavização *Finishing Touch* – Stratasys, INC (acesso em 01/02/2021).

Os três estudos realizados via estação de suavização Finishing Touch (CHOHAN; SINGH; BOPARAI, 2016; SINGH; SINGH; SINGH, 2017; SINGH *et al.*, 2017) buscavam alcançar resultados possíveis a serem aplicados para a customização de implantes biomédicos (Figura 5). A ideia central dos estudos era de utilizar a impressão 3D por extrusão de filamento como material de sacrifício na preparação do processo de cera perdida; para a criação de implante ósseo, o que revolucionaria a produção nesse segmento de pesquisa.

Num dos estudos sobre uma prótese de quadril, Singh; Singh; Singh (2017) também testaram algumas combinações e verificaram que os parâmetros ideais são a exposição ao vapor de acetona em três ciclos de 6 segundos e a orientação de impressão de 90° — sentido cuja velocidade de impressão foi maior e mais

econômico, sem material de suporte — Figura 5B, foi necessário imprimir duas metades e depois uni-las.

Figura 5: Imagens dos modelos de implantes de quadril e de fêmur.



Em (A) modelo de implante de quadril e em (B) modelo de implante de fêmur.

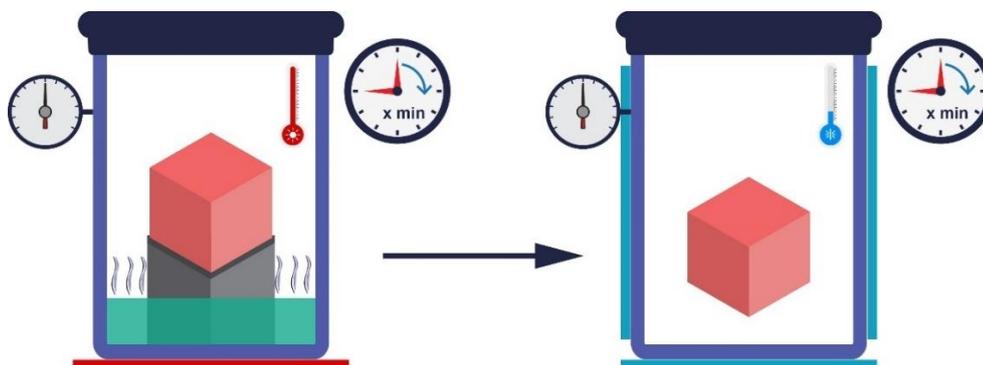
Fonte: Chohan; Singh; Boparai (2016); Singh; Singh; Singh (2017) e Singh *et al.* (2017).

Ambas as pesquisas realizaram numerosos estudos visando ao controle dimensional dos parâmetros de suavização, variando não só o tempo de exposição ao vapor de acetona aquecida (de 4 a 30 segundos), mas como o número de ciclos (4 a 8). Outras variantes relacionadas pelos pesquisadores foram os parâmetros de impressão, como os ângulos de impressões distintos e as densidades de preenchimento (baixa, alta e sólida). De uma forma geral, foi concluído que tempos de exposição mais curtos por ciclos repetitivos proporcionaram bom acabamento superficial e também não afetaram suas dimensões de forma significativas.

Nos outros dois trabalhos (CUNICO *et al.*, 2017; PIATANZA *et al.*, 2018) foram criados recipientes fechados hermeticamente, ambos com controle da pressão, e com sistema de aquecimento e resfriamento da acetona (Figura 6).

Cunico *et al.* (2017) buscavam compreender a relação entre os ciclos de repetições, tempo de exposição, temperatura do vapor do solvente e a orientação construtiva da amostra impressa. Com essas variáveis os pesquisadores almejavam concluir: proporção de solvente que era absorvido pela amostra; a razão de secagem; índice de rugosidade superficial; distorções dimensionais externas e a mudança estrutural das camadas internas por meio da seção transversal.

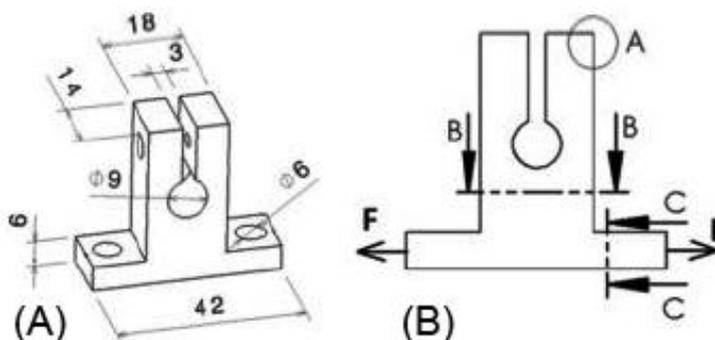
Figura 6: Representação figurativa da técnica de suavização da superfície com vapor aquecido de acetona.



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

A forma do objeto (Figura 7), além de possuir configurações geométricas diferentes, também proporcionou que ensaios de tração pudessem ser realizados. A conclusão do trabalho foi que em tempos reduzidos (até 10 min. de exposição); com maior quantidade de repetições (1 a 18 vezes) não prejudicam a dimensão do objeto e que a penetração do solvente funde o ABS até 1 mm para dentro da superfície. Dentro desse tempo de exposição, também foi verificado que a força de tração de ruptura aumentou em 46%. A análise de rugosidade demonstrou uma redução de 70%. Quanto à absorção de solvente no objeto impresso os pesquisadores identificaram que nos locais onde o objeto começa a deformar estão concentrado os maiores níveis de solvente absorvido, contudo eles entendem necessário mais estudos para compreender por que isso ocorre.

Figura 7: Ilustração do corpo de prova do estudo de Cunico *et al.* (2017).



Em (A) dimensões gerais do corpo de prova. Em (B) esquema das direções de cargas exercidas nos testes de resistência e de tração, na região pontilhada está o local onde foram realizadas as análises microscópicas.

Fonte: Cunico *et al.* (2017).

Na pesquisa de Pietanza *et al.* (2018), não foram utilizados ciclos, mas aplicaram-se tempos menores de exposição em uma escala na qual o tempo mínimo

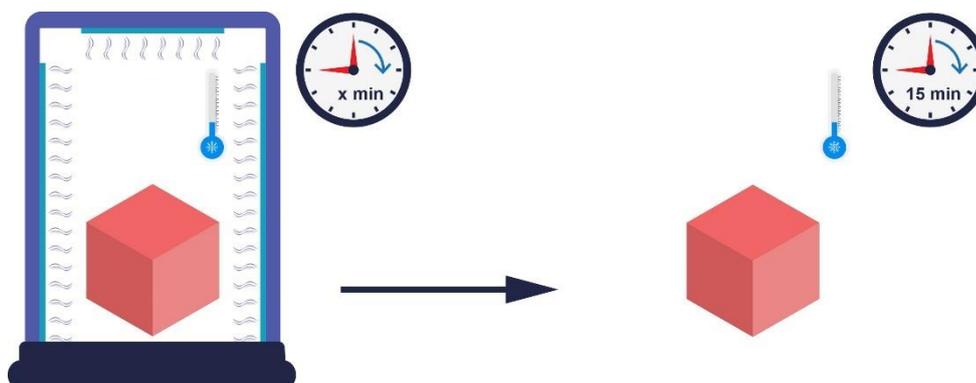
foi de 5 minutos e o tempo máximo de 15 minutos (variando 2,5 minutos entre os tempos de exposição), com temperaturas escalares de 10 °C (começando com 30 °C até 50 °C). A amostra foi impressa em formato de um paralelepípedo (20 mm x 20 mm x 40 mm). Os objetivos da pesquisa eram: (1) a identificação da homogeneização da superfície, para isso mediram a rugosidade da amostra antes e depois do tratamento (Ra%, Rq%, Rz%) utilizando o rugosímetro Mitutoyo SJ-400; (2) a identificação do menor custo de recurso tanto de solvente, quanto de tempo de envolvimento de processo. Suas conclusões foram que com temperaturas entre 30 °C e 50 °C e tempos de exposição entre 5 e 15 min. os índices de rugosidades reduziram 37% e 54%; porém, as temperaturas abaixo de 40 °C são mais adequadas para a estrutura do objeto. Eles também consideraram que a técnica com vapor aquecido a vácuo reduz o consumo de acetona.

Por fim, o processo de suavização com vapor de acetona aquecido se mostrou satisfatório em todos os experimentos citados; porém, esta técnica necessita de equipamentos específicos para que se tenha segurança no processo, já que a acetona é um solvente inflamável, podendo causar algum acidente.

2.2.3 Vapor de acetona fria

Outra técnica utilizada é a vaporização da acetona a frio. Essa técnica também é a mais divulgada nas comunidades entusiastas em impressão tridimensional devido sua facilidade de manuseio e simplicidade de operação (Figura 8). Essa metodologia é simples e necessita apenas de um recipiente com fechamento hermético, folhas de papel absorvente, acetona P.A., sala em temperatura controlada (18°C – 22°C) e um cronômetro.

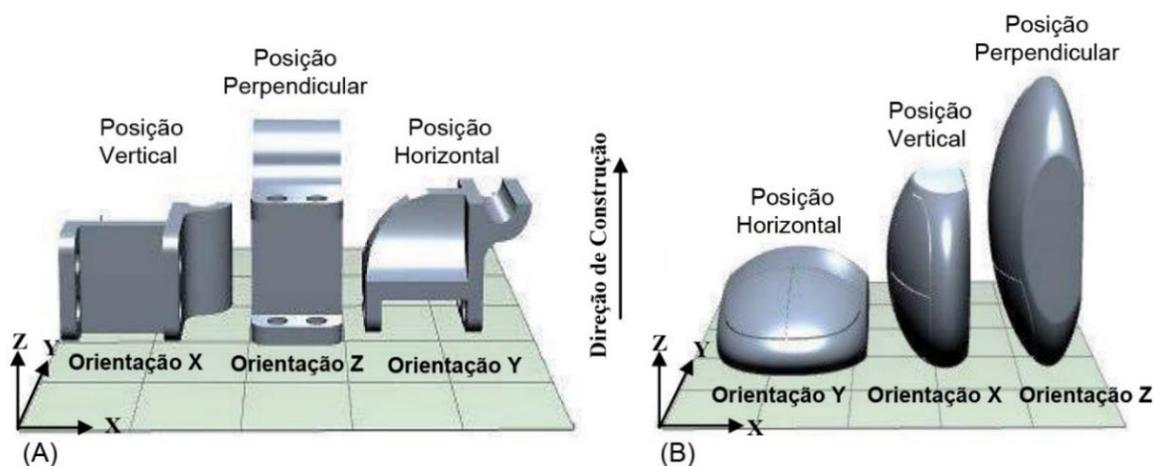
Figura 8: Representação da técnica de suavização da superfície com vapor frio de acetona.



Fonte: Autora.

Na pesquisa conduzida por Garg; Bhattacharya; Batish (2017), as peças foram impressas em diferentes orientações: vertical, horizontal e topo (Figura 9). A seguir, foram expostas ao vapor frio de acetona por 40 min. A conclusão foi que houve diminuição significativa da rugosidade superficial com mínima variação da precisão dimensional das peças.

Figura 9: Peças e orientações da impressão 3D por extrusão de filamento em três sentidos construtivos das peças: vertical, perpendicular, horizontal.

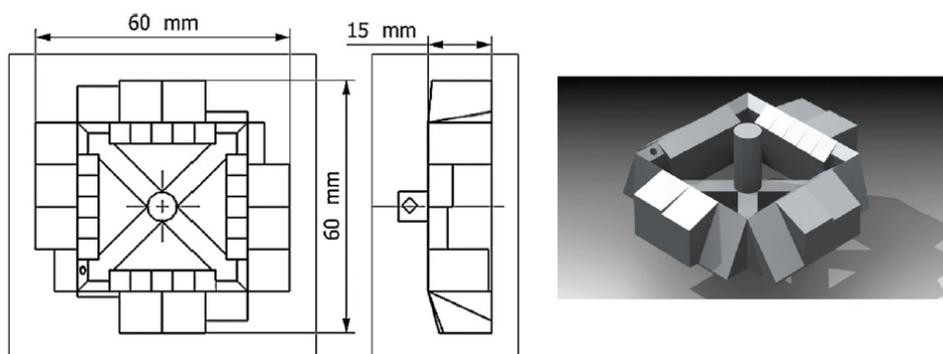


Em (A) peça com formas primitivas e curvas e em (B) peça duplamente curva.

Fonte: Adaptado de Garg; Bhattacharya; Batish (2017).

No estudo realizado por Lalehpour; Janeteas; Barari (2017), foi verificada a relação da espessura de camada de impressão (0,254 mm e 0,3302 mm) e da inclinação de plano (entre 5 e 90°) de peças produzidas em ABS (Figura 10) expostas ao vapor frio de acetona (2, 3 e 4 ciclos de 8, 10 e 15 s). Os melhores resultados foram obtidos nas peças impressas com camadas mais finas e com planos com inclinação de 40°. Quanto à exposição, o melhor parâmetro para suavização de superfície foi estabelecido com 3 ciclos de 15 s.

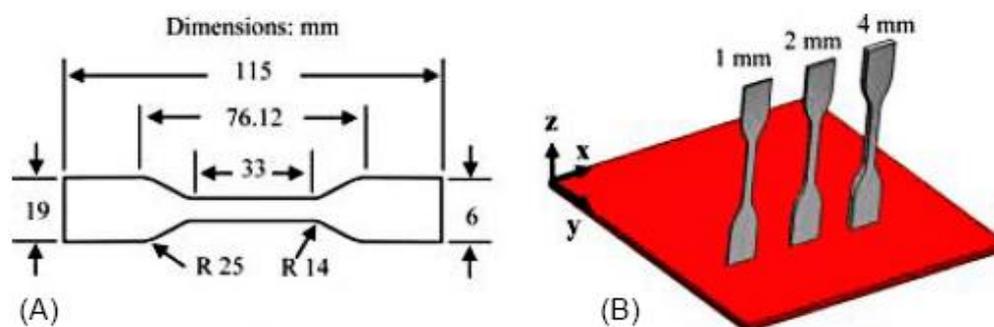
Figura 10: Imagem da peça de teste projetada por Lalehpour; Janeteas; Barari (2017).



Fonte: Lalehpour; Janeteas; Barari (2017).

Neff; Trapuzzano; Crane (2018) verificaram rugosidade superficial, precisão dimensional, propriedades mecânicas e porosidade de corpos de prova com espessura de 1, 2 e 4 mm (Figura 11) tratadas com vapor de acetona (45 min). Houve pouca alteração dimensional nas amostras de 1 mm e nenhuma nas peças mais espessas. O tratamento diminuiu significativamente a rugosidade superficial, mas acarretou na diminuição das propriedades mecânicas conforme o aumento da espessura. A porosidade diminuiu significativamente em todas as peças avaliadas.

Figura 11: Imagem do corpo de prova do estudo do Neff; Trapuzzano; Crane (2018).



Em (A) dimensão do corpo de prova segundo ASTM D638-10 Tipo IV (ASTM, 2010). Em (B) sentido de impressão e especificação das espessuras das amostras.

Fonte: Neff; Trapuzzano; Crane (2018).

Maciąg; Wieczorek; Kałsa (2019) verificaram a qualidade superficial de peças expostas ao vapor de acetona por 30, 60, 90 e 120 minutos. O melhor resultado foi obtido com 60 minutos. Por sua vez, Romero *et al.* (2021) utilizaram o vapor de acetona (100 ml em um recipiente com uma grade elevada) por 15, 30 e 45 min para suavizar a superfície de peças de ABS. Nesse caso, o melhor resultado foi obtido com 45 min. Popescu *et al.* (2021) verificaram que a porosidade de instrumentos médicos de ABS produzidos por FDM reduziu com exposição ao vapor de acetona por 45 minutos.

2.2.4 Comparação entre as técnicas

Todas as técnicas de tratamento com a acetona mostraram bom potencial de utilização. Contudo, é importante controlar os parâmetros de suavização do ABS com vapor de acetona, não só para reduzir o efeito escada causado pelo processo FDM, mas também para minimizar o desvio geométrico das peças. No Quadro 2, encontram-se os prós e contras de cada técnica pesquisada.

Quadro 2: Prós e contras de cada técnica aplicada na suavização do efeito escada com o uso de acetona.

Técnica	Prós	Contras
Imersão	Processo significativamente rápido e dispensa reaplicação da técnica.	Necessita da acuidade do tempo de exposição, pois a peça pode deformar, além de necessitar de equipamento específico e do auxílio do vácuo.
Vapor aquecido	Processo extremamente rápido, mesmo com a repetição dos ciclos. Não depende da expertise de quem irá aplicar a técnica. Utiliza um equipamento vedado que impede a inalação dos vapores de acetona pelo usuário. É de fácil replicabilidade em escala comercial.	Existe um custo com o equipamento e uma limitação de tamanho das cabines. As técnicas que não utilizam o equipamento específico podem ser arriscadas ao indivíduo que irá aplicá-las, pois a acetona é inflamável.
Vapor frio	Fácil aplicação e acessível a custo baixo. Não requer muita conhecimento prévio do usuário que irá aplicar. É de fácil replicabilidade em escala comercial.	Demostrou ser necessário um pouco mais de tempo para o alisamento da peça.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Para o estudo proposto, foi identificada a aplicação do vapor de acetona a frio como a opção mais viável, devido sua facilidade de manuseio e do controle de execução.

2.3 TEXTURAS EM OBJETOS PARA USO MANUAL

Keller e Medeiros (2016) acreditam que as superfícies destinadas a objetos de uso manual ainda são pouco estudadas, muito provavelmente, porque as questões táteis, quanto ao manejo de objetos, não sejam questões abordadas dentro dos estudos ergonômicos, nos quais as preocupações são mais técnicas quanto ao projeto. Iida (2005) diz que a rugosidade superficial dos objetos de manejo, assim como suas orientações construtivas de arranjo, podem influenciar a forma que a pessoa irá segurar e utilizar uma ferramenta, e que superfícies ásperas incluem vantagens devido ao maior atrito entre o objeto e a mão; porém, é necessário o cuidado com os cantos vivos, saliências e rebarbas, já que são concentradores de tensões.

A força de pinça da mão humana é uma das principais habilidades do homem, com uma capacidade de precisão em níveis diferentes (força, velocidade, etc.). A qualidade ergonômica percebida nos objetos de manejo estão ligadas a diversos aspectos, tais como: psicofísico, cognitivo, segurança e conforto ao toque (BORGHI; MEJIA, 2016). O design de produto voltado ao objeto de manejo é muito importante, pois, quando não projetado adequadamente, pode trazer ao usuário desconforto e insatisfação. Alguns requisitos de projeto são importantes como, por exemplo, o dimensionamento, a forma a ser aplicada, o peso e, entre outros, a textura que pode trazer estabilidade de uso (PASCHOARELLI *et al.*, 2010). Paralelo a isso, Silva (2006) diz que os aspectos sensoriais das interfaces texturizadas interagem diretamente nos aspectos emocionais e perceptíveis do indivíduo pelos simples ato de tocar o objeto. Desta forma, pode-se inferir que os fatores de design vão muito além da forma, função e material em que o objeto será projetado, mas também, nas qualidades intrínsecas proporcionadas via texturas tridimensionais impostas às superfícies dos objetos (CHOI; JUN, 2007; MANZINI, 1993).

O acabamento alisado nas superfícies é a técnica comumente utilizada nas superfícies de moldes (injeção plástica). Porém, é possível utilizar texturas visuais e tridimensionais, a fim de proporcionar ao objeto, em material polimérico, maior valor percebido. Os *rappports* das texturas podem ser diferenciados apresentando aparências naturais (mais orgânicos); geométricos e funcionais. Para este último, pode-se dar o exemplo das texturas que auxiliam na minimização os efeitos de marcas e arranhões (LÓSS; JANSEN, 2015).

Karana; Pedgley; Rognoli (2014), descrevem a percepção humana em superfícies de objetos em quatro extensões (geométrica, físico-química, emocional e associativa) e que os descritores de qualidades, quando associados apenas a uma dimensão, podem sugerir uma percepção totalmente distinta quando duas ou mais ações estão atribuídas. Por exemplo, em uma superfície lisa a dimensão associada ao espectador — utilizando apenas a visão — é de pegajoso, úmido, frio e brilhante. Ao contrário deste, em uma superfície rugosa a pessoa descreverá como pegajoso, quente, seco e opaco. Com tudo, quando se introduz mais um meio perceptivo como o tato o mesmo objeto com superfície alisada pode apresentar nova narrativa (confortável e não pegajosa). A correlação entre as quatro dimensões, referidas pelos

autores, é essencial para indicar a subjetividade da percepção tátil com relação aos materiais na utilização dos objetos.

Malshe *et al.* (2018), acreditam que convergir recursos criativos, está associado à oferta de texturas com funcionalidades variadas aos objetos de manejo; esse tipo de estudo vem ganhando interesse comercial junto ao consumidor, pois traz consigo possibilidades mais eficientes e duradoras, já que proporcionarão maior satisfação do usuário. A construção geométrica das texturas compreende a convergência de recursos como forma, dimensão, proporção, frequência, orientação e arranjo (Figura 12). A estruturação de todos os recursos de design das superfícies traz como resultado mais de 700 tipos de texturas viáveis.

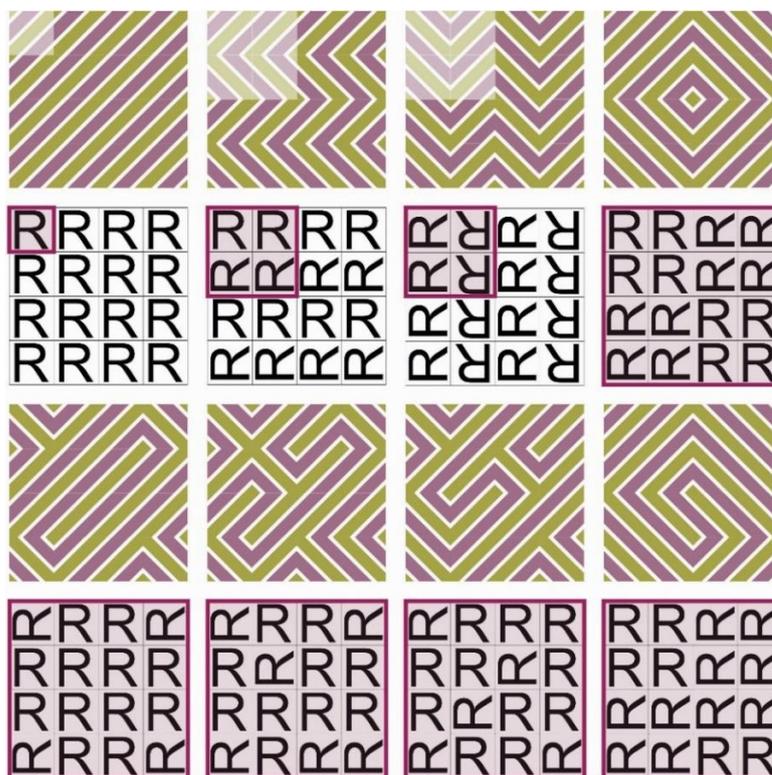
Figura 12: Componentes que contribuem para a criação de texturas em superfícies.



Fonte: Adaptado de Malshe *et al.* (2018).

Segundo Rùthschilling (2008), as metodologias de criação de estampas/texturas são herdadas das indústrias têxteis e das cerâmicas e seguem dois princípios básicos: módulo e repetição. O módulo (R), na Figura 13, é o ponto inicial para o desenvolvimento de um padrão (ou *rapport*), o qual se repetirá em toda a extensão da superfície a ser estampada visualmente em 2D, ou em 3D — quando esta for também representada com relevo.

Figura 13: Sistema de repetição com suas possíveis variâncias.



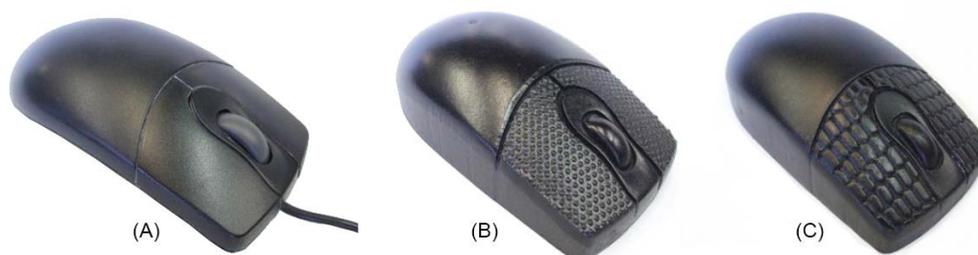
Representação da criação de um *rapport* de repetição (R em roxo) e as possíveis formulações a partir de uma mesma figura geométrica.

Fonte: Adaptado de Rüttschilling (2008).

O segmento da indústria que investe fortemente em desenvolvimento de novas texturas táteis e visuais é a automotiva, pois esses dois atributos juntos entregam percepções que valorizam os veículos atraindo os compradores. As texturas introduzidas em veículos automotores vão além da estética, como por exemplo nos volantes que ajudam na aderência da mão. É possível identificar muitas texturas que imitam a natureza nas peças polimérica dos carros, uma vez que proporcionam ao usuário as sensações visuais e táteis relacionadas ao conforto e ao luxo. Contribuindo a isso, a biomimética pode ser uma ferramenta para os designers criarem uma gama rica de opções no design de superfícies (GOMES FILHO, 2006; SANTOS, 2018; SILVA, 2016). Por esse motivo, os estudos quanto a esse assunto são necessários dentro das universidades, pois desta forma as empresas terão subsídios na introdução de novas texturas em seus produtos já com arranjos bem definidos e, assim, ofertarão ao mercado um diferencial, trazendo inovação e a garantia de satisfação (SILVA *et al.*, 2009). Ao encontro dessa ideia, Silva *et al.* (2009) realizaram um estudo conceitual, com o auxílio tecnológico do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS, cujo objetivo era a aplicação de texturas diferentes e

bioinspiradas em um mouse (Figura 14). Suas conclusões foram que eles deveriam ter aplicado primeiramente as texturas em amostras de superfície plana, pois assim, seria possível estudar escalas diferentes de texturas e, partindo dos melhores resultados, aplicar ao protótipo. Além disso, eles também concluíram que para obter uma interação mais fidedigna no “*marketing teste*” o material do protótipo deve ser mais similar ao produto final, pois somente dessa forma é possível ofertar ao mercado um produto previamente aprovado.

Figura 14: Texturas aplicadas em mouse via fabricação por usinagem.



Em (A) produto encontrado no mercado; (B) textura inspirada na bolacha-do-mar; (C) textura inspirada no grão-de-bico.

Fonte: Silva *et al.* (2009, p5).

Para averiguar como os designers de produtos estão abordando a estética das superfícies dos objetos fora do meio acadêmico, foi realizada uma busca na internet por indústrias que ofertam algum tipo de textura com relevo aparente (bidimensional e tridimensional) nos seus produtos. Na área de acabamentos automotivos, foi encontrada uma empresa alemã chamada Kurz especializada em design de superfície, principalmente no que se refere aos acabamentos personalizados de veículos produzidos em polímero (Figura 15). Com tecnologias avançadas, eles fornecem estruturas com aspecto liso ou com texturas tridimensionais, além dos acabamentos com retroiluminação com controle ao toque do dedo (*smart surface*).

Figura 15: Alguns acabamentos disponibilizados pela Kurz.



Em (A) acabamento em textura (bidimensional) de madeira; em (B) acabamento texturizado tátil (tridimensional); em (C) acabamento com retroiluminação (*smart surface*).

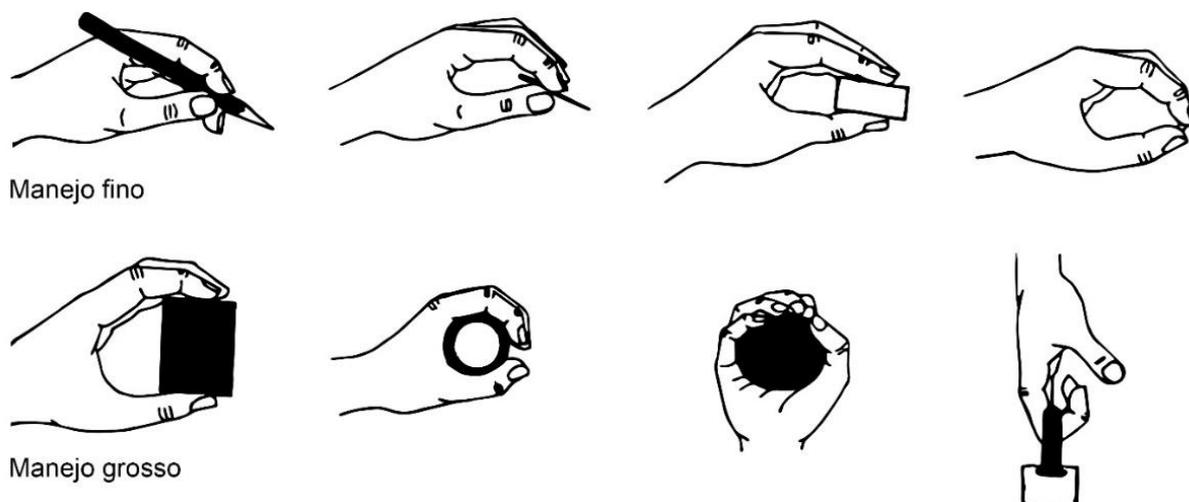
Fonte: Site da Kurz¹.

¹ <https://www.plastic-decoration.com/en/>. Acesso em: 29 de agosto. 2019

Além desse segmento, há objetos com os quais a interação com as mãos é natural e necessária. Suas superfícies são texturizadas intencionalmente para desempenhar uma função de agarre, de estética, ou ambos. O ato de manipular algum objeto, utilizando, de forma particular e controlada, a ponta dos dedos e a palma da mão é chamado de “manejo”. Graças aos dedos opositores, a mão humana torna-se um instrumento pleno e capaz de executar várias tarefas, com capacidade de variar força, pressão e velocidade de movimentos (IIDA, 2005). Existem várias formas de manuseio, contudo Iida (2005) destaca dois tipos básicos — manejo fino e manejo grosso (Figura 16):

- o manejo fino, ou de precisão, é o movimento executado com as pontas dos dedos, onde o punho e a mão permanecem o mais parado possível. São os movimentos que realizamos para escrever a lápis, sintonizar a estação do rádio, etc. Neste movimento, é possível realizar tarefas com grande precisão, velocidade e baixa capacidade de força;
- o manejo grosso, ou de força, é realizado com a palma da mão, ou seja, o movimento dos dedos ficam relativamente estáticos e o objeto prende-se na palma da mão. A dinâmica dá-se com o movimento do punho e braço. Esse manejo é o oposto do anterior, pois o usuário consegue transmitir mais força em menores velocidades. É o movimento de cerrar uma madeira, martelar um prego, cortar um legume, etc.

Figura 16: Formas de manejo.

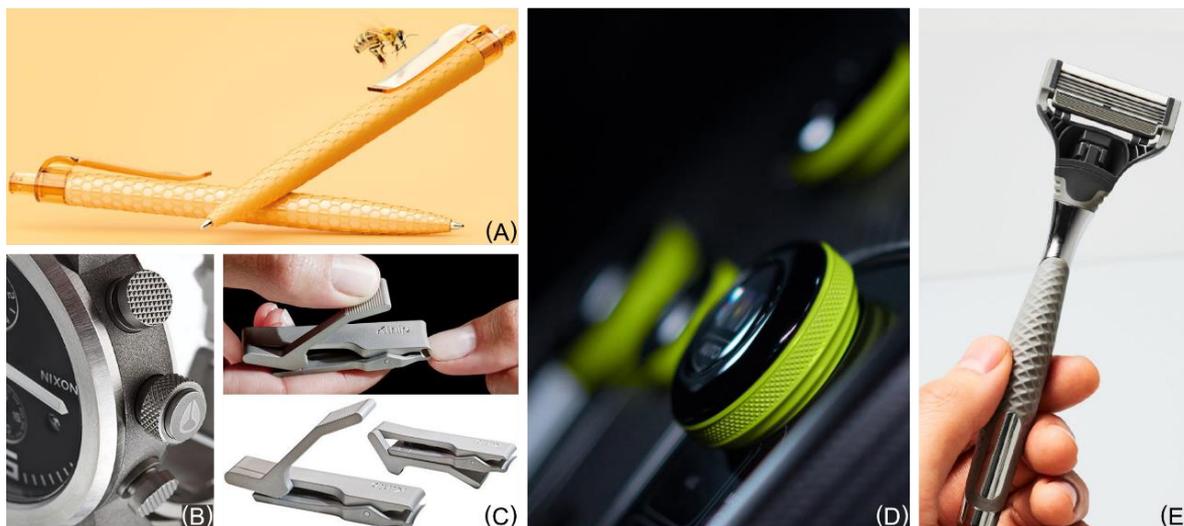


Fonte: Adaptado de Iida (2005).

Na Figura 17 pode-se observar objetos cujas texturas auxiliam na usabilidade conforme os tipos de manejos: (1) fino, (2) grosso e (3) fino/grosso.

Figura 17: Objetos texturizados catalogados por tipos de manejo – fino, grosso, fino/grosso.

1 - Manejo Fino



2 - Manejo Grosso



3 - Manejo Fino/Grosso



Fonte: Compilação da autora².

² Montagem a partir das imagens coletadas nos sites: (A) Prodir, (B) Nixon, (C) Klhip, (D e E) leManoosh, (F) Andrea Locatelli, (G) Nicholl Knives, (H) Hangar Design, (I) Product Ventures, (J) Marc Newson, (K) Blue Lug, (L) Fast Copany, (M) Peng Gong e (N) Freshfiber. Acesso em 30 de agosto de 2019.

Não foi possível identificar as intenções sobre a percepção esperada pelos designers ao criarem as texturas (Figura 17); porém, apenas com a análise visual podemos indicar algumas possibilidades quanto aos seus empregos:

- a) nas imagens do manejo fino (Figuras 17 A, B, C, D, E), as texturas aparentam ser propositais, cujo objeto é de aderência;
- b) nas imagens do manejo grosso (Figuras 17 F, G, H, I, J, K, L) podem-se verificar estruturas com apelo estético/emocional, como a maçaneta (Figura 17F) e as facas (Figura 17G). O copo térmico (Figura 17H) e a tesoura (Figura 16I) possuem texturas que num primeiro momento são simbólicas, contudo também podem servir para a função de atrito. Na câmera fotográfica (Figura 17J), no manete de bicicleta (Figura 17K) e na cadeira de roda (Figura 17L) trazem ao entendimento que suas texturas superficiais possuem funções de fricção entre a mão e o objeto;
- c) no manejo fino/grosso (Figuras 17 M, N), pode-se inferir que as texturas nas ferramentas (Figura 17M) servem para proporcionar agarramento durante sua utilização. Para a capa de celular (Figura 17 N) colaciona-se o apelo estético/emocional com a função – proteção e atrito.

2.4 PERCEPÇÃO: SENTIDO TÁTIL E SISTEMA HÁPTICO

“Nosso senso de toque é uma sensibilidade fundamental que entra em ação no nascimento — nosso sentido estereognóstico — a capacidade de sentir peso e forma e avaliar seu significado”. (HEPWORTH, 1954, p.54).

O tato, diferentemente dos outros sentidos, necessita do contato junto ao objeto para sua análise exploratória, pois só assim obtém-se o entendimento quanto ao seu peso, dimensão, estado físico (líquido, sólido, pastoso, etc.), acabamento superficial e outros. O processamento dessas informações é dada por uma complexa rede sensorial cutânea, chamada de sistema háptico. Trata-se da união das informações adquiridas em dois atos intrínsecos ao manejo de um objeto que é denominado como percepção háptica: (1) tato (pega estática); (2) movimento cinestésico (ação exploratório com a mão) (ÁLVARES; DIAS, 2008; SCHMID, 2005).

Etimologicamente háptico vem do grego *haptikos* e seu sentido mais amplo refere-se à capacidade de tocar e ao estudo das percepções cutâneas. Nas últimas

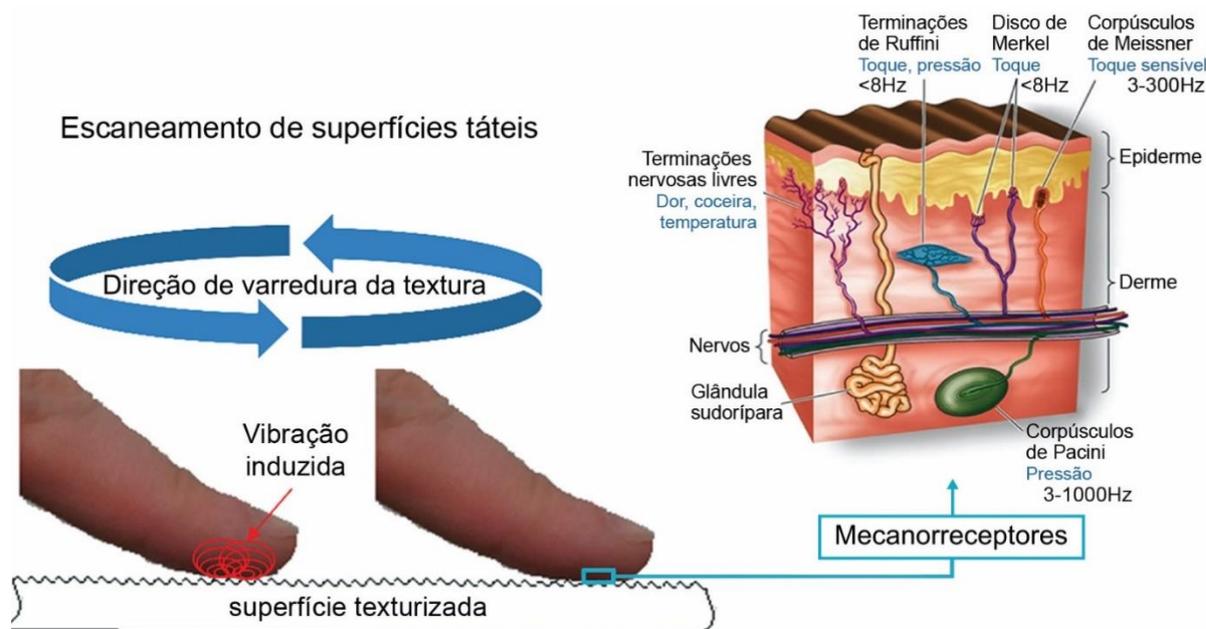
duas décadas, foram realizados muitos estudos para identificar como a modalidade sensorial do toque funciona. Contudo, dois pesquisadores são considerados os responsáveis pelos conceitos deste seguimento de pesquisa. O primeiro foi Ernst Heinrich Weber (1795/1878), considerado o fundador da psicologia experimental. Seu interesse científico estava concentrado em experimentos que fossem relacionados às sensações. Sua teoria mais conhecida, Lei de Weber, é sobre o estudo háptico e a magnitude física percebida através de estímulos. Este estudo psicofísico foi reconhecido e confirmado matematicamente por Gustav Theodore Fechner em 1860 (PRYTHERCH; MCLUNDIE, 2002).

Anos após (1925), David Katz (1884 /1953) escreve sua monografia: “*Der Aufbau der Taswelt*” (O Mundo do Toque) (PRYTHERCH; MCLUNDIE, 2002). Nesse, é trazida a teoria dúplex da sensação tátil, que foi validada em 2000 por Hollins e Risner no trabalho intitulado: “*Evidence for the duplex theory of tactile texture perception*” (Evidências para a teoria dúplex da percepção da textura tátil). No estudo de David Katz a questão da percepção háptica é composta por dois conjuntos de sensações: (1) “sentido espacial” e (2) “sentido de vibração”. O primeiro percebe texturas mais grosseiras e o segundo as texturas mais finas, ou diminutas. Esses dois tipos de sensores cutâneos podem ser utilizados separadamente, pois quando apenas tocamos os objetos, sem esfregá-los, percebemos a sua volumetria e as suas texturas mais salientes. No entanto, para perceber as texturas mais delicadas precisamos estimular os Aferentes de Pacini (Figura 18), através de estímulos vibracionais pressionando os dedos na superfície, ou seja, precisamos esfregar o objeto com as pontas dos dedos utilizando certa pressão (CESINI *et al.*, 2018).

No momento do toque a membrana plasmática do mecanorreceptor (Figura 18) se deforma e começa a retransmitir informações através de canais iônicos, alterando o potencial da membrana da célula originando, no final da cadeia informativa, comunicação ao sistema nervoso central. Desses receptores táteis o mais relevante é o composto pelo disco de Merkel. A célula de Merkel fica localizada na camada basal da epiderme e se adaptam mais rapidamente às deformações e são muito sensíveis, além disto, são os responsáveis pela percepção volumétrica de texturas durante a movimentação do objeto entre os dedos. Outras duas células que contribuem na identificação tátil encontram-se na derme — terminações de Ruffini e corpúsculos de Pacini (Figura 18). A terminação de Ruffini molda-se lentamente e é capaz de prover

dados com vibrações de baixa frequência. Um pouco mais profundo estão os corpúsculos de Pacini que se moldam rapidamente e percebem as deformações através das vibrações ocorridas em frequências mais altas, por este motivo essas células são capazes de perceber alterações na superfície dentro da faixa dos nanômetros (JOHNSON, 2001; SADAVA *et al.*, 2008).

Figura 18: Esquema do contato entre o dedo e a superfície texturizada do objeto e da posição dos mecanorreceptores na pele.



Fonte: Adaptado de Cesini *et al.* (2018) e Sadava *et al.* (2008).

Fisicamente o sistema nervoso percebe as texturas através dos mecanorreceptores; porém, identificar e traduzir as dimensões físicas distintas (rugosa/lisa, dura/macia e escorregadia/pegajosa) percebidas pelo homem, ao tocar um objeto, são considerados problemas de design. Dessa forma, além da escolha do material e o tipo de acabamento, outros atributos devem ser considerados para vincular ao usuário fatores emocionais e psicológicos aos produtos (YANAGISAWA; TAKATSUJI, 2015).

A fim de estabelecer a relação dimensional das texturas táteis com os mecanorreceptores muitos pesquisadores buscaram traduzir os resultados numa escala de valor. Berthier (1991), utilizou texturas classificadas como: mega, macro e micro com o objetivo de identificar qual a menor rugosidade percebida pelo tato direto. Skedung *et al.* (2013), verificaram que o dedo humano consegue perceber rugosidades distintas simultaneamente. Além disso, eles identificaram que a menor escala perceptível ao toque está entre 760 nm e 870 nm (de comprimento de onda).

No estudo de Silva (2016), as texturas foram estudadas em diversas relações como: diferentes comprimentos de ondas, densidades (número de elementos por área da superfície), regularidades (simetria e proporção) e formas (elementos orgânicos ou geométrico). Juntando desses estudos foi possível gerar uma escala dimensional para texturas táteis percebidas pelos macanorreceptores (Tabela 1).

Tabela 1: Escalonamento das texturas táteis com dimensões em mm, percebidas pelo toque humano.

Definição	Nanotextura	Microtextura	Macrotextura	Megatextura
Comprimento de onda em (mm)	< 0,001	0,001 – 0,5	0,5 - 50	> 50

Fonte: Adaptado de Silva (2016) e Skedung *et al.* (2013).

Visto que a impressão 3D por extrusão de filamento produz peças por camadas, tipicamente na faixa de 0,1 mm a 0,2 mm, foram projetadas, nesta pesquisa, texturas bioinspiradas em escala macro.

2.5 USANDO OS PRINCÍPIOS DA BIOMIMÉTICA PARA A INSPIRAÇÃO E CRIAÇÃO DE TEXTURAS.

Os métodos criativos dos designers originam-se de diferentes formas e estímulos, contudo dependerão das suas experiências pregressas (expertise) e de inspirações externas vivenciadas (exposições, concursos de design, workshops, etc.). Uma técnica recorrente é a análise de similares — exemplos trazidos de ilustrações, documentos como registro de patentes, ou análise junto à natureza —; esta última é conhecida como biomimética (GONÇALVES; CARDOSO; BADKE-SCHAUB, 2014).

A biomimética é o estudo que busca inspiração na natureza para solucionar questões projetuais complexas. O termo deriva de duas palavras do grego: *bio* (vida) e *mimesis* (imitação), logo, a junção dos dois termos significa “imitação da vida”. O conceito básico tem como propósito buscar na natureza um modelo de criação projetual e, assim, aprender com ela e não utilizá-la apenas como meio extrativo, ou seja, trazer dos organismos naturais formas eficientes de resolver problemas de projeto mais sustentável e eficiente (BENYUS, 2003, 2020). Este tipo de estudo é caracterizado como uma ciência multidisciplinar, servindo para aplicação concreta dos elementos naturais nos objetos, com objetivo de desenvolvimento tecnológico e, ao

mesmo tempo, preservação do meio ambiente (QUEIROZ; RATTES; BARBOSA, 2017).

A camada externa dos organismos vivos é muito importante, pois nela está toda a evolução e adaptação para a sobrevivência das espécies. Esse extrato de proteção age constantemente com a influência de muitos agentes ambientais hostis como as mudanças climáticas; a mudanças de terreno (agentes abrasivos ou líquidos (pH), agentes de aderência; bactérias e vírus; radiação solar e outros. Para combater tantas variáveis, a superfície (pele/carapaça) desses organismos precisou arquitetar estruturas com características multifuncionais distintas, não exclusivas, para sobreviver, ou proliferar. Para isso, os sistemas biológicos desenvolveram em suas carapaças composições químicas aliadas a uma composição superficial texturizada, onde as leis da física possam ser exploradas por esses organismos e, desta forma, superar suas capacidades de trabalho (MALSHE *et al.*, 2018). Por este motivo, o estudo em texturas de superfícies bioinspiradas pode proporcionar uma ótima ferramenta ao design, pois é possível trazer mais funcionalidade as superfícies dos produtos (MALSHE *et al.*, 2013).

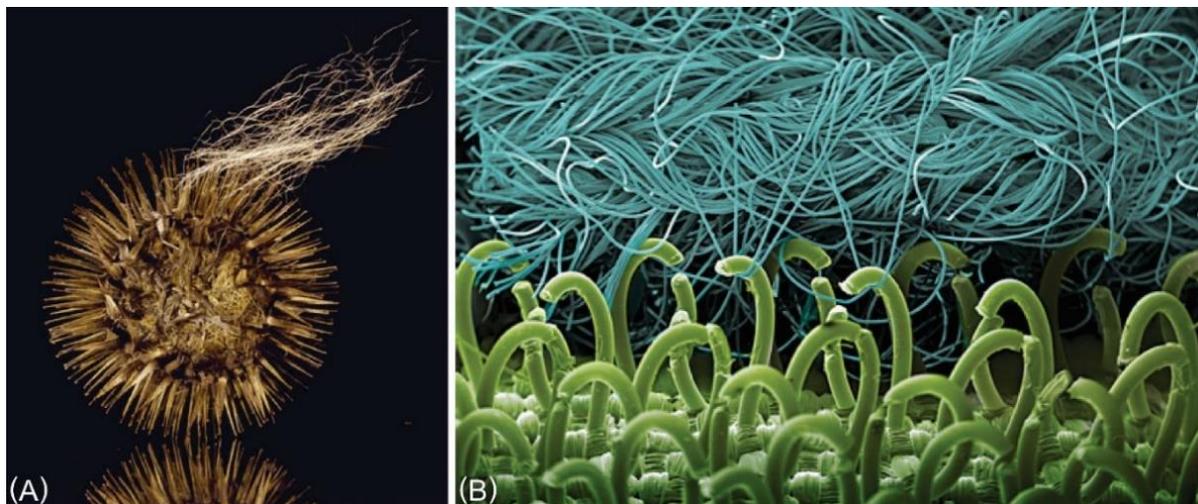
Estudos em superfícies funcionais com inspiração biológica têm sido explorados por pesquisadores nas últimas décadas (MALSHE *et al.*, 2018). A disseminação da biomimética tornou-se visível por causa do trabalho de grande importância que Janine M. Benyus, por meio de seu livro: *Biomimicry: innovation inspired by nature* (1997) (FERREIRA, 2016; SANTOS, 2018). Além disso, Janine Benyus, juntamente com Bryony Schwan, fundou o *Institute Biomimicry* em 2006; já em 2008 eles lançam o catálogo *on-line* sobre “soluções da natureza para desafios em design” chamado de “AskNature”³.

Provavelmente o exemplo mais antigo de produtos bioinspirados aplicado na indústria em grande escala foi o Velcro®, em 1941 (Figura 19). A descoberta começou com a observação da semente de *Arctium* (carrapicho), que frequentemente grudava nas roupas e nos pelos do cachorro do engenheiro suíço Georges de Mestral. Com auxílio de um microscópio, Mestral observou que o formato de gancho dos terminais dos filamentos da semente poderiam ser recriados, assim o inventor do Velcro®

³ <https://asknature.org/>

construiu duas estruturas distintas que se unem de maneira reversível (FERREIRA, 2016; SANTOS, 2018).

Figura 19: Imagens macroscópica do carrapicho e microscópica do Velcro.



Em (A) imagem macroscópica da semente de *Arctium* e em (B) imagem microscópica do Velcro.
Fotos de Robert Clark (A) e Emilly T. Griffiths (B).
Fonte: Marmey (2014).

Na investigação feita por Malshe *et al.* (2013), foram levantados os estudos realizados no desenvolvimento de superfícies bioinspiradas funcionais, como por exemplo: os pés das lagartixas, dos besouros e das rãs possuem a funcionalidade de adesão; algumas folhas como a de lótus são super-hidrofóbicas e autolimpantes; a pele de tubarão, e as penas dos periquitos-de-coroa-azul são anti-incrustante e hidrodinâmicas; etc. Eles ressaltam a importância do conhecimento construtivo do organismo, tanto nos aspectos físicos, quanto químicos (tratamento superficial ou material), pois só assim é possível garantir que as texturas aplicadas em produtos venham a desempenhar suas funções igualmente às encontradas na natureza.

No desenvolvimento de macrotextura bioinspiradas são encontradas duas técnicas de criação — 2D e 3D. Na primeira, o designer utiliza a semelhança da forma como inspiração partindo de uma imagem bidimensional, esta então é simplificada gerando o design final da forma do módulo (*rapport*) de repetição (CIDADE; PALOMBINI; KINDLEIN JÚNIOR, 2015; DISCHINGER, 2009; REIS, 2013; SANTOS, 2018; SILVA *et al.*, 2010). As texturas criadas via estrutura tridimensional necessitam do auxílio de equipamentos de precisão topográfico como o scanner tridimensional a laser. Esse equipamento promove alto grau de precisão dos detalhes, sendo possível trabalhar com sua forma após os dados tratados. Esse modo criativo abre um leque

de possibilidades criativas — como a forma final da textura — e tecnológica — melhor meio produtivo e material — para a reprodução industrial (SILVA *et al.*, 2009; SILVA, 2006; SILVEIRA *et al.*, 2010).

Neste trabalho, por se tratar da identificação de texturas táteis em escala macro de elementos da natureza, optou-se pela digitalização 3D como meio de captura das texturas.

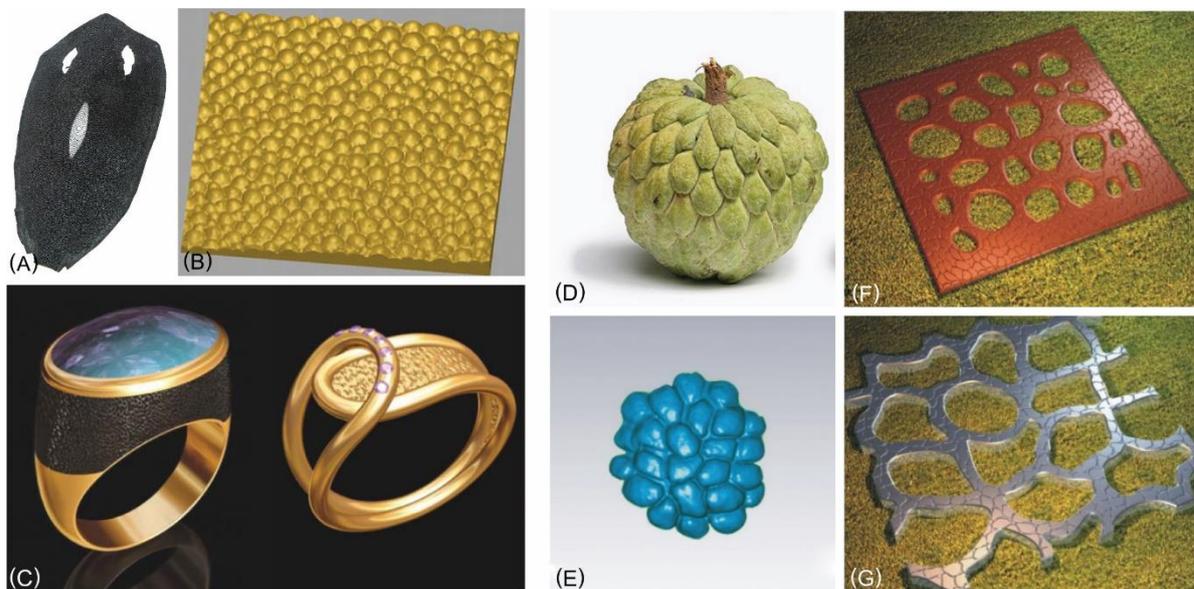
2.6 DIGITALIZAÇÃO 3D COMO MÉTODO DE EXTRAÇÃO DAS TEXTURAS BIOINSPIRADAS

A digitalização tridimensional é uma tecnologia que proporciona agilidade no processo criativo e analítico dos objetos físicos. Com esta ferramenta é possível capturar e analisar os mais finos detalhes pertencentes ao objeto. Com a digitalização 3D, juntamente com softwares específicos, é possível trabalhar com o controle dimensional e de qualidade, criação de moldes, entre outras possibilidades (BAXTER, 2000; OLIVEIRA, 2007; SILVA *et al.*, 2010). Para o design de superfície, esse tipo de equipamento torna-se muito útil no desenvolvimento de novas texturas bioinspiradas, pois além da criação pode-se utiliza-lo para aferição e análise dimensional dos *rappports* (SILVA, 2006; SILVA *et al.*, 2010; SILVEIRA *et al.*, 2010).

A digitalização tridimensional funciona utilizando as coordenadas cartesianas, seu meio de captação e recepção se dá através da holografia conoscópica com feixe de laser que realiza leitura pontual do objeto (BAXTER, 2000; OLIVEIRA, 2007; SILVA *et al.*, 2010). No Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS é utilizado frequentemente o scanner a laser da Digimil 3D para extrair e estudar os parâmetros da natureza. Na Figura 20 estão dispostos alguns trabalhos já realizados por alunos da Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Nestes exemplos, os autores criaram suas texturas bioinspiradas na natureza e realizaram testes virtuais das possibilidades de aplicações em objetos do cotidiano.

Nesse contexto, as texturas bioinspiradas desta pesquisa seguiram as mesmas metodologias dos trabalhos de referência (SILVA, 2006; SILVEIRA *et al.*, 2010): digitalização da forma natural, trabalho da malha em software e aplicação da textura no objeto.

Figura 20: Exemplo de texturas extraídas de formas naturais.



Em (A) couro de arraia; em (B) malha tratada após a digitalização e em (C) joias criadas com a textura do couro de arrais. Em (D) fruta-do-Condé (ou Pinha), (E) malha tratada após a digitalização e em (F) e (G) exemplos de megatexturas para aplicação de pisos externos.

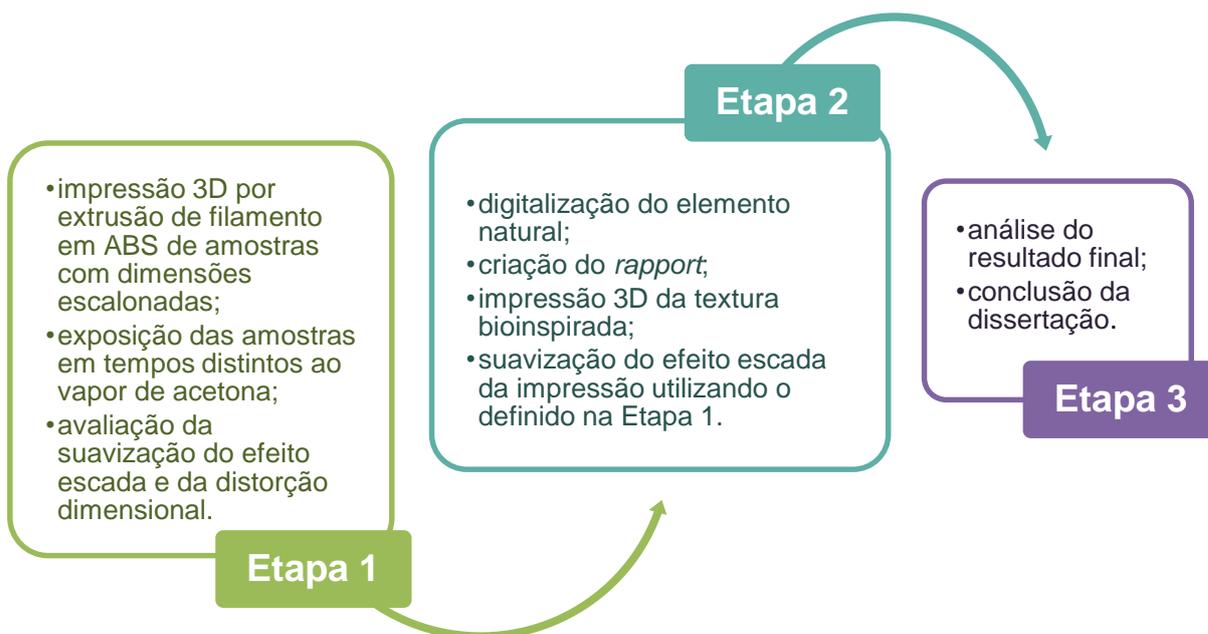
Fonte: Silva (2006), Silveira *et al.* (2010).

Diante do exposto, foi identificada relevância para a comunidade científica a unificação dos dois temas abordados neste trabalho. Primeiramente pelo crescimento da Manufatura Aditiva e a necessidade de formação de profissionais com conhecimentos técnicos sobre este meio produtivo. Por conseguinte, o uso de técnicas que podem auxiliar na criação de novos produtos com texturas bioinspiradas, a fim de, proporcionar ao mercado opções que podem ir além do apelo estético.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa aplicada busca explorar os conhecimentos necessários para descrever um método embasado em procedimentos técnicos, bibliográficos e experimentais alicerçado em três etapas (Figura 21).

Figura 21: Fluxograma das etapas da dissertação.



Nos próximos itens, estão detalhados os processos preliminares da pesquisa e, posteriormente, no Capítulo 5, estão detalhados os métodos para a criação e acabamento superficial da textura bioinspirada e seus resultados.

3.1 ESTUDO DOS PARÂMETROS DA SUAVIZAÇÃO DO EFEITO ESCADA COM OS VAPORES DE ACETONA FRIA COM AS PEÇAS TESTES PADRÕES.

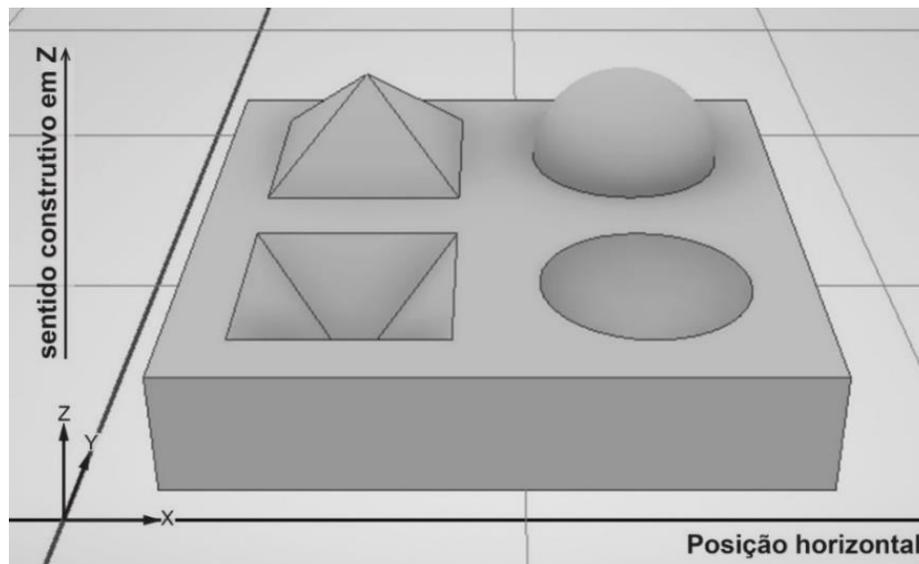
Nos Capítulos que seguem serão detalhados as etapas para a aplicação da técnica escolhida para este estudo: produção dos corpos de prova, aplicação do vapor de acetona fria, análise dos resultados e conclusão preliminar.

3.2 CORPOS DE PROVA: PRODUÇÃO E SUAVIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Para identificar o comportamento das amostras aos diferentes tempos de exposição aos vapores de acetona fria nas peças impressas em ABS por fabricação

por extrusão de filamento, foram utilizados corpos de prova com diferentes geometrias: plana, inclinada (pirâmide), curva (esfera) côncavas e convexas. Em um primeiro momento foram impressas 9 peças testes com picos e vales de 5 mm (Figura 22 e 23). Foi utilizado filamento fornecido pela Stratasys ABS-P430.

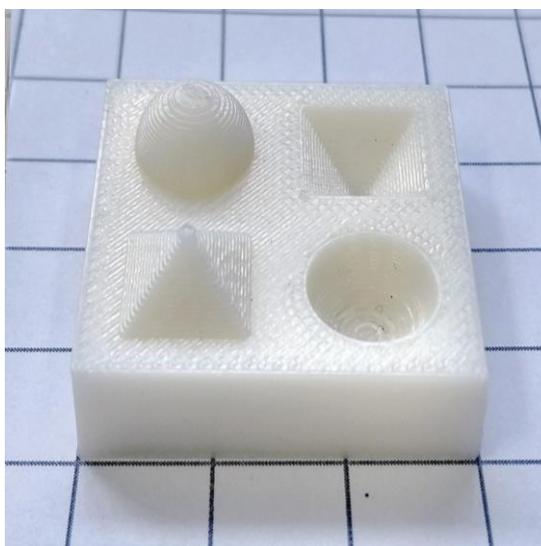
Figura 22: Ilustração do sentido construtivo da amostra na mesa de impressão



Fonte: Autora.

A posição de impressão das peças na mesa foi a horizontal (Figura 23), onde o sentido construtivo (Z) está direcionado ao sentido do topo das geometrias das amostras. A impressora utilizada foi a UPrint SE (Stratasys), localizada no LIFELAB, UFRGS, com resolução de 0,254 mm.

Figura 23: . Peça teste com picos e vales de 5 mm e dimensões externas totais de 30x30x15 mm (largura, profundidade e altura).



Fonte: Autora.

Essas 9 amostras com picos e vales de 5 mm serviram para verificar, por triplicata, se a técnica de suavização com vapores de acetona fria se comportaria de forma assídua entre os tempos de exposições distintos. Tais tempos foram determinados conforme a revisão de literatura e estão disponíveis no Quadro 3.

Quadro 3: Tempo de exposição das amostras ao vapor de acetona

Amostra	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9
Tempo de Exposição	20 min	30 min	40 min

Fonte: Autora.

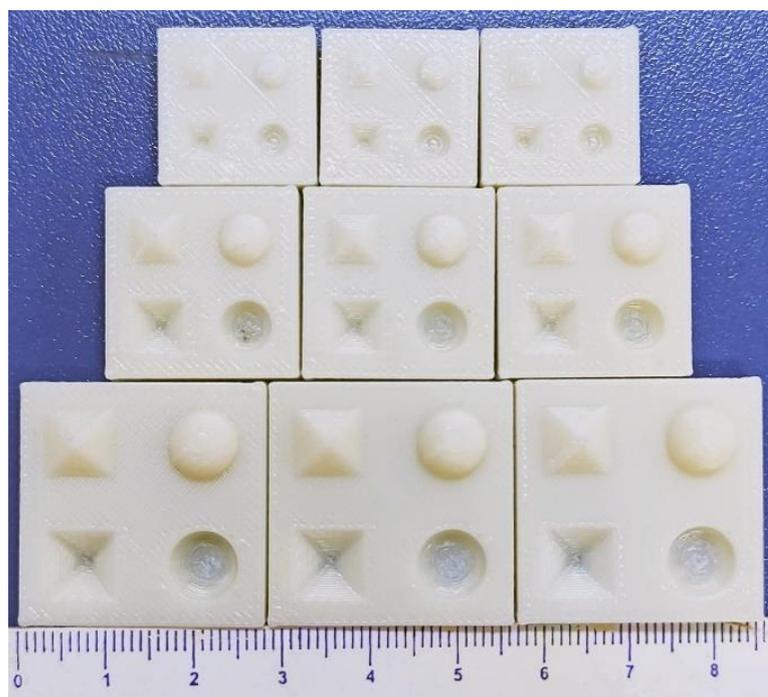
Assim, as peças ficaram expostas ao vapor de acetona fria de forma individual em um recipiente polimérico de PP (polipropileno) com fechamento hermético e volume de 300 ml, em uma sala com temperatura controlada de 22 °C. A acetona é introduzida em papéis-toalha e fixados nas laterais do recipiente com auxílio de ímãs. Todas as amostras foram depositadas na mesma posição: com picos e vales voltados para cima. Em cada procedimento, os papéis absorventes, cujos tamanhos foram proporcionais ao volume do recipiente, foram embebidos em 5 ml de acetona P.A. (Propanona). Após a aplicação da técnica, as amostras permaneceram em ambiente controlado para sua secagem por 24 horas. Todo o método utilizado está descrito no Apêndice A.

Para a verificação da qualidade superficial e suas possíveis perdas dimensionais, foram realizados as seguintes análises: rugosidade; desvio dimensional e análise visual.

Mediante os resultados das análises aplicadas — realizadas nas amostras com 5 mm de picos e vales —, foi possível concluir que a técnica de suavização com vapores de acetona fria possui estabilidade entre os tempos de exposição. À vista disso, foram verificados, também por triplicata, os mesmos tempos de exposição ao vapor de acetona fria em novas amostras com picos e vales de 4 mm, 3 mm e 2 mm (Figura 24).

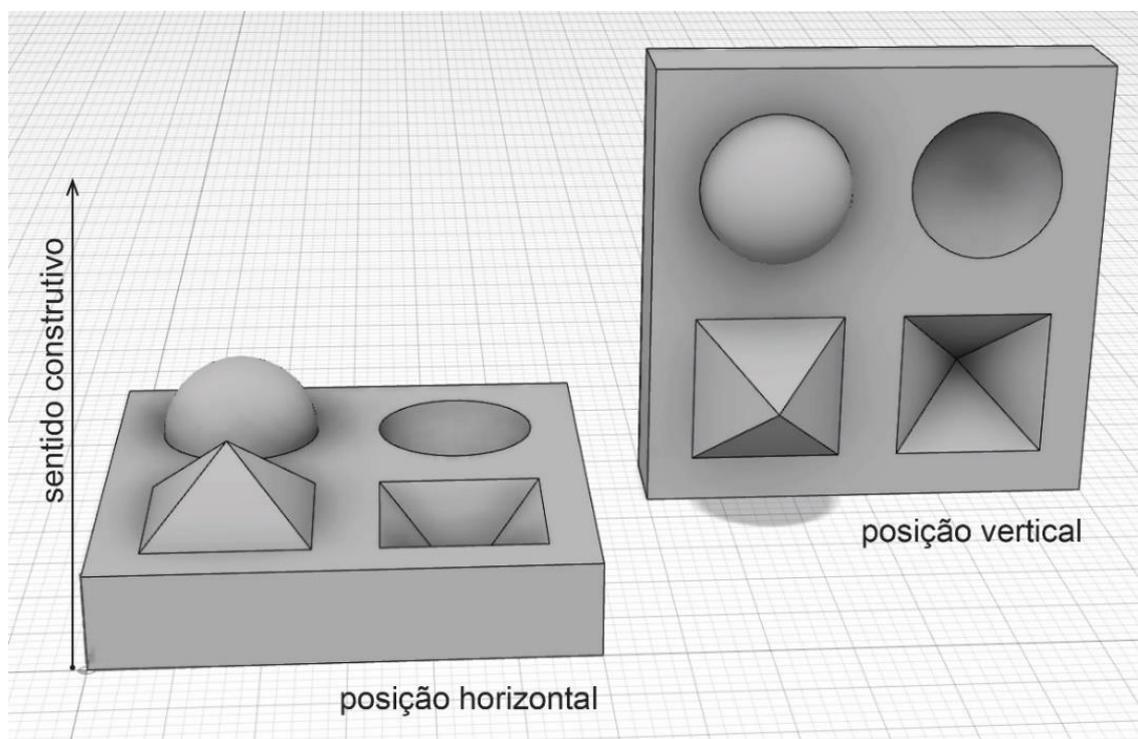
Contudo, nesse segundo experimento optou-se por imprimir as amostras em dois sentidos construtivos distintos: horizontal e vertical (Figura 25). Esta variação teve como objetivo a verificação da qualidades de impressão.

Figura 24: Imagem das amostras testes com geometrias concavas e convexas com picos e vales de 4 mm, 3 mm, 2 mm.



Fonte: Autora.

Figura 25: Sentido construtivo das amostras com picos e vales de 2 mm, 3 mm e 4 mm.



Fonte: Autora.

3.3 CORPOS DE PROVA: ANÁLISES SUPERFICIAIS E ANÁLISE DIMENSIONAL

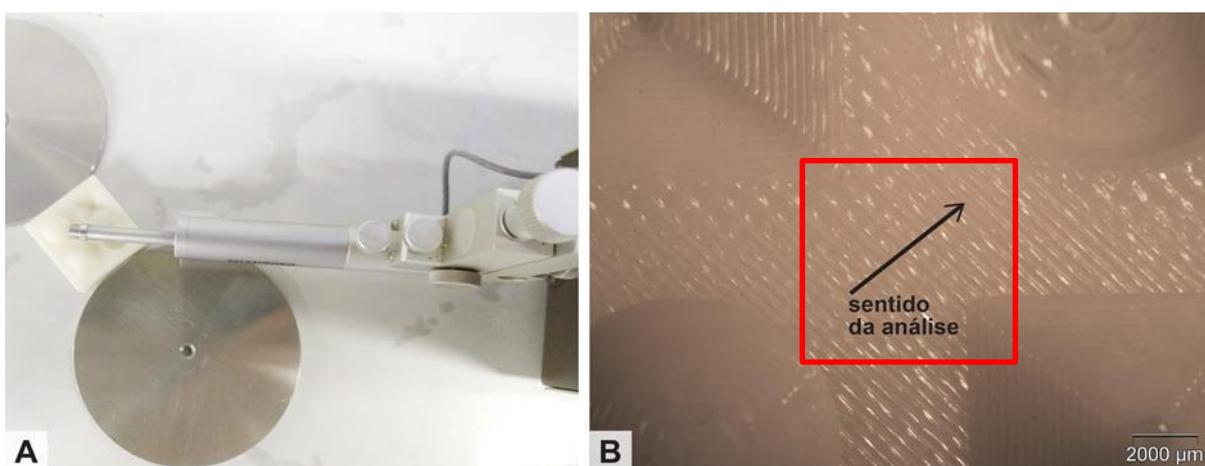
Com exceção da análise de rugosidade, restrita às amostras com picos e vales de 5 mm, as outras análises (visual e desvio dimensional) foram realizadas em todas as amostras. Vale ressaltar que as análises foram realizadas antes e após a exposição ao vapor de acetona fria.

3.3.1 Análise de rugosidade

Para a verificação da rugosidade superficial oriunda da impressão 3D por extrusão de filamento foi utilizado o rugosímetro SurfTest – 401 (Mitutoyo). As diretrizes foram utilizadas conforme estabelecido pela norma ABNT NBR ISO 4287: 2002 (ABNT, 2002). Foi utilizado como cálculo o desvio aritmético médio (R_a) que é dado pelas distâncias entre os picos e vales referentes à linha média da área rugosa em um trecho de medição.

Todas as 9 amostras com picos e vales de 5 mm foram medidas 5 vezes antes e depois da suavização com vapor de acetona fria. O local escolhido foi a parte central da amostra (Figura 26), no sentido de 90° do caminho de deposição do material.

Figura 26: Análise de rugosidade do efeito escada deixado pela impressão 3D.



Em A, equipamento varrendo a parte central da amostra. Em B, região onde o rugosímetro executou a varredura.

Fonte: Autora.

3.3.2 Análise visual por meio de equipamentos

Para analisar visualmente as superfícies das amostras, foram realizadas imagens microscópicas utilizando a Lupa Estereoscópica SZX16 (Olympus) e o Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV (TM3000, Hitachi). Ambos os equipamentos estão situados no LDSM na Escola de Engenharia da UFRGS. Devido a limitações de altura do equipamento, o MEV foi utilizado somente para capturar imagens das amostras com picos inferiores a 5 mm.

3.3.3 Análise do desvio dimensional

Esta análise foi utilizada para detectar os desvios dimensionais das amostras em cada etapa. Para tanto, as peças foram digitalizadas (antes e depois da exposição ao vapor de acetona) com o scanner 3D a laser (Digimill 3D, Tecnodrill), lente de 75 mm (precisão z de 0,01 mm) e resolução xy de 0,05 mm. Os dados obtidos foram avaliados no software Geomagic Qualify.

4 RESULTADOS

A seguir, estão descritos os resultados do uso da acetona fria para a suavização das amostras impressas em ABS por fabricação por extrusão de filamento.

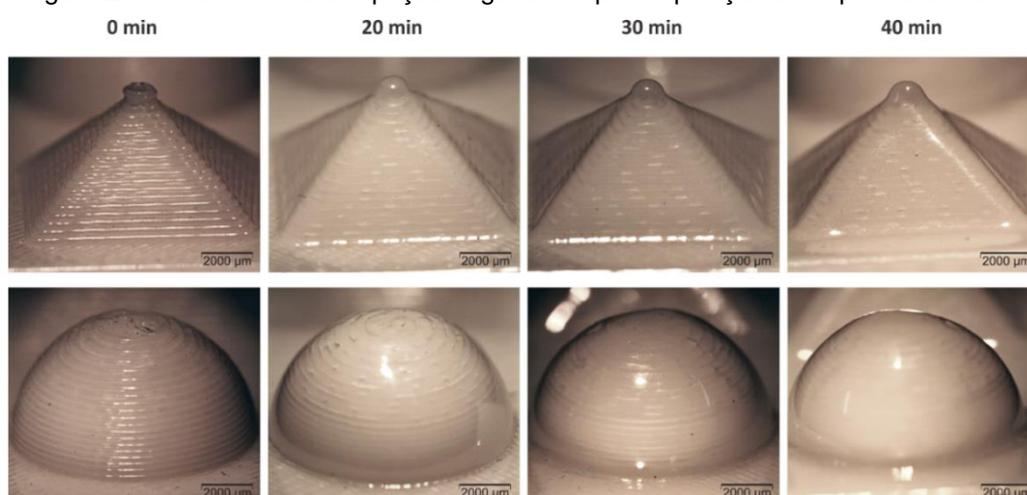
4.1 ÍNDICE DE RUGOSIDADE

A rugosidade média (Ra) das superfícies planas das peças antes da exposição ao vapor de acetona foi de 4,87 micrometros. Após a exposição, o Ra ficou na ordem de 0,47 micrometros sem diferença significativa entre os 3 tempos testados. Essa grande queda no valor de rugosidade e o atingimento de um platô está em conformidade com o observado em outros estudos (GARG; BHATTACHARYA; BATISH, 2017, LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2017, NEFF; TRAPUZZANO; CRANE, 2018, MACIAG; WIECZOREK; KALSA, 2019, ROMERO *et al.*, 2021).

4.2 ANÁLISES VISUAIS POR LUPA ESTEREOSCÓPICA E MEV

Na análise visual com a Lupa Estereoscópica (Figura 27), foi observada a suavização do efeito escada e aumento do brilho da peça, principalmente nos tempos de 30 e 40 minutos de exposição ao vapor de acetona. Foi possível notar deformações na ponta da pirâmide e em suas arestas, o que também se observou nas bordas da peça. Além disso, houve arredondamento na intersecção entre as geometrias e o plano da base, o que se tornou mais crítico na amostra de 40 minutos. Esse comportamento foi observado em todas as amostras.

Figura 27: Análise visual das peças originais e após exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Pestano; Pohlmann; Silva (2022).

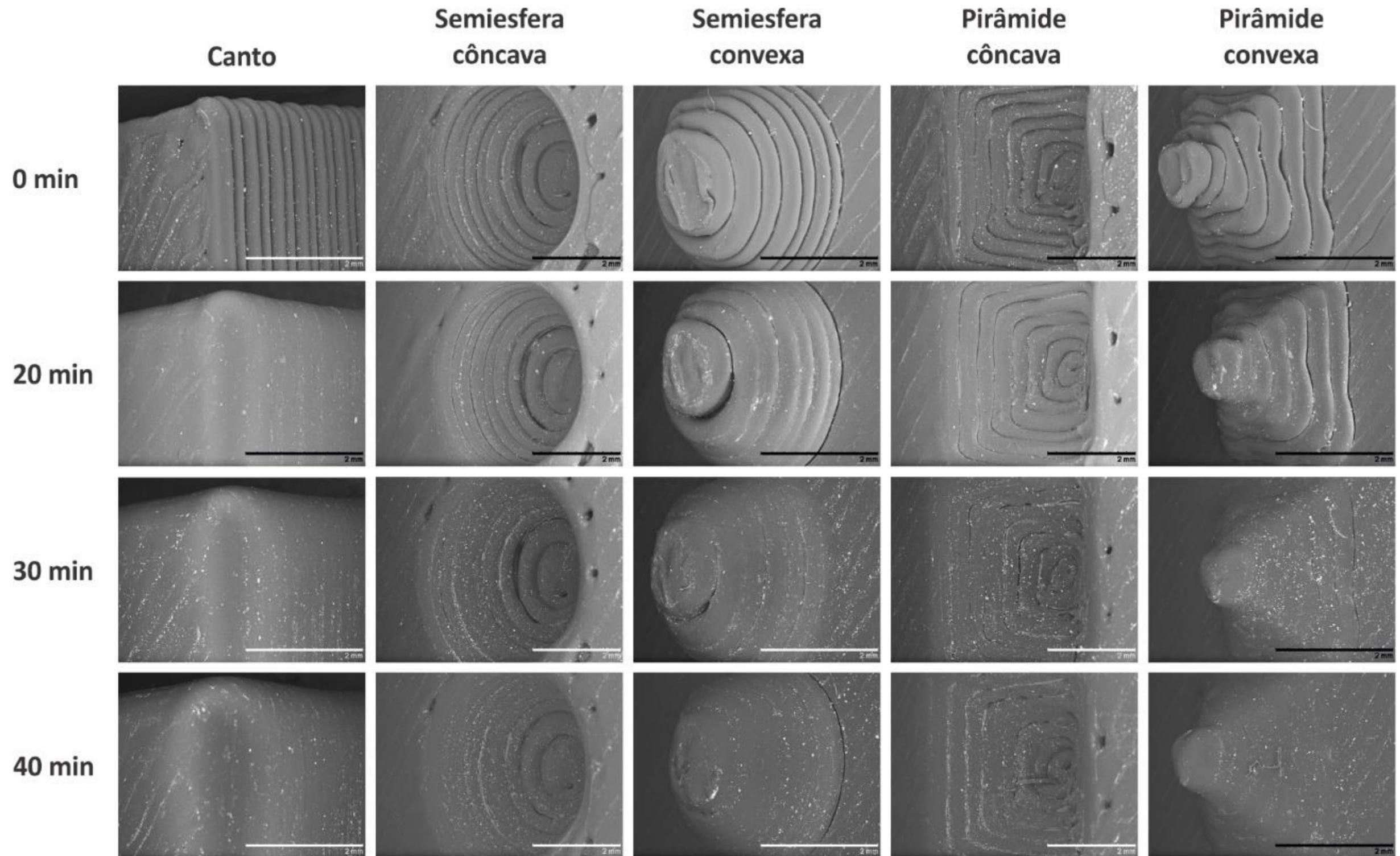
4.2.1 Peças impressas na orientação horizontal

Nas imagens obtidas por MEV das peças impressas com picos e vales de 2 mm (Figura 28), observa-se a suavização de superfícies e arestas desde o menor tempo de exposição (20 min). Nas peças convexas, é possível notar que, com 40 min de exposição, pois suas arestas ficam bem arredondadas. Nas semiesferas, nota-se uma leve redução de sua altura com exposição de 40 min. Diferentemente do que ocorreu com as geometrias convexas, a suavização nas geometrias côncavas ocorreu de forma mais leve, um pouco de efeito escada ainda foi observado após os 40 minutos de exposição.

Observando os cantos das peças impressas com picos e vales de 3 mm (Figura 29), também houve suavização das superfícies e arredondamento das arestas desde o menor tempo de exposição ao vapor de acetona. Já nas superfícies laterais das peças, a maior diferença na suavização ocorre a partir dos 30 minutos de exposição. As geometrias côncavas apresentaram maior suavização próximo às bordas e menor suavização nas camadas mais profundas, indicando uma dificuldade do vapor em atingir as reentrâncias.

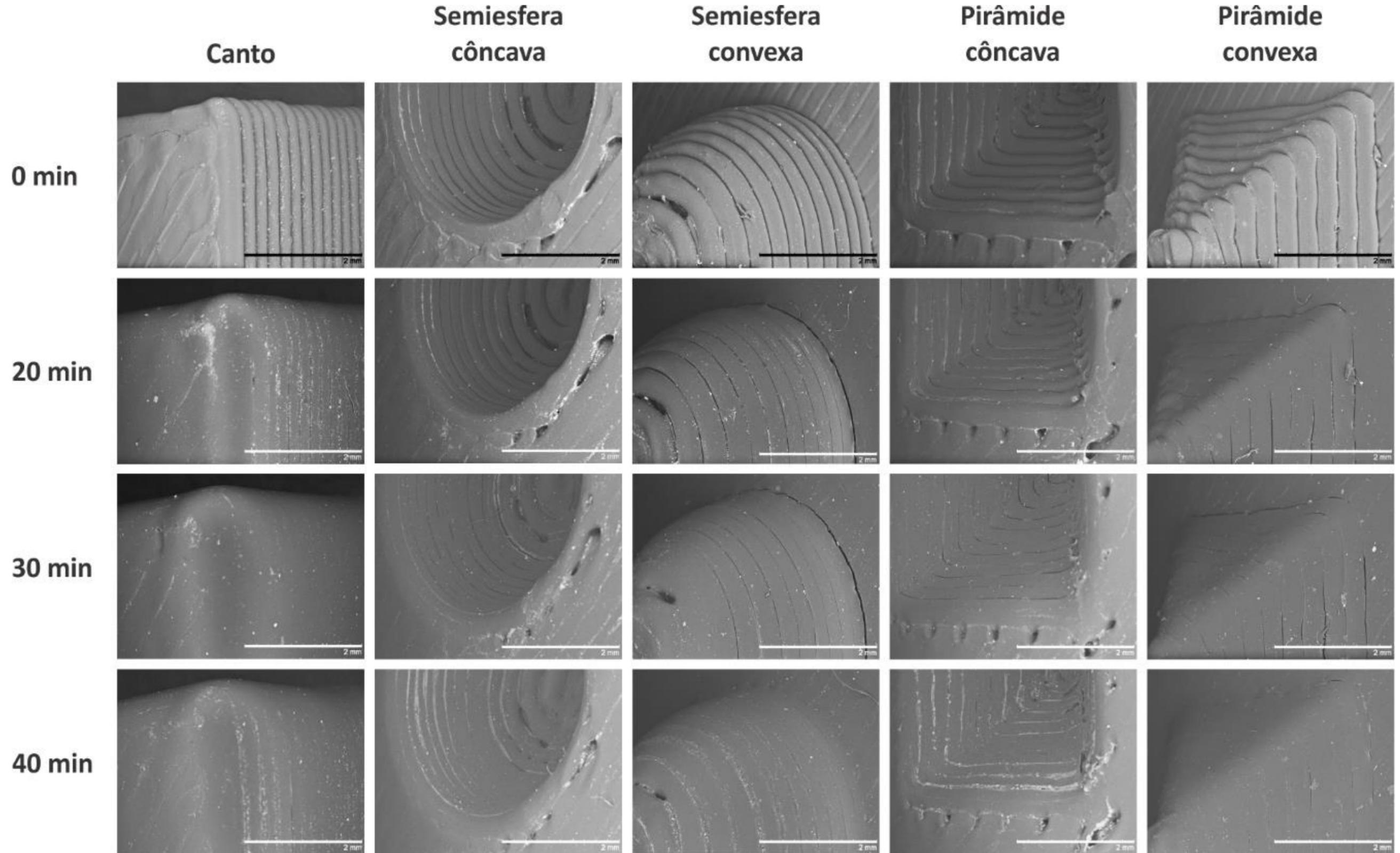
O mesmo comportamento foi observado nas peças com picos e vales de 4 mm (Figura 30). Novamente, pode ser notada a suavização das superfícies e arredondamento das arestas. Com o aumento do tamanho da peça, o mesmo efeito de arredondamento fica menos evidente, pois os planos das laterais das geometrias triangulares são proporcionalmente maiores. Assim como nas geometrias côncavas de 3 mm, percebeu-se uma dificuldade do vapor de acetona em atingir as reentrâncias. Com o aumento do tamanho da peça, a profundidade e a largura das geometrias côncavas aumentaram e a suavização foi mais eficiente, aparentemente sendo a largura o fator de maior influência.

Figura 28: MEV das peças impressas no sentido horizontal com picos e vales de 2 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona.



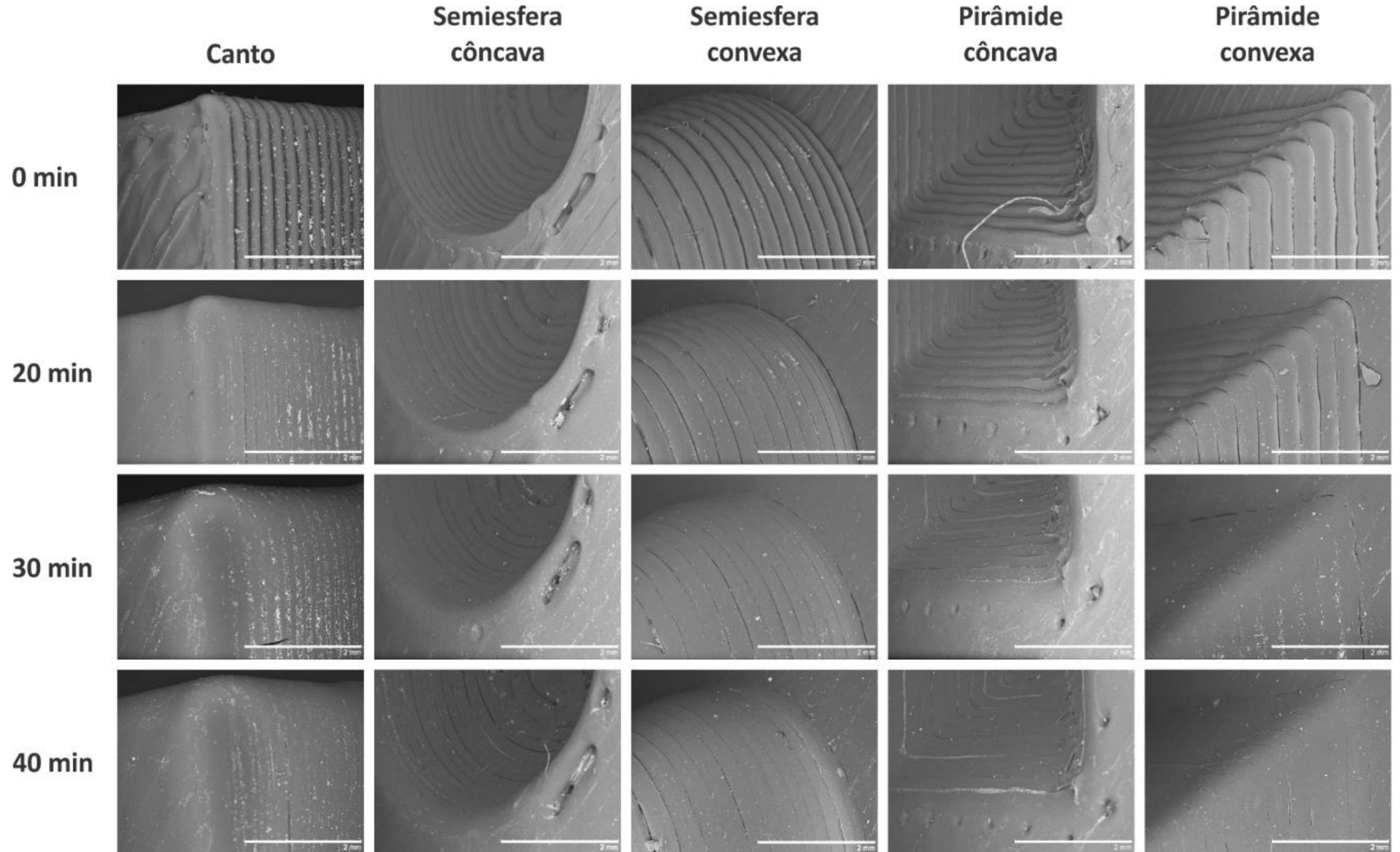
Fonte: Pestano; Pohlmann; Silva (2022).

Figura 29: MEV das peças impressas no sentido horizontal com picos e vales de 3 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Pestano; Pohlmann; Silva (2022).

Figura 30: MEV das peças impressas no sentido horizontal com picos e vales de 4 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Pestano; Pohlmann; Silva (2022).

4.3 PEÇAS IMPRESSAS NA ORIENTAÇÃO VERTICAL

As peças impressas na vertical possuem acabamento superficial distinto, já apresentando menor efeito escada antes do tratamento com acetona. Notadamente, as pirâmides possuem os picos mais suaves e arestas mais definidas. Como essas formas foram mais representativas para os resultados, as análises concentraram-se apenas nas geometrias triangulares.

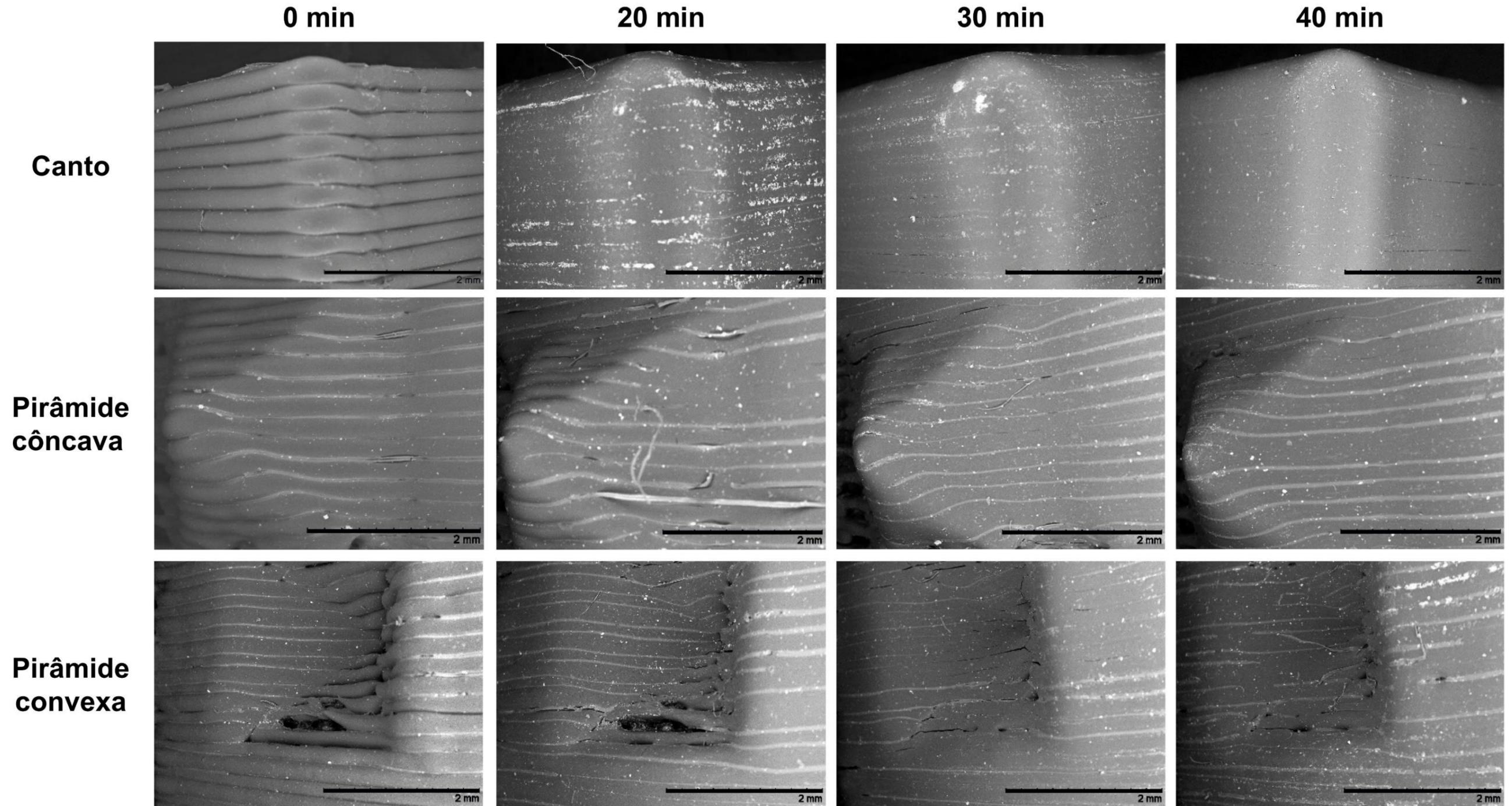
Nas imagens obtidas por MEV das peças impressas com picos e vales de 2 mm (Figura 31), observa-se melhores resultados de suavização nos tempos de exposição de 30 e 40 min. Embora também haja um arredondamento das arestas, as pirâmides aparentam menor deformação geométrica quando comparadas às impressas na horizontal. Ainda, observa-se um melhor resultado de suavização na pirâmide côncava.

Nas peças com picos e vales de 3 mm (Figura 32), observa-se ainda o arredondamento das arestas, mas com efeito menos evidente devido ao maior número de camadas impressas.

Os mesmos resultados são novamente observados nas peças impressas com picos e vales de 4 mm (Figura 33). Cabe observar que a geometria côncava obteve melhor resultado com o tempo de 40 minutos de exposição ao vapor de acetona.

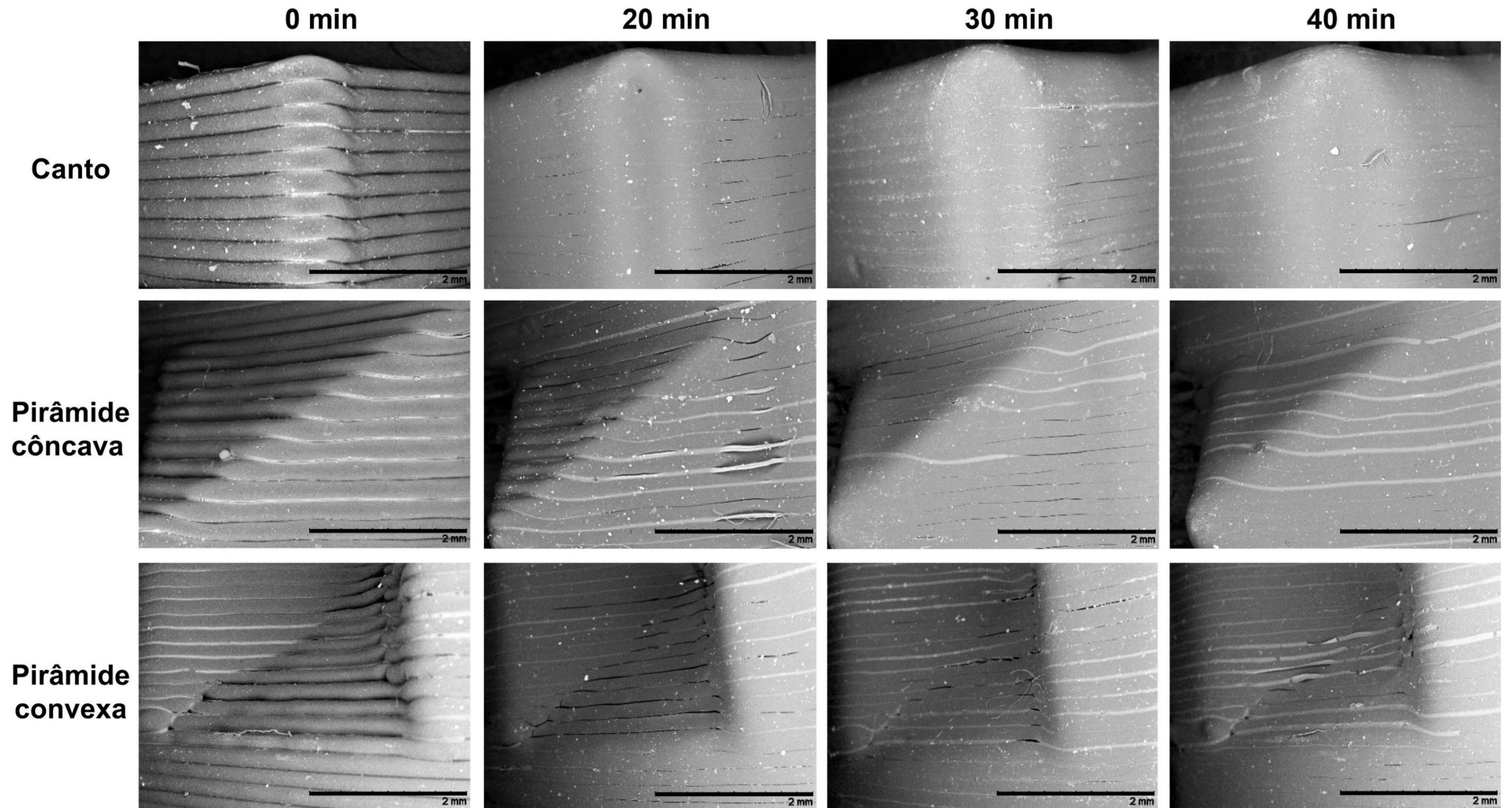
Diante do exposto, foi definido utilizar o tempo de 30 minutos de exposição aos vapores de acetona fria para ser utilizado na textura bioinspirada, uma vez que foi verificado nas imagens que com 20 minutos de exposição ao vapor de acetona fria as superfícies convexas e côncavas o alisamento não se completa.

Figura 31: MEV das peças impressas no sentido vertical com picos e vales de 2 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona.



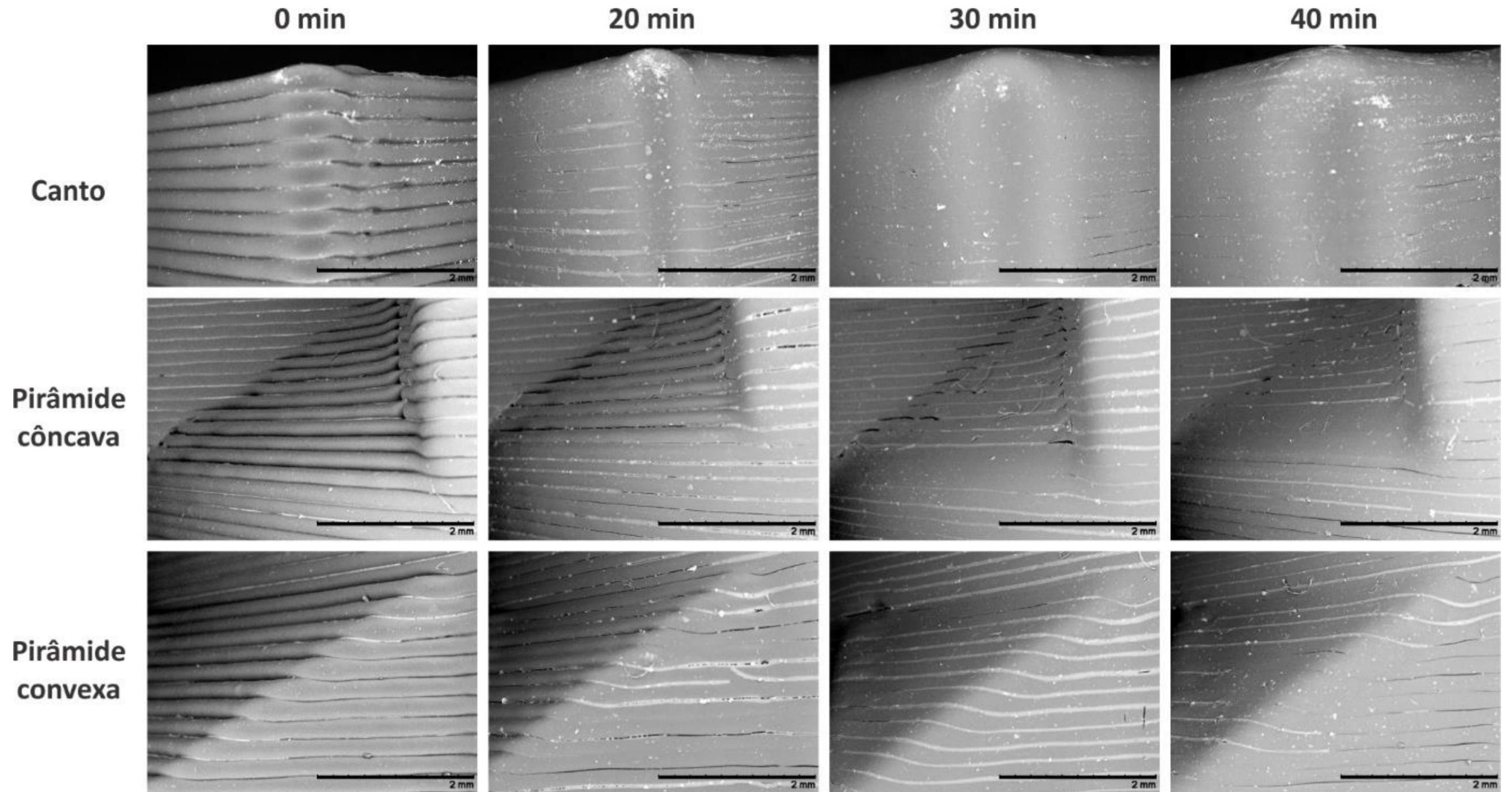
Fonte: Autora.

Figura 32: MEV das peças impressas no sentido vertical com picos e vales de 3 mm originais e após exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Autora.

Figura 33: MEV das peças impressas no sentido vertical com picos e vales de 4 mm originais e após exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Autora.

4.4 ANÁLISE DO DESVIO GEOMÉTRICO

Para a análise do desvio geométrico foi realizada uma comparação 3D, primeiramente, nas amostras com picos e vales de 5 mm (Figura 34).

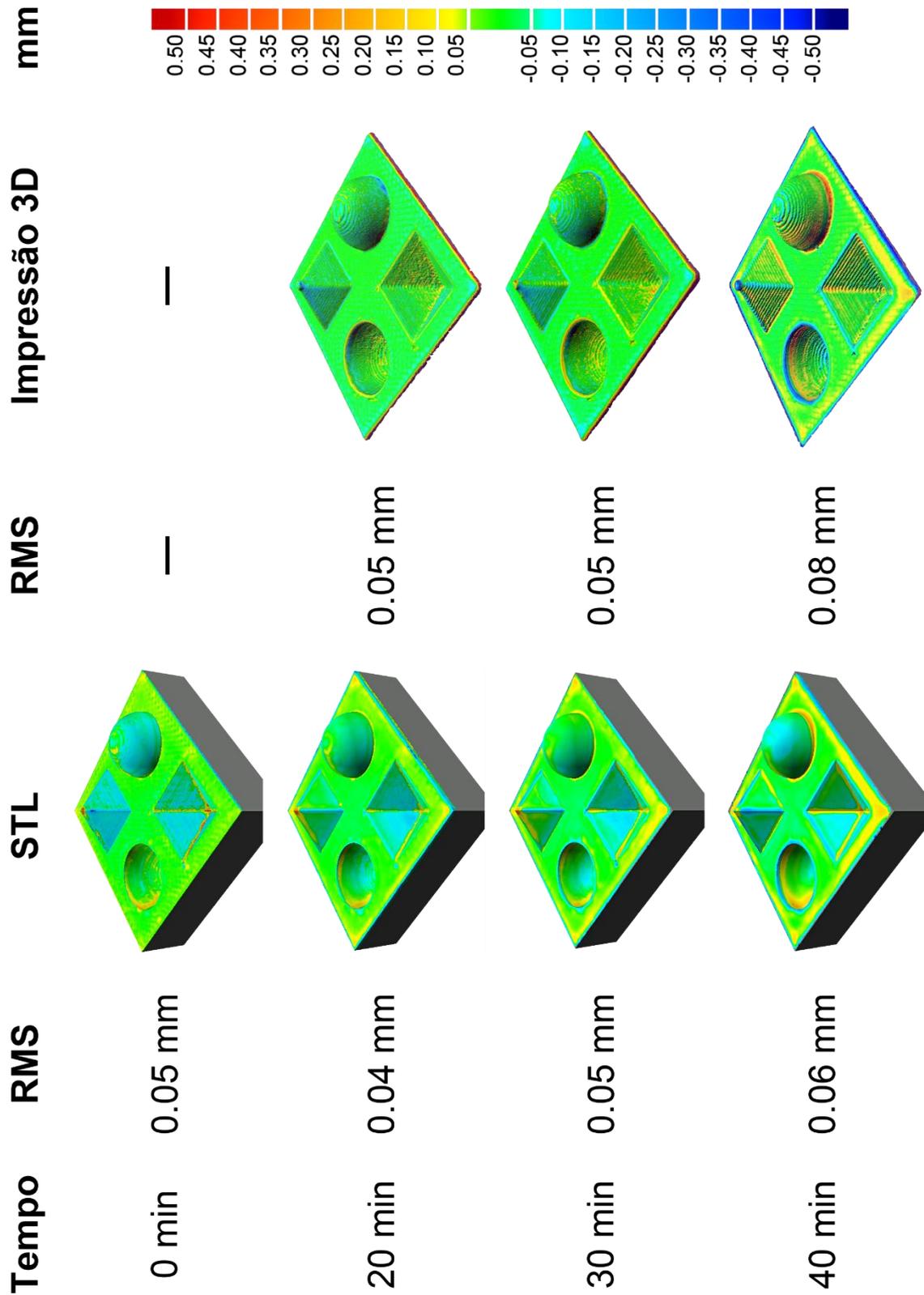
Ao comparar o arquivo STL com a impressão 3D antes do tratamento de suavização, verificou-se uma distorção acentuada (em tons de azul do espectro), sobretudo nas superfícies da pirâmide côncava e convexa, bem como na semicircunferência côncava. Também, foi possível observar que no topo da pirâmide há distorção de forma (em laranja e vermelho do espectro). Além disso, nas formas convexas, existem pontos críticos (em vermelho do espectro), cujas causas foram verificadas por meio de imagens com lentes de aproximação: nestes locais existem rebarbas de impressão, tratando-se do início e fim de cada caminho de extrusão.

Na comparação 3D entre os arquivos STL e as amostras expostas por 20 minutos ao vapor de acetona, houve mudanças nas superfícies planas da pirâmide e da semicircunferências convexas. Pode-se dizer que ocorreu preenchimento de área (verde no espectro) significando que essas regiões aproximaram-se do desenho CAD (STL), observado também pelo erro quadrático médio (RMS) que reduziu 0.01 mm em relação a peça sem suavização. Contudo, nas superfícies côncavas o mesmo não se sucedeu, pois os pontos críticos estão atenuados.

Na comparação 3D entre os arquivos STL e as amostras que ficaram expostas ao vapor de acetona por 30 minutos observa-se maior distorção nas arestas, quando comparado com os tempo anterior (20 min.). Além disso, nas bordas das quinas externas ficou acumulada resina plástica (tons amarelos do espectro). Na região côncava, observa-se que a exposição ao vapor de acetona fez mais efeito, quando comparado com o tempo de exposição de 20 minutos.

As deformações mais críticas estão na comparação 3D entre os arquivos STL e as amostras que ficaram expostas ao vapor de acetona por 40 minutos. Observa-se um acúmulo acentuado de polímero dissolvido, principalmente, nos cantos vivos e nas bases de todas as geometrias, bem como nas bordas externas das amostras.

Figura 34: Comparação 3D das amostras com picos e vales de 5 mm antes e depois da exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Autora.

No que tange à análise da comparação entre as amostras antes e após o processo de suavização, aquelas que foram expostas por 20 minutos ao vapor de acetona não tiveram mudanças significativas além do topo da pirâmide. Já nas amostras expostas por 30 minutos foi visualizada uma perda de forma nas arestas e bordas das geometrias côncavas (tons amarelados) e convexas (tons azulados). Nas amostras expostas por 40 minutos, verificaram-se deformações regulares em todas as arestas e bordas das geometrias côncavas e convexas. Assim como, um acúmulo de polímero dissolvido nas quinas da superfície plana.

De modo geral, observou-se que as amostras com picos e vales de 5 mm tiveram menor deformação com os menores tempos de exposição (20 min e 30 min). Quando comparado com o arquivo STL, foi possível verificar que as superfícies planas das geometrias projetadas ficam próximas aos do desenho CAD. Outra observação é o acúmulo de polímero dissolvido localizado nas bordas das superfícies planas na comparação 3D do STL com os tempos de exposição. O mesmo fenômeno só foi identificado na análise da comparação 3D dos impressos antes e depois da exposição com os tempos de exposição de 30 min e de 40 min. Por fim, as análises dos desvios dimensionais por digitalização 3D também não obtiveram diferenças significativas quantitativamente (RMS) nas amostras em geral, com exceção daquelas que permaneceram expostas a acetona por 40 minutos — 0.08 mm.

Para a análise das amostras com picos e vales de 2, 3 e 4 mm, não foi utilizado o arquivo CAD (STL) como referência, mas sim a peça diretamente produzida por FDM sem tratamento visando descartar os erros intrínsecos do processo de impressão 3D. Então, para a avaliação dos desvios geométricos, foram utilizados os dados obtidos com a digitalização 3D antes e depois do processo de suavização com vapor de acetona (Figura 35) (PESTANO; POHLMANN; SILVA, 2022).

As áreas em verde são aquelas em que os desvios ficam abaixo de 0,05 mm, que foi a resolução de digitalização. Podem-se observar alguns desvios geométricos nos locais onde as cores mudam para os tons azuis, amarelos e vermelhos. Apesar de a técnica permitir um cálculo estatístico dos pontos, as áreas afetadas pela suavização são pequenas em relação ao restante do modelo em verde, fazendo com que os valores de desvios dimensionais se diluam e tenham médias sem diferenças significativas. Por esse motivo, foi realizada a análise qualitativa das imagens. De

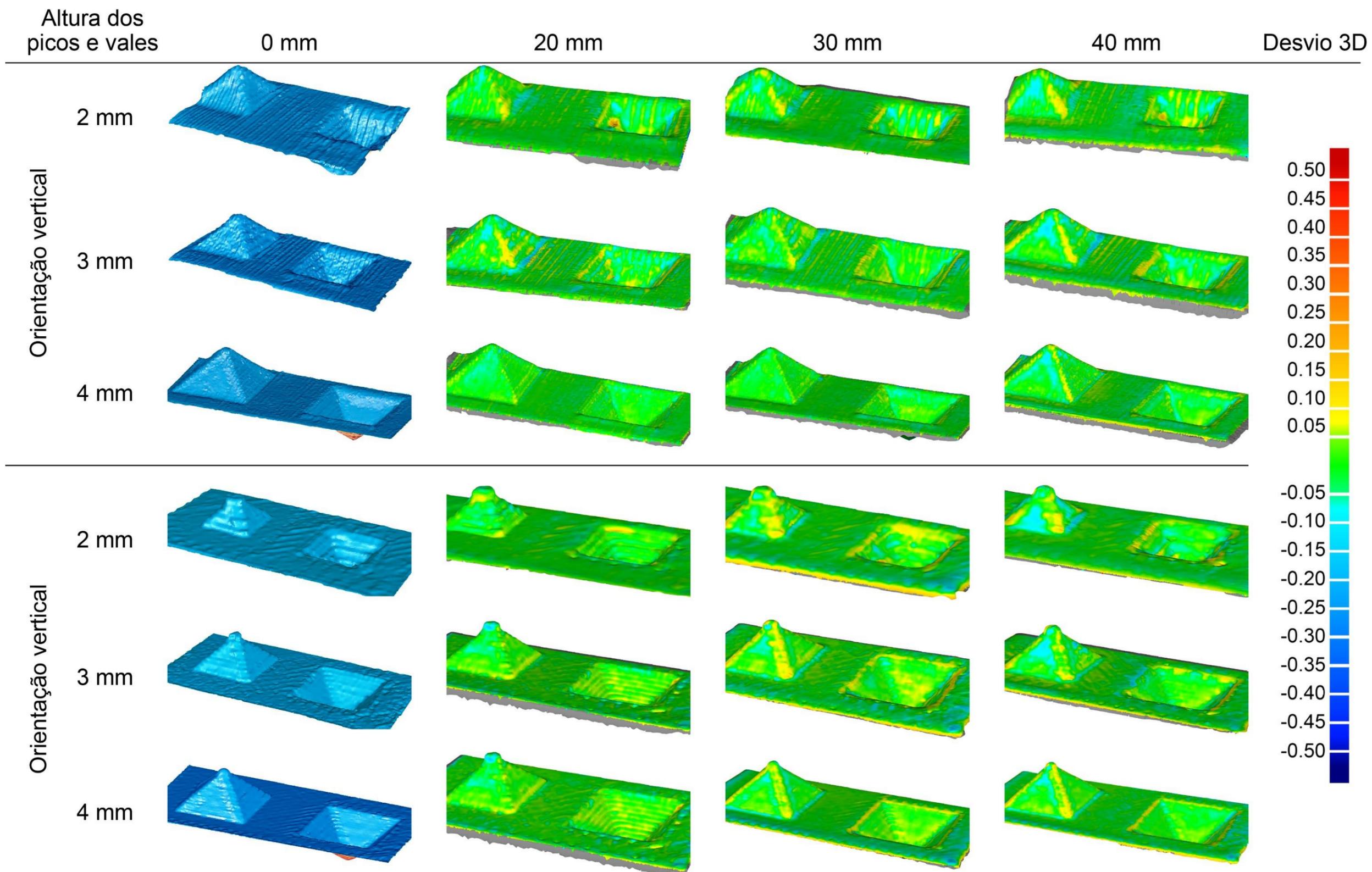
forma geral, é possível notar que os desvios geométricos são compatíveis com as análises visuais realizadas por MEV.

Claramente há arredondamentos nas arestas das pirâmides (convexas), implicando em uma redução na geometria na ordem de 0,1 mm (amarelo). Também é possível observar que um pouco de material escorregar para a base das pirâmides, em alguns casos formando um raio (*fillet*) de 0,1 a 0,2 mm (azul). Esses efeitos são mais notáveis nas amostras menores e com maior tempo de exposição ao vapor de acetona. Observa-se, ainda, um leve inchamento de algumas áreas planas e das faces de algumas pirâmides (azul). O maior exemplo disso é a amostra de 2 mm / 40 min impressa na horizontal, que se tornou praticamente cônica. Quanto às formas côncavas, se observa um arredondamento nas bordas com redução da geometria (amarelo) e também algumas deformações nas laterais internas.

Em geral, é possível notar que as amostras impressas na orientação vertical apresentam melhores resultados de acabamento com menores desvios geométricos, o que está de acordo com os achados de Garg; Bhattacharya; Batish (2017). Uma vez que quanto maior o tempo de exposição ao vapor de acetona, maior o desvio geométrico observado na peça, com base nos resultados aqui apresentados recomenda-se a utilização de um tempo 30 minutos.

Aparentemente, de forma relativa, o desvio geométrico é mais significativo para as amostras menores. Assim, tem-se resultados mais críticos para as amostras de 2 mm, intermediários para as amostras de 3 mm e ótimos para as amostras de 4 mm.

Figura 35: Comparação 3D entre as peças antes e depois da exposição ao vapor de acetona.



Fonte: Pestano; Pohlmann; Silva (2022).

5 ESTUDO DE CASO: TEXTURAS BIOINSPIRADAS EM OBJETOS PARA USO MANUAL

A metodologia para a criação de macrotexturas táteis bioinspiradas serão detalhadas nos tópicos na seguinte ordem: (1) inspiração, (2) captação da forma, (3) criação do *rapport* e (4) aplicação na amostra que foi impressa por fabricação por extrusão de filamento em ABS e suavizada com vapor de acetona fria.

5.1.1 Inspirações na natureza

Ao buscar inspiração na natureza para as macrotexturas táteis foram tomadas como base alguns adjetivos que se encaixariam na procura de percepções hápticas como: rugoso, áspero, aderente, liso, suave, escorregadio. Todos estes embasados na pesquisa preliminar sobre percepção tátil.

Dentre as imagens de elementos naturais encontradas nos canais de busca, optou-se por um que se mostrou mais promissor e factível com a ideia do projeto: a concha Bivalve (Quadro 4).

Quadro 4: Elemento natural que traduziu os adjetivos esperados em uma macrotextura tátil — a concha do molusco Bivalve da família Cardiidae.

Imagem	Nome	Textura	Rapport
	Concha do molusco Bivalve da família Cardiidae.	Sua textura possui o desenho simétrico e de mesmo tamanho que se apresentam de forma radial. Seu aspecto aparenta suavidade e aderência.	Necessita a criação de um módulo de repetição e um ajuste no tamanho da malha para que seja possível imprimí-lo.

Fonte: Autora.

A concha do molusco Bivalve pode ser localizada em regiões arenosas em todo o mundo e existem mais de 205 espécies. Popularmente conhecido como berbigão possui formato de coração quando vistas lateralmente — com as duas partes fechadas —, suas estrias são simétricas, radiais e uniformemente afastadas (SCHNEIDER, 1995). Essas características tornam a concha deste molusco uma excelente inspiração para a criação de uma textura tridimensional para objetos de uso manual.

A criação do *rapport* inspirada na concha do berbigão se dará com os seguintes processos:

- a) Extração da forma natural utilizando a digitalização 3D;
- b) Ajuste e montagem das nuvens de pontos;
- c) Criação da malha STL (*Standard Triangle Language*);
- d) Criação do *rapport* com o auxílio de programas 3D;
- e) Aplicação do módulo definido em uma peça teste;
- f) Impressão 3D por extrusão de filamento da peça teste;
- g) Suavização da rugosidade da impressão com o tempo de exposição aos vapores de acetona fria selecionado;
- h) Análise e dissertação dos resultados.

5.1.2 Digitalização 3D da concha do molusco bivalve

No processo de escaneamento da concha do molusco bivalve foi utilizado o scanner a laser da Digimil 3D. Para que todos os detalhes pudessem ser adquiridos foram necessárias 6 tomadas diferentes de captação.

Com o auxílio do software Geomagic, as digitalizações viraram nuvens de pontos que puderam ser montadas. Logo após a limpeza dos excessos de pontos não vinculados ao objeto, foi possível gerar a forma final em uma Malha com 633.234 triângulos (Figura 36).

Figura 36: Malha gerada após a montagem das nuvens de pontos.



Fonte: Autora.

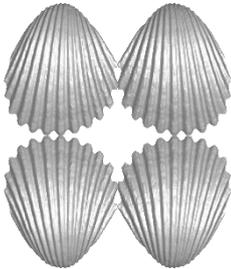
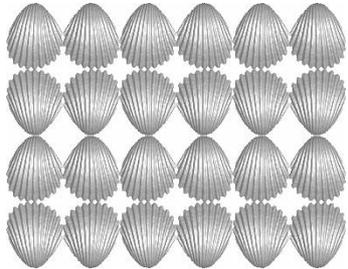
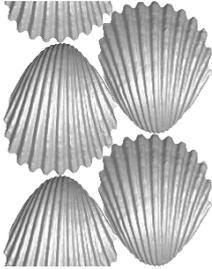
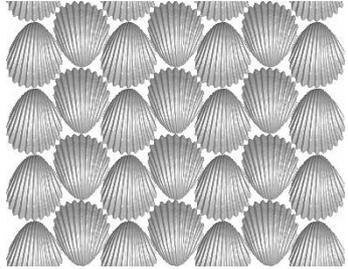
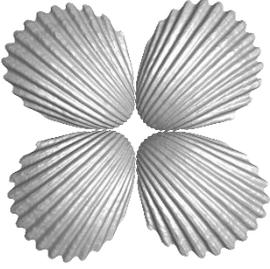
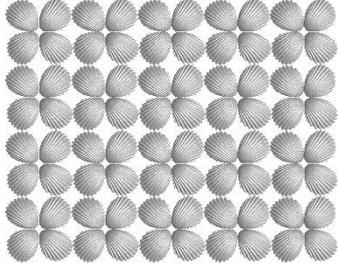
Com a malha STL pronta, partiu-se para a criação do *rapport* bioinspirado.

5.1.3 Criação do *rapport* bioinspirado

Foram criadas duas opções de texturas tridimensionais bioinspiradas:

- 1) Múltiplas volumetrias (Quadro 5): foi utilizada a volumetria natural da concha com suas estrias radiais;
- 2) Volumetria plana (Quadro 6): a inspiração foi a volumetria das estrias radiais da concha e sua sequência radial.

Quadro 5: opções de *rapports* utilizando múltiplas geometrias.

	Módulo de repetição	Rapport
1		
2		
3		

Fonte: Autora.

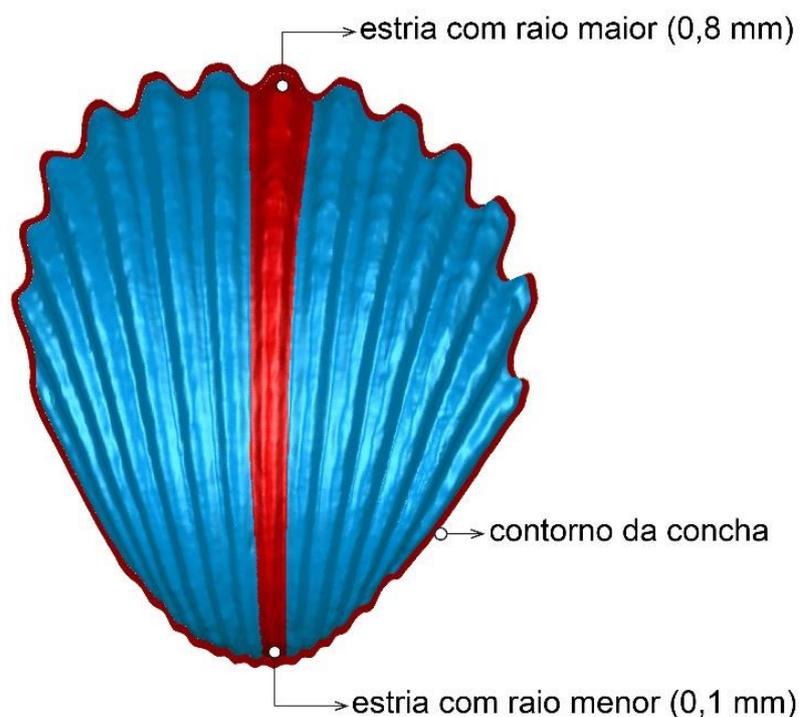
Na primeira opção (Múltiplas volumetrias), foram elaborados três *rapports* (Quadro 5). O primeiro módulo de repetição (1º linha do Quadro 5) foi projetado por dois espelhamentos da forma da concha do molusco bivalve e seu *rapport* é a cópia do módulo na horizontal e na vertical. Essa textura traz ao olhar uma sensação de movimento contínuo.

O módulo de repetição seguinte (2º linha do quadro 5) foi projetado por meio de cópias da volumetria básica na vertical. Logo após, realizou-se um espelhamento na horizontal mais uma rotação 360° no conjunto todo, esses movimentos proporcionaram um encaixe mais aproximado entre as duas colunas de elementos, minimizando assim os espaços entre as formas. Por fim, foram cortados de modo que se pudesse realizar um encaixe quando o módulo fosse replicado e criado o *rapport*. A repetição deste módulo ficou ajustada harmoniosamente como um caminho de tijolos.

O 3º módulo de repetição (Quadro 5) foi pensado em um padrão circular com 4 cópias. Seu *rapport* foi dado pela repetição vertical e horizontal. A repetição do módulo proporcionou uma alusão se pétalas de flores e as estrias das conchas trazem movimento ao conjunto.

Para a criação de texturas com geometrias planas foi utilizando a técnica da simplificação da forma. Para isso, foram extraídas as principais características da concha do molusco bivalve que foram o contorno e a estria da parte central (Figura 37).

Figura 37: Ilustração das principais formas extraídas da concha bivalve para a criação do módulo por simplificação da forma.



Fonte: Autora.

Para extrair as principais formas da concha bivalve, foi utilizado um recurso de fatiamento no programa Geomagic, onde se extraiu: (1) o contorno da concha; e (2) as duas curvaturas das extremidades da estria concha (raio maior e raio menor) na parte mais central da concha (Figura 37). Para poder trabalhar no *rapport* foi necessário utilizar 3 programas, uma vez que o STL não pode ser editado no Inventor. Dessa forma, depois dos arquivos salvos no formato STL no Geomagic, eles foram convertidos para OBJ (*Object File Wavefront 3D*) com o auxílio do programa Fusion 360°.

A projeção planificada da concha bivalve se deu da seguinte forma:

- 1) No contorno geral da forma da concha bivalve foram traçadas linhas radiais guias que auxiliaram na posição e projeção das duas estrias com raios distintos — maior e menor;
- 2) Por meio de planos perpendiculares as duas extremidades das estrias foram adicionadas e extrudadas por caminho de transição;
- 3) O leque de estrias foi criado por espelhamentos em ambos os lados gerando 14 estrias no total;
- 4) Os elementos extras foram excluídos com o comando extrusão — recortar.

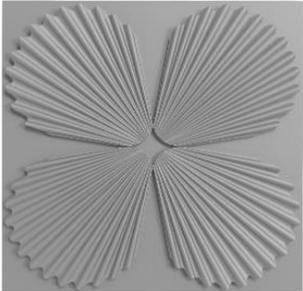
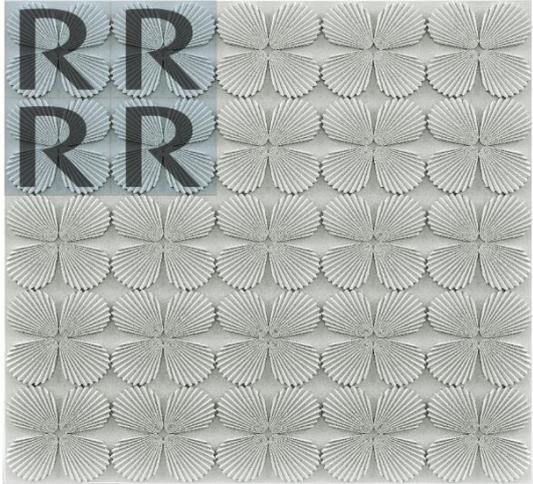
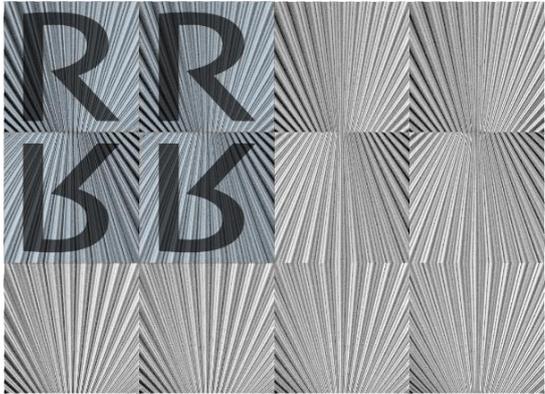
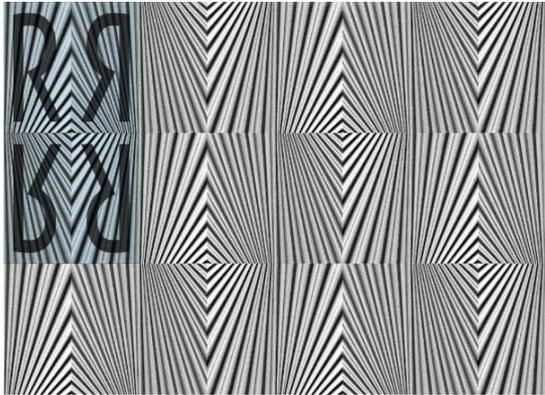
A partir deste momento, três opções foram geradas (Quadro 6): (1) corte com o contorno da concha de forma simplificada (primeira linha do Quadro 6); corte retangular suprimindo algumas informações (segunda linha do Quadro 6); e uma segunda opção de corte retangular suprimindo algumas informações (terceira linha do Quadro 6).

No quadro 6, primeira linha, está a planificação da forma da concha Bivalve cujo módulo de repetição foi realizado pela rotação de 360° de 4 elementos iguais. Na criação do *rapport*, optou-se pela repetição do módulo na vertical e horizontal. Assim como o módulo 3 do Quadro 5, este proporciona visualmente um conjunto de pétalas.

Na segunda textura (segunda linha do quadro 6) o módulo de repetição foi criado simplificando ainda mais a forma da concha bivalve. Para esse realizou-se um corte simétrico retangular, deixando assim apenas as estrias distribuídas radialmente de forma que fosse possível encaixes para a repetição do módulo. Para o *rapport* foi

executado espelhamentos verticais e horizontais. A resultante da repetição modular projetou uma textura onde losangos se formam e se radiam da maior para a menor forma das estrias da concha. Este arranjo proporciona movimento e ilusão de ótica ao seu conjunto.

Quadro 6: Opções de *rapports* utilizando volumetria plana.

	Módulo de repetição	Módulo representativo	Rapport
1			
2			
3			

Fonte: Autora.

A terceira textura (terceira linha do quadro 6) foi projetada dividindo ao meio a textura 2 (Quadro 6). Sua repetição, um pouco mais complexa, se deu primeiramente por cópia e rotação de 360° em seu sentido vertical. Posto isto, realizou-se espelhamentos no sentido vertical. Então este conjunto gerado de 4 módulos foi espelhado no sentido horizontal, após alcançada a largura necessária foi copiado na vertical. Nesse *rapport* o jogo óptico ficou mais marcante.

Analisando os *rapports* dos dois grupos de opções gerados (Quadro 5 e 6) foi concluído que as texturas do Quadro 5 se enquadram melhor na aplicação em objetos com proporções maiores como por exemplo em painéis decorativos. Além disso, as texturas com múltiplas volumetrias teriam que ser reduzidas para que suas formas caibam proporcionalmente em um objeto que terá interação com a mão humana. Com esta diminuição de medidas ocorreriam perdas nas formas diminutas das texturas e, por isso, estão fora do escopo deste trabalho. Contudo, as texturas do Quadro 6 se mostraram mais condizentes ao trabalho proposto. Além disso, também possuem um visual mais atraente para o tipo de aplicação almejada.

Dentro das opções geradas no Quadro 6, a 2 e a 3 se destacam mais, pois geram ao olhar do espectador curiosidade pelo movimento de suas linhas. Entretanto, foi definido como *rapport* teste a textura 2 (Quadro 6) para ser impressa por fabricação por extrusão de filamento e sua posterior suavização com o vapor de acetona fria.

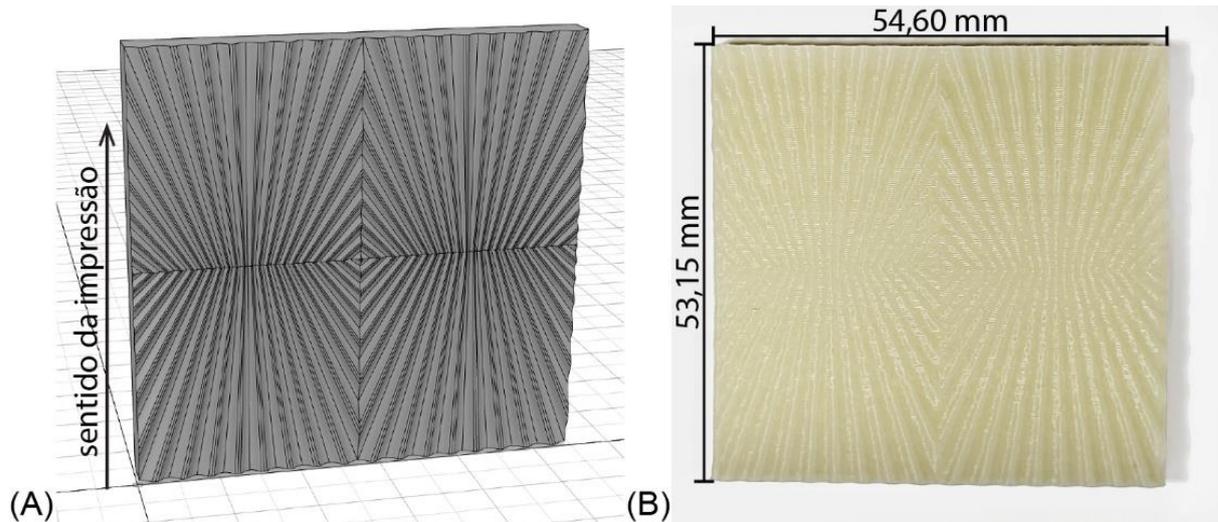
5.1.4 Impressão da amostra com o *rapport* definido

A impressão 3D por extrusão de filamento da textura teste se deu com os mesmos parâmetros das amostras preliminares (resolução de 0,254 mm). Foi definido que seriam impressos quatro módulos do padrão selecionado, pois, desta forma, poderia se obter uma ideia geral de como a textura ficaria impressa em uma região maior, antes e depois da suavização com o vapor de acetona fria. O sentido de impressão escolhido foi o vertical (Figura 38), uma vez que foi possível observar nas amostras preliminares, que a impressão 3D por extrusão de filamento foi de melhor qualidade nessa orientação.

Na Figura 38 (B) pode-se observar que a amostra da textura bioinspirada na concha do berbigão ficou impressa de forma íntegra, sem grandes defeitos aparentes.

Após as captações de imagens, por MEV e Lupa, e da digitalização 3D; partiu-se para a aplicação dos vapores de acetona fria. Para tal, foi definido utilizar o tempo de 30 minutos de exposição, uma vez que, segundo as análises preliminares das imagens de MEV ambas as amostras com impressões distintas (vertical e horizontal) permaneceram com o efeito escada visível com tempo de exposição inferior a este.

Figura 38: Ilustração do sentido de impressão da textura teste e imagem após impressão.



Em (A), ilustração do sentido de impressão 3D por extrusão de filamento. Imagem (B) textura bioinspirada já impressa e sem tratamento superficial e com suas medidas externas.

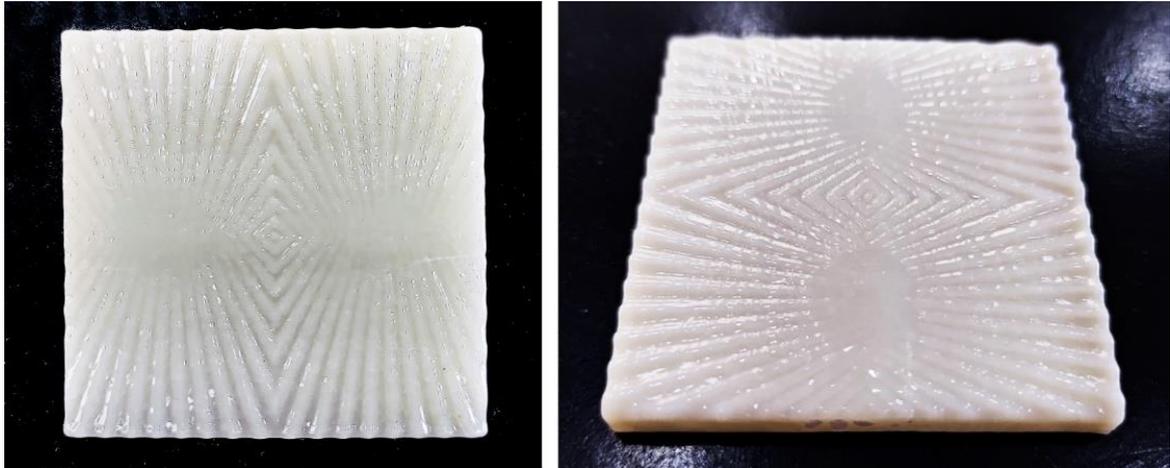
Fonte: Autora.

5.1.5 Suavização com os vapores de acetona fria na amostra da textura bioinspirada.

A amostra da textura bioinspirada permaneceu por 30 minutos nos vapores de acetona fria em um recipiente hermético de polímero PP com capacidade de 500 ml, onde foi utilizado 15 ml de acetona P.A.

Observando a amostra sem auxílio de instrumentos foi possível observar que a região onde o raio da estria é menor (lados esquerdo e direito da parte central), perdeu sua saliência (Figura 39). A seguir, a peça foi digitalizada e microfotografada antes e depois da suavização com vapor de acetona fria.

Figura 39: Imagem da amostra da textura bioinspirada após 30 minutos de exposição ao vapor de acetona fria.



Fonte: Autora.

No Quadro 7, estão as imagens realizadas no MEV e na lupa estereoscópica. Na primeira linha (MEV e Lupa) a imagem foi realizada no canto da amostra. Já na segunda linha (MEV e Lupa) a imagem capturada é no centro da amostra onde os raios são menores. Ao analisar as imagens da amostra com a textura bioinspirada averiguamos que a rugosidade superficial, deixada pelo caminho de deposição do filamento, ficou completamente alisada em todas as superfícies que tiveram contato com o vapor de acetona (topo e laterais). Além da suavização, foi verificada uma leve perda de forma, também condizente com a análise de comparação 3D.

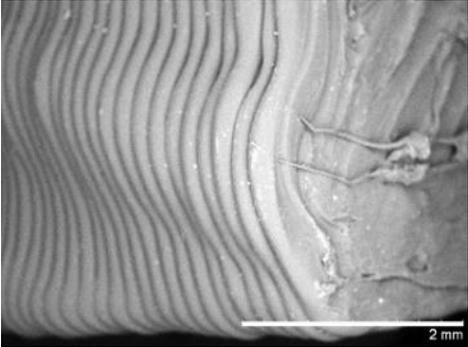
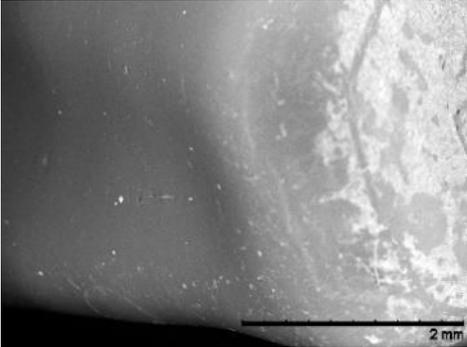
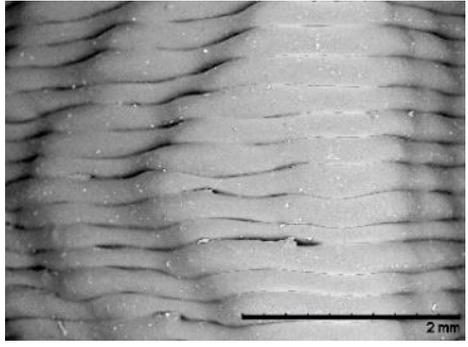
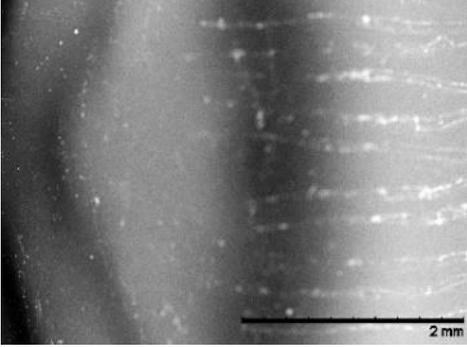
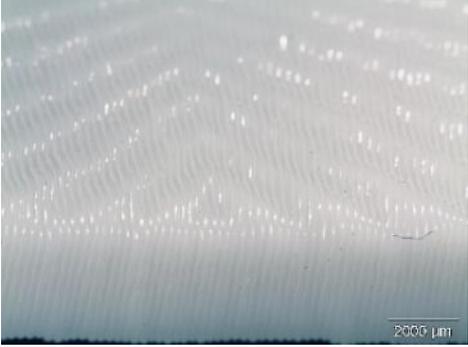
Na comparação 3D no Geomagic Qualify (digitalização 3D com lente de 25 mm) nas três etapas de produção da amostra da textura bioinspirada (Quadro 8):

1. STL com o *rapport* impresso;
2. STL com o *rapport* suavizado com o tratamento superficial;
3. *Rapport* antes e depois do tratamento superficial.

Na primeira linha do Quadro 3, está a análise comparativa 3D do desenho CAD no formato STL com a amostra impressa sem o tratamento superficial. É possível observar um desvio dimensional em toda a extensão das duas laterais da amostra durante a impressão (tons de azul no espectro). Além disto, também se verifica que tanto os picos, quanto os vales, possuem zonas de desvio dimensional (tons de azul e laranja). O erro quadrático médio (RMS) apresentado entre as duas peças foi de 0,09 mm. Cabe salientar que esse valor está dentro da tolerância esperada para o processo de impressão 3D por extrusão de filamento. Os tons azuis e vermelhos estão

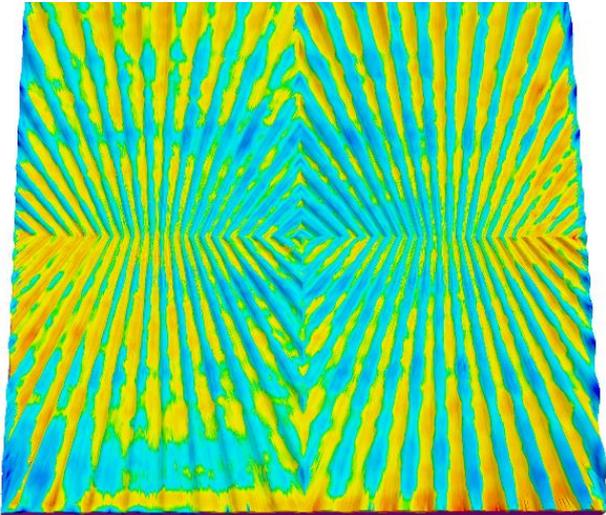
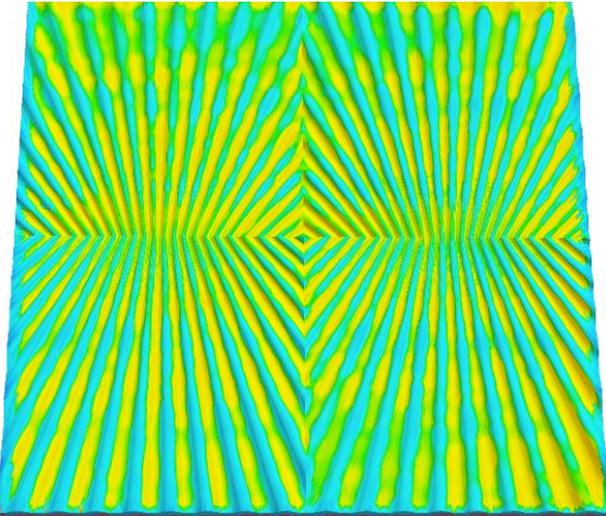
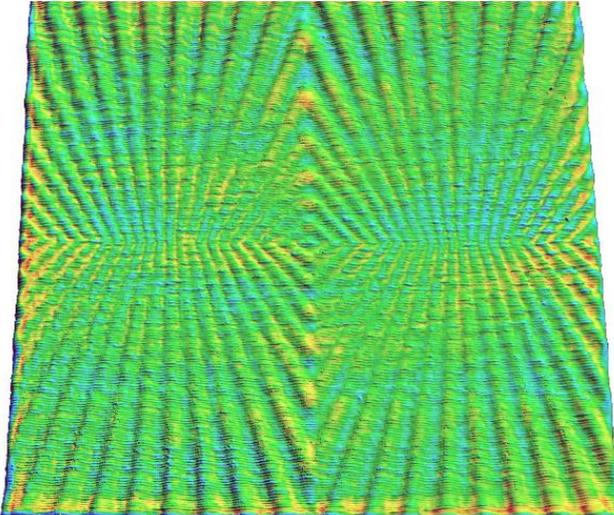
mais fortes, pois a escala foi mantida para permitir uma melhor comparação em relação às demais peças.

Quadro 7: Imagens de MEV e Lupa Estereoscópica da amostra da textura bioinspirada antes e depois da suavização com os vapores de acetona fria.

	Impressão 3D sem tratamento	Impressão 3D com tratamento
MEV		
		
LUPA		
		

Fonte: Autora.

Quadro 8: Análise da comparação 3D da amostra com a textura bioinspirada.

		RMS	Comparação 3D	mm
1	Modelo STL comparado com o <i>rapport</i> impresso SEM tratamento superficial	0,09 mm		
2	Modelo STL comparado com o <i>rapport</i> impresso COM tratamento superficial	0,11 mm		
3	Impressão 3D sem tratamento comparado com a impressão com tratamento.	0,04 mm		



0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
-0.05
-0.10
-0.15
-0.20
-0.25
-0.30
-0.35
-0.40
-0.45
-0.50

Fonte: Autora.

Já na comparação 3D entre a peça impressa por fabricação por extrusão de filamento, antes e depois da exposição ao vapor de acetona (terceira linha do Quadro 9), foi verificado um desvio dimensional menor. As áreas mais afetadas são próximas as quatro arestas externas, as quais apresentaram uma pequena deformação, indicando que a peça deu uma leve inchada. Além disto, nas porções onde o raio da textura diminui (mais ao centro) existe uma perda de forma indicada pelos tons de azul, isso ocorre devido à dimensão da textura ser muito pequena no local. A análise quantitativa está condizente com a descrição qualitativa, pois o valor RMS ficou em 0,04 mm, indicando baixa distorção geométrica. Assim, o resultado da suavização da superfície foi considerado satisfatório, uma vez que o erro dimensional resultante da técnica é menor do que o erro inerente ao próprio processo de impressão 3D por extrusão de filamento.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, o vapor de acetona foi aplicado em peças de ABS impressas para investigar o acabamento superficial versus o desvio geométrico. O processo de suavização com vapor de acetona se mostrou eficiente, proporcionando uma superfície visualmente lisa e brilhante. Foi possível reduzir o efeito escada, porém, às custas de algum desvio geométrico variável de acordo com os parâmetros utilizados.

A suavização das superfícies planas foi bastante eficiente, indicado pela redução da rugosidade em 90%, porém, ela ocorreu acompanhada de um arredondamento das arestas (desvios na ordem de 0,2 mm) que é potencialmente indesejado. Os melhores resultados foram obtidos com peças de 4 mm impressas na orientação vertical e expostas ao vapor de acetona por um tempo 30 minutos.

Considerando os trabalhos existentes com o processo de suavização por vapor de acetona, é importante destacar que há consideráveis diferenças nos materiais e métodos utilizados. A primeira diferença importante é o próprio ABS utilizado, que nem sempre é especificado e pode ser de diferentes *grades*⁴. Ainda, nem todos os autores especificam a quantidade e a pureza da acetona, a forma de geração do vapor e o volume do recipiente onde a amostra é colocada, o que implica na dificuldade de reprodução e comparação dos resultados. Apesar disso, é possível afirmar que os resultados aqui obtidos estão em consonância com a literatura e auxiliam a melhorar a qualidade das peças impressas em ABS.

A metodologia utilizada para a criação da textura bioinspirada se mostrou eficiente e de fácil aplicação. Contudo, foi necessária a utilização de três programas para que o módulo de repetição fosse criado. Foi possível criar seis possibilidades distintas de texturas abrindo um leque de possibilidades para os *rappports* bioinspirados.

As imagens capturadas por Lupa Estereográfica e MEV (Quadro 7) confirmam o que foi observado na análise da comparação 3D das amostras impressas por fabricação por extrusão de filamento antes e depois do tratamento de suavização: que em algumas regiões ocorrem acúmulo de polímero ABS. Isso ocorreu, muito provavelmente, por não ter escorrido pelas laterais, uma vez que a amostra da textura

⁴ São diferentes especificações de polímeros, para diferentes aplicações (TORRAGA, 2016).

bioinspirada permaneceu com a superfície em topo (sentido horizontal). Cabendo estudos expondo as peças ao vapor de acetona no sentido vertical, para verificar se essas ocorrências minimizam.

Analisando o processo de produção da amostra da textura bioinspirada, observou-se, por meio da comparação 3D (Quadro 8), que, mesmo na impressão vertical, os elementos tridimensionais da textura deformam ao longo da impressão por fabricação por extrusão de filamento, principalmente naqueles de menor tamanho. O que pode ser mensurado pelo RMS das comparações 3D entre os arquivos STL e as amostras antes do tratamento de suavização que foi de 0,09 mm. Resultado este que poderia ser melhorado com ajustes na resolução, contudo não era o foco do trabalho. O RMS após o tratamento de suavização subiu para 0,11 mm. Contudo, quando comparamos as digitalizações da amostra com a textura bioinspirada impressa antes e após o tratamento de suavização, observamos que as mudanças de geometria não são bruscas, já que seu RMS foi de 0,04 mm. Além disso, analisando a coloração do espectro pode-se dizer que, em alguns pontos, houve acúmulo de polímero e, em outros, o raio da circunferência reduziu (azul na escala), tornando assim a textura menos visível ao olho nu.

Por fim, podemos concluir que o estudo de caso proposto neste trabalho demonstrou uma suavização eficiente com grande redução do efeito escada causado pela impressão 3D por extrusão de filamento. Apesar do desvio geométrico decorrente do processo de suavização, é possível observar claramente a textura projetada sem o ruído causado pelas camadas de impressão. Assim, a técnica proporciona aos designers possibilidades de criação de texturas com potencial estético e sensorial para os projetos de novos produtos, especialmente para aqueles cuja interação da mão humana é importante.

6.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, são elencados os seguintes pontos:

- Testar a suavização do efeito escada com a amostra texturizada no sentido vertical para verificar se o acúmulo de polímero ABS se torna mínimo;
- Resolvida a estabilidade das geometrias da amostra, após a aplicação da acetona fria, indica-se o estudo do emprego da textura bioinspirada em um

modelo ou protótipo com uma superfície que não seja plana para investigar possíveis deformações na textura;

- Estudar a impressão 3D de peças com compensações nas dimensões para que atinjam a geometria desejada após a deformação causada pelo processo de suavização;
- Investigar a interação do usuário com o protótipo onde a textura bioinspirada esteja aplicada, antes e depois do alisamento da rugosidade, para que seja obtido um produto cuja interação háptica com o usuário esteja bem definida.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade: NBR ISO 4287**. 2002.

ADDITIVE, blog. **FDM - Fused Deposition Modeling (or FFF, PJP, LPD)**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/fdm-fused-deposition-modeling-fff-pjp-lpd/>. Acesso em: 30 jul. 2019.

ÁLVARES, Maria Regina; DIAS, Correia. **Percepção dos materiais pelos usuários: modelo de avaliação Permatius**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento) - Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92232>. Acesso em: 5 maio 2019.

ARRUDA, Amilton J. V. **MÉTODOS E PROCESSOS EM BIÔNICA E BIOMIMÉTICA: A revolução tecnológica pela natureza**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2018.

BAXTER, Mike. **Projeto de Produto: Guia prático para o design de novos produtos**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2000.

BENYUS, By Janine M. **A Biomimicry Primer**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf. Acesso em: 1 maio 2020.

BENYUS, Janine M. **Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza**. 6. ed. São Paulo: Editora Pensamento-Cultrix Ltda, 2003.

BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, Indiana, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012.

BERMAN, Barry. Managing the Disruptive Effects of 3D Printing. **Rutgers Business Review**, New Jersey, v. 5, n. 3, p. 294–309, 2020.

BERTHIER, Jean. Véhicules et routes. **Ed. Techniques Ingénieur**, [s. l.], 1991. Disponível em: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-travaux-publicques-et-infrastructures-tiace/archive-1/projet-et-construction-de-routes-c5500/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

BIOMIMICRY INSTITUTE. **What is Biomimicry?**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>. Acesso em: 5 out. 2019.

BORGHI, Paula Araújo; MEJIA, Dayana Priscila Maia. **Ergodesign de ferramentas manuais**. Manaus, 2016. p. 15. Disponível em: http://portalbiocursos.com.br/ohs/data/docs/183/9-Ergodesign_de_ferramentas_manuais.pdf. Acesso em: 28 ago. 2018.

BROECK, Fabrício Vanden. La naturaleza como maestra. BARTOLO, Carmelo Di; SOLDINI, Emanuele. **Biônica e Design**. São Paulo. Blucher. 2019 p.101-110.

CAMPOS, Luiz Emanuel S M. **Impressoras 3 D - definições, conceitos e prática**. 1. ed. Buenos Aires: Delearte Emcampos, 2011.

CESINI, Ilaria *et al.* Correlation between friction-induced vibrations and tactile perception during exploration tasks of isotropic and periodic textures. **Tribology International**, [s. l.], v. 120, p. 330–339, 2018.

CHAPMAN, Ben *et al.* **Investigating Methods of Prototyping with ABS**. 2013. Disponível em: https://benchapman4.files.wordpress.com/2014/05/teamabs_guidereport.pdf. Acesso em: 15 nov. 2018.

CHOHAN, Jasgurpreet Singh; SINGH, Rupinder; BOPARAI, Kamaljit Singh. Parametric optimization of fused deposition modeling and vapour smoothing processes for surface finishing of biomedical implant replicas. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Holanda, v. 94, p. 602–613, 2016.

CHOHAN, Jasgurpreet Singh; SINGH, Rupinder; BOPARAI, Kamaljit Singh. Post-processing of ABS Replicas with Vapour Smoothing for Investment Casting Applications. **Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences**, Índia, v. 92, [s. l.], p. 97-102, 2020.

CHOHAN, Jasgurpreet Singh; SINGH, Rupinder; BOPARAI, Kamaljit Singh. Thermal and surface characterization of ABS replicas made by FDM for rapid tooling applications. **Rapid Prototyping Journal**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 28–36, 2018.

CHOI, Kyungmee; JUN, Changrim. A systematic approach to the Kansei factors of tactile sense regarding the surface roughness. **Applied Ergonomics**, [s. l.], v. 38, p. 53–63, 2007.

CIDADE, Mariana Kuhl; PALOMBINI, Felipe Luis; KINDLEIN JÚNIOR, Wilson. Biônica como processo criativo: Microestrutura do bambu como metáfora gráfica no design de joias contemporânea. **Educação Gráfica**, Bauru-SP, p. 13, 2015.

CONFORTO, Carlos; AMARAL, Daniel C.; SILVA, Sergio Luis da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 8., 2011. Porto Alegre: [s. n.], 2011. p. 12.

CUNICO, Marlon Wesley Machado *et al.* Investigation of additive manufacturing surface smoothing process. **Rapid Prototyping Journal**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 201–208, 2017.

DETANICO, F B; TEIXEIRA, F G; SILVA, T K. A Biomimética como Método Criativo para o Projeto de Produto. **Design & Tecnologia**, Porto Alegre, v. 2, p. 101–113, 2010.

DISCHINGER, Maria do Carmo Torri. Contribuição ao Design de Produto: metodologia de análise da percepção tátil em diferentes classes de materiais e texturas. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE PESQUISA EM DESIGN, 5., 2009, São Paulo. Anais [recurso eletrônico]. Bauru, SP : UNESP, 2009. p. 12 . Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/31168>. Acesso em: 22 nov. 2019.

FERREIRA, Carlos Gonçalves Félix. **PERGUNTAR À NATUREZA - BIOMIMICRY THINKING: O biodesign como solução para a escassez de água**. 2016. Dissertação (Mestrado em Design de Equipamento

Especialização em Design de produto) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Belas Artes, Lisboa, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/28499>. Acesso em: 01 dez. 2019.

GALANTUCCI, L. M.; LAVECCHIA, F.; PERCOCO, G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 189–192, 2009.

GARG, Ashu; BHATTACHARYA, Anirban; BATISH, Ajay. Edge quality in fused deposition modeling: I. Definition and analysis. **Rapid Prototyping Journal**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 1226–1236, 2017.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing**

Technologies. 2. ed. New York: Springer, 2019.

GOMES FILHO, João. **Design do Objeto: Bases Conceituais**. 1. ed. São Paulo: Escrituras, 2006.

GONÇALVES, Milene; CARDOSO, Carlos; BADKE-SCHAUB, Petra. What inspires designers? Preferences on inspirational approaches during idea generation. **Design Studies**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 29–53, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2013.09.001>. Acesso em: 13 ago. 2019.

HEPWORTH, Barbara. **Barbara Hepworth Retrospective Exhibition 1927-1954**. London: Whitechapel Art Gallery, 1954.

HOLLINS, Mark *et al.* Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling. **Perception & Psychophysics**, [s. l.], v. 62, n. 8, p. 1534–1544, 2000.

IIDA, Itiro. **Ergonomia: projeto e produção**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

IIDA, Itiro; GUIMARÃES, Lia B. de Macedo. **Ergonomia: projeto e produção**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

JIANG, Ruth; KLEER, Robin; PILLER, Frank T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 117, p. 84–97, 2017.

JOHNSON, K. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. **Current Opinion in Neurobiology**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 455–461, 2001.

JONES, Rhys *et al.* RepRap-the replicating rapid prototyper. **Robotica**, Cambridge, v. 29, [s. l.], p. 177–191, 2011.

KARANA, Elvin; PEDGLEY, Owain; ROGNOLI, Valentina. **Materials Experience: Fundamentals of Material and Design**. 1. ed. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2014.

KELLER, Luciana Ponce da Motta; MEDEIROS, Ligia Maria Sampaio de. A percepção sensorial e o uso das mãos: considerações relevantes ao projeto de instrumentos manuais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 12., 2016, Belo Horizonte: **Blucher Design Proceedingd**, 2016. p. 756-768. Disponível em: 10.5151/despro-ped2016-0065.

Acesso em: 20 dez. 2019.

KILLI, Steinar Westhrin. **Additive Manufacturing: Design, Methods, and Processes**. Singapore: Pan Stanford, 2017.

LALEHPOUR, Amirali; JANETEAS, Conner; BARARI, Ahmad. Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 95, n. 1–4, p. 1505–1520, 2018.

LÓSS, Marcelo Luiz Vieira; JANSEN, Luciana Pisati. Interior Plastic Surface Development from Design Concept up to Global Vehicle Launch. *In*: SAE BRASIL INTERNATIONAL CONGRESS AND DISPLAY, 24., 2015, São Paulo: **SAE International**, 2015. p. 14. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2015-36-0316>. Acesso em 12 nov. 2019.

MABLE, Mike (Stratasys). **Finishing touch smoothing station™**. [S. l.: s. n.], Disponível em: <https://www.stratasys.com/siteassets/3dlc/high-school/finishing-touch-smoothing-station.pdf?v=48f5f3>. Acesso em: 01 Fev. 2021.

MALSHE, Ajay *et al.* Bio-inspired functional surfaces for advanced applications. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 62, n. 2, p. 607–628, 2013.

MALSHE, Ajay P. *et al.* Bio-inspired textures for functional applications. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 627–650, 2018.

MANZINI, Ezio. **A matéria da invenção**. 1. ed. Lisboa, Portugal: Centro Português de Design, 1993.

MORENO GRANDAS, Diana Paola *et al.* The potential of design-by- Analogy methods to support product, service and product service systems idea generation. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 20., 2015, Milão. **Politecnico Di Milano**, 2015. p. 93–104. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276202710>. Acesso em: 01 out. 2019.

NGO, Tuan D *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 143, [s. l.], p. 172-96, 2018.

OLIVEIRA, F. C. G. **Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos**

heurísticos de otimização numérica. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14872>. Acesso em: 25 dez. 2019.

PASCHOARELLI, Luis Carlos *et al.* Antropometria da Mão Humana: Influência do Gênero no Design Ergonômico de Instrumentos Manuais. **Ação Ergonômica**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 2, p. 08, 2010.

PESTANO, Viviane; POHLMANN, Mariana; SILVA, Fabio Pinto da. Effect of Acetone Vapor Smoothing Process on Surface Finish and Geometric Accuracy of Fused Deposition Modeling ABS Parts. **Journal of Materials Science and Chemical Engineering** [s. l.], v. 10, n. 10, p. 1–9, 2022.

PIETANZA, Sergio; SORGENTE, Donato; PERCOCO, Gianluca. Enhancing the sustainability of chemical vapour polishing of additive manufactured ABS parts using a vacuum chamber. **Rapid Prototyping Journal**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 1043–1050, 2018.

PRYTHERCH, David; MCLUNDIE, Mairghread. So what is haptics anyway? **The Research Training Initiative**, Birmingham, [s. l.], n. 2, p. 16, 2002.

QUEIROZ, Natália; RATTES, Rafael; BARBOSA, Rodrigo. Biônica e Biomimética no contexto da complexidade e sustentabilidade em projeto. *In*: ARRUDA, Amilton J. V.; **Design & Complexidade**. São Paulo: Blucher, 2017. p. 127–140.

REIS, Tatielle Haussen. **Desenvolvimento De Texturas Com Base Em Estudos Biomiméticos Acerca Dos Pássaros Da Espécie Sicalis Flaveola (Canário-Da-Terra) Associado Ao Design Emocional.** 2013. Dissertação (Mestrado em Design) - Programa de Pós-Graduação em Design UFRGS, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/96474>. Acesso em: 15 Jun. 2019.

SADAVA, D.E. *et al.* **Life: The Science of Biology.** 8. ed. Sunderland: Sinauer Associates, INC, 2008.

SANTOS, Edney Eboli dos. **A APLICAÇÃO DA BIOMIMÉTICA NO DESENVOLVIMENTO DE TEXTURAS AUTOMOTIVAS PELO DESIGN DE COLOR & TRIM.** 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2018.

Disponível em: <http://www.pos.cps.sp.gov.br/dissertacao/a-aplicacao-da-biomimetica-no-desenvolvimento-de-texturas-automotivas-pelo-design-de-color-trim>. Acesso em: 27 Nov. 2022.

SCHIFFERSTEIN, Hendrik N.J; SONNEVELD, Marieke H. The Tactual Experience of Objects. *In*: Schifferstein, Hendrik N.J; Hekkert, Paul **Product Experience**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2008. p. 41–67.

SCHMID, Aloísio Leoni. **A idéia de conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. 6. ed. Rio de Janeiro: Pacto Ambiental, 2005.

SCHNEIDER, JAY A. Phylogeny of the Cardiidae (Mollusca, Bivalvia): Protocardiinae, Laevicardiinae, Lahilliinae, Tulongocardiinae subfam. n. and Pleuriocardiinae subfam. n. **Zoologica Scripta**, Oslo, v. 24, n. 4, p. 321–346, 1995.

SILVA, Fábio Pinto da *et al.* A Digitalização Tridimensional Móvel e sua aplicação no Design de Produto. **Design & Tecnologia**, Porto Alegre, v. 1, n. 2003, p. 60-65, 2010.

SILVA, Everton S. Amaral da. **DESIGN, TECHNOLOGIE ET PERCEPTION : Mise en relation du design sensoriel, sémantique et émotionnel avec la texture et les matériaux**. 2016. Tese (Doutorado em Design) - Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/150641>. Acesso em 7 Jun. 2018.

SILVA, Everton S. Amaral da *et al.* Discussão entre práticas para desenvolvimento e aplicação de texturas em produtos industriais. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE PESQUISA EM DESIGN, 5., 2009, Bauru. **Blucher Proceedings** 2009. p. 7. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/31099/000720871.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 maio 2019.

SILVA, Fábio Pinto Da. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produto**. 2006. Dissertação (mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10388/000597347.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 nov. 2018.

SILVEIRA, Flávia Lopes da *et al.* Análise Biônica Em Projetos De Design: A Fruta-Do-Conde Como Referência De Textura Em Pisos Para Áreas Externas. **Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 16, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4966/496650331012.pdf>. Acesso em: 7 set. 2019.

SINGH, Jaspreet *et al.* Dimensional accuracy and surface finish of biomedical implant fabricated as rapid investment casting for small to medium quantity production. **Journal of Manufacturing Processes**, Illinois, v. 25, p. 201–211, 2017.

SINGH, Rupinder *et al.* Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 111, p. 228–234, 2017.

SINGH, Jaspreet; SINGH, Rupinder; SINGH, Harwinder. Investigations for improving the surface finish of FDM based ABS replicas by chemical vapor smoothing process: a case study. **Assembly Automation**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 13–21, 2017.

SINGH, Daljinder; SINGH, Rupinder; SINGH BOPARAI, Kamaljit. Review Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review. **Journal of Manufacturing Processes**, Illinois, v. 31, p. 80–95, 2018.

SKEDUNG, Lisa *et al.* Feeling Small: Exploring the Tactile Perception Limits. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 3, n. 2617, p. 6, 2013.

TORRAGA, Maria Giuliana Fontanelli. **Otimização da transição de grades poliméricos em reatores tipo loop para a produção de polipropileno**. 2016. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-22092016-092941/publico/MariaGiulianaFontanelliTorrageCorr16.pdf>. Adesso em: 14 ago. 2019.

TYMMS, Chelsea; ZORIN, Denis; GARDNER, Esther P. Tactile perception of the roughness of 3D-printed textures. **J Neurophysiol**, [s. l.], v. 119, n. 3, p. 862–876, 2018.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

YANAGISAWA, Hideyoshi; TAKATSUJI, Kenji. Effects of Visual Expectation on

Perceived Tactile Perception: An Evaluation Method of Surface Texture with Expectation Effect. **International Journal of Design**, Taiwan, v. 9, n. 1, p. 39–51, 2015.

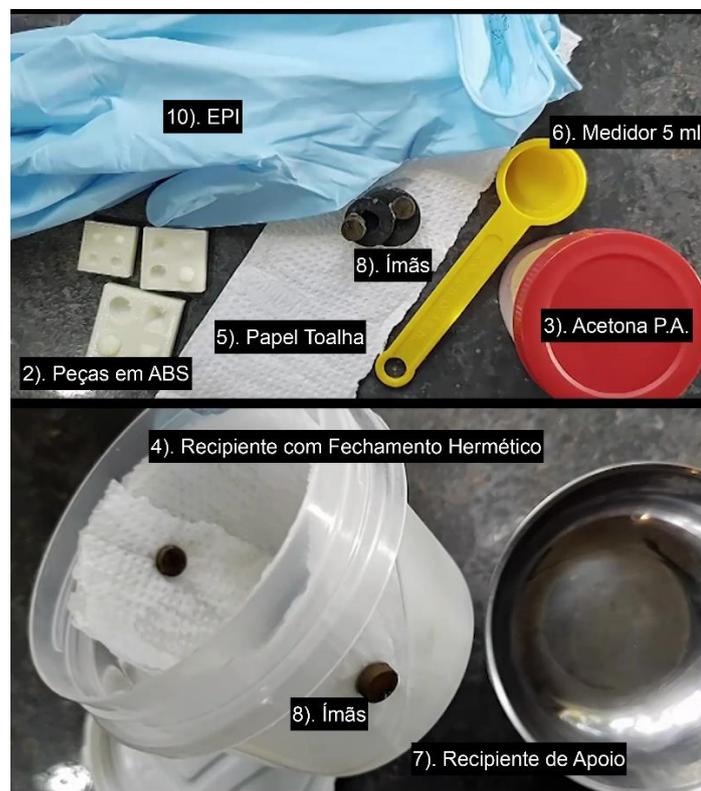
ZHANG, Sung-uk. Numerical evaluation of ABS parts fabricated by fused deposition modeling and vapor smoothing. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal**, Covina, v. 2, n. 6, p. 157–161, 2017.

APÊNDICE A – Detalhamento do Método de suavização com vapor de acetona fria.

A técnica de suavização das peças impressas, por extrusão de filamento em ABS, com vapor de acetona fria se mostrou eficiente no trabalho que se seguiu.

Para que seja possível a replicabilidade do experimento em trabalhos futuros segue o detalhamento da técnica de suavização com vapor de acetona fria.

Figura 1: Materiais utilizados na técnica de suavização das peças impressas, por extrusão de filamento em ABS, com vapores de acetona fria.



Imagens em: <https://www.youtube.com/watch?v=YA10ISHBxB0>

Fonte: Autora

Materiais necessários:

- 1) Local com temperatura ambiente controlado — foi estipulado em 22° C;
- 2) Peças impressas em ABS;
- 3) Acetona P.A;
- 4) Recipiente com fechamento hermético de tamanho proporcional ao objeto impresso. Para nossas peças com picos e vales de 5 mm, 4 mm, 3 mm e 2 mm o recipiente tinha 300 ml de volume (Figura 2);
- 5) Papel toalha;

- 6) Medidor — para controlar o volume de acetona utilizada em cada peça — neste trabalho foi utilizado o medidor de 5 ml, proporcional ao volume do recipiente hermético de 300 ml.
- 7) Recipiente de apoio — para molhar o papel toalha na acetona;
- 8) Imãs — para fixar o papel toalha nas paredes internas do recipiente com hermético (Figura 1);
- 9) Cronômetro;
- 10) EPI — luvas e máscara.

Após a impressão das amostras é necessário aguardar por até 12 horas para a secagem e estabilização das peças em um local com temperatura ambiente (18° C à 22° C).

Na sala com temperatura controlada prepare o recipiente hermético com o papel toalha embebido na acetona, preso com os ímãs. Posicione a peça na base do recipiente — foi decidido deixar as amostras com a face lisa para baixo e picos e vales voltados para cima (Figura 2) —, para um melhor controle do processo optou-se por suavizar uma peça de cada vez nos tempos de 20 min., 30 min. e 40 min.

Figura 2: Posição da amostra na base do recipiente hermético.



Imagem em: <https://www.youtube.com/watch?v=YA10ISHBxB0>

Fonte: Autora

Após os devidos tempos de exposição aos vapores de acetona fria, todas as amostras foram deixadas para secagem final na sala com ambiente controlado por 24 horas, antes de realizar qualquer ensaio.