

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Roberto Takao Yamaki**

**Design para manufatura aditiva:  
desenvolvimento de EPI para emergências de saúde**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Design pelo Programa de Pós-graduação em Design da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos  
Coorientador: Prof. João Victor Azevedo de Menezes Correia de Melo

Rio de Janeiro  
setembro de 2024



**Roberto Takao Yamaki**

**Design para manufatura aditiva:  
desenvolvimento de EPI para emergências de saúde**

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

**Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos**

Orientador

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

**Prof. João Victor Azevedo de Menezes Correia de Melo**

Coorientador

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

**Prof. Carlo Franzato**

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

**Prof. Cláudio Freitas de Magalhães**

Departamento de Artes & Design – PUC-Rio

**Prof.<sup>a</sup> Claudia Borges e Souza Paraizo**

Fiocruz/UFRJ

**Prof. Leonardo Frajhof**

Unirio

Rio de Janeiro, 27 de setembro de 2024

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

### **Roberto Takao Yamaki**

Mestre em Design pela PUC-Rio em 2012, graduou-se em Desenho Industrial – Habilitação em Projeto de Produto na Escola de Belas Artes da UFRJ em 2008 e em Arquitetura e Urbanismo na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ em 2017. Pesquisador do Laboratório BioDesign da PUC-Rio desde 2022, onde desenvolve pesquisa sobre o uso da manufatura aditiva voltada para a saúde.

#### Ficha Catalográfica

Yamaki, Roberto Takao

Design para manufatura aditiva: desenvolvimento de EPI para emergências de saúde / Roberto Takao Yamaki; orientador: Jorge Roberto Lopes dos Santos; coorientador: João Victor Azevedo M. Correia de Melo – 2024.

183 f. : il. color; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design, 2024.

Inclui bibliografia.

1. Artes e Design – Teses. 2. Design e Tecnologia. 3. Manufatura aditiva. 4. EPI. 5. Máscara. I. Santos, Jorge Roberto Lopes dos. II. Melo, João Victor Azevedo de Menezes Correia de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Artes e Design. IV. Título.

CDD:700

Para a minha linda esposa Amanda e os meus pais Beto e Regina.

## **Agradecimentos**

À PUC-Rio e CAPES, pelos auxílios concedidos;

Ao meu orientador Jorge pela oportunidade e todos os outros professores pelos seus ensinamentos;

Ao grande amigo e coorientador João, pelo incentivo e camaradagem;

À minha família, pelo apoio e carinho;

Aos colegas do Laboratório BioDesign da PUC-Rio, especialmente Gerson Ribeiro, Mário Ricardo, Raphael Vinagre, Vinicius Arcoverde, Pedro Themoteo, Aline Kauffmann, Marcelo Balisteri, Victor Côrtes e Marcelo Viana, pela parceria e colaboração na pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

Yamaki, Roberto Takao; Santos, Jorge Roberto Lopes dos. (orientador). **Design para manufatura aditiva: desenvolvimento de EPI para emergências de saúde.** Rio de Janeiro, 2024. 183p. Tese de Doutorado – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A pandemia de COVID-19 resultou em uma crise global de saúde pública nunca antes observada, impactando praticamente todos os aspectos da vida humana e catalisando a pesquisa em equipamentos de proteção individual (EPI). Com a falta desses equipamentos para os profissionais que atuaram na linha de frente, diversas iniciativas de fabricação local de EPI foram observadas utilizando manufatura aditiva como forma de amortizar a falta desses insumos tão valiosos. Este trabalho apresenta a contextualização da pandemia, com seus impactos não somente na população geral, mas principalmente no trabalho dos profissionais de saúde no Rio de Janeiro. Demonstra também as estratégias observadas em diversos locais do mundo para mitigar a falta de EPI, causada pela alta demanda e pelos interrompimentos nas cadeias de abastecimento. O trabalho apresenta as ferramentas e metodologias utilizadas na pesquisa e desenvolvimento de três EPIs, projetados utilizando a metodologia de pesquisa RtD para avaliar e documentar cada etapa e a manufatura aditiva como ferramenta fundamental para sua produção. A partir de diferentes tecnologias de impressão 3D, a pesquisa gerou inúmeros protótipos, que serviram para iterar o design dos três produtos: um *face shield* com tecnologia embarcada, voltado ao trabalho dos Agentes Comunitários de Saúde e duas máscaras de proteção respiratória que utilizam o tecido da máscara cirúrgica como mídia filtrante, além de ensaiar fabricação de filtros para máscaras utilizando uma máquina construída com ferramentas comuns e acessíveis. A tese detalha cada decisão projetual tomada ao longo do trabalho e reflete sobre a possibilidade de futuras pesquisas e aplicações da manufatura aditiva na área da saúde, no sentido de inovação e de fabricação não centralizada.

## Palavras-chave

Design e tecnologia; manufatura aditiva; EPI; máscara; protetor facial.

## Abstract

Yamaki, Roberto Takao; Santos, Jorge Roberto Lopes dos. (advisor). **Design for additive manufacturing: development of PPE for health emergencies.** Rio de Janeiro, 2024. 183p. Tese de Doutorado – Departamento de Artes & Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The COVID-19 pandemic resulted in an unprecedented global public health crisis, impacting virtually all aspects of human life and catalyzing research on personal protective equipment (PPE). Due to the shortage of PPE for frontline workers, various local manufacturing initiatives emerged, using additive manufacturing as a way to mitigate the lack of these essential supplies. This work presents the contextualization of the pandemic, highlighting its impact not only on the general population but especially on the work of healthcare professionals in Rio de Janeiro. It also demonstrates strategies observed worldwide to address the PPE shortage caused by high demand and disruptions in supply chains. The work presents the tools and methodologies used in the research and development of three PPEs, using the Research through Design (RtD) methodology to evaluate and document each step, with additive manufacturing as a fundamental tool for their production. Using different 3D printing technologies, the research generated numerous prototypes, which served to iterate the design of the three products: a face shield with embedded technology aimed at Community Health Workers, and two respiratory protection masks that use surgical mask fabric as a filtering medium. The thesis details each design decision made throughout the work and reflects on the potential for future research and applications of additive manufacturing in the healthcare field, in terms of innovation and decentralized production. As an outcome, this work presents the beginning of research on the manufacturing of mask filters, using a machine built with common and accessible tools.

## Keywords

Design and technology; additive manufacturing; PPE; mask; face shield.

## Sumário

1	Introdução	11
1.1	Sobre a Pandemia de COVID-19 e EPI	13
1.2	Design Emergencial	15
1.3	O estado da arte da manufatura aditiva em EPI	17
1.4	O caso da PUC-Rio na produção de EPIs	19
1.5	Estrutura da pesquisa	22
2	Materiais e métodos	27
2.1	<i>Research Through Design</i> (RTD)	28
2.2	<i>Design for Additive Manufacturing</i> (DFAM)	30
2.3	Modelos antropométricos impressos em 3D	35
2.4	Precauções no projeto de EPI	39
2.5	Autoria e licenciamento	41
3	Desenvolvimento do <i>Face Shield</i>	44
3.1	Identificação do problema	44
3.2	Design Emergencial e IoT	46
3.3	Questão	47
3.4	Desenvolvimento do primeiro protótipo	48
3.5	Desenvolvimento do segundo protótipo	52
3.6	O <i>Face Shield</i>	59
3.7	Resultados	64
4	Desenvolvimento das Máscaras de Proteção Respiratória	67
4.1	Identificação do problema	67
4.2	Questão	67
4.3	Parâmetros da investigação	68
4.4	Testagem comparativa de fluxo de ar e respirabilidade de máscaras disponíveis comercialmente no Brasil	70
4.4.1	O equipamento utilizado	70
4.4.2	Montagem	72
4.4.3	Filtros testados	73
4.4.4	Resultados	77

4.5 A máscara cirúrgica como elemento filtrante	86
4.6 Teste de vedação e ajuste	87
4.7 Geração de alternativas e prototipagem	90
4.7.1 Principais alternativas e versões	93
4.8 Desenvolvimento da Alternativa II (Máscara A02V11)	95
4.8.1 Modelo A02V01	95
4.8.2 Modelo A02V02	96
4.8.3 Modelo A02V03	98
4.8.4 Modelo A02V08	99
4.8.5 Modelo A02V10	101
4.8.6 Modelo A02V11	103
4.8.7 Resultados	107
4.9 Desenvolvimento da Alternativa I (Máscara A01V19)	108
4.9.1 Modelo A01V11	109
4.9.2 Modelo A01V07	111
4.9.3 Modelo A01V14	112
4.9.4 Modelo A01V16	113
4.9.5 Modelo A01V17	115
4.9.6 Modelo A01V18	117
4.9.7 Modelo A01V19	118
4.9.8 Resultados	120
5 Máquina de algodão doce	123
5.1 O método do algodão doce	124
5.2 Experimentos	129
5.3 Resultados preliminares	136
5.4 Ensaio de fabricação do filtros	138
5.5 Conclusão	140
6 Discussão	142
7 Considerações Finais	150
7.1 Trabalhos futuros	154
8 Referências Bibliográficas	155
Apêndices	181

Tabela 4.2 - Valores finais comparados entre todos os testes	182
Figura 4.19 - Alternativas e suas versões desenvolvidas	183

# 1

## Introdução

A pandemia de COVID-19, causada pelo coronavírus *SARS-CoV-2*, desencadeou uma crise global de saúde pública sem precedentes, afetando quase todos os aspectos da vida humana. Desde o seu surgimento inicial em dezembro de 2019<sup>1</sup> até se espalhar rapidamente pelo mundo, a COVID-19 trouxe desafios nunca pensados para o período que se estendeu até maio de 2023<sup>2</sup>. A rápida disseminação do vírus, a alta taxa de transmissão e os sintomas que, a princípio, eram desconhecidos, levaram a um aumento vertiginoso no número de casos confirmados, sobrecarregando sistemas de saúde em muitos países. Com fácil propagação e sintomas semelhantes à gripe comum, o número de casos da doença em hospitais subiu vertiginosamente e demandou quantidades de equipamentos de proteção individual (EPI) para os profissionais de saúde que ninguém tinha em estoque.

A falta de EPI emergiu como um problema crítico, exacerbando as dificuldades enfrentadas pelos profissionais de saúde no país (Takemoto *et al.*, 2020). Apesar dos sistemas de saúde e de proteção social estabelecidos no Brasil, a rápida disseminação da COVID-19 sobrecarregou a infraestrutura de saúde, levando à escassez de recursos essenciais (Rocha *et al.*, 2021). A dificuldade de acesso a EPIs não só afetou a população em geral, como também representou riscos significativos para os profissionais de saúde na linha da frente do combate à pandemia.

Com a urgente demanda por esses equipamentos, em diversas partes do mundo surgiram projetos focados na impressão de EPIs e peças para equipamentos hospitalares. Seguindo estes exemplos, pesquisadores do BioDesign<sup>3</sup> da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) deram início à produção de protetores faciais, óculos e outros equipamentos destinados aos profissionais da linha de frente. Essa produção de EPI não apenas compensou grande parte da demanda, mas inspirou pessoas por todo o Brasil a fazerem o mesmo, auxiliando o esforço para combate à doença e protegendo profissionais de saúde.

---

<sup>1</sup> <https://www.paho.org/pt/covid19/historico-da-pandemia-covid-19>

<sup>2</sup> <https://www.ufmg.br/espacodoconhecimento/o-fim-da-pandemia/>

<sup>3</sup> BioDesign é um laboratório da PUC-Rio que pretende avançar nas pesquisas em tecnologias 3D, focando na interseção entre medicina, biologia, design e engenharia.

Foi a partir desta iniciativa que a proposta de aprofundamento na fabricação não centralizada de EPIs avançou. O início deste trabalho se deu em 2020, durante o período de quarentena da pandemia, quando eu e os demais pesquisadores dirigimos pelas ruas desertas para a universidade a fim de nos encontrarmos e compartilharmos nossos avanços. Foi um período de muitas inseguranças e ansiedade. O confinamento social, o isolamento de entes queridos, o medo de contrair o vírus ou de perder familiares e amigos criou um sentimento perpétuo de vulnerabilidade que, pessoalmente, acabou por motivar o meu trabalho. Todos nós tivemos que lidar, de uma forma ou de outra, com a nova realidade que nos foi imposta e, em retrospecto, percebo que o sentimento de trabalhar em algo que propunha pelo menos minimizar as atribuições que estávamos todos testemunhando me ajudou a manter a cabeça equilibrada por esse período.

Tudo era muito novo. As mudanças bruscas nas dinâmicas de trabalho e estudo, a transição para os encontros à distância até a montagem do laboratório BioDesign, que foi fundado nessa época. Foi durante esse período que eu tive contato com a impressão 3D, de forma que a evolução formal dos EPIs projetados foi acompanhada pela minha evolução na familiaridade com a tecnologia.

Essa progressão de quatro anos em que trabalhei no doutorado comporta a presente pesquisa, que traz o desenvolvimento de um *face shield smart* e duas máscaras que aproveitam o tecido da máscara cirúrgica como filtro, aumentando sua segurança. O *face shield* traz o benefício da tecnologia embarcada, facilitando o trabalho de agentes de saúde em visitas a comunidades carentes, com sensor de temperatura a distância, reconhecimento facial e comunicação com os registros do paciente, oferecendo diversas possibilidades no campo da telemedicina. As duas máscaras foram desenvolvidas em diferentes tecnologias de impressão: uma que é mais moderna tecnologicamente, mas menos acessível pelo seu preço, e outra, acessível e popularizada, mas que possui limitações tecnológicas. Os detalhes sobre a pesquisa e cada EPI serão revelados ao longo da tese, assim como o estudo que busca a viabilidade de criar filtros para máscaras, utilizando fiação centrífuga por fusão, inspirada no processo simples e visualmente análogo à produção de algodão doce. A grande vantagem é a possibilidade de utilizar ferramentas já existentes, de forma relativamente simples, e a capacidade de produzir em larga escala com menos dependência de materiais importados ou tecnologias de alta complexidade.

O tema desta tese me deu um senso de propósito e trouxe uma pressão inesperada, mas, no fim, o esforço valeu a pena. Cada obstáculo superado trouxe novas descobertas, não só no campo técnico da pesquisa, mas também sobre como a academia pode (e deve) reagir em tempos de crise. Concluir a tese nesse contexto foi mais do que finalizar um trabalho acadêmico; foi uma experiência de aprendizado sobre colaboração, inovação sob pressão e a importância de contribuir com algo significativo para a sociedade. Foi uma jornada difícil, mas saí dela com um olhar mais amplo sobre o impacto da ciência aplicada, especialmente em momentos críticos como o que vivemos.

## 1.1

### **Sobre a Pandemia de COVID-19 e EPI**

A interseção da pandemia de COVID-19 com os desafios de saúde existentes no Brasil, como a escassez de profissionais e de recursos de cuidados intensivos, criou um cenário complexo (Takemoto *et al.*, 2020). O sistema de saúde do país esteve sob imensa pressão devido ao aumento da demanda por serviços e à necessidade de se adaptar às novas exigências trazidas pela pandemia (Figura 1.1). O impacto da pandemia nos profissionais de saúde mostrou-se mais uma preocupação no país, e foram desenvolvidos estudos que demonstram os desafios enfrentados por este grupo, incluindo questões relacionadas com a carga de trabalho, a proteção, a formação e o bem-estar emocional (Cotrin *et al.*, 2020).

As desigualdades socioeconômicas e as vulnerabilidades no Brasil complicaram a resposta do país à COVID-19, afetando os esforços de preparação e resposta do sistema de saúde (Rocha *et al.*, 2021). A lotação nas UTIs dos hospitais da rede pública tornou mais difícil garantir aos brasileiros um acesso equitativo aos serviços e recursos de saúde, com implicações não só para a população em geral, mas principalmente para grupos vulneráveis específicos da sociedade brasileira. A crise do Coronavírus revelou a falta de diversos outros insumos hospitalares no Brasil, que importa grande parte dos equipamentos e tecnologia na área de saúde, e levou o mundo a uma guerra comercial em busca de materiais hospitalares. Segundo reportagem da Exame<sup>4</sup>, antes da crise, a fabricação desses insumos estava concentrada

---

<sup>4</sup> <https://exame.com/negocios/dificuldade-em-comprar-insumos-leva-hospitais-a-risco-de-desabastecimento/> (Acesso em 29/04/2020).

em um grupo seleto de países como China, Coreia do Sul e Malásia. A reivindicação mundial e a alta do dólar ampliaram os preços de diversos destes itens essenciais.

Segundo reportagem do G1<sup>5</sup> que cruzou dados da Associação Médica Brasileira (AMB) com o Conselho Federal de Enfermagem (Cofen), somente no período de 13 de março a 20 de abril foram registradas 7.987 denúncias de falta de equipamentos para atuar contra o novo Coronavírus, dentre eles, principalmente, máscaras N95 e protetores faciais.



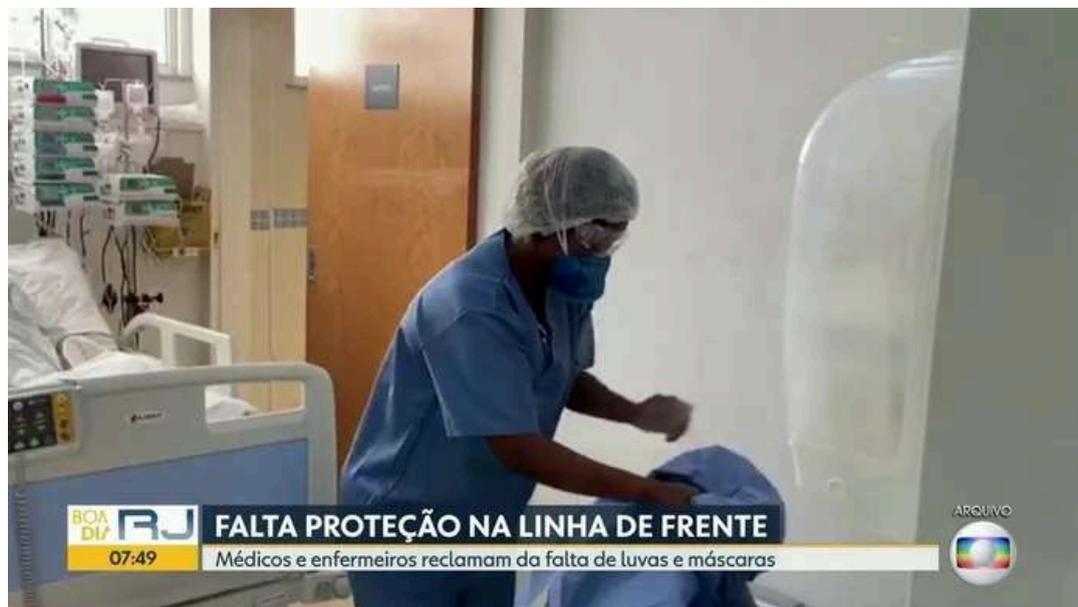
**Figura 1.1** - Fila de testagem para a Covid-19. Fonte: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/brasil/2022/01/covid-19-brasil-registra-2-maior-numero-de-casos-diarios-desde-o-ini.html> (Acesso em 20/02/2022)

A escala da pandemia e o seu impacto na cadeia de abastecimento global conduziram a uma escassez aguda desses equipamentos, (Figura 1.2) impondo desafios significativos para garantir a segurança dos trabalhadores da linha de frente (Maher *et al.*, 2022). Cadeias de abastecimento interrompidas e reservas insuficientes de insumos deixaram estes profissionais expostos ao risco de infecção (Mukhamedyarova *et al.*, 2021, Menberu *et al.*, 2021), suscitando preocupações quanto à segurança dos doentes e da população em geral, uma vez que as unidades de saúde lutavam para proporcionar uma proteção adequada contra o vírus (Jamil &

---

<sup>5</sup> <https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2020/04/21/em-1-mes-medicos-registraram-31-mil-denuncias-de-falta-de-equipamentos-de-protecao-para-atuar-contr-o-coronavirus-diz-associacao.ghtml> (Acesso em 29/04/2020).

Hossain, 2022). O evento levou os profissionais de saúde de todo o mundo a reverem os seus procedimentos de controle de infecções e as suas escolhas de EPI (Hall *et al.*, 2018). A escassez de EPI também suscitou preocupações éticas e de saúde ocupacional, uma vez que os profissionais de saúde enfrentaram riscos acrescidos de infecção devido a proteção inadequada (Bramstedt, 2020).



**Figura 1.2** - Reportagem noticiando a falta de EPI para profissionais de saúde. Fonte: FALTA PROTEÇÃO NA LINHA DE FRENTE. Programa Bom Dia Rio na emissora Rede Globo em 02/04/2020

O problema levantou questões mais amplas sobre a sustentabilidade dos sistemas de saúde e a resiliência das cadeias de abastecimento globais. Os desafios na sustentação da cadeia de abastecimento de EPI de plástico de uso único destacaram a necessidade de novas soluções para lidar com o aumento da demanda por equipamentos de proteção (Rowan & Laffey, 2021). A resolução da escassez de EPI exigiu uma abordagem multifacetada que englobe não só a produção e distribuição de equipamento de proteção, mas também programas de formação, estratégias de fabricação independente de insumos e esforços de coordenação global.

## 1.2

### Design Emergencial

Design Emergencial é uma abordagem que visa desenvolver soluções rápidas e eficazes para situações de crise, emergências ou desastres, em que a necessidade de intervenção imediata é premente. Esse enfoque é caracterizado pela sua agilidade, adaptabilidade e foco na resolução de problemas urgentes que surgem

inesperadamente, como é o caso de desastres naturais, pandemias, conflitos armados, entre outros.

Durante situações de emergência, o Design Emergencial desempenha um papel fundamental na criação de soluções eficientes para atender às necessidades imediatas das comunidades afetadas. Essas soluções podem envolver desde o desenvolvimento de abrigos temporários, sistemas de distribuição de alimentos e água, até a criação de estratégias de comunicação e educação para prevenção e resposta a emergências (Barbosa, 2014; Rodrigues, 2023). A integração de métodos de *Design Thinking*<sup>6</sup>, prototipagem rápida e uso de materiais e recursos disponíveis localmente são aspectos-chave desse tipo de abordagem (Venancio & Rocha, 2017; Rodrigues, 2023).

Durante a pandemia de COVID-19, essa abordagem desempenhou um papel crucial na criação de soluções para enfrentar os desafios impostos pela crise de saúde global. Desde a concepção de EPI e peças para respiradores artificiais até a adaptação de espaços públicos para garantir o distanciamento social, o Design Emergencial foi fundamental para auxiliar no combate à propagação do vírus e na proteção da população (Sampaio *et al.*, 2022). Em resposta à escassez de EPI, várias estratégias foram propostas para preservar e otimizar o uso dos equipamentos de proteção existentes. Sua implementação pode ajudar a mitigar a escassez e garantir a operação contínua das instalações de saúde, especialmente em ambientes com poucos recursos (Grant *et al.*, 2021). A adoção da tecnologia de impressão 3D surgiu como uma ferramenta tão valiosa para lidar com essa questão que a *Food and Drug Administration* (FDA) reconheceu o papel da impressão 3D na superação da escassez de suprimentos médicos ao produzir EPI, equipamentos e acessórios essenciais para combater a pandemia (Niranjan *et al.*, 2022). Essa abordagem proporcionou um meio de fabricar rapidamente equipamentos essenciais, contribuindo para aliviar a pressão sobre as cadeias de suprimentos tradicionais (Niranjan *et al.*, 2022).

Uma de suas principais características é a capacidade de colaboração e cocriação envolvendo diferentes agentes, como comunidades locais, organizações não governamentais, instituições de ensino e governos para garantir que as soluções desenvolvidas atendam efetivamente às necessidades específicas de cada contexto de emergência (Barbosa, 2014; Melo *et al.*, 2022).

---

<sup>6</sup> O *Design Thinking* é uma abordagem de resolução de problemas centrada no ser humano que busca inovar e criar soluções eficientes para desafios complexos. Centra-se nas ações dos designers durante o processo de design, enfatizando a importância de uma abordagem prática e da resolução de problemas (Cross, 2011).

### 1.3

#### **O estado da arte da manufatura aditiva em EPI**

Comumente conhecida como impressão 3D, manufatura aditiva é uma tecnologia que cria objetos tridimensionais a partir de modelos digitais. Este processo, que envolve a adição de material camada por camada até que o objeto esteja completo, surgiu como uma tecnologia transformadora com potencial significativo para resolver problemas emergenciais e enfrentar vários desafios em diferentes setores. A capacidade da manufatura aditiva de fabricar objetos com geometrias e funcionalidades complexas revolucionou os processos de fabricação tradicionais (Park *et al.*, 2022). Ao permitir a produção personalizada de componentes complexos, essa nova forma de fabricação oferece uma solução versátil para responder rapidamente a situações de emergência que exigem soluções personalizadas e exclusivas.

Essa nova forma de produção apresenta oportunidades para otimizar os processos de produção e a logística, criando células autônomas de fabricação que independem das cadeias de produção tradicionais. Ao aproveitar as tecnologias de manufatura aditiva, os fabricantes podem simplificar os processos de produção, reduzir os prazos de entrega e aumentar a eficiência operacional, melhorando assim a capacidade de resposta em situações de emergência (Raja & Rajan, 2023). A capacidade de produzir peças de formato complexo de forma eficiente sem etapas adicionais ressalta o potencial da manufatura aditiva para simplificar e acelerar os processos de manufatura (Zi *et al.*, 2018).

Em ocasiões vividas na pandemia, quando a dificuldade de transporte, alta demanda ou alta de preços dificultaram o acesso a diversos insumos, a manufatura aditiva ofereceu uma solução rápida e flexível para a produção de componentes, dispositivos e equipamentos essenciais. A integração da manufatura aditiva se mostrou eficaz no aprimoramento dos recursos de produção e na solução de desafios logísticos (Zohrehvandi, 2024).

Diversos estudos enfatizaram a versatilidade e a adaptabilidade da manufatura aditiva na produção de diferentes tipos de EPI, abordando a escassez e fornecendo soluções personalizadas para atender a necessidades específicas (Amin *et al.*, 2020; Aydin *et al.*, 2021; Chaturvedi *et al.*, 2020). Pesquisas demonstraram que a tecnologia de impressão 3D desempenhou um papel fundamental na produção de protetores faciais de forma rápida e econômica para proteger os profissionais de saúde e o

público em geral durante a pandemia (Amin *et al.*, 2020; Chaturvedi *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2020). A capacidade de personalizar o design e aumentar rapidamente a produção de protetores faciais foi essencial para mitigar a escassez desse equipamento de proteção essencial.

Ao aproveitar a tecnologia de impressão 3D, *makers*<sup>7</sup> conseguiram fabricar máscaras personalizadas e componentes de *face shields* (ou protetores faciais) para garantir um melhor ajuste e proteção aprimorada para os usuários (Aydin *et al.*, 2021; Chaturvedi *et al.*, 2020; Belhouideg, 2020), além de ter sido empregada na produção de outros itens essenciais, como óculos de proteção. A capacidade de fabricar esses itens proporcionou uma solução flexível e eficiente para atender à crescente demanda por equipamentos de proteção durante a emergência de saúde pública (Aydin *et al.*, 2021; Chaturvedi *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2020). Ao utilizar a manufatura aditiva, grupos independentes se adaptaram rapidamente às necessidades em constante mudança e produziram uma ampla variedade de EPI para aumentar a segurança em vários ambientes. Seu uso na criação de equipamentos especializados, como máscaras de ventilação não invasivas e máscaras individualizadas para cuidados neonatais, demonstra a versatilidade da tecnologia para atender a requisitos específicos de saúde (Borràs-Novell *et al.*, 2022). Ao personalizar o EPI por meio da impressão 3D, os profissionais de saúde podem garantir ajuste, conforto e funcionalidade ideais, aumentando a eficácia geral das medidas de proteção em ambientes clínicos.

O método *point-of-need additive manufacturing (PoN AM)*, ou manufatura aditiva no ponto de necessidade (tradução livre), surgiu como uma estratégia essencial para atender à demanda urgente por suprimentos e equipamentos médicos. *PoN AM* refere-se à prática de utilizar tecnologias de manufatura aditiva para produzir componentes ou produtos no local ou próximo ao local onde são necessários, em vez de depender de cadeias de suprimentos tradicionais que envolvem instalações de produção centralizadas. Essa abordagem aproveita os recursos exclusivos da manufatura aditiva, como prototipagem rápida, personalização e redução do desperdício de material, para aumentar a eficiência e a capacidade de resposta em vários setores (Wisdom, 2024).

---

<sup>7</sup> O termo “*maker*” é atribuído às pessoas que fazem parte de uma cultura que celebra a criação prática e a inovação, muitas vezes associada ao movimento do “faça você mesmo”. Os *makers* utilizam diversas ferramentas e tecnologias, como impressoras 3D, cortadoras a laser, microcontroladores e softwares de design e programação para desenvolver seus projetos. O movimento *maker* tem ganhado força nos últimos anos, influenciado pela democratização das tecnologias de fabricação digital.

Seu uso desempenhou um papel fundamental na mitigação das interrupções na cadeia de suprimentos causadas pela pandemia (Radfar *et al.*, 2021). A capacidade da impressão 3D de produzir rapidamente itens essenciais no local exato em que são necessários mostrou-se inestimável no combate à escassez de equipamentos médicos (Advíncula *et al.*, 2020). Essa abordagem permitiu a rápida reposição de estoques cada vez menores de EPI e outros suprimentos essenciais, garantindo que os profissionais de saúde tivessem acesso às ferramentas necessárias para cuidar dos pacientes com segurança (Abbas, 2021). Esse método de produção localizada não só garantiu uma resposta mais eficiente às necessidades imediatas, como também reduziu a dependência das cadeias de suprimentos tradicionais, que foram prejudicadas durante a pandemia (Antonini *et al.*, 2020).

Os esforços colaborativos entre os hospitais e a academia desempenharam um papel crucial no aproveitamento dos recursos de manufatura aditiva para enfrentar os desafios impostos pela pandemia (Kunovjanek & Wankmüller, 2020). Essa sinergia facilitou o rápido desenvolvimento e a implantação de soluções para combater a COVID-19, demonstrando o potencial da manufatura aditiva para permitir processos de produção ágeis e responsivos (Salmi *et al.*, 2020). A impressão 3D oferece uma rota de fabricação rápida que pode preencher as lacunas imediatas da cadeia de suprimentos enquanto as rotas tradicionais de produção em massa estão sendo restabelecidas (Tareq *et al.*, 2021). A impressão 3D em grande escala desempenhou um papel crucial na produção de EPIs durante a pandemia, permitindo a fabricação rápida e personalizada de itens de proteção essenciais. A capacidade da manufatura aditiva em atender à demanda de forma ágil e eficiente foi fundamental para garantir a segurança dos profissionais de saúde e da população em geral (Bishop & Leigh, 2020; Albusac *et al.*, 2020; Kunovjanek & Wankmüller, 2020; Advíncula *et al.*, 2020).

#### 1.4

#### **O caso da PUC-Rio na produção de EPIs**

Santos *et al.* (2020) descreve a iniciativa do DAD (Departamento de Artes & Design) da PUC-Rio na organização e fabricação para suprir a falta de EPI em hospitais e unidades de saúde na cidade do Rio de Janeiro (Figura 1.3). A documentação explora o papel do design colaborativo na abordagem dos desafios impostos pela pandemia da COVID-19, com foco especial na escassez de EPI. Os autores destacam como pesquisadores, designers e *makers* se uniram para enfrentar a

escassez de EPI utilizando a manufatura aditiva para produzir artefatos intrinsecamente projetados, complexos e exclusivos a custos relativamente baixos (Melo *et al.*, 2022).



**Figura 1.3** - Reportagem divulgando a produção de EPI na PUC-Rio . Fonte: REDE DE SOLIDARIEDADE, Programa Bom Dia Rio na emissora Rede Globo em 26/03/2020

Diante da urgência da situação, instituições acadêmicas e de pesquisa, como a PUC-Rio, foram desafiadas a mobilizar seus recursos e conhecimentos para contribuir com soluções práticas. O trabalho desenvolvido ressalta os esforços de colaboração de diversas partes interessadas no campo do design, enfatizando a importância da parceria e da ação coletiva para atender às necessidades urgentes decorrentes da pandemia. Ao reunir conhecimentos especializados dos laboratórios NEXT<sup>8</sup> e BioDesign com várias disciplinas e aproveitar os recursos das tecnologias de manufatura aditiva, o grupo conseguiu projetar e produzir óculos de proteção e *face shields* que atenderam aos requisitos de segurança sugeridos pelos profissionais de saúde com baixo custo de fabricação. Essa abordagem não apenas atendeu à escassez imediata de EPI, mas também demonstrou a adaptabilidade e a criatividade da comunidade de design em tempos de crise, ilustrando a interdisciplinaridade no desenvolvimento de soluções para desafios complexos.

---

<sup>8</sup> O NEXT (Núcleo de Experimentação Tridimensional) é um laboratório de pesquisa e desenvolvimento da PUC-Rio, dedicado ao estudo e aplicação de tecnologias de impressão 3D, modelagem tridimensional, prototipagem rápida e fabricação digital.

Uma das principais estratégias foi a utilização de impressoras 3D disponíveis na universidade, combinadas com impressoras de voluntários, que permitiram a fabricação rápida de máscaras, protetores faciais e outros dispositivos essenciais. O projeto possibilitou a doação de cerca de 20.000 *face shields*, 5.000 óculos de proteção e 150 válvulas para a adaptação em sistemas de ventilação mecânica. Além da quantidade de equipamentos distribuídos, o desenvolvimento desta ação destacou o papel do Design em Parceria na abordagem dos desafios da pandemia da COVID-19.

A publicação aborda os desafios enfrentados pela equipe da PUC-Rio durante o processo de produção, como a escassez de materiais, a necessidade de garantir a qualidade dos produtos e a logística de distribuição. No trabalho, é destacada a importância da colaboração entre diferentes departamentos da universidade, bem como parcerias com empresas e organizações locais, que foram fundamentais para superar esses obstáculos. Essa colaboração interinstitucional é apresentada como um modelo de resposta ágil e eficaz em tempos de crise, e as lições aprendidas com esses esforços colaborativos podem informar estratégias futuras para alavancar a experiência e a tecnologia aliadas ao design na resposta a emergências de saúde.

Os autores também exploram o impacto social da iniciativa da PUC-Rio, mencionando a importância da comunicação e do engajamento com a comunidade, que foram essenciais para disseminar informações sobre a disponibilidade dos produtos e garantir que as necessidades locais fossem atendidas. A ação emergencial na PUC-Rio foi amplamente divulgada, sendo apresentada num dos principais telejornais do país e em redes sociais. Tal divulgação aumenta a percepção de valor do design como ferramenta colaborativa com outras áreas, como a medicina e a engenharia, gerando produtos úteis para a sociedade.

Dentre as reflexões sobre as lições aprendidas e as implicações para futuras crises de saúde pública, os autores argumentam que a experiência adquirida durante a pandemia pode informar práticas de fabricação e design em situações de emergência, promovendo uma maior resiliência nas cadeias de suprimento de saúde. Essa colaboração desencadeou o início dos estudos que resultaram no presente trabalho, que ampliou a investigação, fabricação e avaliação de três equipamentos de proteção individual utilizando as técnicas de fabricação digital disponíveis no laboratório BioDesign, conforme detalhado a seguir.

## 1.5

### Estrutura da pesquisa

A tecnologia de impressão 3D desempenhou um papel crucial para preencher a lacuna entre a oferta e a demanda de EPI durante a pandemia, destacando sua importância para garantir a proteção adequada para os trabalhadores da linha de frente (Bharti & Singh, 2020). A estratégia de produzir EPIs sob demanda usando manufatura aditiva foi reconhecida como uma abordagem comum para atenuar os choques de fornecimento durante pandemias e situações de emergência (Budhwani *et al.*, 2022).

O conceito de *point-of-need additive manufacturing*, em que a impressão 3D é implantada mais perto do ponto de necessidade, foi identificado como uma estratégia para superar os desafios logísticos e melhorar a produção oportuna de equipamentos médicos essenciais (Wisdom, 2024). No contexto da crise da COVID-19, a impressão 3D proporcionou uma solução de transição rápida para as empresas de manufatura fornecerem EPIs prontamente em situações de emergência, complementando os processos de manufatura tradicionais (Albusac *et al.*, 2020). Foram feitas recomendações para que os hospitais aproveitem a capacidade de impressão 3D durante crises como a pandemia da COVID-19, enfatizando a importância da fabricação distribuída<sup>9</sup> para a resposta rápida de equipamentos médicos (Manero *et al.*, 2020). A fabricação local de produtos médicos, incluindo EPI, usando tecnologias de manufatura aditiva foi destacada como uma estratégia valiosa durante pandemias de doenças, mostrando a adaptabilidade das comunidades de impressão 3D na resposta a emergências (Sinha *et al.*, 2020).

Considerando o potencial da manufatura aditiva e as diversas iniciativas ao redor do mundo em adotar essa tecnologia como uma forma de amortecer a falta de suprimentos, este trabalho possui como questão norteadora: tendo como gatilho a crise causada pela COVID-19, como compor diretrizes práticas de pesquisa e produção local de EPIs? A hipótese, embasada na ação da PUC-Rio discriminada no item 1.4, é que equipamentos de proteção individual fabricados a partir da utilização da

---

<sup>9</sup> Fabricação distribuída é um modelo de produção no qual o processo de fabricação não é centralizado em um único local, mas sim distribuído por várias unidades de produção dispersas. Esse conceito tem ganhado destaque devido à crescente demanda por flexibilidade, eficiência e sustentabilidade nas cadeias de suprimentos. Isso favorece a fabricação ocorrendo perto dos pontos de consumo ou de demanda, permitindo que a produção responda rapidamente às necessidades do mercado local, reduzindo custos de transporte e aumentando a agilidade na produção (Rauch *et al.*, 2016).

manufatura aditiva e fabricação distribuída atingem os padrões adequados de segurança.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é delinear parâmetros de projeto e produção de EPIs seguros e eficientes utilizando manufatura aditiva para garantir abastecimento em caso de emergências em saúde. Para tal, foram observados os recursos, demandas e oportunidades existentes no espaço e estruturou-se o processo de pesquisa, desenvolvimento e fabricação dos objetos. Assim foram planejados como objetivos específicos e operacionais:

- Avaliar o estado da arte na produção de EPI durante a pandemia e analisar iniciativas semelhantes em outras partes do mundo, levantando publicações sobre o assunto;
- Ponderar a metodologia de design que melhor se aplica à pesquisa;
- Projetar EPIs de acordo com os dados levantados e a demanda observada pelos profissionais de saúde envolvidos no trabalho;
- Testar tecnologias e utilizar a manufatura aditiva e fabricação distribuída nos projetos de EPI;
- Alcançar os requisitos necessários à segurança do usuário, encaminhando o projeto dos objetos impressos de forma interdisciplinar e com participação dos agentes envolvidos;
- Relatar o processo de investigação que, através da documentação sistemática do processo de design, chegou a três EPIs fabricados por manufatura aditiva que ocorreu durante a pandemia de COVID-19.

O objeto da pesquisa é o uso da manufatura aditiva para emergências de saúde, de forma que os EPIs desenvolvidos, voltados para a pandemia de COVID-19, cuja transmissão é feita principalmente por aerossóis, foram:

- Um *face shield* com tecnologia embarcada, voltado para Agentes Comunitários de Saúde;
- Duas máscaras de proteção que utilizam a máscara cirúrgica como elemento filtrante.

Além disso, este trabalho dá início a uma pesquisa que investiga a fabricação de filtros utilizando material reciclado que podem ser utilizados em uma terceira máscara, também projetada para fabricação aditiva.

É relevante explicitar a natureza independente de fabricação em relação à indústria tradicional ocorrida na pesquisa. A iniciativa do trabalho (ação emergencial na PUC-Rio, item 1.4) surgiu como forma de mitigar uma necessidade local de falta de EPI nos hospitais da cidade do Rio de Janeiro. A partir da inquietação projetual em saber do potencial e infraestrutura da universidade como solução para esse problema, pesquisadores e profissionais se arriscaram em período de quarentena para fabricar de forma autônoma alguns dos equipamentos tão necessários naquele momento de pandemia, fenômeno que foi observado também em outros locais do mundo.

As lições e aprendizados reunidos nesta ação formaram a base em que este trabalho se sustenta. Além da já revelada importância da colaboração e coordenação entre comunidades de *makers*, universidades e hospitais, que permitiram a rápida prototipagem e produção de EPIs, essa cooperação demonstrou de forma empírica como a impressão 3D pode ser uma tecnologia flexível e ágil, capaz de adaptar rapidamente a produção para atender às necessidades emergentes. Neste trabalho estão reunidos os conhecimentos e as ações feitas para garantir a qualidade e a conformidade com padrões de segurança especificados pelos profissionais de saúde, processo que trouxe o saber necessário para o desenvolvimento de novos projetos de EPI e melhorias em processos existentes.

Para isso, o trabalho foi estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1 - Introdução - fez a contextualização da pandemia com a falta de EPI vivida não somente pela população em geral, mas principalmente pelos profissionais de saúde que trabalharam na linha de frente, lidando diretamente com pessoas contaminadas. O capítulo também trata do Design Emergencial, que é uma abordagem voltada para contextos de resposta a crises e desenvolvimento de soluções que envolvem ativamente todas as partes interessadas. Este conceito esteve presente durante todo processo e focou nas necessidades reais dos usuários, respondendo rapidamente às necessidades imediatas.

O Capítulo 1 prossegue com estado da arte da manufatura aditiva, que reuniu os trabalhos acadêmicos ao redor do mundo que lidaram com a fabricação de EPI utilizando manufatura aditiva durante a crise da COVID-19 na busca por soluções ao problema, mas outros trabalhos são citados ao longo da tese, quando necessário. As diversas abordagens e projetos foram coletados como forma de identificar as fronteiras do conhecimento atual e servindo como base para sua aplicação e desenvolvimento no contexto em que o presente trabalho se insere, com foco na ação ocorrida na PUC-Rio e seus desdobramentos. Este, que é o item 1.5 - Estrutura da Pesquisa - estabelece a

questão norteadora, objetivos geral e específicos, os objetos da pesquisa e a organização geral do trabalho.

O Capítulo 2 - Materiais e métodos - detalha como o trabalho foi conduzido e explana a metodologia aplicada na pesquisa, fundamentada em soluções que sejam profundamente informadas pelas experiências e necessidades dos usuários. Além do seu caráter interdisciplinar, envolvendo diversos profissionais de variadas disciplinas no seu andamento, o trabalho compreendeu a participação ativa dos pesquisadores e das pessoas afetadas pelo problema em questão. Em seguida, explica a metodologia *Research Through Design* (RtD) utilizada no fabrico dos objetos estudados, que integra a prática do design com a investigação acadêmica, utilizando o projeto de design como um meio para responder a questões de pesquisa e gerar conhecimento. A RtD permite a exploração de novas ideias, a geração de *insights* e a validação de soluções por meio de experimentações e principalmente prototipagem, que foi feita segundo princípios do *Design for Additive Manufacturing* (DfAM). Essa abordagem de projeto visa otimizar a estrutura dos protótipos para serem fabricados de forma eficiente por impressão 3D, aproveitando a liberdade de design que essa tecnologia oferece. O capítulo aborda também as tecnologias e os materiais utilizados, como as impressoras e os manequins de cabeça ISO<sup>10</sup> que foram aplicados na pesquisa em EPI. Após isso, são apontadas as limitações e precauções referentes à pesquisa utilizando as tecnologias mencionadas.

O Capítulo 3 - Desenvolvimento do *face shield* - descreve o processo de pesquisa referente ao primeiro EPI, citando a oportunidade observada a partir do trabalho dos Agentes Comunitários de Saúde (ACS) atuando em comunidades do Rio de Janeiro durante a pandemia. O produto proposto, um *face shield* com tecnologia embarcada, tem seu desenvolvimento decomposto ao longo do capítulo até o resultado final, quando são postos seus potenciais e limitações.

Já o Capítulo 4 - Desenvolvimento das máscaras de proteção respiratórias - trata da pesquisa mais ampla desta tese, estabelecendo primeiramente os parâmetros da investigação a serem seguidos para as máscaras (respirabilidade, filtração e ajuste) e as ações tomadas para cumprir com cada um. A seguir, é apresentada a organização da pesquisa das máscaras e como cada alternativa gerada se desenvolveu, seja para a

---

<sup>10</sup> International Organization for Standardization (ISO) ou Organização Internacional de Normalização (tradução livre) é um organismo reconhecido mundialmente que desenvolve e publica normas internacionais para a indústria que tem como objetivo garantir a qualidade, segurança, eficiência e interoperabilidade de produtos, serviços e sistemas (Furner, 2019).

produção de um objeto final, como o caso das máscaras A01V19 e A02V11, ou para o enriquecimento geral da investigação.

O Capítulo 5 - Máquina de algodão doce - detalha o início da pesquisa de uma máquina fabricada utilizando ferramentas comuns, documentando a investigação que busca a viabilidade da aplicação da técnica de *centrifugal melt spinning*, que é similar à fabricação de algodão doce, para a fabricação de filtros para máscaras respiratórias.

No Capítulo 6 - Discussão - faz a interpretação dos resultados obtidos na pesquisa, destacando as descobertas mais significativas e as hipóteses não concretizadas, apontando suas implicações, contribuições e limitações para aplicação dos EPIs.

Finalmente, no Capítulo 7 - Considerações finais - é apresentada uma síntese dos principais resultados e descobertas da pesquisa. São sugeridas também recomendações para sua continuidade.

Esta tese está entre desdobramentos da ação descrita na PUC-Rio (item 1.4), e se dedica a documentar a capacitação adquirida do laboratório BioDesign na fabricação distribuída, onde unidades de produção menores e localizadas podem utilizar impressão 3D para fabricar produtos médicos sob demanda, reduzindo a dependência de cadeias de suprimentos globais. Este trabalho busca elucidar a importância de investir em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a tecnologia de impressão 3D para integração aos sistemas de saúde locais, por corroborar o fornecimento de uma solução rápida e eficiente para a fabricação de EPI e outros equipamentos médicos e garantindo que a força de trabalho esteja preparada para futuras emergências.

## 2

### **Materiais e métodos**

Este capítulo apresenta as tecnologias de impressão e metodologias empregadas na pesquisa e desenvolvimento dos EPIs, concebidos para responder às demandas urgentes impostas pela pandemia de COVID-19. A tese foi elaborada com participação de pesquisadores com atuações em diferentes campos. Para o desenvolvimento e avaliação de cada passo, os designers puderam contar com a contribuição da equipe, que possui médicos, fisioterapeutas, programadores, designers e engenheiros que deram valioso aporte em cada evolução projetual dos objetos estudados. A pesquisa em design possui um caráter interdisciplinar, mas de cunho tecnológico e propositor de inovação (Kistmann, 2014). Além de levar em consideração a viabilidade técnica das ações projetuais, é necessário também ponderar o universo de necessidades do usuário, que implica um acervo de conhecimento em diversas áreas (Fontoura, 2011).

A interdisciplinaridade envolve a colaboração de diversas áreas, como saúde pública, engenharia, ciências da saúde, psicologia e design, para criar soluções inovadoras e eficazes (Moullin *et al.* 2019). A abordagem interdisciplinar permite a integração de conhecimentos e habilidades de diferentes disciplinas, enriquecendo o processo de pesquisa e promovendo a criação de EPIs mais eficazes e adaptados às necessidades dos profissionais de saúde e da população em geral.

A pesquisa foi conduzida de forma colaborativa, buscando integrar as perspectivas e experiências dos envolvidos e permitindo que suas necessidades e desejos sejam considerados desde as fases iniciais do projeto. Essa aproximação promove a inclusão de diferentes perspectivas e fortalece o engajamento e a cocriação de soluções mais adequadas e eficazes. Ao adotar uma abordagem participativa, os profissionais de design podem garantir que as soluções propostas atendam de forma eficaz às demandas e expectativas das pessoas envolvidas (Santiago *et al.*, 2020). Por meio de um processo estruturado que envolve etapas como pesquisa, metaprojeto, projeto e prototipagem, intervenção urbana e reflexões, os profissionais de design podem abordar desafios complexos de forma colaborativa e inovadora (Júnior *et al.*, 2016). Essa abordagem metodológica permite uma integração eficaz entre teoria e prática, resultando em soluções concretas e impactantes para a sociedade..

## 2.1

### **Research Through Design (RtD)**

Como o presente trabalho envolve ao mesmo tempo investigação e projeto, foram seguidas diretrizes já estabelecidas de pesquisa em design, especificamente a metodologia de Pesquisa Através do Design (tradução livre). A RtD utiliza a prática e pensamento de design como metodologia, de forma que a criatividade e o design crítico apresentam um processo de criação de produtos como modelo de pesquisa. Ao contrário da simples prática de design, em que o processo se concentra na fabricação de um produto comercialmente bem sucedido, os pesquisadores de design engajados em RtD criam artefatos destinados a serem trabalhados em questões criteriosamente colocadas (Zimmerman *et al.*, 2007). Da mesma forma, Koskinen *et al.* (2013) destacam a investigação sobre design por meio da prática, envolvendo a pesquisa em ambientes do mundo real para explorar aspectos multidisciplinares. Essa abordagem permite que os pesquisadores apliquem as descobertas diretamente a contextos práticos. Frayling (1993) argumenta que a RtD se distingue das formas tradicionais de investigação que visam informar a prática de design ou análise dos resultados de design. Em vez disso, enfatiza a natureza generativa do design como método de investigação, permitindo aos designers explorar problemas complexos e produzir novos conhecimentos através do ato de fazer.

Fundamental nesta metodologia, a documentação do processo de design leva a melhores decisões projetuais sobre o objeto, pois seu fichamento permite posteriores análises e abordagens. Como pesquisadores de design frequentemente adotam o papel duplo de projetistas e pesquisadores em diferentes momentos do processo, é crucial que cada passo do desenvolvimento fique registrado no processo projetual, pois este servirá de base não apenas para os próximos passos da investigação, mas de repositório para futuros projetos (Dalsgaard *et al.*, 2012). A RtD busca ordenar e catalogar o caminho do pesquisador de forma que este registro facilite a “volta” de um passo já dado e sua subsequente reinterpretação. A elaboração de uma sequência de protótipos aprimorou o registro e a documentação do processo de pesquisa e auxiliou os pesquisadores a identificar e aperfeiçoar as sucessivas evoluções. Ao criar artefatos tangíveis, explorar as regras do mundo real e participar de atividades de design iterativas, os pesquisadores podem gerar percepções valiosas, impulsionar a inovação e contribuir para o avanço do conhecimento em diversos campos.

Em primeiro lugar, é essencial definir claramente os problemas a serem solucionados, as metas e os objetivos da pesquisa (Zimmerman *et al.*, 2007). Isso envolve observar o contexto, identificar seus agentes e necessidades, sendo, nesse caso, profissionais de saúde e a falta de EPI, e propor ferramentas para sua modificação de acordo com os requisitos e as funcionalidades específicas que cada EPI deve ter, como conforto, eficácia, segurança e clareza de uso.

A próxima etapa envolve a realização de uma revisão da literatura para entender as pesquisas existentes sobre máscaras faciais, *face shields* e tecnologias de impressão 3D, materiais usados na produção dos equipamentos e preferências do usuário. Essa etapa ajuda a identificar lacunas no conhecimento atual e a compreender o estado da arte no campo do design e da produção dos EPIs.

Após a revisão da literatura, a equipe de pesquisa pode passar para a fase de ideação. Essa etapa envolve o levantamento de parâmetros a serem atendidos, *brainstorming* e a geração de conceitos de design para os novos equipamentos. Designers e pesquisadores podem colaborar para apresentar ideias que atendam aos requisitos identificados e incorporem novos recursos possibilitados pela tecnologia de impressão 3D (Ogunyemi *et al.*, 2018).

Depois que os conceitos são gerados, a equipe pode passar para a fase de prototipagem. Usando o software de modelagem 3D, os pesquisadores podem criar protótipos digitais. Esses protótipos digitais podem então ser impressos por manufatura aditiva para criar protótipos físicos para teste e avaliação (Watson & Kharrufa, 2021).

A seguir, os protótipos físicos entram na fase de testes. Essa etapa inclui a realização de testes de usabilidade, testes de ajuste e avaliações de desempenho para verificar a funcionalidade e o conforto dos EPIs. Os feedbacks de usuários e especialistas ajudam a aprimorar a forma e a fazer as melhorias necessárias (Wacharamanotham *et al.*, 2022). Com base nos resultados dos testes e no feedback, os pesquisadores podem iterar o design. Esse processo iterativo envolve o refinamento do design, a realização de modificações com base nos resultados dos testes e a criação de novos protótipos para avaliação posterior. Os ciclos de design iterativo ajudam a otimizar o design das máscaras e protetores faciais (Bardzell & Bardzell, 2013).

Durante todo o processo de pesquisa, conforme já reforçado, é fundamental documentar todas as decisões de design, iterações, resultados de testes e feedback recebido. A manutenção de registros detalhados garante a transparência e a

rastreabilidade dos resultados da pesquisa. Essa documentação também serve como um recurso valioso para referência futura e replicação da pesquisa (Goodman *et al.*, 2011).

Por fim, a equipe de pesquisa pode divulgar os resultados por meio de artigos, apresentações e publicações. Compartilhar os resultados da pesquisa com a comunidade científica contribui para o avanço do conhecimento no campo do design e da tecnologia de impressão 3D. A publicação dos resultados pode inspirar mais pesquisas e inovações nessa área (Lucero *et al.*, 2019).

## 2.2

### ***Design for Additive Manufacturing (DfAM)***

O Design para Manufatura Aditiva (tradução livre) é uma abordagem que surgiu para lidar com os desafios e oportunidades exclusivos apresentados pelas tecnologias de impressão 3D. O DfAM engloba um conjunto de métodos e ferramentas que ajudam a projetar objetos, considerando os requisitos e os recursos específicos dos processos de manufatura aditiva desde as fases iniciais do projeto (D'Antonio *et al.*, 2016). Ao integrar os princípios do DfAM, é possível otimizar o planejamento do processo com base em especificações funcionais, garantindo que o produto final não seja apenas bem projetado, mas também fabricável (Tüzün *et al.*, 2021). O DfAM é fundamental para a priorização e a implantação de estratégias para a implementação da manufatura aditiva nos produtos do usuário final, considerando fatores como restrições de fabricação, disponibilidade de material, usabilidade, design leve e personalização de peças (Murugan, 2023). Para que a metodologia seja aplicada corretamente, é preciso delinear com precisão quais técnicas estão sendo utilizadas em cada projeto. Pois embora existam condutas comuns na prática DfAM, existem diretrizes específicas para cada técnica de impressão, que variam de acordo com suas singularidades.

A pesquisa desenvolveu-se, portanto, utilizando três tecnologias de impressão (Figura 2.1), que foram utilizadas segundo as especificidades de cada modelo a ser impresso: *Selective Laser Sintering* ou Sinterização Seletiva a Laser (SLS), *Stereolithography* ou Estereolitografia (SLA) e *Fused Deposition Modeling* ou Modelagem por Deposição Fundida (FDM).



**Figura 2.1** - Impressoras utilizadas da esquerda para direita: SLS - *Selective Laser Sintering*, SLA - *Stereolithography* e FDM - *Fused deposition modeling* ou FFF - *Fused Filament Fabrication*. Fontes: <https://sinterit.com/3dprinters/lisa-pro/>; <https://store.anycubic.com/products/photon-m3-max>; <https://www.creality.com/br/products/creality-ender-3-s1-3d-printer> (Acesso em 24/07/2024)

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) utiliza um laser para sinterizar seletivamente materiais em pó, como polímeros ou metais, camada por camada, para fabricar objetos (Matúš *et al.*, 2023). Uma das principais vantagens da SLS é sua capacidade de produzir geometrias complexas com alta precisão, tornando-a adequada para diversas aplicações em setores como aeroespacial, automotivo e de saúde (Awad *et al.*, 2020). Notavelmente, a SLS elimina a necessidade de estruturas de suporte durante a impressão ao utilizar pó não sinterizado como material autoportante (Figura 2.2), reduzindo assim o desperdício de material e os requisitos de pós-processamento (Matúš *et al.*, 2023). A SLS se destaca na geração de peças com excelentes propriedades mecânicas, pois os materiais sinterizados demonstram alta resistência e durabilidade (Espera *et al.*, 2019). Essa qualidade torna a SLS ideal para a fabricação de protótipos funcionais, componentes de uso final e peças que exigem robustez e integridade estrutural. Esta tecnologia oferece a vantagem de trabalhar com diferentes materiais, que permite a produção de peças com diversas características, como flexibilidade ou resistência ao calor, de forma que as peças produzidas por SLS tendem a ser mais resistentes e duráveis em comparação com outras tecnologias de impressão 3D, como FDM.

Como desvantagem, existe o alto custo operacional da impressora. Trata-se de um equipamento de alta tecnologia que utiliza material proprietário, sendo assim, pouco popular no Brasil. A aquisição de equipamentos e materiais para impressão pode ser significativamente alta, tornando o investimento inicial um obstáculo para muitas universidades e empresas e uma barreira intransponível para o usuário comum.



**Figura 2.2** - Processo de limpeza da peça com remoção do pó não sinterizado, que serve também como suporte. Fonte: Autor.

A impressão por Estereolitografia (SLA) utiliza a fotopolimerização para criar objetos 3D camada por camada (Miedzińska, 2020). Na impressão SLA, uma resina líquida de fotopolímero é exposta à luz ultravioleta (UV) de uma tela LCD, fazendo com que ela se solidifique e forme a forma desejada (Taormina *et al.*, 2018). Essa técnica é conhecida por sua capacidade de produzir peças com alta resolução, detalhes nítidos e acabamentos de superfície suaves (Clifton *et al.*, 2020). A impressão SLA é particularmente valorizada por sua precisão e exatidão, tornando-a adequada para aplicações em que geometrias intrincadas e detalhes finos são essenciais (Cruz Olivo, 2022). Essa tecnologia é ideal para aplicações que exigem acabamento, como próteses dentárias e dispositivos médicos (Healy *et al.*, 2019), ou até mesmo estatuetas decorativas. Dependendo da forma, é necessário adicionar etapas de pós-processamento para remoção de estruturas de suporte, aumentando o tempo e o custo total da produção. Outro problema observado na impressão SLA é a resistência mecânica limitada das peças em comparação com as outras tecnologias.

Já a Modelagem por Deposição Fundida (FDM) é uma técnica de manufatura aditiva amplamente popular que envolve a extrusão de filamentos termoplásticos por meio de um bocal aquecido para depositar o material camada por camada em uma superfície, criando o objeto (Fafenrot *et al.* 2017). A FDM oferece uma ampla variedade de materiais para trabalhar, permitindo que os usuários escolham entre diferentes termoplásticos com base em seus requisitos específicos (Bochnia *et al.*, 2021). Essa versatilidade de materiais permite a criação de protótipos e peças funcionais com propriedades personalizadas, como flexibilidade ou resistência mecânica. Seu fator mais atraente é o seu baixo custo, o que a torna uma opção

acessível para prototipagem rápida e produção em pequena escala (Bochnia *et al.*, 2021). A simplicidade e a facilidade de operação das impressoras FDM contribuem para sua ampla adoção, pois são fáceis de usar e não exigem configuração ou manutenção complexas (Zhang *et al.*, 2016). A tecnologia FDM é particularmente adequada para criar protótipos de mecanismos para testar sua funcionalidade, permitindo melhorias e validação iterativa do projeto (Bochnia *et al.*, 2021). A desvantagem da FDM é o processo de deposição camada por camada, que pode resultar em linhas de camada visíveis na peça final, afetando o acabamento da superfície e a estética geral (Bochnia *et al.*, 2021). Etapas de pós-processamento, como lixamento ou alisamento, podem ser necessárias para melhorar a aparência dos objetos impressos em FDM. Além disso, as propriedades mecânicas das peças impressas por FDM podem ser influenciadas por fatores como porcentagem de preenchimento, orientação da camada e parâmetros de impressão, que podem exigir otimização para o desempenho desejado (Torres *et al.*, 2022). Um problema típico dessa tecnologia de impressão é a adesão entre as camadas, levando a uma possível delaminação ou ligação fraca na peça final (Bochnia *et al.*, 2021). O controle de parâmetros como temperatura de extrusão, temperatura da mesa e configurações de resfriamento é crucial para garantir a adesão adequada e a integridade estrutural dos objetos impressos em FDM (Gao *et al.*, 2019). Além disso, a resolução da impressão FDM pode ser limitada em comparação com outras técnicas de manufatura aditiva, afetando o nível de detalhes e a complexidade que podem ser obtidos nas peças impressas (Bochnia *et al.*, 2021).

Para balizar as especificações de impressão é utilizado um tipo de software chamado fatiador (ou *slicer*), que determina todas as características da impressão. O fatiador converte o modelo 3D (que é um arquivo de extensão .STL) em camadas 2D, determinando o caminho exato que a impressora deve seguir para construir a peça camada por camada. Com isso, ele gera o *G-code*, que é a linguagem de programação que a impressora 3D entende, controlando movimentos, velocidades e a quantidade de material. O fatiador permite ajustar os parâmetros de espessura de camada, densidade de preenchimento, velocidade de impressão e temperatura do material. O software gera, quando preciso, as estruturas de suporte que são necessárias para imprimir geometrias com saliências e ângulos agudos. Eles podem ser personalizados para serem fáceis de remover após a impressão, minimizando o desperdício de material e danos à peça final. O fatiador permite visualizar a peça dividida em camadas,

ajudando a identificar e corrigir potenciais problemas antes da impressão, como erros de geometria, áreas sem suporte adequado, ou inconsistências no preenchimento, além de simular o processo de impressão, fornecendo uma prévia detalhada de como a peça será construída, o que é essencial para garantir a precisão e a qualidade do produto final.

Para preparo das impressões por SLS foi utilizado o software *Sinterit Studio*, para as impressões por SLA foi utilizado o *Chitubox* e para as impressões por FDM foi utilizado o *Ultimaker Cura*. Em toda pesquisa, o projeto dos modelos virtuais tridimensionais foi feito no software *Rhinoceros*, que é amplamente empregado na modelagem de peças com geometrias curvas. Ele trabalha com o sistema NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), que permite a criação de superfícies complexas com grande precisão, que foi necessário tanto para modelar as formas e encaixes dos objetos estudados, quanto para adequar corretamente o desenho dos EPIs aos manequins virtuais utilizados na pesquisa.

Os projetos desenvolvidos neste trabalho seguiram as diretrizes expressas pelo DfAM específicas para cada uma dessas tecnologias para assegurar que o processo seja eficiente e o produto final tenha a qualidade desejada. A manufatura aditiva oferece uma enorme liberdade formal, pois o método permite a criação de geometrias complexas que seriam impossíveis ou muito caras de se fabricar por métodos tradicionais, e utilizar essa liberdade possibilitou otimizar significativamente o desempenho dos EPIs. Para a modelagem dos objetos, manter uma espessura de parede uniforme foi essencial para evitar deformações térmicas e garantir uma impressão mais consistente. No caso da impressão por FDM, utilizar estruturas internas, como retículas ou treliças, ajudou a reduzir peso e material sem comprometer a resistência da peça. As tolerâncias e os acabamentos são outra consideração importante. A precisão das peças na manufatura aditiva varia de acordo com a tecnologia empregada, portanto, é necessário garantir que as tolerâncias projetadas sejam adequadas de acordo com o processo aditivo escolhido. Planejar o design considerando o acabamento necessário é fundamental, pois algumas superfícies podem precisar de acabamento pós-impressão para atingir a qualidade desejada. A escolha do material também é crucial, pois é necessário selecionar materiais que atendam aos requisitos funcionais da peça, considerando as propriedades mecânicas, térmicas e químicas. Por isso, é importante garantir que o material escolhido seja compatível com a tecnologia de manufatura aditiva disponível. Os custos e o tempo de

produção também foram levados em consideração. Os projetos sempre buscaram utilizar o material de forma eficiente para reduzir custos, considerando o tempo de impressão e os processos de pós-tratamento na estimativa do tempo total de produção. Além disso, foi importante garantir que o design não apresente riscos durante a fabricação ou uso e que os materiais utilizados sejam seguros para o ambiente de trabalho e para a aplicação final dos EPIs. O DfAM foi essencial para descrever as normas necessárias para uma pesquisa eficaz em cada ponderação descrita.

## 2.3

### Modelos antropométricos impressos em 3D

Como a pesquisa trata de EPIs utilizados no rosto, tornou-se necessária a implementação de modelos virtuais de cabeças para obtenção das medidas corretas. O uso de um manequim virtual permite uma análise detalhada das proporções e formas do rosto humano no espaço tridimensional do software, garantindo que as máscaras e *face shields* se ajustem corretamente a diferentes pessoas, o que é crucial para o conforto e eficácia na proteção. Sua utilização possibilita também a criação de soluções personalizadas que atendem a uma variedade maior de formas e tamanhos de cabeça, assegurando que pessoas com características faciais fora do padrão médio também sejam bem atendidas.

Com a presença dos modelos tridimensionais no espaço de modelagem, é possível simular diferentes cenários e prever o desempenho das máscaras e *face shields* em termos de vedação, respirabilidade e resistência, permitindo a previsão detalhada de como esses dispositivos funcionam em condições reais de uso, a identificação de possíveis falhas e correção antes da impressão.

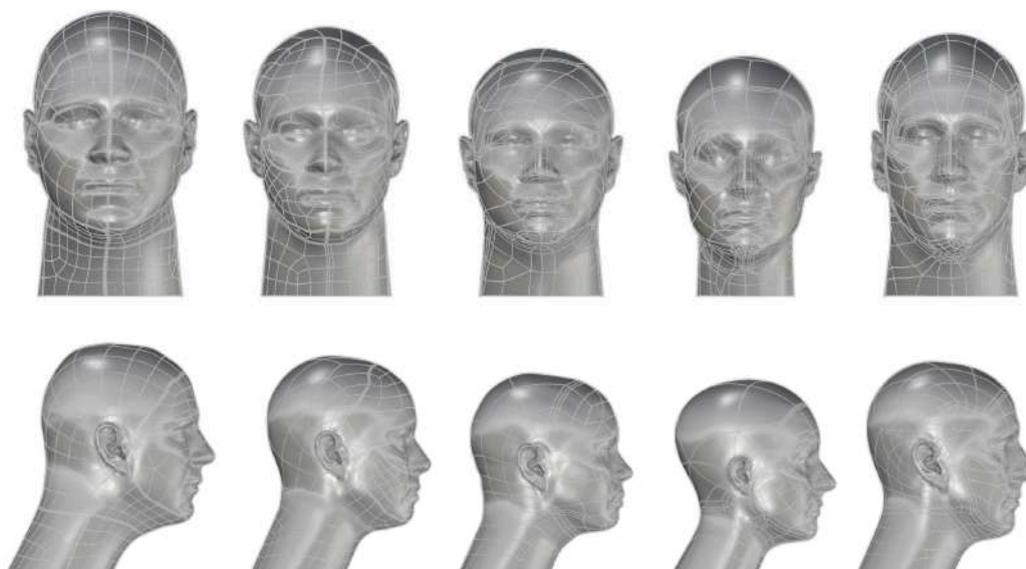
O escaneamento facial<sup>11</sup> foi o primeiro método de obtenção da topografia do rosto humano. Para realização do escaneamento, foi utilizado o *scanner* de luz estruturada *Artec EVA* no rosto de um voluntário da equipe, e as malhas obtidas durante o escaneamento foram processadas por meio do software *Artec Studio 3D*. Apesar dessa possibilidade de obtenção de dados ter sido considerada no início da pesquisa, seu desenvolvimento foi abandonado tendo em vista a grande variedade de

---

<sup>11</sup> A tecnologia de escaneamento empregada na pesquisa (luz estruturada) utiliza um equipamento (*scanner*) que, ao projetar um padrão de luz (geralmente linhas ou grades) sobre o rosto, captura a forma da face, cabeça e a textura da pele, criando uma representação digital tridimensional (3D) da pessoa.

rostos, o tempo e a complexidade operacional necessários para obter a forma do rosto de diferentes pessoas, além de criar possíveis dados enviesados pela baixa amostragem que seria colhida.

Assim, uma solução mais abrangente foi buscada. Para que as dimensões da face humana fossem alcançadas corretamente, foi adicionada à pesquisa a utilização de modelos de representação da cabeça humana, utilizados na forma virtual e impressos em manufatura aditiva, que seguem os padrões descritos pelo *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH<sup>12</sup>). Os dados antropométricos do NIOSH e as formas de cabeça digitais ISO foram essenciais para a concepção e avaliação dos equipamentos de proteção para o rosto. O NIOSH recolheu dados antropométricos através de pesquisas e desenvolveu os formatos de cabeça digitais (Figura 2.3) que representam diversas populações, colaborando, dessa maneira, com a criação de dispositivos de proteção respiratória inclusivos e eficazes (Zhuang & Bradtmiller, 2005). Os modelos estabelecidos garantem que as máscaras se adaptem a uma vasta gama de dimensões e formas faciais (Lin & Chen, 2017).



**Figura 2.3** – Representação dos modelos 3D de frente e de perfil conforme o NIOSH. Da esquerda para a direita: ISO grande, ISO médio, ISO curto/largo, ISO pequeno e ISO longo estreito. Fonte: Autor.

A admissão destes dados no processo de concepção representa uma melhora no ajuste, conforto e eficácia dos produtos, aperfeiçoando, em última análise, a segurança

---

<sup>12</sup> NIOSH, que em português significa Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional, é uma agência federal dos Estados Unidos responsável por conduzir pesquisas e fazer recomendações para a prevenção de doenças e lesões relacionadas ao trabalho. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/data/datasets/rd-10130-2020-0/default.html> (Acesso em 20/06/2024).

e a satisfação dos usuários (Zhuang *et al.*, 2010). A incorporação dos modelos permite uma avaliação de ajuste mais representativa, considerando fatores como a diversidade étnica, que podem ter impacto no desempenho do equipamento (Stannard *et al.*, 2022).

Esses manequins de cabeça digitais, especificadas na ISO 16976-2<sup>13</sup>, fornecem uma plataforma padronizada para avaliar o ajuste e o desempenho dos respiradores em diferentes populações (Nilasaroya *et al.*, 2023). Além da etnia, que é um fator extremamente relevante considerando a população brasileira, a utilização desses modelos possibilitou avaliar o ajuste da máscara em diversas antropometrias faciais (Tabela 2.1), considerando gênero e o índice de massa corporal no design do equipamento (Chopra *et al.*, 2021). A utilização dos manequins digitais ISO garantiu que os dispositivos de proteção respiratória serão eficazes e atenderão às características únicas de vários grupos de utilizadores (Nilasaroya *et al.*, 2023).

Os modelos foram impressos pela técnica de Fabricação por Filamento Fundido (FDM), em ABS<sup>14</sup>, em escala 1:1 (Figura 2.4). Os estudos citados demonstraram a importância dos dados antropométricos do NIOSH e das formas de cabeça digitais ISO na otimização do ajuste dos equipamentos de segurança. Além disso, a impressão das cabeças para avaliações de ajuste de respiradores com base nos dados do NIOSH facilitou testes e validação mais precisos de dispositivos de proteção respiratória. Os manequins foram utilizados na modelagem e ensaios de usabilidade dos equipamentos impressos, com aproveitamento dos modelos virtuais, que foram cruciais para auxiliar a modelagem das máscaras e *face shield*. Esses arquivos, conforme já colocado, possibilitaram capturar as linhas e superfícies da topografia de cada rosto com precisão.

---

<sup>13</sup> A ISO/TS 16976-2 é uma especificação técnica que se enquadra na norma mais ampla ISO/TS 16976, centrado-se especificamente nos dispositivos de proteção respiratória e nos fatores humanos. Esta norma, intitulada “Dispositivos de proteção respiratória - Fatores humanos - Parte 2: Antropometria”, define requisitos específicos para a medição das dimensões faciais, tais como o comprimento e a largura do rosto, utilizando técnicas normalizadas (Fakherpour *et al.*, 2020). Estas medições são cruciais para garantir que os dispositivos de proteção respiratória se ajustem de forma segura e confortável aos utilizadores, minimizando o risco de fugas e a exposição a contaminantes nocivos (Rodríguez *et al.*, 2020). A norma sublinha a importância de ter em conta a variabilidade humana no processo de pesquisa para garantir uma adaptação e proteção ideais para todos os indivíduos. Globalmente, a ISO/TS 16976-2 desempenha um papel fundamental no avanço da qualidade e eficácia do equipamento de proteção respiratória através de uma abordagem de concepção centrada no ser humano.

<sup>14</sup> O ABS (Acrlonitrila Butadieno Estireno) é um dos materiais mais amplamente utilizados na impressão 3D, especialmente em tecnologias como *Fused Deposition Modeling* (FDM). É conhecido por suas boas propriedades mecânicas e térmicas.

**Dimensões das Cinco Formas de Cabeça**  
(pequena, curta e larga, média, longa e estreita, grande)

	Pequena	Curta / Larga	Média	Longa / Estreita	Grande	Imagem de referência
LARGURA FRONTAL MÍNIMA	98	106	104	103	110	
LARGURA DA FACE	128	141	140	140	151	
LARGURA BIGONIAL	101	118	115	113	131	
COMPRIMENTO MENTON-SELLION	110	112	119	127	127	
DISTÂNCIA INTERPUPILAR	59	65	64	63	68	
LARGURA DA CABEÇA	142	149	150	151	158	
PROTRUSÃO DO NARIZ	19	17	20	23	21	
LARGURA DO NARIZ	32	39	36	35	41	
LARGURA DA RAIZ NASAL	15	17	16	15	18	
COMPRIMENTO SUB- NASAL-SELLION	47	44	50	56	52	

\*dimensões em milímetros

**Tabela 2.1** - Medidas gerais dos modelos disponibilizados como padrão para investigação das conchas.  
Fonte: ISO/TS 16976-2 / LEUI - PUC-Rio



**Figura 2.4** – Modelos impressos. Da esquerda para a direita: ISO grande, ISO médio, ISO curto/largo, ISO pequeno e ISO longo estreito. Fonte: Autor.

## 2.4

### Precauções no projeto de EPI

Uma preocupação significativa associada ao trabalho é a qualidade e a segurança dos materiais usados. Embora os biomateriais de polímeros sintéticos sejam comumente empregados em EPIs impressos, é fundamental assegurar que esses materiais tenham a composição e a qualidade adequadas para garantir o mesmo nível de proteção que os produtos de grau de fabricação padrão, como as máscaras N95 (Ishack & Lipner, 2020).

Em resposta à demanda mundial por equipamentos de proteção individual, vários projetos de máscaras impressas em 3D foram publicados ou estão disponíveis gratuitamente online (Swennen *et al.*, 2020; Cortes *et al.*, 2020). Ao utilizar a manufatura aditiva para a produção de EPI, há vários riscos em potencial que precisam ser cuidadosamente considerados e abordados para garantir a segurança e a eficácia dos produtos fabricados. Esses riscos são destacados em vários estudos e publicações relacionados ao uso da tecnologia de impressão 3D para a produção de EPIs durante emergências, como a pandemia da COVID-19 (Ishack & Lipner, 2020; Rendeki *et al.*, 2020; Jackson, 2024).

O design e a integridade estrutural do EPI devem atender aos padrões e regulamentos de segurança para garantir a funcionalidade e a proteção adequadas. Foram levantadas preocupações com relação à durabilidade e à confiabilidade do EPI impresso em 3D, especialmente em ambientes de alto risco em que o equipamento pode ser submetido a uso rigoroso ou exposição a condições perigosas (Rendeki *et al.*, 2020). Procedimentos de descontaminação inadequados ou a reutilização de EPIs além dos limites recomendados podem representar riscos à saúde dos indivíduos e comprometer a função de proteção do equipamento.

Uma preocupação relevante, especialmente relacionada à impressão por deposição fundida (FDM), é a permeabilidade dos materiais, que poderia trazer problemas de vedação. Sobre isso, Gordeev *et al.* (2018) realizaram um estudo que constatou como esse problema pode ser resolvido com otimizações dos parâmetros primários definidos pelo *G-code*, como a taxa de alimentação do filamento<sup>15</sup>, a geometria da parede e a sua estrutura. Segundo o estudo, para fabricar itens impermeáveis, deve-se levar em consideração as seguintes observações: (a) o uso de um valor maior de multiplicador de extrusão (às vezes o maior possível), a menos que isso resulte em uma deterioração significativa na qualidade da superfície do item; (b) a espessura da parede deve permitir um preenchimento interno (que para este trabalho foi definida a medida mínima de quatro camadas) e (c) dentre as geometrias estudadas, superfícies cilíndricas são preferidas sempre que possível. Seguindo estas recomendações, o estudo mostra que a impressão 3D é adequada para a produção de produtos completos e funcionalmente consistentes com boas propriedades de vedação de uma ampla gama de polímeros, mesmo usando impressoras 3D de baixo custo.

A contaminação dos materiais também pode comprometer a eficácia do EPI e expor os usuários a riscos. Os processos de esterilização e descontaminação são essenciais para garantir que o EPI esteja livre de patógenos e contaminantes nocivos, especialmente em ambientes de saúde em que o controle de infecções é fundamental (Jackson, 2024). Métodos adequados de esterilização devem ser implementados para manter a segurança e a integridade do EPI impresso em 3D e evitar a disseminação de infecções. Embora a possibilidade de reutilização de determinados itens de EPI, como *face shields* e máscaras, seja essencial para lidar com a escassez, a capacidade de esterilizar com eficácia e reutilizar com segurança esses itens deve ser avaliada minuciosamente (Rendeki *et al.*, 2020).

Devido à forma como esses dispositivos são fabricados, os materiais impressos por FDM são frequentemente mais rugosos do que os materiais típicos de dispositivos médicos, permitindo que abriguem impurezas, o que significa que os microrganismos podem permanecer e se transformar em problemas secundários se os EPIs não forem cuidadosamente esterilizados (Tarfaoui, 2020). Mesmo assim, ainda é possível fazer

---

<sup>15</sup> Definido como multiplicador de extrusão, é o parâmetro para controlar a taxa de fluxo de extrusão, ou seja, o volume de material plástico derretido extrudado através do bico por unidade de tempo. Tecnicamente, um aumento no multiplicador de extrusão geralmente leva a um aumento na velocidade de rotação das engrenagens no mecanismo de alimentação da cabeça de impressão (Gordeev *et al.*, 2018).

uma descontaminação eficaz, mantendo a integridade do equipamento. Estudos como o de Welch *et al.* (2021) avaliaram a descontaminação de materiais utilizados na impressão 3D de máscaras para agentes patogênicos virais humanos, incluindo o *SARS-CoV-2*, utilizando métodos de desinfecção comuns. Dentre outros, os autores testaram a desinfecção de materiais como o PLA e ABS (materiais típicos de impressão FDM). O estudo aponta que todos os vírus testados foram completamente inativados por uma única aplicação de solução com 10% de alvejante (hipoclorito de sódio), quaternário de amônio ou água oxigenada (peróxido de hidrogênio a 3%). Outro dado importante que Welch *et al.* (2021) revelam é a inaptidão do PLA para fabricação de EPI, devido à sua alta permeabilidade. Zhang *et al.* (2020) apontam o uso do álcool 70° como desinfetante eficaz contra a COVID-19, além de ser acessível e não deixar resíduos.

A partir destes dados, ficou estabelecido que para as impressões por FDM, o PLA seria utilizado somente durante o estudo formal dos EPIs, pela sua praticidade de uso diante dos outros materiais. As peças rígidas dos modelos finais, no entanto, foram feitas em ABS, pelas suas propriedades mecânicas. As peças flexíveis foram fabricadas utilizando o TPE, que é um material que combina as propriedades dos termoplásticos e dos elastômeros, oferecendo flexibilidade, resiliência e facilidade de processamento. Sua elasticidade, durabilidade, e resistência química também o habilitam para os meios de descontaminação propostos. As impressões por SLA não possuem restrição de material, visto que as superfícies geradas são mais precisas e não possuem a rugosidade típica da FDM. Por isso, serão feitas utilizando resina comum, pela sua baixa permeabilidade e capacidade de esterilização. Já as impressões por SLS serão feitas utilizando poliamida (PA) para as peças rígidas e poliuretano termoplástico (TPU) para as peças flexíveis. Ambos apresentam também boa resistência e resistência química.

## 2.5

### **Autoria e licenciamento**

Os direitos de propriedade intelectual, os requisitos regulatórios, os riscos de responsabilidade e as questões de segurança associadas à produção de EPIs impressos em 3D precisam ser cuidadosamente abordados (Bharti & Singh, 2020). A conformidade com as normas regulatórias, como as estabelecidas pelas autoridades de saúde e organizações de segurança, é essencial para garantir a segurança, a eficácia e a

legalidade do EPI fabricado, pois o não cumprimento dos requisitos regulatórios pode resultar em um EPI abaixo do padrão e que não oferece proteção adequada aos usuários. Embora a manufatura aditiva ofereça soluções para lidar com a escassez de EPI durante emergências, é essencial estar ciente dos possíveis perigos associados à produção independente.

O licenciamento dos produtos desenvolvidos sob *Creative Commons* pode contribuir significativamente para a pesquisa ao facilitar a colaboração, o compartilhamento de conhecimento e a inovação na comunidade científica. *Creative Commons* é uma organização sem fins lucrativos que oferece um conjunto de licenças de direitos autorais gratuitas que permitem aos criadores compartilhar, usar e construir sobre o trabalho de outros de maneira legal. Essas licenças proporcionam uma forma flexível para os autores, artistas, educadores e outros criadores compartilharem suas obras com o público, ao mesmo tempo em que mantêm alguns direitos de autor.

Ao utilizar as licenças *Creative Commons*, os pesquisadores podem compartilhar abertamente suas descobertas, dados e metodologias, permitindo maior transparência e reprodutibilidade na pesquisa (Korbel, 2018). Essa abordagem aberta para o compartilhamento de informações pode levar a um progresso acelerado no desenvolvimento de soluções personalizadas de EPI ao criar novos desdobramentos para a pesquisa. Ao licenciar abertamente esse conhecimento, os pesquisadores podem garantir que os profissionais de saúde em todo o mundo tenham acesso a diretrizes baseadas em evidências para fabricação dos EPIs. A licença sob atribuição não comercial permite que outros remixem, adaptem e criem a partir da obra, embora suas novas obras devam também reconhecer o autor e não possam ser usadas para fins comerciais. Greenhalgh *et al.* (2019) discutem estratégias para apoiar a participação da comunidade em pesquisas, enfatizando a importância do envolvimento de diversas partes interessadas nesse processo. Ao compartilhar estruturas e metodologias de pesquisa sob licenças *Creative Commons*, os pesquisadores podem capacitar pacientes, profissionais de saúde e o público em geral para contribuir com o desenvolvimento e a avaliação de soluções de EPI. Essa abordagem inclusiva não apenas aumenta a relevância e o impacto da pesquisa, mas também promove a confiança do público e a aceitação de novas tecnologias.

A partir dos métodos, materiais disponíveis e requisitos listados, a pesquisa foi desenvolvida. O BioDesign acumula vasta vivência na experimentação e produção de pesquisa tecnológica, o laboratório dispõe de equipamentos de última geração e

extenso conhecimento em design e medicina, e a equipe é composta por um grupo interdisciplinar de alta capacidade técnica e acadêmica. Com o avanço da pandemia, o laboratório se destacou como um dos pioneiros na resposta em fabricação emergencial de EPIs, que foram encaminhados para hospitais públicos, colaborando com a proteção de profissionais de saúde. Tal iniciativa comprovou que a união entre a academia e a sociedade civil é capaz de solucionar problemas sociais complexos, bem como consolidar a impressão 3D como uma ferramenta de produção digna ao usuário final.

### 3

## **Desenvolvimento do *Face Shield***

Com o agravamento das consequências da pandemia, ficou claro que o trabalho de diagnóstico e levantamento de dados era fundamental para o planejamento das ações de enfrentamento do vírus. Dentro dessa estratégia, encontra-se o trabalho dos Agentes Comunitários de Saúde (ACS), que fazem o cadastramento e acompanhamento das famílias atendidas pelo Sistema Único de Saúde (SUS) dentro das comunidades. Em situação de pandemia, o trabalho destes profissionais se tornou arriscado, visto a propagação por aerossóis do vírus. Portanto, a utilização de equipamentos de proteção individual fez-se extremamente necessária para o prosseguimento deste trabalho com segurança.

### 3.1

#### **Identificação do problema**

Os Agentes Comunitários de Saúde (ACS) exercem uma função fundamental em comunidades carentes. Esses profissionais atuam como elo crucial entre a comunidade e o sistema de saúde, sendo o único trabalhador que reside obrigatoriamente na área em que atua (Jardim & Lancman, 2009). Sua presença constante e proximidade com a população permitem uma melhor compreensão das necessidades de saúde locais, facilitando a interlocução entre a comunidade e os serviços de saúde (Silveira *et al.*, 2023). Além disso, os ACS possuem habilidades de comunicação e liderança naturais, o que lhes permite exercer um papel de destaque na promoção da saúde e no cuidado das pessoas (Sebold *et al.*, 2022).

A presença dos ACS é particularmente relevante em contextos de vulnerabilidade, como comunidades carentes no Rio de Janeiro. Eles atuam como agentes de transformação social, promovendo a educação popular em saúde e contribuindo para a melhoria das condições de vida da população local (Araújo, 2022). Esses profissionais desempenham um papel crucial na atenção a grupos específicos, como no caso de portadores de tuberculose, onde sua atuação é fundamental para o sucesso do tratamento e prevenção da doença (Correia *et al.*, 2022). Sua atuação na promoção da saúde mental, na educação em saúde e na prevenção de doenças, como a dengue, demonstra a versatilidade e importância desses

profissionais no contexto da atenção primária à saúde (Villela *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021).

Segundo a Política Nacional de Atenção Básica (Brasil, 2012) estão entre as funções do ACS: trabalhar com o registro de famílias de sua microárea; cadastrar e manter os cadastros atualizados; orientar as famílias sobre a utilização dos serviços de saúde disponíveis; realizar visitas domiciliares para acompanhar todas as famílias sob sua responsabilidade; estar em contato permanente com as famílias, desenvolvendo ações educativas para a promoção da saúde e prevenção de doenças. O ACS é essencial para a implementação do SUS, pois esse profissional fortalece a integração entre os serviços de Atenção Primária em Saúde (APS), ou Atenção Básica (AB), como também é conhecida. A APS consiste em um conjunto de ações de promoção e proteção da saúde que visa solucionar os problemas de saúde mais frequentes da população (Brasil, 2009).



**Figura 3.1** - Agente Comunitário de Saúde em trabalho durante a pandemia de COVID-19 Fonte: <https://www.epsjv.fiocruz.br/noticias/reportagem/agentes-de-saude-na-mira-da-covid-19> (Acesso em 24/07/2024)

Em tempos de crises, como a pandemia de COVID-19, os ACS se destacaram ainda mais, enfrentando desafios (Figura 3.1) e assumindo um papel essencial no enfrentamento da doença, mesmo diante de medos e inseguranças (Duarte *et al.*, 2020). Sua presença foi fundamental para fornecer informações sobre a doença, medidas de prevenção e acesso aos serviços de saúde, atuando como mediadores entre a população e as autoridades de saúde. Eles desempenharam um papel ativo na identificação de casos suspeitos, no encaminhamento para testagem e tratamento e na

promoção de medidas de higiene e distanciamento social. Seu empenho foi também essencial na educação da população sobre a importância da vacinação contra a COVID-19, contribuindo para aumentar a adesão às campanhas de imunização e combater a desinformação (Borges, 2023). Sua atuação próxima às famílias e indivíduos permitiu um acompanhamento mais efetivo dos casos, identificando necessidades específicas e garantindo o acesso aos cuidados de saúde necessários (Nunes *et al.*, 2021).

Durante a pandemia, as comunidades carentes do Rio de Janeiro enfrentaram desafios únicos, como a falta de acesso a informações confiáveis, recursos e serviços de saúde adequados. Os ACS desempenharam um papel crucial na mitigação desses desafios, fornecendo suporte emocional, orientação e encaminhamento para serviços de apoio psicológico e social (Palmeira *et al.*, 2022). Sua presença constante e comprometimento com o bem-estar da comunidade foram essenciais para garantir que as necessidades básicas de saúde fossem atendidas, mesmo em meio a um cenário de crise (Nunes *et al.*, 2021). Maciel *et al.* (2020) abordaram a reorganização no processo de trabalho dos ACS durante esse período. Os autores abordam a inserção de novos meios para o trabalho dos ACS com o uso de tecnologias e apontam em suas considerações a necessidade de garantir equipamentos de proteção individual para esses profissionais.

### **3.2**

#### **Design Emergencial e IoT**

O desenvolvimento tecnológico vem alterando diversas práticas na área de saúde, abrangendo atividades como diagnóstico, terapia, tratamento, gerenciamento e educação. As tecnologias 3D oferecem para a área médica novas possibilidades de desenvolvimento e aprimoramento de produtos, possibilitando o desenvolvimento de protótipos e a materialização destes por meio da fabricação digital.

A Internet das Coisas (IoT) é um conceito que se refere à interconexão de objetos físicos, como sensores, atuadores, dispositivos e máquinas por meio da internet, permitindo o armazenamento e processamento de dados na nuvem para fins de monitoramento e controle (Cantú & Montez, 2020). Essa tecnologia possibilita que objetos do cotidiano sejam conectados à internet, coletando informações, identificando, rastreando e monitorando dados de forma autônoma (Monteiro *et al.*, 2019). A IoT tem o potencial de revolucionar diversos setores, incluindo a saúde,

logística, indústria e educação, ao permitir a comunicação entre dispositivos e a coleta de informações de forma automatizada (Cesário, 2021). Por meio da IoT, objetos físicos podem se tornar inteligentes, interagindo entre si e com os usuários por meio de interfaces inteligentes (Fonseca *et al.*, 2020).

Alinhado à fabricação digital, a Internet das coisas permite a criação de objetos que aumentam a quantidade de informações disponíveis em tempo real para o usuário. A IoT está presente em todas as esferas da vida, agregando comodidade às nossas rotinas. A ampla concorrência neste campo possibilita vários modos de transformação e desenvolvimento da indústria. (Long, 2022). De acordo com De Lesegno *et al* (2016) existem diversos tipos de Objetos Médicos Conectados ou *Internet of Medical Things* (IoMT), desde equipamentos para registro da frequência cardíaca fetal até oxímetros de pulso. Os dispositivos inteligentes baseados em IoMT estão ocasionando um grande impacto, especialmente, no estado de pandemia global (Dwivedi *et al.*, 2021).

O Design Emergencial, com sua capacidade de resposta rápida a situações de crise, e a IoT, que permite a conexão e comunicação entre dispositivos, podem ser combinados para criar um equipamento de proteção individual avançado e adaptável às necessidades específicas do contexto pandêmico. Essa integração permite a criação de um equipamento de proteção individual avançado, adaptável e conectado, que não apenas protege o usuário, mas também fornece informações valiosas para a prevenção e controle da propagação do vírus.

### 3.3

#### Questão

O mundo físico e o digital estão cada vez mais relacionados e conectados. Através de sensores e softwares, objetos eletrônicos transmitem informações para a rede que, através de análises e cruzamentos, cria formas mais eficazes de lidar com situações do cotidiano. Um protetor facial que possui uma interface conectada à rede, com acesso rápido e preciso a fichas de pacientes, podendo ser editadas e atualizadas em tempo real seria capaz de agilizar o diagnóstico e o tratamento de pacientes.

Portanto, este projeto teve como questão: como guarnecer o ACS de dados mantendo sua segurança e agilizando o atendimento? Como resposta, foi concebido um protetor facial (*face shield*) de acordo com os padrões de segurança pertinentes ao EPI, com ferramentas acopladas de uso médico comum em um único objeto, capaz de

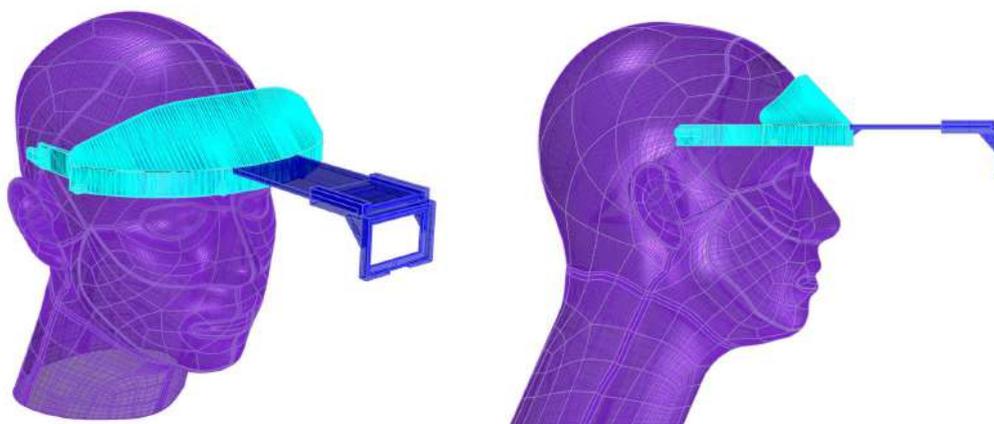
fornecer dados em tempo real de pacientes com projeções no próprio visor. A demanda anuncia que a utilização de um EPI munido de tais ferramentas promoverá mais conforto, segurança e praticidade para o profissional de saúde, assim como agilizará o diagnóstico e possível tratamento das doenças, com um acesso a um prontuário online que estará sempre atualizado.

Na pesquisa de um *face shield* inteligente em tempos de pandemia, a integração da IoT pode agregar funcionalidades avançadas ao equipamento. Sensores embutidos no *face shield* poderiam monitorar variáveis como temperatura e sintomas do paciente, enviando esses dados para uma plataforma online para análise em tempo real (Monteiro *et al.*, 2019). O dispositivo elaborado foi desenvolvido considerando as atribuições e necessidades dos ACS. Por isso, foram selecionadas as funções mais úteis, sendo essas: a identificação de pacientes e suas informações por meio de reconhecimento facial e a medição de temperatura em tempo real. Ambas as funções selecionadas seriam então exibidas para o usuário sem a necessidade de uma interação próxima com o paciente, proporcionando assim maior segurança e agilidade para o profissional.

### 3.4

#### Desenvolvimento do primeiro protótipo

O primeiro protótipo, bastante simplificado, foi construído para obtenção de medidas necessárias de conforto e usabilidade (Figura 3.2). A tela do *shield* foi colocada em um trilho para que sua distância pudesse ser ajustada. Verificada de forma empírica, a posição escolhida deveria contemplar a todos que realizaram o teste.



**Figura 3.2** - Vistas em perspectiva e de perfil do modelo ISO médio com a modelagem do primeiro protótipo. Fonte: Autor.

Questões a respeito do design e modelagem tridimensional precisaram ser consideradas, como alocação dos componentes eletrônicos dentro do *shield*, processos de fabricação e impressão e peças necessárias. Para verificar a distância da tela até os olhos para melhor visibilidade, foram feitos ensaios com a estrutura impressa em PLA com partes móveis, de maneira que, de forma experimental com diversos voluntários, fosse verificada a distância mínima necessária para visualização da tela com conforto (Figura 3.3).



**Figura 3.3** - O primeiro protótipo, sendo utilizado para verificação da distância da tela aos olhos. Fonte: Autor.

As duas placas utilizadas no projeto foram *Arduino Mega* e *ESP32-CAM*. O *Arduino Mega 2560* é uma placa de microcontrolador de código aberto e de baixo custo (Chen *et al.*, 2019). Ele oferece um número suficiente de pinos analógicos para diversas aplicações em automação de residências (Saaïd *et al.*, 2020). Fabricada pela empresa Arduino, esta placa é uma das três variantes de controladores Arduino, juntamente com o *Arduino Uno R3* e o *Arduino Nano*. O *Arduino Mega 2560* é escolhido em vários projetos devido à sua capacidade de comunicação serial e ao número suficiente de pinos de entrada/saída digitais e analógicos.

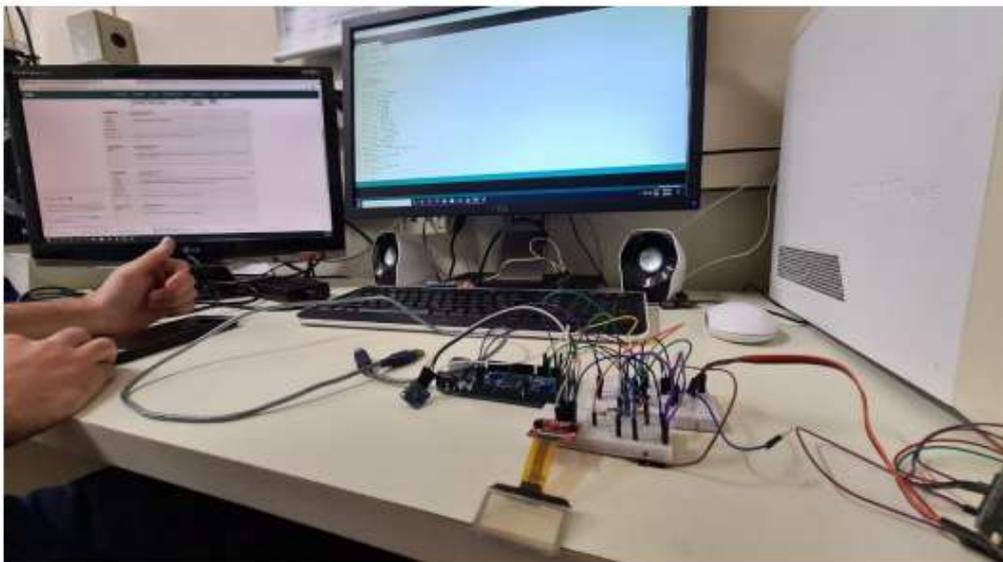
O *ESP32-CAM* é uma placa de desenvolvimento *WiFi/Bluetooth* que combina um microcontrolador *ESP32* com uma câmera (Muhammad *et al.*, 2023). Esta placa é conhecida por ser uma solução econômica para câmeras habilitadas para *Wi-Fi*, apresentando um microcontrolador de 32 bits e suporte para cartão *microSD*, tornando-a ideal para diversos projetos de *IoT* (Hirve, 2024). O módulo *ESP32-CAM* oferece várias vantagens, como captura de dados de alta qualidade, controle remoto e transmissão de dados sem fio, sendo adequado para diversas aplicações, como segurança e monitoramento (Sahil, 2023). É amplamente utilizada em sistemas de segurança doméstica, sistemas de notificação, reconhecimento facial, detecção de

incêndio, controle de acesso, entre outros. Sua capacidade de capturar e armazenar imagens em um cartão microSD facilita a gestão eficiente de dados (Gawai, 2024). O *ESP32-CAM* é empregado também em sistemas de reconhecimento facial, detecção de veículos, monitoramento inteligente, reconstrução 3D e detecção de objetos, demonstrando sua versatilidade em uma variedade de aplicações.

O código desenvolvido para o primeiro protótipo foi majoritariamente desenvolvido em *C++*, tanto para a programação do *Arduíno Mega*, quanto para a segunda placa, o *ESP32-CAM*. *C++* é uma linguagem de programação que foi desenvolvida como um aperfeiçoamento da linguagem *C*, com o objetivo de proporcionar melhores características e funcionalidades (Eddelbuettel & Balamuta, 2017). É uma linguagem de programação poderosa e polivalente, conhecida pelas suas capacidades de programação orientadas para objetos, o que a torna uma linguagem versátil para o desenvolvimento de software (Seed, 1996).

O primeiro protótipo (Figura 3.4) utilizava dois microcontroladores diferentes, como mencionado acima: *Arduíno mega 2560* e *ESP32-CAM*. O *Arduíno mega 2560* foi utilizado para controlar: um display OLED transparente da marca *Sparkfun Qwiic*, onde as informações seriam apresentadas para o profissional da saúde; um sensor de temperatura baseado em infravermelho, o *Gy-906 Mlx90614 Esf – Baa*; além de receber via comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) dados sobre o reconhecimento do paciente. O UART, ou Transmissor Receptor Assíncrono Universal, é um protocolo para comunicação serial, em que os dados são recebidos ou transmitidos por meio de duas linhas (Mishra, 2015).

O *ESP32-CAM* foi utilizado, separadamente, para realizar a tarefa de reconhecer as faces dos pacientes. Ao ocorrer o reconhecimento dos dados, estes são enviados para o *Arduíno mega 2560* via comunicação UART. Mesmo com os algoritmos eficientes, o esforço computacional para a execução de tal tarefa seria mais alto do que o *Arduíno* seria capaz de oferecer.



**Figura 3.4** - Desenvolvimento do software do primeiro protótipo. Fonte: Autor.

Para operar o sensor *Gy-906 Mlx90614 Esf*, foi utilizada a biblioteca *SparkFun\_MLX90614\_Arduino\_Library*<sup>16</sup>, e poucas alterações ao código exemplo foram necessárias para integrá-la com o restante da programação. A biblioteca *SparkFun* é uma coleção de ferramentas, módulos e sensores projetados pela *SparkFun Electronics*, uma empresa especializada em eletrônica e componentes para *makers* e engenheiros. A biblioteca inclui diversos recursos de hardware e software que facilitam a integração e utilização desses componentes em projetos de eletrônica, robótica e IoT.

Para o display OLED transparente da *Sparkfun Qwiic*, foi desenvolvido um código baseado nos exemplos encontrados em *Qwiic\_Transparent\_Graphical\_OLED*<sup>17</sup>, uma vez que não foi encontrada nenhuma biblioteca referente ao módulo da Sparkfun em questão. Para otimizar esta parte da integração foram necessárias diversas alterações nos códigos encontrados online. Para ambos os dispositivos controlados pelo *Arduíno mega 2560* foram utilizadas as portas SCL e SDA referentes a comunicação *I2C*<sup>18</sup>. O código de reconhecimento facial, utilizado no *ESP32-CAM*,

---

<sup>16</sup> SparkFun Electronics. 13 Nov 2020. Github.com. Fonte: [https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_MLX90614\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/SparkFun_MLX90614_Arduino_Library) (Acesso em 28/06/2021).

<sup>17</sup> SparkFun Electronics. 5 Mar 2019. Github.com. Fonte: [https://github.com/sparkfun/Qwiic\\_Transparent\\_Graphical\\_OLED](https://github.com/sparkfun/Qwiic_Transparent_Graphical_OLED) (Acesso em 28/06/2021).

<sup>18</sup> A comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*) é um protocolo de comunicação serial que permite que múltiplos dispositivos, como microcontroladores, sensores e atuadores, se comuniquem entre si utilizando apenas dos fios: SDA (*Serial Data Line*) e SCL (*Serial Clock Line*).

foi adaptado do repositório: *esp32 by espressif systems*<sup>19</sup>, mais especificamente do *wrover module*, porém foram feitas alterações para que fosse possível salvar codificações de rosto em uma partição de memória flash no dispositivo (obs: versão utilizada foi a de 2019, uma vez que tal função é incompatível com atualização realizada no segundo semestre de 2020). Por último, a comunicação UART foi feita utilizando os pinos nativos do *Arduíno Mega 2560* e criando alguns adicionais ao *ESP32-CAM*. Além disso, ambos foram conectados por meio de um divisor de tensão isolado por um buffer, uma vez que ambos utilizam tensões diferentes em suas portas.

Durante o desenvolvimento do primeiro protótipo, foram observados alguns pontos a serem aprimorados, como o alcance do sensor infravermelho que se mostrou muito curto, o peso excessivo exercido pelos componentes do *face shield* e alguns erros de programação. Assim, com o intuito de resolver estes problemas, o hardware foi atualizado, em que o *Arduíno Mega 2560* foi substituído pelo *Arduíno nano*, o sensor infravermelho *Gy-906 Mlx90614 Esf – Baa* foi substituído pelo *AMG8833 (Grid-eye)*, amenizando assim os problemas anteriormente observados. Como as mudanças não incluem diferentes linhas de controladores, o código desenvolvido para o segundo protótipo se manteve em C++. Para a utilização do sensor *AMG8833*, foi utilizada a biblioteca *SparkFun\_GridEYE\_Arduino\_Library*<sup>20</sup>. A parte física das conexões, por sua vez, se manteve intocada.

### 3.5

#### Desenvolvimento do segundo protótipo

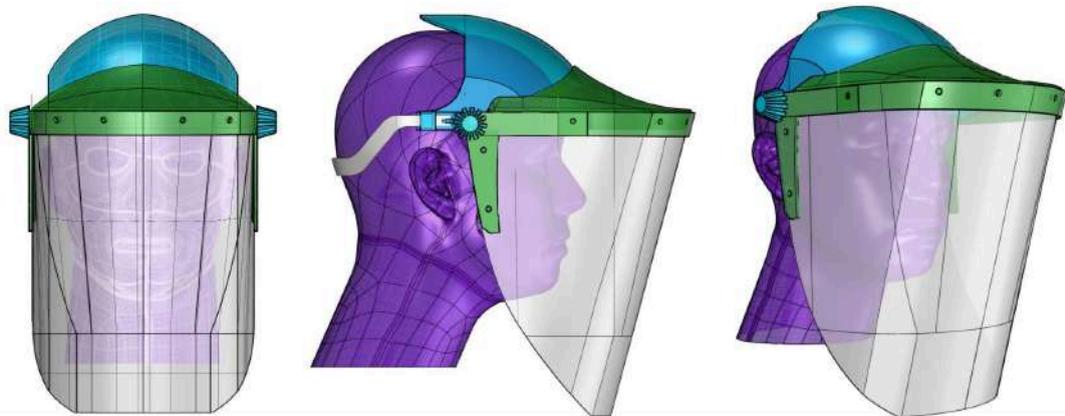
O segundo modelo (Figura 3.5) foi realizado com o intuito de testar os encaixes, articulações e conforto do usuário, sendo que primeiramente foi feito um modelo sem as cavidades necessárias para alocação dos componentes eletrônicos. Diversas questões formais foram resolvidas neste ensaio, como a configuração em duas partes, com o componente que se apoia na cabeça e o componente aba, em que fica o visor móvel (Figura 3.7), a cinta de fixação (Figura 3.8) e o uso de parafusos de cabeça sextavada para as articulações (Figura 3.9). A forma do visor foi planejada e cortada à laser em PETg (Politereftalato de etileno glicol - Figura 3.6). Foram modelados e

---

<sup>19</sup> Espressif Systems. 28 Jun 2021. Github.com. Fonte: <https://github.com/espressif/arduino-esp32> (Acesso em 28/06/2021).

<sup>20</sup> SparkFun Electronics. 15 Jul 2018. Github.com. Acessado por último em 28/06/2021. <[https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_GridEYE\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/SparkFun_GridEYE_Arduino_Library)>

impressos, portanto, três componentes principais: a peça da cabeça, o visor móvel e a cinta de fixação do visor (Figura 3.5).

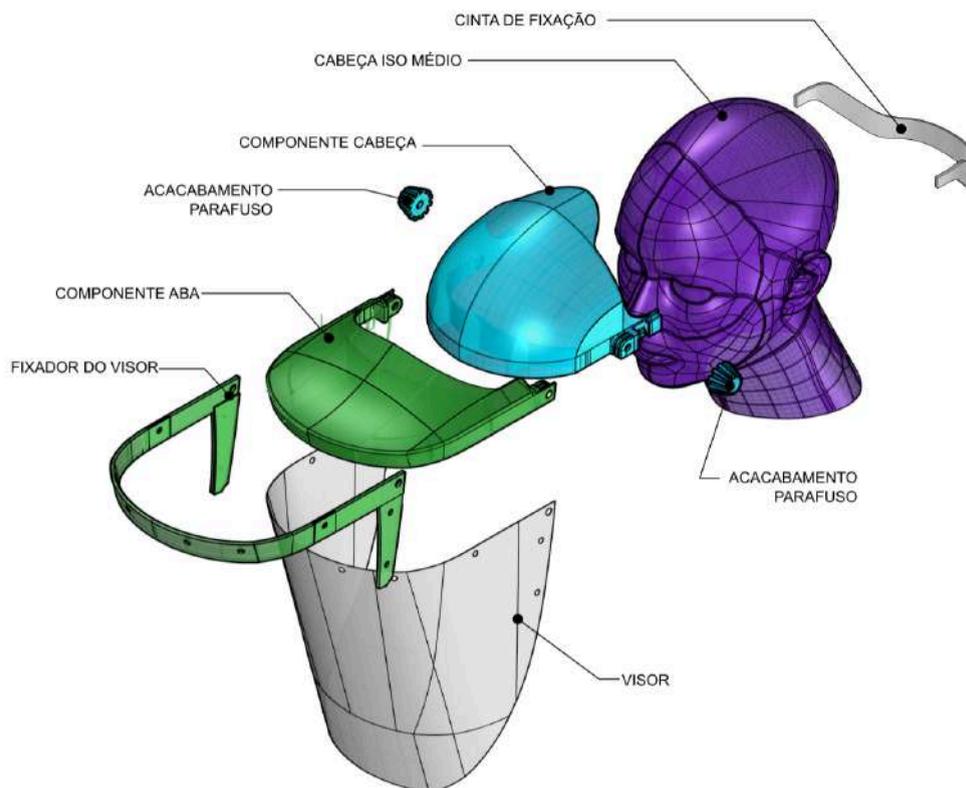


**Figura 3.5** - Modelagem dos três componentes do segundo protótipo, sem eletrônicos vistos no manequim, de frente, perfil e perspectiva. Fonte: Autor.

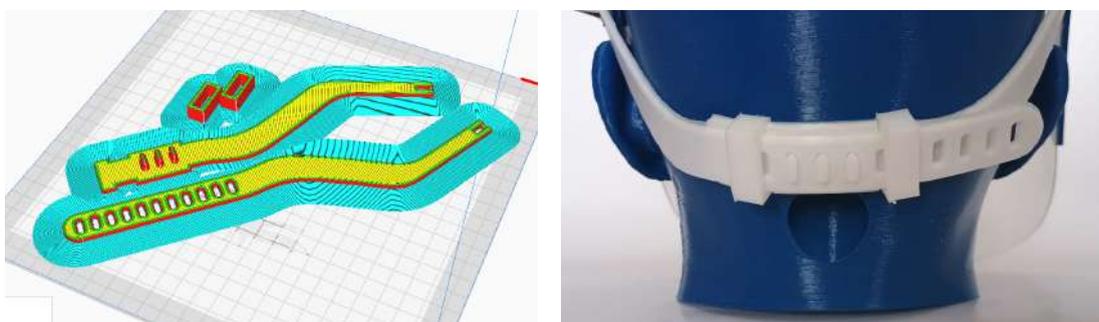


**Figura 3.6** - Planificação do visor para corte (esquerda) e segundo protótipo sem eletrônicos impresso (direita). Fonte: Autor.

Para valores antropométricos como diâmetro de cabeça, posicionamento e distância entre olhos e tamanho geral do do rosto, foram utilizados os mesmos modelos de representação da cabeça humana, impressos em manufatura aditiva, que seguem os padrões descritos na norma técnica ISO/TS 16976-2, que retratam os percentis mais comuns na população (item 2.3). Foram utilizados os mesmos cinco modelos correspondentes às dimensões ISO grande, ISO médio, ISO curto/largo, ISO pequeno e ISO longo/estrito e, conforme já colocado, o uso destes modelos durante a pesquisa foi fundamental para obtenção precisa das dimensões da cabeça e da face típicas da população.

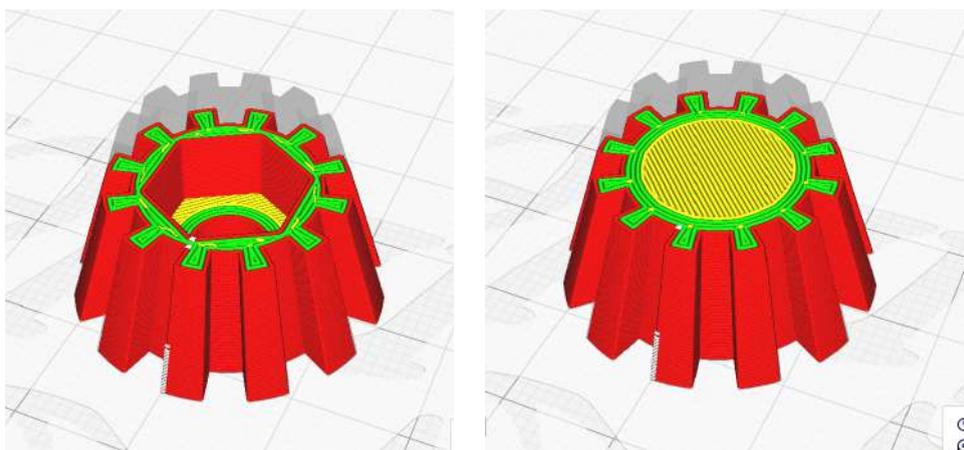


**Figura 3.7** - Vista explodida dos componentes do segundo protótipo. Fonte: Autor.



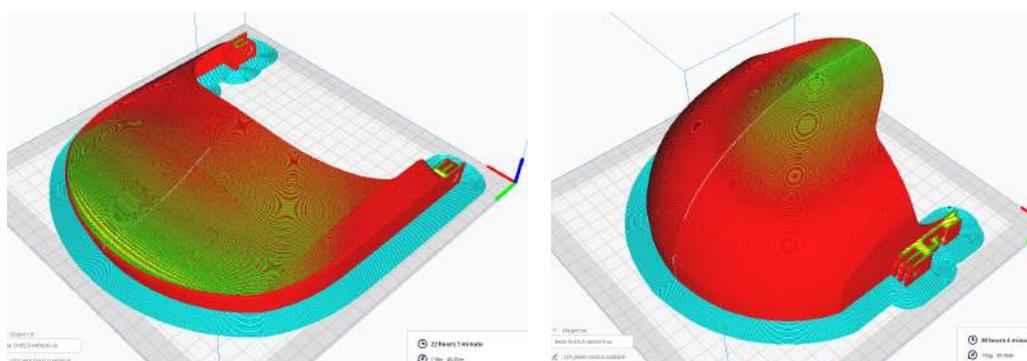
**Figura 3.8** - Visualização das cintas no fatiador (esquerda) e após a impressão, posicionadas na nuca do manequim (direita). Fonte: Autor.

A cinta de fixação foi impressa com TPE, que é um material flexível e higienizável, com 17 milímetros de largura, 2,5 milímetros de espessura e ajuste de tamanho. As porcas que seriam utilizadas na articulação do visor foram resultado de um procedimento específico de interromper a impressão para adição de componentes: as peças pretas (Figura 3.11) contém uma porca em seu interior, que foi encaixada durante o processo de impressão. A impressora foi pausada e a porca colocada na sua posição. Após isso, o processo foi continuado, enclausurando a porca no interior. A Figura 3.9 exhibe detalhes do processo em que as porcas receberam um invólucro impresso em 3D para tornar o ajuste manual mais confortável.



**Figura 3.9** - A previsão do software fatiador demonstrando a impressão com a cavidade preparada para acomodação da porca (esquerda) e o prosseguimento da impressão, uma vez que ela estivesse inserida (direita). Fonte: Autor.

As duas peças (componente cabeça e componente aba) foram modeladas segundo a limitação da mesa de impressão (Figura 3.10). O *shield* foi projetado para fabricação na impressora *Ender-3*, que é uma impressora 3D de baixo custo que ganhou popularidade devido à sua acessibilidade, capacidade de modificação e boa qualidade de impressão. Como sua área é de 220 x 220 milímetros na mesa de impressão e altura máxima de 250 milímetros, as duas peças maiores tiveram que se acomodar dentro dessas medidas. É importante ressaltar que a área para o *brim*<sup>21</sup> ajustada em 15 milímetros foi necessária e também foi considerada. O mesmo ocorreu nas impressões posteriores (Figura 3.10).

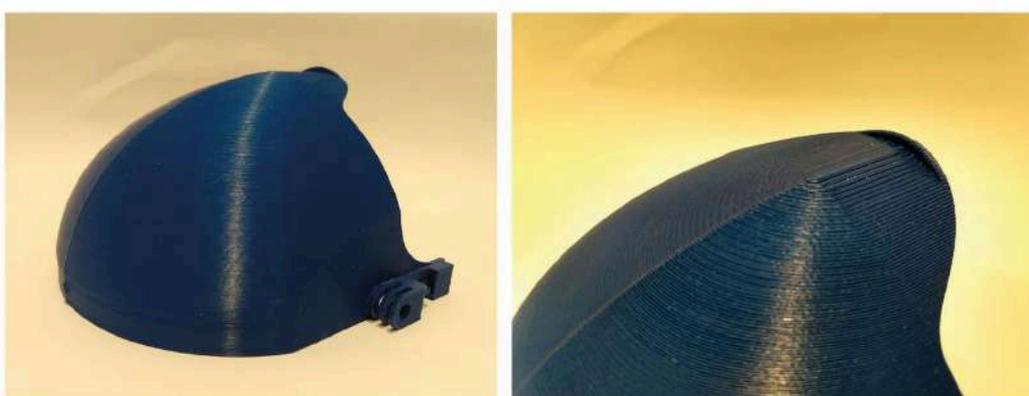


**Figura 3.10** - Previsão do software fatiador com os componentes Aba (esquerda) e Cabeça (direita) acomodados na mesa de impressão. O brim está representado em azul. Fonte: Autor.

<sup>21</sup> “*Brim*” refere-se a uma técnica ajustada no fatiador que é usada para melhorar a aderência da peça impressa à mesa de impressão e prevenir a deformação (*warping*). O *brim* consiste em adicionar várias linhas de material ao redor da base da peça, formando uma espécie de “saia” que se estende para fora a partir do perímetro da impressão. Essas linhas adicionais não fazem parte da peça final, mas ajudam a mantê-la estável durante o processo de impressão.



**Figura 3.11** - Peças desenvolvidas e impressas pela equipe para acomodação das porcas (esquerda) e detalhe da dobradiça de abertura da viseira do *face shield* (direita). Fonte: Autor.



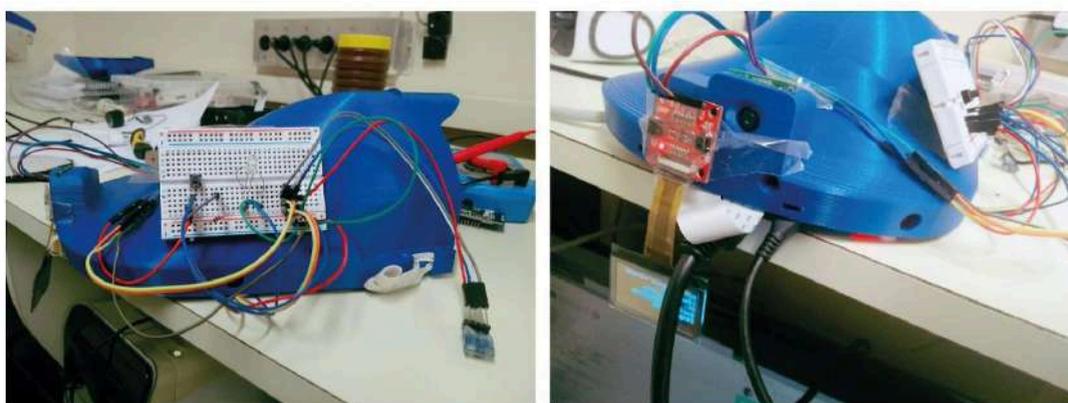
**Figura 3.12** - Detalhes da impressão do componente cabeça, feito em impressão 3D por FDM em PLA com altura de camada 0,2mm. Fonte: Autor.

O modelo ainda sem eletrônicos foi realizado, principalmente, como forma de otimizar o tempo da pesquisa. Como a programação da placa e seus componentes cobrou um intervalo de tempo extenso, tomou-se a decisão de adiantar a modelagem e impressão das outras partes do projeto durante esse período. O segundo protótipo do *face shield* foi projetado com as seguintes especificações: (a) cobrir o rosto na parte superior, frontal e laterais; (b) contemplar a possibilidade de levantar o visor sem retirar o *shield* da cabeça; (c) Possuir um espaço protegido para os componentes eletrônicos; (d) Ter suas peças otimizadas para impressão 3D.

Logo que os detalhes de encaixe entre as peças foi resolvido, o protótipo foi atualizado para recepção das placas e peças eletrônicas. O *Arduíno nano* e o *ESP32-CAM* foram substituídos por um dispositivo somente, o *Raspberry Pi 3*, para futuramente migrar para o *Raspberry Pi zero*. Esta placa foi selecionada por sua maior capacidade de processamento e maior memória interna, sendo uma versão compacta e de baixo custo do computador de placa única *Raspberry Pi* (Figura 3.14). Ele é

amplamente utilizado em uma variedade de aplicações de IoT e computação incorporada devido ao seu tamanho reduzido e eficiência energética (Ahmadi *et al.*, 2022). O *Raspberry Pi Zero* é frequentemente integrado a sistemas de controle, como um sistema de monitoramento de níveis de glicose não invasivo baseado em IoT (Alarcón-Paredes *et al.*, 2019) e empregado em sistemas de reconhecimento facial (Nagpal *et al.*, 2018), sistemas de monitoramento de pacientes (Kumar & Rajasekaran, 2016), e até mesmo em sistemas de previsão de enchentes em tempo real (Hassan *et al.*, 2022).

Como é possível observar na Figura 3.13, para comportar todas as mudanças, a parte física do *face shield* teve que ser atualizada para que o peso da parte eletrônica fosse melhor distribuído.



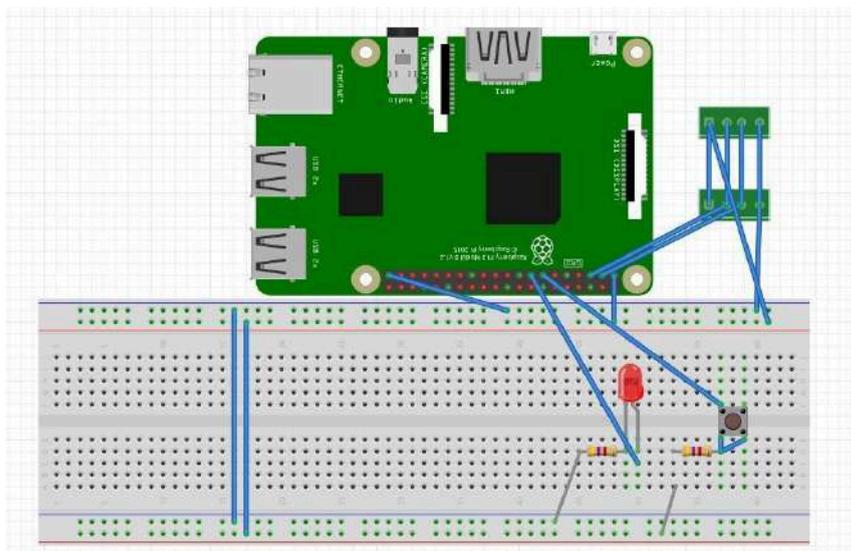
**Figura 3.13** - Testes para a produção do protótipo 3. Fonte: Autor.

Ao optar por utilizar somente um microcontrolador para gerir os componentes, foi necessária uma mudança drástica, tanto nas bibliotecas utilizadas, como na maneira em que o código seria implementado. Sendo assim, o código foi desenvolvido em *Python* (versão 3.8) e a câmera utilizada foi o modelo *REV 1.3* (a câmera anteriormente utilizada era integrada no *ESP32-CAM*).

*Python* é uma linguagem de programação amplamente reconhecida e utilizada em diversas áreas, desde ciência da computação até bioinformática e química. É conhecida por sua sintaxe concisa e legibilidade, sendo uma escolha popular devido à sua versatilidade e comunidade ativa (Eppler *et al.*, 2008; GoldwasserMichael, 2008). Apesar de ser frequentemente vista como uma linguagem de *scripting*<sup>22</sup>, *Python* é

<sup>22</sup> *Scripting* refere-se ao ato de escrever pequenos programas, chamados de *scripts*, que são projetados para automatizar tarefas repetitivas, manipular dados, ou realizar uma série de operações de forma eficiente e rápida. Ao contrário de programas grandes e complexos, *scripts* são tipicamente mais curtos, focados e frequentemente usados para resolver problemas específicos ou realizar tarefas de administração de sistemas, análise de dados, ou automação de processos.

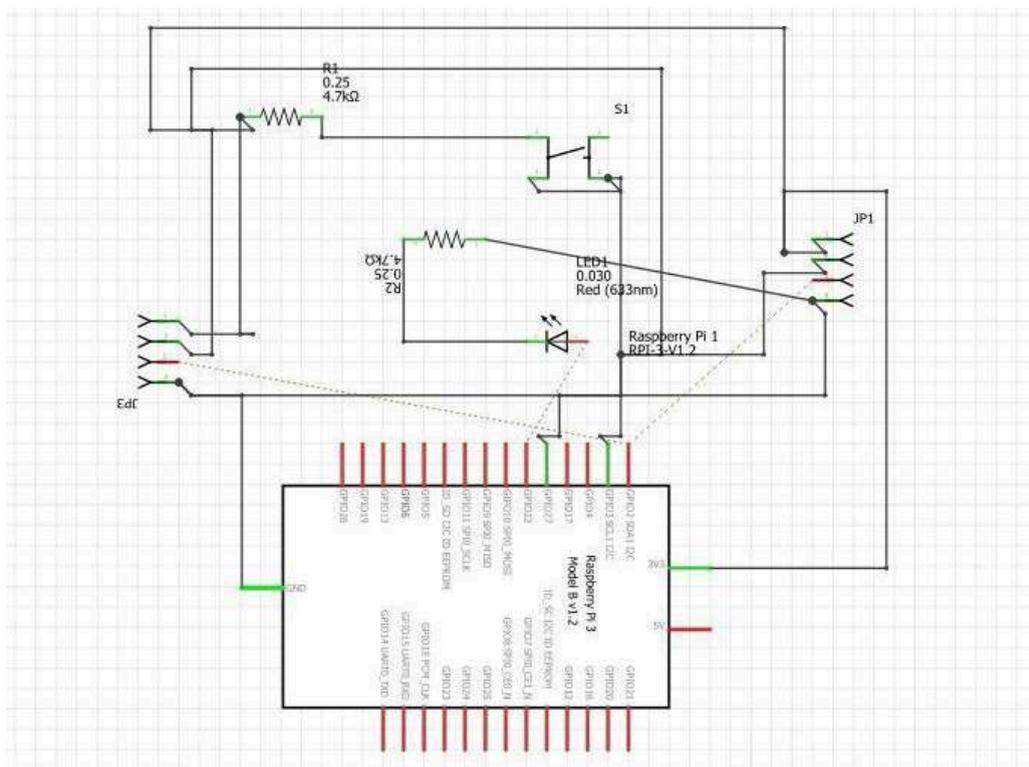
totalmente orientada a objetos, com um modelo de objeto consistente e um conjunto rico de classes integradas (Lafuente *et al.*, 2021). Sua popularidade se deve em parte à sua natureza de código aberto, sendo gratuita e com uma abundância de recursos de aprendizado.



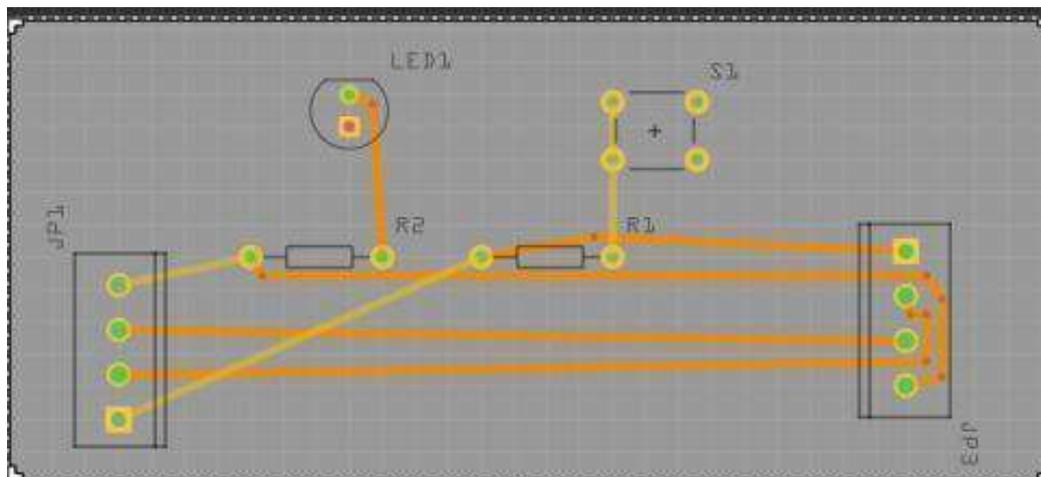
**Figura 3.14** - Representação gráfica do *Raspberry Pi3* e dos conectores, resistores, botão e LED na *protoboard*. Fonte: Autor.

A etapa de reconhecimento facial é feita com o uso da biblioteca *face\_recognition*. A comunicação *I2C* com o display OLED é realizada a partir da *luma.oled*, com algumas modificações para comportar o modelo da *sparkfun* mencionado. Por último, a comunicação *I2C* realizada para com o *AMG8833* é realizada através do *circuit python*, com o módulo específico *Adafruit CircuitPython AMG88xx*. Ao final, foi adicionado um LED e um botão que, quando pressionado, envia um sinal para que tal LED seja acionado e a câmera tire uma foto para que o reconhecimento de qualquer indivíduo na frente do usuário seja realizada. Ao final desse processo, o LED se apaga e as informações referentes a pessoa mais próxima reconhecida são colocadas na tela (o processo só ocorre ao apertar o botão, provendo maior controle para o usuário e evitando que a tela seja desnecessariamente poluída).

Para a montagem final, foi criado um esquemático no software *Eagle* (Figura 3.15), facilitando assim a transmissão de informações referente às ligações e facilitando a criação de placas para tal tarefa (Figura 3.16). Foi utilizada uma placa de interconexão entre os sensores e o *Raspberry Pi*. Nela, será possível conectar o sensor de temperatura, a câmera, o botão para realizar a captura da imagem e o LED para confirmar a captura da imagem. Entre o LED e o botão existem dois resistores que ficam entre os elementos e o *Raspberry Pi*. As conexões serão via *I2C*.



**Figura 3.15** - Esquema elétrico das conexões entre os elementos do conjunto a ser conectado ao *Raspberry Pi3*. Fonte: Autor.

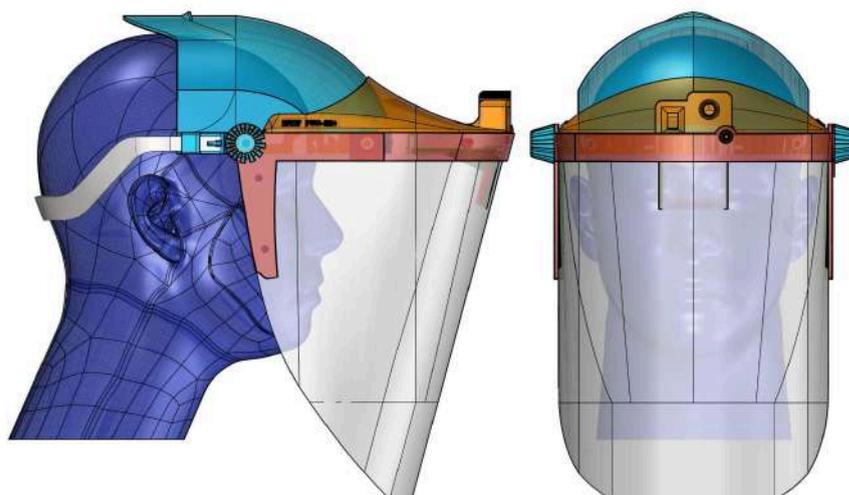


**Figura 3.16** - Projeto da placa das conexões entre os elementos do conjunto a ser conectado ao *Raspberry Pi3*. Fonte: Autor.

### 3.6

#### O Face Shield

A Figura 3.17 exhibe as vistas frontal e lateral, a Figura 3.18 exhibe uma perspectiva da modelagem contemplando as cavidades para alocação dos componentes eletrônicos atualizados e a Figura 3.19 mostra a vista explodida do modelo final.

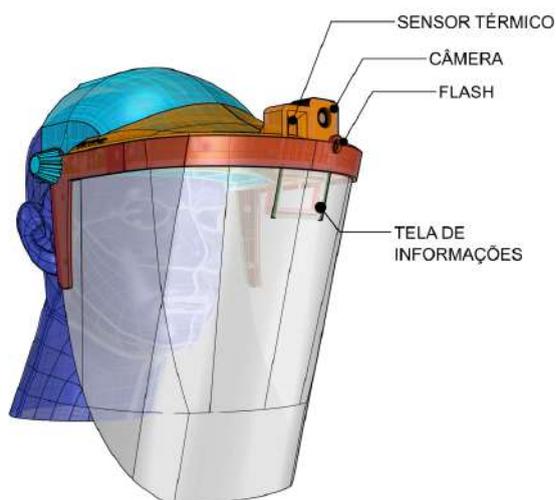


**Figura 3.17** - Vistas de perfil e frontal da modelagem do *face shield* no manequim ISO médio. Fonte: Autor.

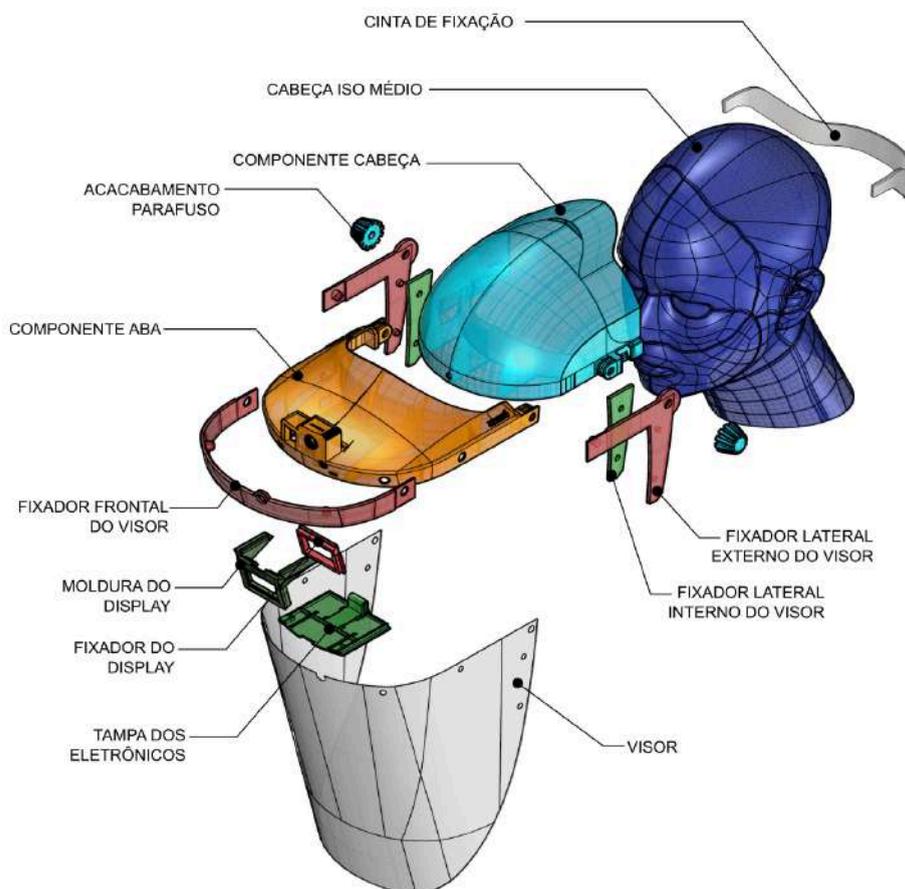
Para o posicionamento da tela de informações, foi feita uma pesquisa mais aprofundada, além do teste empírico realizado na fase anterior. A distância mínima que um objeto pode estar do olho humano sem perder o foco é determinada pela capacidade de acomodação do olho. A acomodação é o processo pelo qual o olho ajusta a sua focagem para perceber objetos a várias distâncias, sendo que a distância focal em relação ao vértice frontal da córnea aumenta de cerca de 31 mm para objetos no infinito para cerca de 40 mm para objetos a 10 cm de distância (Langenbucher *et al.*, 2021). Isto indica que o olho é capaz de focar objetos a uma distância de 10 cm. A profundidade de focagem do olho humano varia ao longo da retina, com a profundidade de focagem total aumentando linearmente de 0,89 D<sup>23</sup> na fóvea<sup>24</sup> para 3,51 D a uma excentricidade retiniana de oito graus (Wang & Ciuffreda, 2004). Isto sugere que a capacidade do olho para manter a focagem se estende para além da fóvea, permitindo a focagem a distâncias mais próximas. Porém, telas que ficam muito próximas ao olho apresentam desafios na manutenção do foco devido ao conflito vergência-acomodação. Os olhos mudam o ângulo de vergência para fixar objetos a diferentes profundidades, mas as lentes cristalinas dos olhos têm de se acomodar a uma única distância fixa para focar a imagem virtual (Padmanaban *et al.*, 2017).

<sup>23</sup> D ou dioptria, é uma unidade de medida utilizada em oftalmologia para expressar o poder de refração de lentes ou a capacidade refrativa do olho. Em termos simples, a dioptria é uma medida da convergência ou divergência dos raios de luz que entram no olho, sendo fundamental para corrigir problemas de visão, como miopia, hipermetropia e astigmatismo (Geraissate, 2000).

<sup>24</sup> A fóvea é a área da retina que recebe a imagem diretamente do ponto onde os olhos estão focados. Isso permite que a fóvea forneça a visão central de alta resolução necessária para atividades como leitura e observação de detalhes.



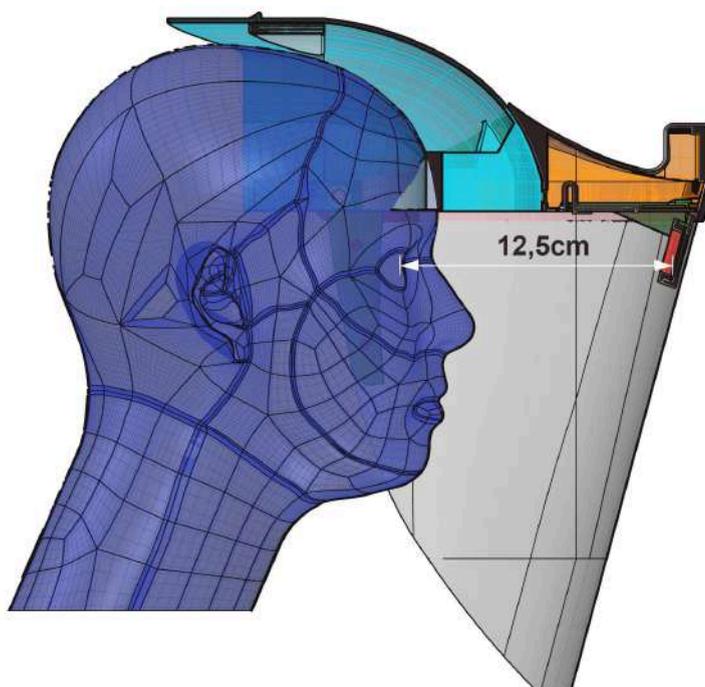
**Figura 3.18** - Perspectiva da modelagem do *face shield*. Fonte: Autor



**Figura 3.19** - Vista Explodida com os componentes projetados para o *face shield*. Fonte: Autor.

Por isso, a medida de distância final entre a tela de informações e o olho do usuário foi estabelecida pelos valores obtidos por exames oftalmológicos que analisaram parâmetros da visão binocular (Dzhodzhuva, 2017), como o Ponto Próximo de Acomodação (PPA) e o Ponto Próximo de Convergência (PPC), com a aplicação da Régua de RAF (*Royal Air Force*). O Ponto Próximo de Acomodação é a menor

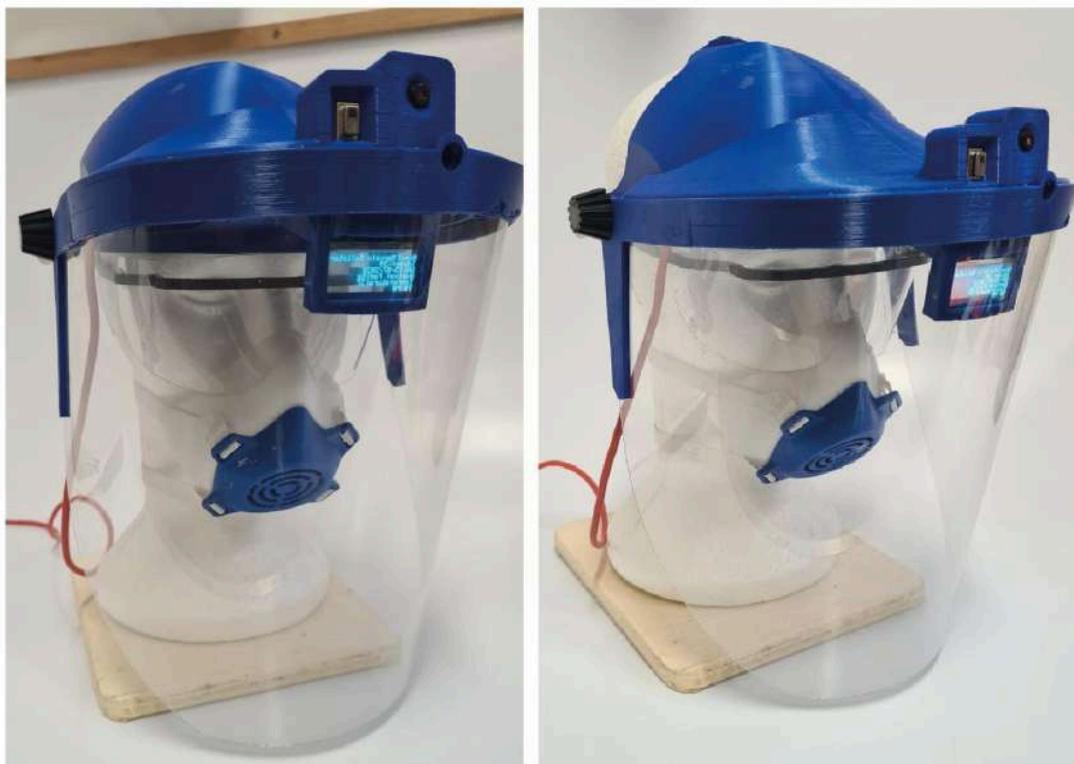
distância dos olhos a um objeto para a qual a imagem pode ser vista com nitidez, e o Ponto de Próximo de Convergência é o ponto mais próximo onde a pessoa pode manter a fixação de um objeto sem ver em dobro. Combinados, o PPC e o PPA representam os pontos mais próximos em que os olhos podem manter o foco e a fixação binocular. O exame, muito semelhante ao teste feito para o primeiro protótipo, consiste em colocar um objeto de fixação à frente do rosto do paciente e lentamente deslocá-lo ao longo da régua na direção dos olhos até que comece a ficar desfocado ou um dos olhos deixe de fixar e comece a desviar-se lateralmente. Dentro dos parâmetros normais, o PPC é estabelecido em aproximadamente 10 centímetros e o PPA considerado em oito dioptrias (ou 12,5 centímetros, conforme a Figura 3.20).



**Figura 3.20** - Seção passando pela cabeça ISO médio e pelo *face shield* demonstrando a distância considerada entre o olho do usuário e o visor. Fonte: Autor.

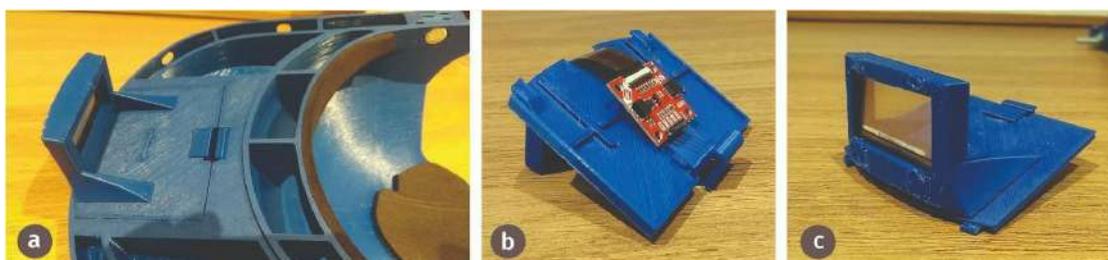
Portanto, foi estabelecido o valor de 12,5 centímetros para a distância entre o olho e a tela de informações, pois o olho humano pode focar objetos a essa distância com a capacidade de ajustar a sua focagem através da retina. Coincidentemente, esse valor é bem semelhante à medida que já vinha sendo utilizada, porém a compreensão dos mecanismos de acomodação e da profundidade de focagem foram cruciais para a estabelecer esse valor com melhor embasamento, prevenindo a fadiga visual.

A figura 3.21 exhibe imagens do *face shield* impresso em ABS.



**Figura 3.21** - *Face shield* impresso com os componentes eletrônicos instalados. Fonte: Autor.

A cinta de fixação permaneceu conforme o modelo anterior, a Figura 3.22 exhibe detalhes de peças que compõem o terceiro protótipo. Detalhe da tampa encaixada, onde a placa e outros componentes eletrônicos foram alocados (Figura 3.22a). Detalhe da tampa solta, onde a tela foi fixada (Figura 3.22b e 5.22c).



**Figura 3.22** - A manufatura aditiva possibilitou a prototipagem de encaixes complexos. Em detalhe: (a) Vista inferior do componente aba, com a tampa fechada; (b) Detalhe da parte interna da tampa com visor; (c) Detalhe da parte externa da tampa com visor. Fonte: Autor.

A Figura 3.23 apresenta detalhes da parte frontal do *face shield* impresso em ABS. A câmera se encontra na parte superior esquerda e o sensor à sua direita. Esta configuração possibilita o monitoramento do paciente que esteja posicionado na frente do usuário, sem comprometer a visão do profissional de saúde. Na figura também é possível observar o display OLED transparente encontrado na altura dos olhos,

segundo o ponto de vista do usuário. Na Figura 3.24, o modelo final é testado no campus da universidade.



**Figura 3.23** - Detalhes da parte frontal do *face shield* com display, sensor e câmera (esquerda) e o ponto de vista do usuário, com as informações do paciente exibidas na tela (direita) Fonte: Autor.



**Figura 3.24** - *Face shield* com a viseira aberta (a) e fechada (b) em teste. Fonte: Autor.

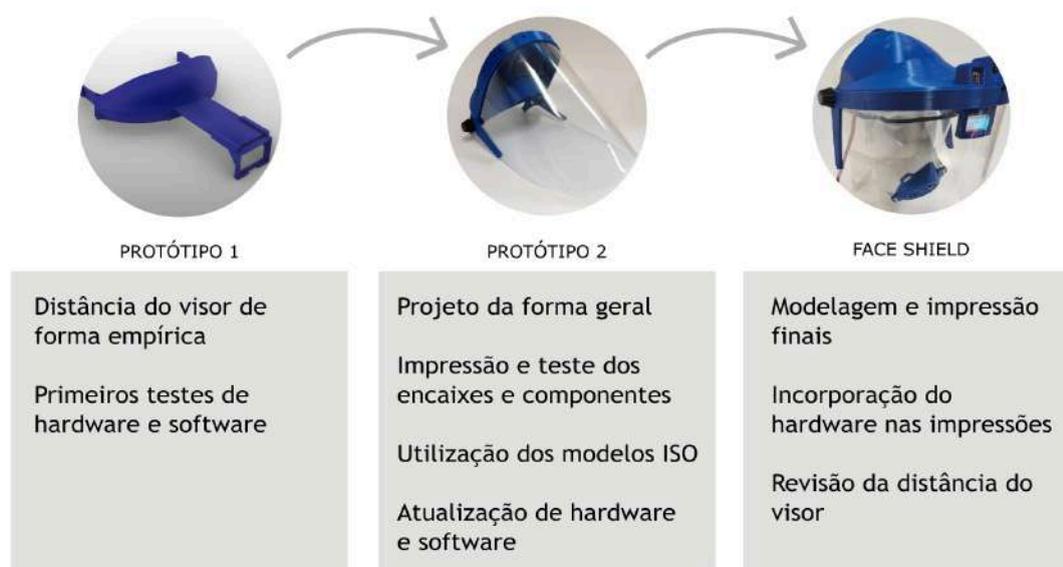
### 3.7

#### Resultados

A Figura 3.25 apresenta o esquema visual que sintetiza as principais soluções técnicas obtidas com a produção de cada protótipo e aplicadas no modelo subsequente. O *face shield* foi levado para a avaliação de profissionais da saúde (Figura 3.26) e após a consulta aos ACS entrevistados, a reação foi positiva, com muito entusiasmo para uso em campo. O EPI inteligente desenvolvido é resultado das pesquisas realizadas pela equipe do BioDesign e entre os pedidos por equipamentos de proteção individual recebidos pelo projeto, um número considerável de solicitações adveio de

Agentes Comunitários de Saúde. O objetivo do projeto consistia em estudar a viabilidade de uma solução que integrasse fabricação digital e Internet das Coisas (IoT) para proteger e auxiliar os profissionais da área da saúde na execução de suas atividades, porém o teste em campo não é um processo que deve ser feito levemente.

### Principais evoluções e aperfeiçoamentos observados por versão:



**Figura 3.25** - Esquema visual demonstrando as principais evoluções técnicas e aperfeiçoamentos no desenvolvimento do *face shield*. Fonte: Autor.

O armazenamento de dados médicos de pacientes em IoT envolve preocupações significativas relacionadas à segurança, privacidade e integridade dessas informações sensíveis. A digitalização dos dados médicos dos pacientes e o compartilhamento desses dados com outras instituições fora das redes protegidas levantam questões importantes sobre a privacidade e a integridade dos dados (Obaid & Salman, 2022). A natureza altamente sensível dos dados de saúde dos pacientes requer medidas robustas de segurança para proteger essas informações contra acessos não autorizados e potenciais violações de privacidade (Chinbat, 2024). A questão ética do armazenamento de dados médicos em IoT também está relacionada à transparência e ao consentimento informado dos pacientes. É fundamental garantir que os pacientes sejam plenamente informados sobre como seus dados serão coletados, armazenados e utilizados, bem como obter seu consentimento explícito para essas práticas (Dua, 2022). A falta de transparência e controle sobre o uso dos dados pessoais dos

pacientes pode minar a confiança no sistema de saúde e levantar preocupações éticas sobre a autonomia e a privacidade dos indivíduos.



**Figura 3.26** - Agente comunitário de saúde utilizando o *face shield*. Fonte: Autor.

Dessa forma, apesar das expectativas, a decisão tomada para o momento foi de não submeter o *face shield* ao teste em campo. Embora a tecnologia exista e tenha sido aplicada com sucesso no *face shield* nos testes elaborados, existem ainda questões técnicas e legais a serem esclarecidas para sua aplicação. Além disso, o investimento em infraestrutura para a proteção dos dados não é compatível com um teste em pequena escala, inviabilizando sua aplicação no momento. Mesmo que o dispositivo funcione e tenha grande potencial, ainda esbarra em algumas questões políticas além do laboratório.

## 4

### **Desenvolvimento das Máscaras de Proteção Respiratória**

Embora a máscara tenha sido apenas um componente dentre as diversas medidas preventivas a serem tomadas durante a pandemia, sua utilização foi certamente a mais simples de ser implementada. Este capítulo explora a pesquisa e o desenvolvimento de máscaras respiratórias impressas em 3D, focando no progresso técnico que levou à melhoria contínua dos modelos.

#### 4.1

##### **Identificação do problema**

Considerando surtos epidêmicos anteriores e sabendo que a contaminação ocorre principalmente por aerossóis, o uso da máscara pela população logo foi aconselhado como forma de desacelerar a contaminação (WHO, 2020a). Hoje sabe-se que o tipo de filtro mais indicado para conter as partículas em suspensão são dos tipos N95 ou PFF2 seguida pelas máscaras do tipo cirúrgica. Porém, no início da pandemia, devido à falta destas máscaras no mercado, outros modelos como as de pano foram considerados alternativas improvisadas viáveis para uso da população e até mesmo por profissionais da saúde que trataram do combate direto à doença, mesmo que sua eficácia tivesse resultados variados (Abd-Elsayed & Karry; 2020).

#### 4.2

##### **Questão**

Novak *et al.* (2020) realizaram a análise de modelos de máscaras disponibilizados online e argumentam que embora exista uma rede bem intencionada de usuários dispostos a ajudar, com grande potencial de execução não centralizada, os modelos analisados não cumprem os requisitos básicos de segurança para uso das máscaras como medidas de proteção contra a COVID-19. Entre os principais fatores para que estes modelos não forneçam a eficácia necessária, os autores destacam a baixa flexibilidade do material, a vedação não eficaz na face, bem como os vazamentos entre a máscara e o material utilizado como filtrante. Os autores não recomendam o uso de máscaras impressas com muitas peças e múltiplos encaixes rígidos, passíveis de vazamentos, pela falsa sensação de segurança que estas máscaras poderiam passar. Afirmam também que a máscara que teve melhor desempenho

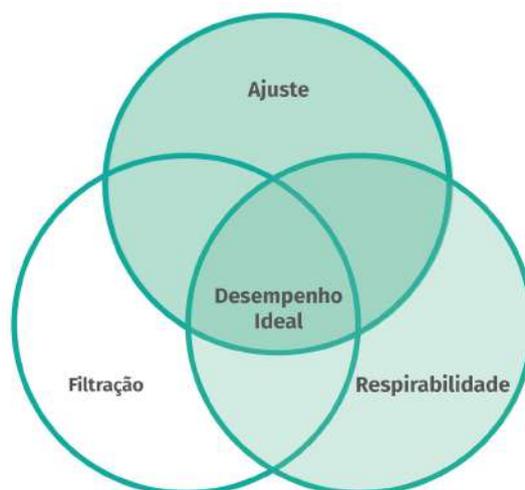
comparada aos outros modelos foi devido à sua concha<sup>25</sup> ter sido impressa em TPU, um material flexível que se acomoda melhor ao rosto, enquanto as demais máscaras analisadas possuíam concha rígida impressas em Ácido Polilático (PLA). Os dados apresentados demonstraram parâmetros e condições para a produção de máscaras e seus componentes por meio de técnicas de fabricação digital, como: (a) concha ergonômica e flexível; (b) simplicidade formal e facilidade de montagem; (c) vedação de encaixes; (d) análise, testes detalhados de sua eficácia e regulamentação.

A pesquisa para este tema resultou no desenvolvimento de uma vasta coleção de modelos e variações de máscaras. A impressão das diversas versões em materiais e técnicas diferentes teve como objetivo o estudo e avaliação dos resultados obtidos com cada modelagem, bem como a verificação da adequação e vedação ao rosto e do conforto. O constante desenvolvimento e produção de novos modelos também permitiu a avaliação do comportamento dos modelos impressos, de acordo com cada material ou técnica utilizada.

### 4.3

#### Parâmetros da investigação

A Organização Mundial da Saúde lista os requisitos básicos para fabricação de máscaras de tecido não-médicas (WHO, 2020b). Esses requisitos foram considerados como uma base da pesquisa e são divididos entre respirabilidade, filtração e ajuste (Figura 4.1).



**Figura 4.1** – Relação entre ajuste, filtragem e respirabilidade para máscaras não médicas. Fonte: Adaptado de WHO (2020a).

---

<sup>25</sup> Concha é a nomenclatura dada à parte da máscara que toca a face do usuário.

A respirabilidade em uma máscara de proteção é um aspecto fundamental que influencia diretamente o conforto e a eficácia do dispositivo, especialmente quando usada por longos períodos. A capacidade de uma máscara de permitir a passagem adequada de ar durante a respiração é essencial para garantir que o usuário possa respirar sem dificuldades, evitando a sensação de sufocamento e desconforto (Benas *et al.*, 2022). Máscaras que possuem materiais altamente condutivos termicamente e boa permeabilidade ao vapor de água são mais confortáveis de usar, pois conseguem transferir calor e umidade do corpo rapidamente, evitando que a máscara fique úmida e se deteriore facilmente (Lee *et al.*, 2020). Caso este requisito não seja atendido, os usuários serão menos propensos a usá-la corretamente ou consistentemente. Máscaras confortáveis e fáceis de respirar aumentam a adesão ao uso, o que é crucial para a prevenção da propagação de doenças respiratórias.

A filtração é também um aspecto essencial que determina a validade da máscara na proteção contra partículas nocivas. A eficiência da filtração é imprescindível para proteger tanto o usuário quanto as pessoas ao seu redor, evitando a disseminação de partículas virais e bacterianas. A capacidade da máscara de filtrar partículas de diferentes tamanhos é crucial para garantir a proteção contra patógenos no ambiente (Pan *et al.* 2020).

Finalmente, o ajuste em uma máscara determina o quão eficaz a máscara será na filtração de partículas e na proteção do usuário, pois apenas uma máscara bem acomodada no rosto e sem vazamentos poderá garantir que o filtro seja corretamente utilizado (O’Kelly *et al.*, 2021). O ajuste bem feito garante que a máscara crie um selo seguro ao redor do nariz e da boca, impedindo que partículas não filtradas entrem pelas bordas (Blachère *et al.*, 2022), além de oferecer uma proteção bidirecional, pois protege tanto o usuário quanto as pessoas ao seu redor: impede que o usuário inale partículas perigosas e também evita que partículas exaladas pelo usuário se espalhem no ambiente.

As máscaras devem proporcionar boa respirabilidade que não cause desconforto aos usuários, filtração adequada que ofereça segurança e um ajuste no rosto que não possibilite escape de ar. A performance ideal da máscara é alcançada quando compreende estas três características.

#### 4.4

### Testagem comparativa de fluxo de ar e respirabilidade de máscaras disponíveis comercialmente no Brasil

Dentre os requisitos listados para o projeto de uma máscara adequada, a “boa respirabilidade” de um tecido filtrante pode ser equivocadamente atribuída ao escape de ar não filtrado, visto que muitas máscaras não oferecem um ajuste hermético à topografia facial. Torna-se, portanto, necessária a investigação deste parâmetro sob condições controladas. Para isso, foi realizado um experimento que buscou verificar a permeabilidade de alguns tecidos filtrantes disponíveis comercialmente. Sem o objetivo de testar a eficácia de filtragem, a testagem executada teve o propósito de comparar quantitativamente a respirabilidade de tecidos utilizados em modelos de máscaras comercializadas no Brasil.

A documentação gerada nesta fase da pesquisa é constituída pelos relatórios e gráficos gerados pelo equipamento utilizado no experimento, assim como gráficos desenhados a partir do cruzamento de dados desse relatório. No dia 28 de outubro de 2021 foi feito o experimento de verificação de respirabilidade de dez tecidos de máscaras, a testagem de diferentes filtros foi feita com o objetivo de verificar e comparar a respirabilidade de variados elementos filtrantes disponíveis no mercado. Deve-se deixar claro que as propriedades filtrantes e eficácia de cada exemplo analisado não estão sendo questionadas; a relevância deste experimento é direcionada apenas à resistência à passagem de ar, ou respirabilidade, dos filtros abordados.

#### 4.4.1

### O equipamento utilizado

**BiPAP *Philips A30*:** BiPAP, ou *Bilevel Positive Airway Pressure* (pressão positiva nas vias aéreas a dois níveis), é um gerador de fluxo de ar (Figura 4.4) utilizado para terapia respiratória, incluindo o tratamento da apneia do sono e disfunções pulmonares. A pressão do ar é feita em dois níveis: um para a inspiração (IPAP) e outro para expiração (EPAP). Trata-se de um ventilador mecânico não invasivo utilizado para equilibrar o ciclo respiratório do paciente dando suporte a respiração natural.

**Analisador de Fluxo *FLUKE VT Plus HF*:** Este dispositivo é responsável pela leitura do fluxo de gases que passam no sistema. O modelo (Figura 4.4) possui leitura

de fluxo bidirecional, que o torna apropriado ao uso combinado com o ventilador mecânico. Todas as informações e gráficos utilizados neste estudo foram fornecidos por este aparelho. A Tabela 4.1, extraída de seu manual, indica a sua resolução, alcance e precisão de leitura.

**Pulmão de teste de precisão *FLUKE ACCU LUNG*:** Este aparelho (Figura 4.4) possui um fole e molas que simulam o pulmão do paciente, em que é possível selecionar uma carga específica, de acordo com a resistência desejada. Os pulmões de teste são utilizados para avaliar o desempenho do aparelho ou como ferramenta de ensino para gerenciamento do ventilador.

**Table 1-7. Breath Parameter Accuracy Specifications**

Parameter	Resolution	Range	Accuracy
Inspiratory and Expiratory Tidal Volume	0.1 ml	As specified in high/low-flow spec	As specified in high/low-flow spec
Minute Volume	0.001 lpm	0-60 l	3 %
Breath Rate	0.1 bpm	0.5 – 150 bpm	1 %
Inspiratory to Expiratory Time Ratio (I:E Ratio)	0.01	1:200 to 200:1	2 % or .1
Peak Inspiratory Pressure	0.1 cmH <sub>2</sub> O	±120 cmH <sub>2</sub> O	±3 % or 1 cmH <sub>2</sub> O
Inspiratory Pause Pressure	0.1 cmH <sub>2</sub> O	±120 cmH <sub>2</sub> O	±3 % or 1 cmH <sub>2</sub> O
Mean Airway Pressure	0.1 cmH <sub>2</sub> O	±80 cmH <sub>2</sub> O	±3 % or 0.5 cmH <sub>2</sub> O
Positive End-expiratory Pressure (PEEP)	0.1 cmH <sub>2</sub> O	-5 to 40 cmH <sub>2</sub> O	±3 % or 0.5 cmH <sub>2</sub> O
Lung Compliance <sup>1</sup>	0.1 ml/cmH <sub>2</sub> O	0 - 150 ml/cmH <sub>2</sub> O	±5 % or 5 ml/cmH <sub>2</sub> O
Inspiratory Time	0.01 sec	0 - 60 sec	0.5 % or 0.02 sec
Inspiratory Hold Time	0.01 sec	0 - 60 sec	1 % or 0.1 sec
Expiratory Time	0.01 sec	0 - 90 sec	0.5 % or 0.01 sec
Expiratory Hold Time	0.01 sec	0 - 90 sec	1 % or 0.1 sec
Peak Expiratory Flow	0.01 lpm	0 - 300 lpm	3 % or 2 lpm
Peak Inspiratory Flow	0.01 lpm	0 - 300 lpm	3 % or 2 lpm
Flow Bias <sup>2</sup>	0.01 lpm	0 - 30 lpm	2 % or 0.5 lpm
<sup>1</sup> Inspiratory pause time >0.5 sec			
<sup>2</sup> Expiratory pause time >0.5 sec			

**Tabela 4.1** - Especificações de precisão do aparelho *FLUKE VT Plus HF*. Fonte: [https://www.flukebiomedical.com/sites/default/files/resources/vtplusfomeng0200\\_0.pdf](https://www.flukebiomedical.com/sites/default/files/resources/vtplusfomeng0200_0.pdf). Página 1-13 (Acesso em 15/01/2022)

**Tubos conectores:** Para a canalização de ar pelos aparelhos foram utilizadas três mangueiras e conexões próprias dos equipamentos, sendo: mangueiras 1 e 2 com 49 centímetros cada e mangueira 3 com 97 centímetros. Todas possuem 22mm de diâmetro.

**Suporte de filtro:** Peça modelada e impressa pelo laboratório em ABS (Figura 4.2) como suporte de teste dos filtros. Projetada em duas partes, acomodando entre elas o elemento filtrante, fechando o sistema de forma hermética, de forma que o fluxo de ar passe pelo filtro com 50 milímetros de diâmetro sem perdas ou vazamentos. O total do volume de ar no sistema criado pelas mangueiras e suporte segue: Mangueira 1 = 0,22 litro; mangueira 2 = 0,22 litro; mangueira 3 = 0,48 litro; suporte: = 0,11 litro; que dá o total de 1,03 litro de “volume morto”.



**Figura 4.2** - Peça de suporte modelada e impressa em ABS com anel de borracha em ambos os lados para acomodação do filtro e fechamento hermético do sistema. Fonte: Autor.

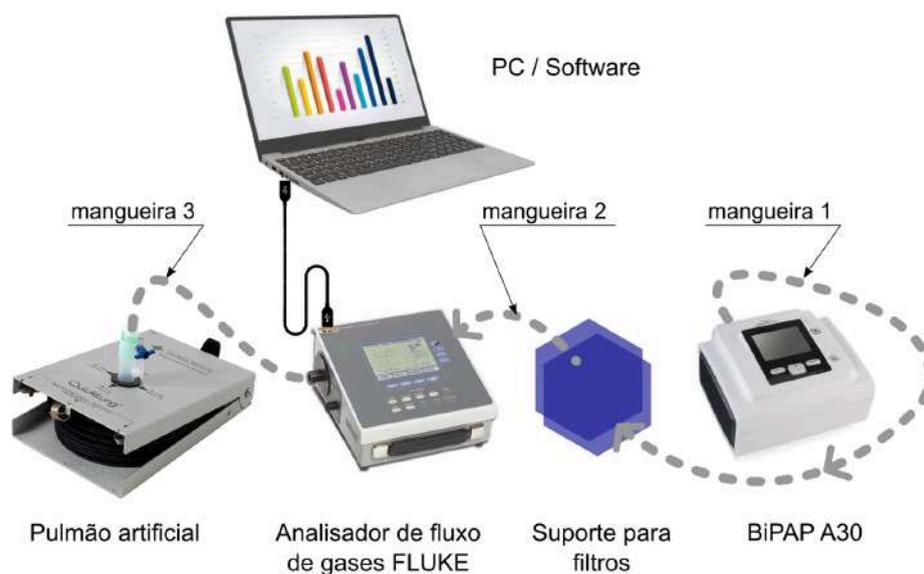
#### 4.4.2

#### Montagem

A montagem do experimento foi feita na seguinte configuração: O BiPAP foi acoplado ao suporte de filtros, que por sua vez foi conectado ao analisador de fluxo pelos tubos conectores. Ao analisador, foi conectado o pulmão de teste por tubo e o computador por cabo USB, com o software que coletou os dados (Figura 4.3). Dessa forma, o fluxo de ar é gerado pelo BiPAP, passa pelos filtros e segue até o analisador, que canaliza o ar até o pulmão de teste. O analisador, por sua vez, captura o fluxo de ar entre o BiPAP e o pulmão, considerando a resistência de cada filtro analisado, conforme o esquema da Figura 4.4. Na Figura 4.3, temos o experimento montado.



**Figura 4.3** - Montagem do experimento. Fonte: Autor.



**Figura 4.4** - Esquema de montagem dos aparelhos para o experimento (fluxo de ar da direita para esquerda). Fonte: Autor.

#### 4.4.3

#### Filtros testados

Os filtros estudados (Figura 4.5) foram selecionados pela disponibilidade de mercado. Para realização do teste, todos os filtros possíveis de serem adquiridos no momento foram utilizados, pois o objetivo era reunir o maior número de exemplares possível para comparação.



**Figura 4.5** - Os filtros utilizados em formato de círculo com diâmetro 50 mm para testagem. Fonte: Autor

**Filtro da máscara *OTO PFF2*:** A máscara *OTO* surgiu, em semelhança com o presente trabalho, com a demanda levantada pela pandemia de máscaras de proteção próprias para uso e fabricadas no Brasil. O filtro possui certificado de atividade antiviral de materiais plásticos contra *SARS-Cov-2* in vitro. Segundo o fabricante, o refil para Máscara *OTO*, o filtro PFF2, atende às análises previstas na RDC 142 do Ministério da Saúde do Brasil nos requisitos de qualidade para fornecedores de matérias primas presentes em produtos absorventes descartáveis de uso externo. O material do filtro passou por testes, que determinaram a eficiência da filtração do produto, alcançando valor mínimo de 94%, requerido na regulamentação técnica. Ainda segundo o fabricante, seus filtros PFF2 atingiram 97% de eficiência de filtração e são recomendados para atendimento médico e hospitalar, ambulatório, clínica médica, enfermagem, coleta de exames, clínica odontológica, laboratórios e atividades industriais que exigem utilização de máscara com filtro PFF2.<sup>26</sup>

**Filtro da máscara *OTO Cirúrgica*:** Do mesmo fabricante, o filtro da máscara *OTO* de denominação “cirúrgica” é dedicado ao uso do público geral. É um filtro do tipo SMS, com tripla camada e elemento filtrante com BFE (eficiência de filtração bacteriana) superior a 95%. É recomendado para atividades de trabalho no comércio, escritórios e prestação de serviços, saídas necessárias de casa, uso no transporte público, ida ao supermercado, ida à farmácia e todas as atividades que eram realizadas sem necessidade de máscaras antes da pandemia.<sup>27</sup>

**Filtro em tecido de algodão:** Filtro confeccionado por duas camadas de tecido de algodão simples, ainda sem lavagem. Material muito utilizado em máscaras de fabricação caseira e populares para uso cotidiano. Como a fabricação artesanal e uso deste tipo de máscara se tornou habitual entre o público, foi julgada pertinente sua participação neste experimento.

**Filtro da máscara *Aura 9320+BR 3M*:** Trata-se de um respirador descartável comercializado pela 3M. Segundo o boletim técnico fornecido pelo fabricante, o respirador é composto basicamente por três camadas: parte interna de sustentação, composta de não-tecido em fibras sintéticas; sobre esta é montado o meio filtrante composto por microfibras tratadas eletrostaticamente, e a parte externa do respirador

---

<sup>26</sup>Disponível em: <https://www.lojaotomask.com.br/ Refil-Filtros-Cirurgico--Descartaveis/p> (Acesso em 20/01/2022).

<sup>27</sup>Disponível em: <https://www.lojaotomask.com.br/refil-filtros-tipo-pff2-descartaveis---20-unidades/p> (Acesso em 20/01/2022).

composta por um não-tecido que protege o meio filtrante evitando que as fibras se soltem. É indicado para proteção das vias respiratórias contra poeiras, névoas não oleosas e fumos. Este respirador enquadra-se na categoria PFF2 e, para tanto, deve obedecer, entre outros, os requisitos estabelecidos de acordo com a norma ABNT/NBR 13698 (Equipamentos de Proteção Respiratória – Peça Semifacial Filtrante para Partículas), que são: penetração máxima de partículas através do filtro mecânico de 6%, resistência máxima à respiração para inalação (a 95 litros/min) de 240 Pa e exalação (a 160 litros/min) de 300 Pa.

O produto é testado de acordo com a norma ABNT/NBR 13698 e aprovado pelo Ministério do Trabalho e Emprego (CA 30592 e CA 30594) como peça semifacial filtrante para partículas, classe PFF2, apresentando eficiência de filtração mínima de 94% contra a penetração de aerossóis particulados não oleosos. Este respirador possui certificação Inmetro, que atesta a conformidade com as normas estabelecidas pela Portaria Inmetro N.º 561 DE 23/12/2014.<sup>28</sup>

**Filtro de máscara cirúrgica:** Para este experimento foi utilizada uma máscara cirúrgica de tripla camada em polipropileno. Para este teste não foi especificado o fabricante, pois embora algumas marcas possuam beneficiamentos virucidas e antimicrobianos, a configuração de duas camadas de TNT com uma camada de SMS não varia entre os modelos disponíveis no mercado.

**Filtro da máscara ÊPA:** A máscara ÊPA surgiu pela iniciativa #DESIGNantivírus, um coletivo de designers e profissionais de saúde atuando voluntariamente no combate ao coronavírus através de campanhas de conscientização, tutoriais, prototipagem de produtos emergenciais de proteção, entre outros. O filtro da máscara analisada é composto por duas camadas de TNT (tecido não tecido) e uma de SMS (*spunbond-meltblown-spunbond*). TNT é um material fabricado a partir de uma liga de fibras e um polímero (polipropileno) que são unidos e colados por calor ou pressão. Já o SMS é um tri-tecido laminado, com três mantas de filamentos aleatórios unidos termicamente. Compõe-se de fibras 100% polipropileno de estrutura plana, flexível e porosa. Segundo o manual de divulgação da máscara ÊPA, este material foi desenvolvido pelo coletivo de voluntários da área de design, saúde, engenharia, entre outros, com orientação de profissionais das seguintes instituições: SOS3DCOVID-19 - OLABI - UFRJ - UERJ - PUC RIO - FIRJAN - SEBRAE / CRAB - FIOCRUZ -

---

<sup>28</sup>Disponível em: <https://multimedia.3m.com/mws/media/14094330/technical-bulletin-3m-disposable-respirators-aura.pdf> (Acesso em 20/01/2022).

INMETRO - INT - INPI - HU - HOSP. SOUZA AGUIAR - ESPM-RIO - CMS ERNANI AGRÍCOLA.<sup>29</sup>

**Filtro da máscara PFF2:** A máscara PFF2 (Peça Facial Filtrante com grau de filtração 2) é feita de fibras tecidas com uma carga elétrica que pode prender partículas errantes e comumente recomendada como a mais adequada para uso da população geral. Este modelo é certificado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) com eficiência mínima de filtração de 94%. O modelo utilizado no teste é do fabricante *Descarpack*, e segundo este, é desenvolvido para proteção de profissionais da saúde em procedimentos que haja emissão de partículas ou vapores nocivos. Fabricada em não tecido 100% polipropileno, possui proteção contra o bacilo *Mycobacterium tuberculosis*, possui seis camadas, é não estéril e é aprovada pelo Ministério do Trabalho (C.A.) É considerada tipo N95, uma vez que no Brasil os equipamentos de proteção respiratória equivalentes ao respirador N95 são as peças semifaciais filtrantes PFF2 ou o respirador do tipo peça semifacial com filtro P2, pois ambos apresentam o mesmo nível de proteção apresentado pela máscara N95.<sup>30</sup>

**Filtro da máscara KN95:** O modelo de máscara KN95 é equivalente à máscara PFF2, mas de fabricação e certificação chinesa. No entanto, modelos de diferentes fabricantes desta máscara já apresentaram diferenças em sua composição e nem todos os fabricantes possuem certificação. O modelo analisado neste teste não possui marca especificada.

**Filtro do Respirador para Partículas 3M 8801:** Trata-se do modelo de máscara da marca 3M com eficiência PFF2. Segundo o fabricante, esse respirador está em conformidade com os requisitos das normas técnicas aplicáveis, quais sejam: NBR13698:2011 (Peça Semifacial Filtrante para Partícula), Portaria Inmetro N°561 de 23 dez 2014, de acordo com os laudos de ensaio emitidos pelo Falcão Bauer, em 2018, n° 304485 (ref. Modelo 8801 e 8801 Export), n° 304481 (ref. Modelo 9320+BR), n° 300773 (ref. Modelo 9820+BR) e n° 304493 (ref. Modelo 9923).<sup>31</sup>

---

<sup>29</sup> Disponível em: <https://www.instagram.com/designantivirus/> e <https://www.facebook.com/designantivirus> (Acesso em 20/01/2022).

<sup>30</sup> Disponível em: <https://descarpack.com.br/mascara-pff2-profissional> (Acesso em 20/01/2022).

<sup>31</sup> Disponível em: [https://www.3m.com.br/3M/pt\\_BR/p/d/b10465546](https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/p/d/b10465546) (Acesso em 20/01/2022).

**Filtro constituído por quatro máscaras cirúrgicas sobrepostas:** Como oportunidade de testar o limite de respirabilidade em situações severas, foi feito um teste sobrepondo quatro camadas da máscara cirúrgica.

#### 4.4.4

#### Resultados

O software do analisador de fluxos gera um detalhado relatório com os dados referentes ao fluxo de ar no sistema. Alguns parâmetros fixos foram estabelecidos para este teste, de forma que os dados variantes pudessem ser comparados. Portanto, os dados fixos do BiPAP foram:

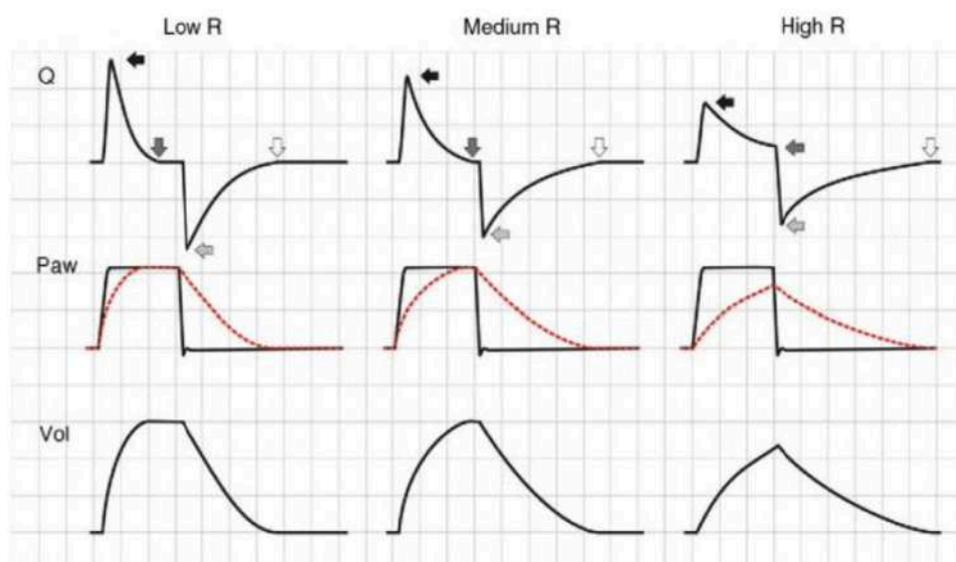
- Pressão de IPAP = 12cm H<sub>2</sub>O e EPAP = 6 cm H<sub>2</sub>O;
- Frequência Respiratória = 12 RPM (respirações por minuto);
- Relação Inspiração:Expiração (I:E) = 1:2. A maioria das pessoas apresenta uma relação I:E de cerca de 1:2 durante a respiração espontânea normal (Powner & Delgado, 2001).

Os termos IPAP (*Inspiratory Positive Airway Pressure* ou Pressão positiva durante a inspiração) e EPAP (*Expiratory Positive Airway Pressure* ou Pressão positiva durante a expiração) referem-se a dois níveis de pressão positiva (P) fornecidos ao paciente para ajudar na respiração. Quando configurado como IPAP=12, significa que, durante a inspiração, o dispositivo fornece uma pressão positiva de 12 cmH<sub>2</sub>O (centímetros de água). Essa pressão ajuda a manter as vias aéreas abertas e facilita a entrada de ar nos pulmões, auxiliando na troca de oxigênio e dióxido de carbono. Da mesma forma, quando configurado como EPAP=6, significa que, durante a expiração, o dispositivo fornece uma pressão positiva de 6 cmH<sub>2</sub>O. Essa pressão ajuda a manter as vias aéreas abertas durante a expiração, prevenindo o colapso das vias aéreas e ajudando na remoção de dióxido de carbono dos pulmões.

A relação (I:E) é uma métrica usada em ventilação mecânica para definir a proporção do tempo gasto na fase de inspiração (entrada de ar nos pulmões) em comparação com a fase de expiração (saída de ar dos pulmões), sendo crucial para ajustar os parâmetros de ventilação de acordo com as necessidades do paciente. No caso da relação 1:2, o tempo de expiração é o dobro do tempo de inspiração. Isso implica que o paciente terá um tempo mais prolongado para expirar em comparação com o tempo para inspirar. Com o BiPAP configurado com uma frequência

respiratória de 12 respirações por minuto (RPM) e uma relação I:E de 1:2, cada ciclo respiratório dura 5 segundos (60 segundos/12 rpm). O tempo de inspiração é de 1.67 segundos (1 parte de 3 no ciclo I:E de 1:2) e o tempo de expiração é de 3.33 segundos (2 partes de 3 no ciclo I:E de 1:2).

O sistema respiratório envolve um sistema de bomba ventilatória que, através dos músculos, gera um diferencial de pressão intra e extra torácica, levando a entrada (inspiração) e saída (expiração) do ar. Algumas das variáveis envolvidas nesse processo e que podem ser representadas graficamente são: pressão (P), fluxo de ar, que pode ser inspiratório ou expiratório (Q) e volume de ar (V), em suas relações com o tempo (T) – pressão x tempo (P x T), fluxo x tempo (Q x T) e volume x tempo (V x T) e entre si – volume x pressão (V x P) e fluxo x volume (Q x V). Quando interpomos uma resistência (R) a passagem do ar, como acontece no uso das máscaras faciais, essas variáveis vão sofrer modificações.



**Figura 4.6** - O efeito do aumento da resistência durante a ventilação na ventilação controlada por pressão. O aumento de R leva a uma redução no pico de fluxo inspiratório (setas pretas) e expiratório (setas cinza claro) enquanto tempo necessário para o fluxo atingir 0 durante a inspiração (setas cinza escuro) e durante a expiração (setas brancas) aumenta. Fonte: Correger E, *et al*, 2012, p.298.

No modelo de pressão positiva (ventilação com BiPAP) em que foram gerados os testes, não há necessidade de gerar pressão negativa para iniciar a fase inspiratória. Em uma representação gráfica (Figura 4.6), podemos verificar as alterações provocadas pelo aumento da resistência (R), lembrando que as pressões inspiratória e expiratória estão fixas. Durante a inspiração, conforme R aumenta, há uma redução do pico de fluxo inspiratório, o tempo inspiratório é prolongado, e a pressão de platô diminui. Caso a resistência seja muito elevada, a pressão alveolar não atinge a pressão

de vias aéreas, causando a diminuição do volume. Na fase expiratória, observamos também uma redução do pico de fluxo expiratório e um tempo expiratório prolongado (Correger E. *et al*, 2012). No gráfico é possível observar também que com o aumento da resistência, ocorre também a diminuição do volume de ar.

Antes dos testes com os filtros, foi feito o primeiro teste, batizado como “teste zero”, em que não foi utilizado nenhum filtro. Ou seja, o fluxo de ar gerado pelo BiPAP foi captado pelo Analisador de fluxos sem barreiras ou interrupções. Este teste foi considerado como “ideal” e, a partir dele, foi feita uma comparação entre este e o resultado de cada filtro, com área permeável de 50 mm de diâmetro e submetidos ao equipamento por cinco minutos.

		RESULTADOS COMPARADOS										
		TESTE ZERO	TESTE 0100	TESTE ALUSIÃO	TESTE ALMA	TESTE CIRURGICA	TESTE CITO CIRURGICA	TESTE ENA				
FLOW	Min. (LPM)	-34.42	-22.15	-25.73	-25.15	-27.15	-25.62	-24.46	-17.51	-21.27	-24.54	-13.57
	Máx. (LPM)	32.17	20.68	24.25	23.95	25.64	24.265	23.28	17.72	20.77	23.68	14.7
	Avg. (LPM)	0.01	0.075	-0.025	0.005	-0.055	0.04	0.085	0.07	0.11	0.08	0.15
AIRWAY PRESSURE	Min. (cmH2O)	5.8	5.8	5.8	5.9	5.9	5.9	5.7	5.98	5.6	5.9	5.8
	Máx. (cmH2O)	12.1	11.7	12	11.9	12.1	12	11.9	11.5	11.7	11.9	10.9
	Avg. (cmH2O)	7.9	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.95	7.8	7.9	7.8
VOLUME	Min. (mL)	-7.2	0.1	-8.8	0.45	-10.4	-2.8	2.5	5.12	4	-1.2	4.3
	Máx. (mL)	279.2	256.8	266.8	268.35	268.9	270.8	267.6	242.3	256.7	267	217.3
	Avg. (mL)	87.3	83.55	82.9	86.8	82.4	86.9	87.6	85.48	86.55	87.55	80.75
BREATH PARAMETERS												
TIDAL VOLUME	mL	273.47	255.53	264.60	266.73	267.33	267.67	266.37	241.52	254.97	265.47	215.83
MINUTE VOLUME	LPM	3.29	3.07	3.19	3.20	3.21	3.20	2.91	3.07	3.20	2.60	
PEAK INSPIRATORY FLOW	LPM	31.24	20.48	23.53	23.50	24.64	24.12	22.35	17.14	19.97	22.89	14.48
PEAK EXPIRATORY FLOW	LPM	33.51	21.85	25.32	24.55	26.54	24.65	23.58	17.05	20.61	23.81	13.04
BASE FLOW	LPM	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
MEAN AIRWAY PRESSURE	cmH2O	7.9	7.8	7.8	7.83	7.90	7.83	7.83	7.9	7.80	7.90	7.90
PEAK INSPIRATORY PRESSURE	cmH2O	12.1	11.7	11.7	11.9	12.07	11.9	11.87	11.5	11.63	11.8	11.8
PEEP	cmH2O	5.9	5.9	5.9	5.9	5.97	5.9	5.9	5.99	5.9	5.9	5.9
INSPIRATORY PAUSE PRESSURE	cmH2O	12	11.5	11.5	11.9	12	11.9	11.8	11.3	11.47	11.73	11.73
MIN. AIRWAY PRESSURE	cmH2O	5.9	5.87	5.87	5.90	6.00	5.90	5.90	6	5.90	5.90	5.90
ASSIST. PRESSURE	cmH2O	0	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
TI - INSPIRATORY TIME	sec	1.59	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	1.62	1.62	1.61	1.61	1.61
TE - EXPIRATORY TIME	sec	3.40	3.38	3.38	3.39	3.38	3.39	3.38	3.35	3.37	3.36	3.36
INSPIRATORY HOLD TIME	sec	0.49	0.02	0.02	0.04	0.15	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
EXPIRATORY HOLD TIME	sec	2.40	1.76	1.76	1.87	1.93	1.87	1.81	1.45	1.64	1.79	1.79
I:E RATIO	1	2.13	2.10	2.10	2.11	2.10	2.11	2.09	2.08	2.09	2.08	2.08
RESPIRATORY RATE	BPM	-12	-12	-12	-12.00	-12.03	-12.00	-12.00	-12.04	-12.03	-12.07	-12.07
COMPLIANCE	mL/cmH2O	47.83	47.33	47.33	45.60	47.47	45.60	46.57	46.23	46.57	47.07	47.07
O2 PERCENT	%	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.8	-9.9	-9.9	-9.9
BAROMETRIC PRESSURE	mmHg	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LOW PRESSURE	Min. (cmH2O)	-0.5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4
	Máx. (cmH2O)	0.3	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
	Avg. (cmH2O)	-0.1	0	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0	0
HIGH PRESSURE	Min. (PSI)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	Máx. (PSI)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Avg. (PSI)	-0.05	-0.05	-0.05	0.06	-0.04	0.06	-0.04	0.05	-0.04	-0.04	-0.04
OXYGEN	Min. (%)	-9.9	-9.8	-9.8	-9.9	-9.9	-9.9	-9.9	-9.8	-9.9	-9.9	-9.9
	Máx. (%)	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8
	Avg. (%)	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8
PRESSÃO	cm H2O	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12
Vte	ml	305	277	289	252	295	286	285	272	285	221	
Vazão	l/min	0.4	0.4	0.3	0.8	0.4	0.3	0.3	0.5	0.7	0.8	0.5
Vent. Min.	l/min	3.7	3.3	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.1	3.3	3.4	2.6
FR:	RPM	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Rdação	I:E	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01
ΔP (PIP - PFlow)	cmH2O	12.1	-0.4	-0.4	-0.2	-0.03	-0.2	-0.23	-0.6	-0.47	-0.3	-0.3
ΔT SUBIDA INSP (Ti - Insp HoldTime)		1.10	1.86	1.59	1.57	1.46	1.57	1.58	1.6	1.59	1.58	1.58
ΔT DESCIDA INSP TE - Exp.HoldTime)		0.99	1.62	1.62	1.51	1.45	1.51	1.57	1.9	1.73	1.57	1.57
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

**Tabela 4.2** - Valores finais comparados entre todos os testes. Fonte: Autor (Versão em alta definição nos Apêndices).

A análise comparativa dos dados coletados (Tabela 4.2) gerou um gráfico para cada parâmetro observado. Para preservar a idoneidade do processo, cada filtro foi

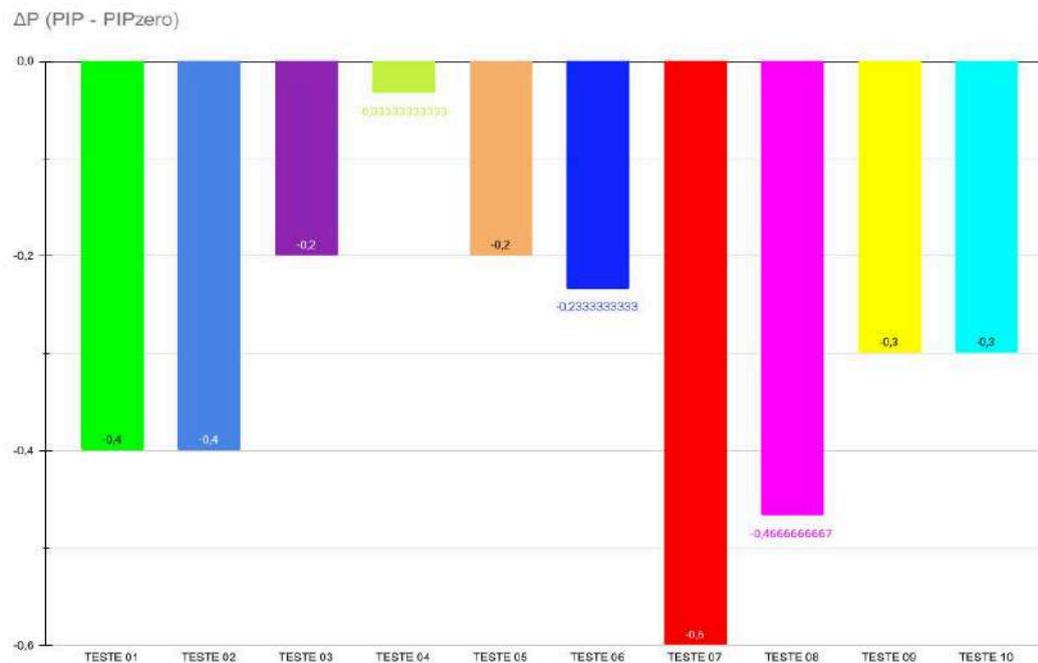
numerado e sua identidade mantida em segredo até a conclusão da análise cega. Os números designados para cada filtro:

- Teste 1 - *OTO PFF2*
- Teste 2 - Algodão
- Teste 3 - *Aura 3M*
- Teste 4 - Máscara cirúrgica
- Teste 5 - *OTO cirúrgica*
- Teste 6 - *ÉPA*
- Teste 7 - KN95
- Teste 8 - PFF2
- Teste 9 - *3M Concha*
- Teste 10 - Máscara cirúrgica (x4)

A observação dos dados coletados demonstra os parâmetros que variaram de acordo com o filtro verificado e os parâmetros que permaneceram estáveis, independente dos filtros. A conclusão acerca deste acontecimento se dá pelas configurações fixadas no equipamento ou parâmetros que não são afetados pela resistência dos filtros. Os valores que permaneceram estáveis, ou tiveram mudanças sutis, dentro da tolerância do equipamento, foram: *Mean Airway Pressure, Peak Inspiratory Pressure, Peep, Min. Airway Pressure, Assist. Pressure, TI - Inspiratory time, TE - Expiratory time, High Pressure, I:E ratio, Respiratory Rate, Compliance, O2 Percent, Low Pressure, High Pressure, Oxygen, Pressão, FR e Relação*. Portanto, para o experimento, como estes dados não foram relevantes, não haverá aprofundamento em cada um deles.

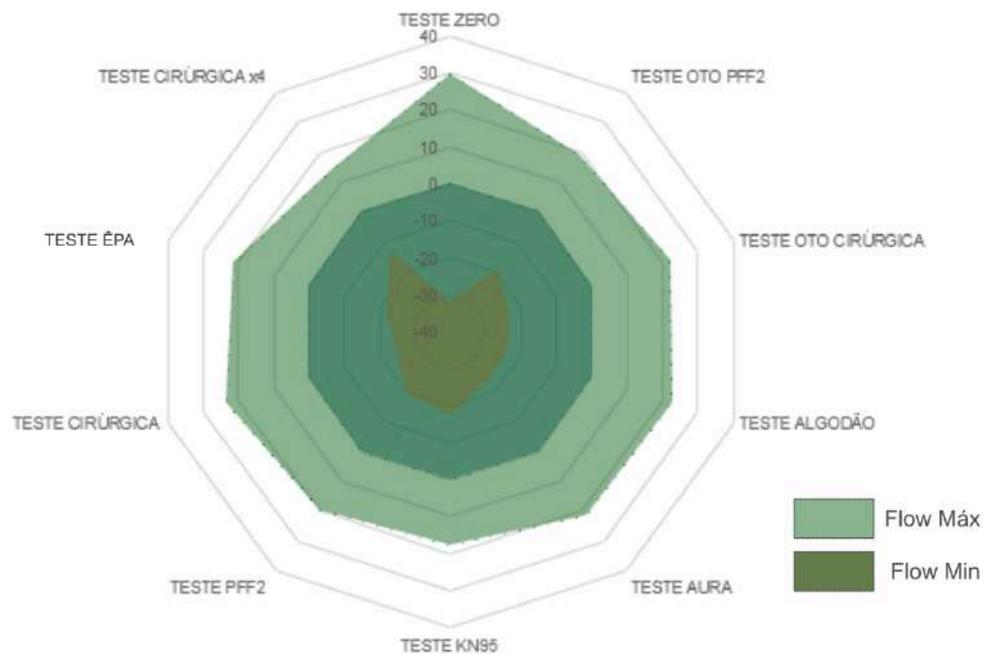
Os dados que foram considerados são os relacionados à respirabilidade, que pode ser definida pela facilidade com que a respiração ocorre através da máscara. Normalmente, é medida pelo diferencial de pressão Delta-P (também chamado de queda de pressão ou delta de pressão) entre os dois lados da máscara, à medida que o ar flui através dele a uma taxa semelhante à da respiração, podendo ser testada a uma taxa de fluxo específica aplicada perpendicularmente ao plano do material testado (Kwong, 2021).

Este valor se dá pela diferença entre a pressão de pico atingida na máscara testada menos a pressão de pico no teste zero. A queda de pressão está relacionada à respirabilidade, ou seja, ao conforto ao respirar no uso da máscara. Um Delta-P negativo se traduz em respirabilidade reduzida. O  $\Delta P$  (Figura 4.7) é expresso em mm H<sub>2</sub>O ou Pascal/cm<sup>3</sup>.



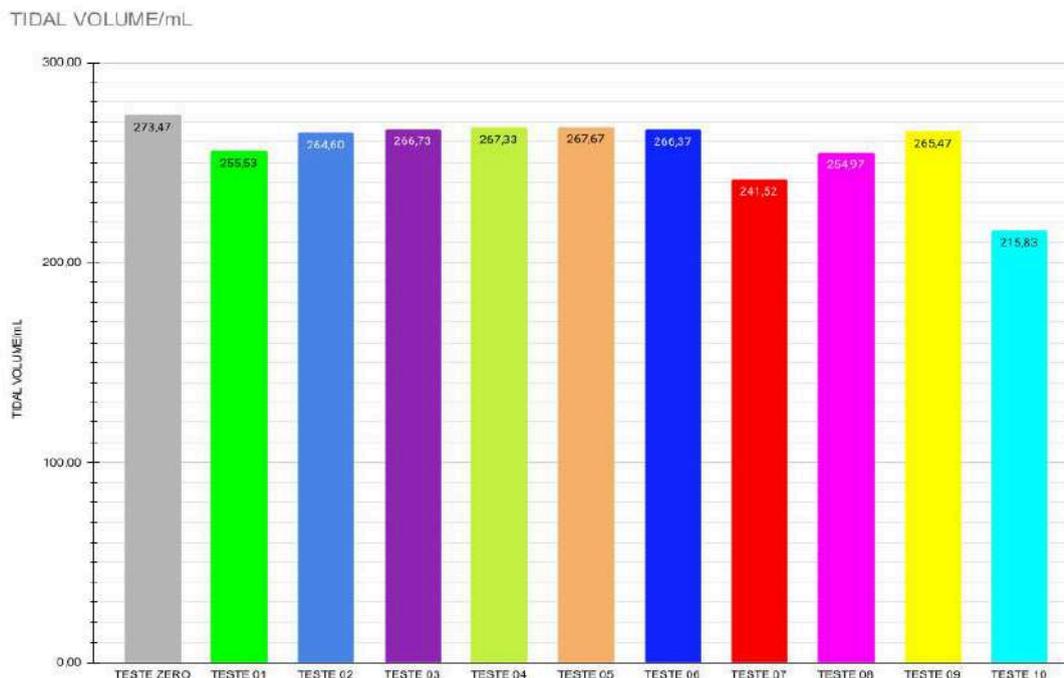
**Figura 4.7** - Quanto mais negativo o valor, pior é a respirabilidade. No gráfico de  $\Delta P$ , o teste 4 (máscara cirúrgica) foi o que apresentou o valor mais próximo de zero. Fonte: Autor.

O gráfico a seguir (Figura 4.8) demonstra os valores de fluxo ( $Q$ ) observados. O fluxo de ar é a taxa à qual o ar é fornecido ao paciente, medido em litros por minuto (L/min). Quanto maior o valor, maior o movimento de ar pelo filtro e mais ele se aproxima da situação ideal do teste zero.



**Figura 4.8** - No teste de *flow* (fluxo) o valor do “teste zero” alcançou os valores de 32,17 e -34,42 LPM respectivamente. O filtro que mais se aproximou destes valores foi o teste 4 (máscara cirúrgica) com valores de 25,64 e -27,15 respectivamente. Fonte: Autor.

No gráfico de volume mobilizado (volume corrente - Figura 4.9) é possível observar a correlação de quanto menor o fluxo, menor será o volume, o que se relaciona diretamente ao conforto/desconforto ventilatório pela máscara, já que todos temos um volume de ar mínimo necessário para uma respiração confortável.



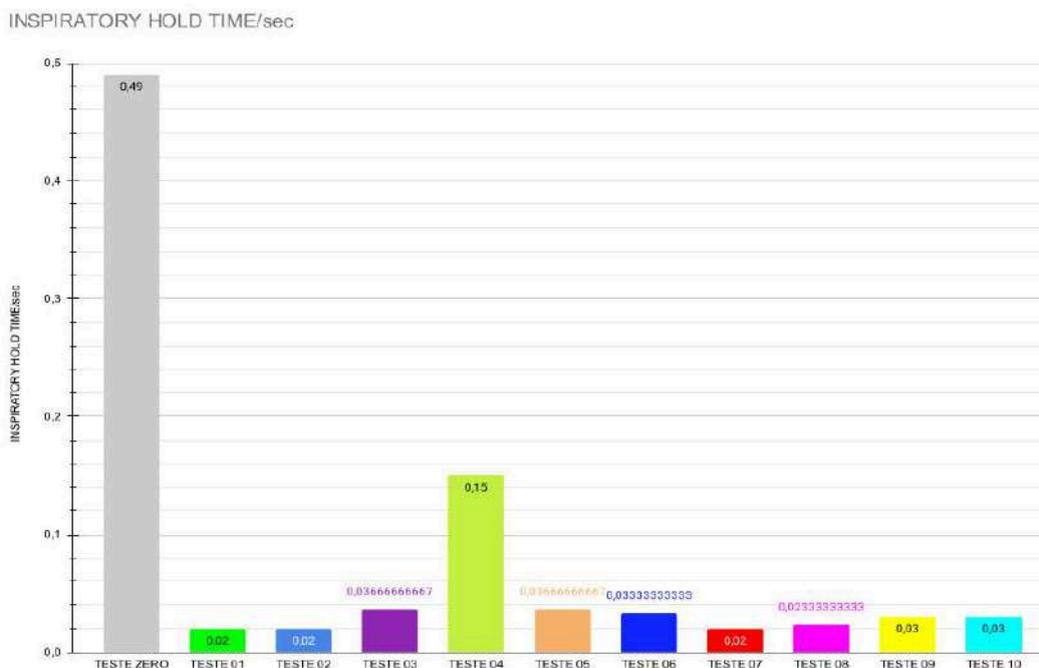
**Figura 4.9** - No teste *Tidal Volume* (volume corrente), os testes que mais se aproximaram foram novamente 4-cirúrgica e 5-Oto cirúrgica com 267,33mL e 267,67mL respectivamente. Fonte: Autor.

Os gráficos de Tempo de Pausa Inspiratória (Figuras 4.10 e 4.11) indicam um dado relevante. O tempo inspiratório total equivale ao tempo de subida inspiratório somado ao tempo de pausa inspiratória. Já o Tempo expiratório total equivale ao tempo de descida expiratória somado ao tempo de pausa expiratória. Ou seja:

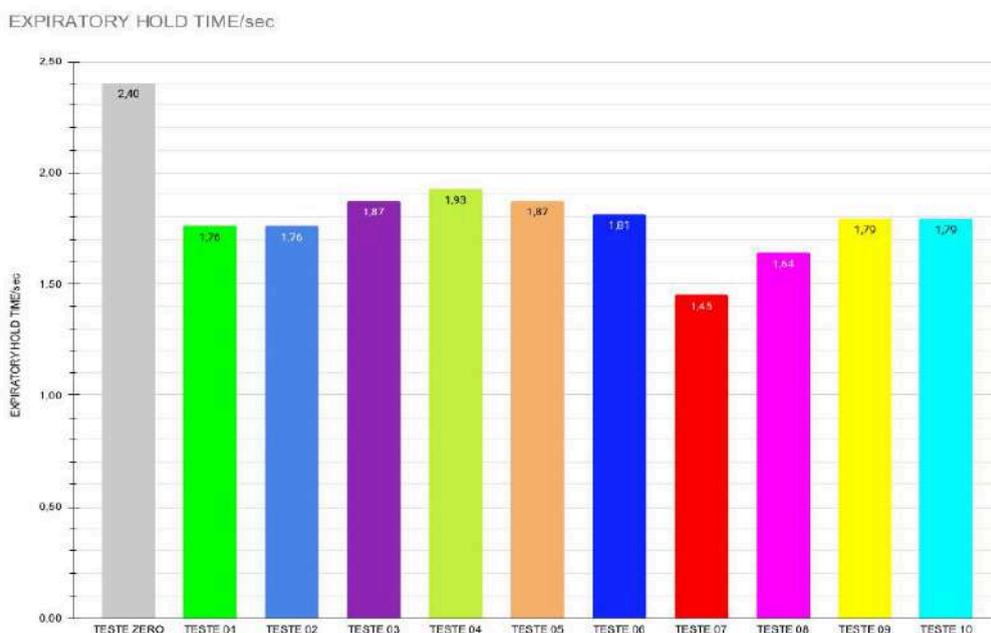
$$TI \text{ total} = TI \text{ subida} + TI \text{ pausa}$$

$$TE \text{ total} = TE \text{ descida} + TE \text{ pausa.}$$

Os tempos de subida e descida equivalem ao tempo em que há passagem ativa de ar no sistema até que os valores fixados sejam atingidos. Já os tempos de pausa indicam o tempo em que o sistema suspende essa ativação, logo que os valores são alcançados. Sendo assim, como o TI total e o TE total estão fixos (TI = 1.67 segundos e TE = 3.33 segundos), quanto menor o tempo de subida/descida (devido a menor resistência e, conseqüentemente, maior fluxo) maior o tempo de pausa, o que significa melhor respirabilidade.

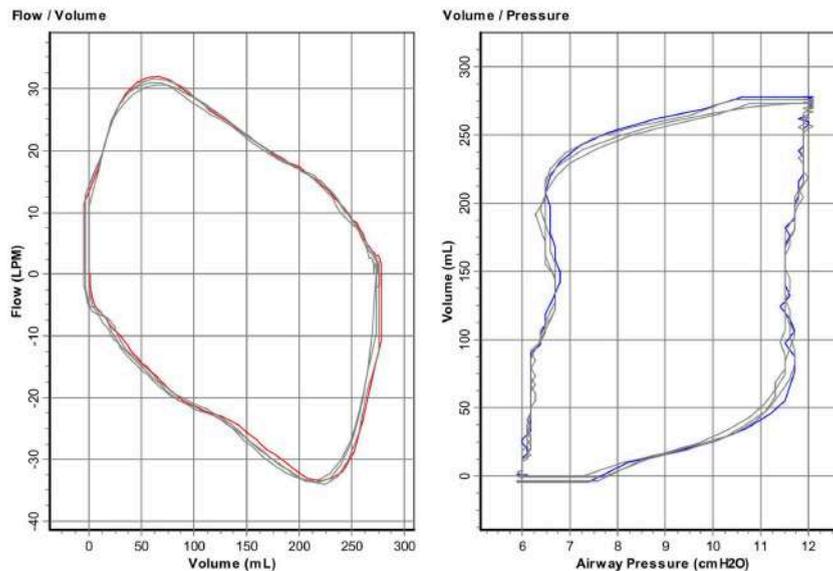


**Figura 4.10** - No gráfico *Inspiratory Hold Time* (Tempo de pausa inspiratória), o teste 4 foi o que mais se aproximou do teste “zero” (0,49 seg) com valor de 0,15 seg. Fonte: Autor.



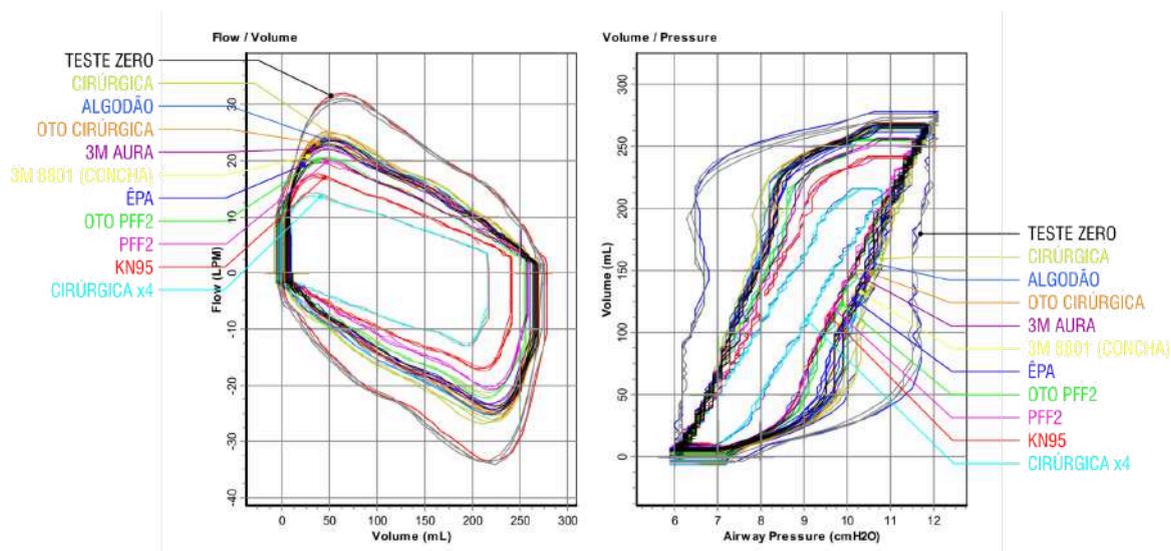
**Figura 4.11** - Dentro os filtros, no gráfico *Expiratory Hold Time* (Tempo de pausa expiratória), o teste 4-cirúrgica (1,93 seg.) se aproximou mais do teste zero (2,40 seg.). Fonte: Autor.

Os seguintes gráficos (Figuras 4.12 e 4.13) relacionam o fluxo (*flow*) com o volume ( $Q \times V$ ) e o volume com a pressão ( $V \times P$ ) de cada filtro analisado. Primeiramente, foi gerado a partir do “teste zero” como referência (Figura 4.12).



**Figura 4.12** - Gráfico gerado sem filtro, ou seja, o “teste zero”. QxV à esquerda e VxP à direita. Fonte: Autor.

A seguir, os gráficos gerados por cada filtro foram sobrepostos a este (Figura 4.13). Quanto maior a respirabilidade do filtro, mais as linhas se aproximaram das curvas do “teste zero”.



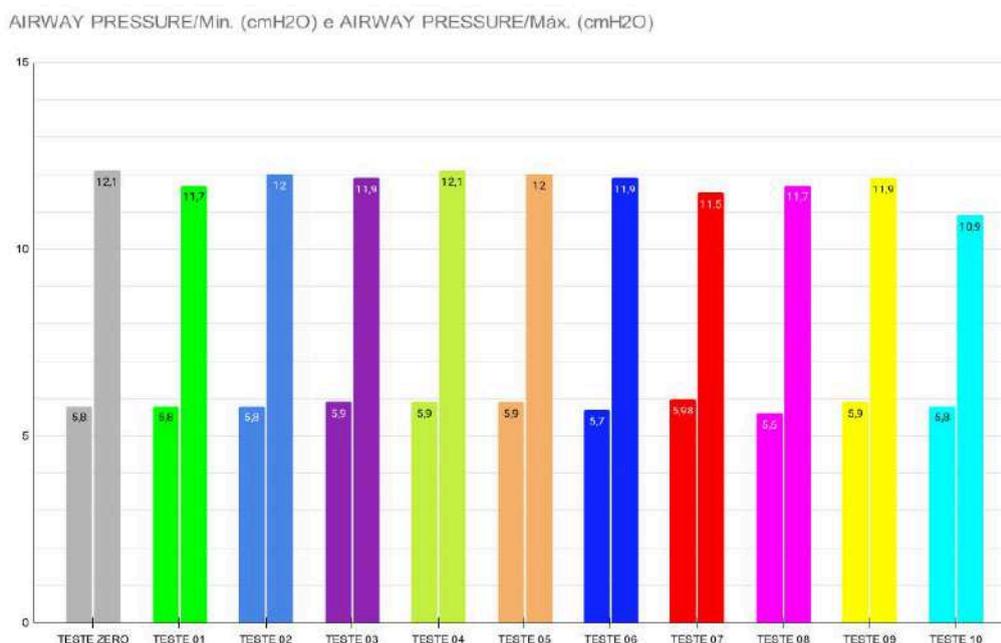
**Figura 4.13** - Com as linhas sobrepostas, é possível ver que o filtro 4-cirúrgica mais se aproximou das linhas do “teste zero”, enquanto o teste 10-cirúrgica x4 teve suas linhas mais afastadas. Fonte: Autor.

Os gráficos de variáveis compostas ( $Q \times V$  e  $V \times P$  - Figura 4.13) são interessantes para entendermos a dinâmica do sistema respiratório, conforme se aumenta a resistência imposta. No gráfico  $Q \times V$ , onde as duas variáveis são livres, podemos observar que quanto maior o pico de fluxo, maior o volume atingido

(representado pela área interna do gráfico) e assim podemos considerar que quanto maior o fluxo, maior a respirabilidade.

No gráfico V x P, observamos que quanto menor o volume atingido, menor a pressão sobre o sistema respiratório. Como as variáveis de pressão (IPAP= 12 / EPAP = 6), assim como os tempos inspiratórios e expiratórios (TI= 1.67 / TE= 3.33) estão fixos no testes, essas só se modificam pois a queda da taxa de fluxo de ar (litros/segundo ou L/s), não permite que dê tempo de pressurizar o sistema até atingir a IPAP de 12 cmH<sub>2</sub>O.

O gráfico a seguir (Figura 4.14) comprova que as variáveis pressão só têm variação quando a resistência é muito aumentada. *Airway Pressure Min.* e *Max* indicam IPAP e EPAP, respectivamente. Embora o aparelho se esforce para chegar aos valores fixados, não dá tempo de pressurizar o sistema, visto que os tempos de inspiração e expiração estão fixos, assim como a pressão. No caso, o EPAP é menos impactado por se tratar de um componente passivo, ou seja, a expiração é motivada pelo relaxamento dos músculos do tórax ou, no caso, o relaxamento do fole e da tração das molas do pulmão de teste.



**Figura 4.14** - É possível observar que o teste zero busca os valores estabelecidos de IPAP= 12 e EPAP= 6. A maior variação ocorre no teste 10, que possui a maior resistência. Fonte: Autor.

A conclusão deste experimento é bastante clara no apontamento do filtro mais respirável, assim como o menos respirável. Conforme previsto em hipótese, o filtro que se revelou menos respirável, ou seja, o que apresentou maior resistência na

passagem de ar, foi o filtro com **quatro camadas de máscara cirúrgica**. Os gráficos desenhados demonstraram de forma clara.

O filtro que apresentou maior respirabilidade foi o de **máscara cirúrgica única**. Este resultado também já era esperado, conforme conclusões tiradas a partir da inspeção visual do material. Esta apuração preliminar oferece confiança para o prosseguimento da investigação formal dos novos modelos de máscara a serem projetados, pois o filtro a partir da máscara cirúrgica é também o mais acessível e barato dentre os filtros apurados que são eficazes em sua função.

## 4.5

### A máscara cirúrgica como elemento filtrante

A eficácia da máscara está indissociavelmente relacionada ao seu tecido filtrante. Como a pesquisa é direcionada à busca de alternativas acessíveis e seguras para proteção individual, a máscara cirúrgica de tripla camada em Polipropileno (PP), sendo duas camadas de tecido não tecido (TNT) e uma camada de tecido SMS (*Spunbonded, Meltblown e Spunbonded*) foi eleita como um material respirável confiável, de baixo custo e vasta distribuição adequado ao trabalho. A camada em tecido *Meltblown* possui uma carga eletrostática que atua como principal filtro, tanto nas máscaras cirúrgicas, como na máscaras N95 (Sureka *et al.*, 2020).

A questão presente na máscara cirúrgica, no entanto, é que sua proteção é apenas unidirecional. Seu objetivo não é proteger o usuário, mas as pessoas em sua volta (Sureka *et al.*, 2020). Como se trata de um tecido preso por elásticos por trás das orelhas ou da cabeça, é comum que espaços sejam criados entre a máscara e o rosto. A máscara cirúrgica, portanto, funciona como uma barreira de filtração para o ar exalado pela respiração e fala da pessoa que a usa, mas suas bordas maleáveis facilitam o escape de ar não filtrado na inspiração. É importante ressaltar também que o desempenho de filtração do material da máscara cirúrgica não é equivalente ao de uma máscara N95, que mantém uma eficiência de captura de partículas maior que 95% num largo espectro de tamanho de partículas (0,01-10  $\mu\text{m}$ ) (Runde *et al.*, 2021).

O motivo para seu uso como elemento filtrante neste trabalho foi, portanto, sua eficácia com potencial de melhoramentos, seu baixo custo em relação às máscaras N95 ou PFF2, maior disponibilidade no mercado e maior respirabilidade, conforme demonstrado no experimento do item 4.4. Máscaras cirúrgicas são uma alternativa mais econômica para proteção contra doenças respiratórias em comparação com as

máscaras N95 (Sekhar *et al.*, 2022; Dugdale & Walensky, 2020). Embora não possua o nível de filtração da N95, as máscaras cirúrgicas padrão possuem uma eficiência mínima de filtração bacteriana e de filtração de partículas submicrônicas maior ou igual a 0,1  $\mu\text{m}$  superior a 95%. É importante notar que mesmo os filtros com mau desempenho em testes controlados demonstraram uma eficiência próxima dos 100% para partículas que se aproximam de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro, o que cobre a gama de 5 a 10  $\mu\text{m}$ , que são o tamanho dos aerossóis respiratórios amplamente considerados como sendo a via primária de transmissão da *SARS-CoV-2* (Runde *et al.*, 2021). No Brasil, como já foram registradas ocorrências de operações de falsificação de máscaras de proteção individual, segundo reportagem da CNN Brasil<sup>32</sup>, é imprescindível que a máscara cirúrgica possua certificação conforme a norma técnica brasileira, a ABNT NBR 15052. O atendimento a esta norma é o que garante ao tecido Eficiência de Filtração Bacteriológica (BFE) superior a 95% e Eficiência da Filtragem de Partículas (PFE) superior a 98%.

Sendo assim, a busca por uma solução que contemple vedação total entre a máscara e a pele da face se tornou absolutamente necessária, de forma que o ar não escape sem filtração, seja na inspiração ou na expiração (Pan *et al.*, 2021). A simples utilização de fita adesiva para selar as bordas resultou em um aumento da eficiência de máscaras cirúrgicas comuns (Gierthmuehlen *et al.*, 2020). Karuppasamy *et al.* (2021) também realizaram testes com modificações na máscara cirúrgica, utilizando fitas para selá-la ao rosto. Os resultados apresentaram uma enorme redução de vazamento de aerossóis, o que torna este modelo uma opção viável em uma situação de escassez de N95.

## 4.6

### Teste de vedação e ajuste

Para o estudo de vedação das máscaras, foi utilizado na pesquisa um teste que permitisse a visualização dos pontos de escape de ar não filtrado. Com esse propósito, uma máquina de fumaça foi adaptada à cabeça ISO médio, de maneira que a fumaça sob pressão fosse expelida pela boca do manequim. Antes da impressão, o modelo virtual foi trabalhado no software de modelagem para a incorporação de um tubo

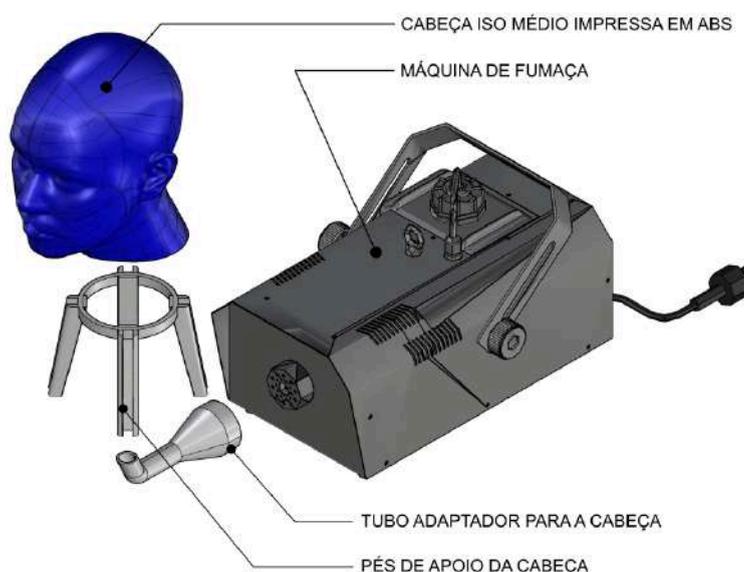
---

<sup>32</sup>Máscaras N95 falsificadas são vendidas 'livremente'; saiba como identificar. CNN, São Paulo. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/mascaras-n95-falsificadas-sao-vendidas-livremente-saiba-como-identificar/> (Acesso em 20/01/2022).

interno que fosse da boca até a base do pescoço. O rosto do modelo foi coberto por uma camada de silicone, com o objetivo de suavizar a rigidez do plástico e simular a textura da pele humana.

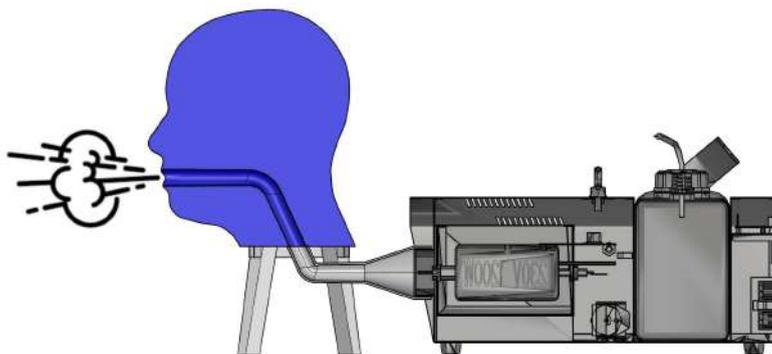
A montagem do experimento (Figura 4.15) utilizou uma máquina de fumaça para festas, que é um dispositivo utilizado para criar efeitos visuais dramáticos em eventos e shows. O funcionamento básico da máquina de fumaça envolve a vaporização de um fluido especial para produzir uma névoa densa, que é composta de água desmineralizada, aromatizantes e álcoois polifuncionais. A máquina possui uma bomba que, quando acionada, empurra o fluido de fumaça do reservatório para uma resistência interna, que se transforma em vapor atóxico e é expelido através do bico de saída da máquina, criando a fumaça.

Um tubo adaptador foi modelado e impresso para canalizar a fumaça da máquina para o interior da cabeça, que foi preparada com o duto de 20 milímetros de diâmetro que liga a base do pescoço até a boca. Foi impressa também uma base com pés de apoio para a cabeça, mantendo-a firme no conjunto.



**Figura 4.15** – Esquema explodido da montagem do teste de vedação. Fonte: Autor.

O acionamento da máquina expulsa o vapor pela boca do manequim, fazendo com que parte da fumaça atravesse o filtro (Figura 4.16). Porém, como a velocidade de saída da fumaça é maior que a capacidade da mídia, parte da fumaça escapa pelas bordas da máscara, tornando qualquer ponto de fuga visível. Como os vazamentos ocorrem justamente nas áreas mais vulneráveis da vedação com o rosto, fica claro para os pesquisadores os pontos precisos de correção da geometria da máscara (Figura 4.17).



**Figura 4.16** – Corte demonstrando o acionamento da máquina de fumaça, expulsando o vapor canalizado da máquina até a boca do manequim. Fonte: Autor.

Estudos enfatizam a importância do ajuste adequado da máscara na prevenção de vazamentos de ar, destacando a relevância das habilidades para garantir um bom ajuste durante a ventilação com máscara para evitar vazamentos através da interface máscara-face (Han *et al.*, 2021). Isto sublinha o papel crítico deste tipo de teste na identificação e abordagem de potenciais pontos de fuga que podem comprometer a função de proteção das máscaras respiratórias. Os procedimentos de teste de ajuste, incluindo soprar ar com força pela boca para verificar se há fugas, são cruciais para garantir a eficácia das máscaras respiratórias na prevenção da exposição a contaminantes transportados pelo ar (Han *et al.*, 2021). As modificações ao ajuste da máscara, como a utilização de suportes de máscara, podem afetar o fator de ajuste geral e a integridade da vedação, sublinhando a importância do ajuste adequado para uma proteção ideal (Blachere *et al.*, 2021).



**Figura 4.17** – Cabeça ISO médio adaptada à máquina de fumaça para verificação de vazamentos (esquerda). Os pontos de maior vulnerabilidade foram observados por este processo (direita). Fonte: Autor.

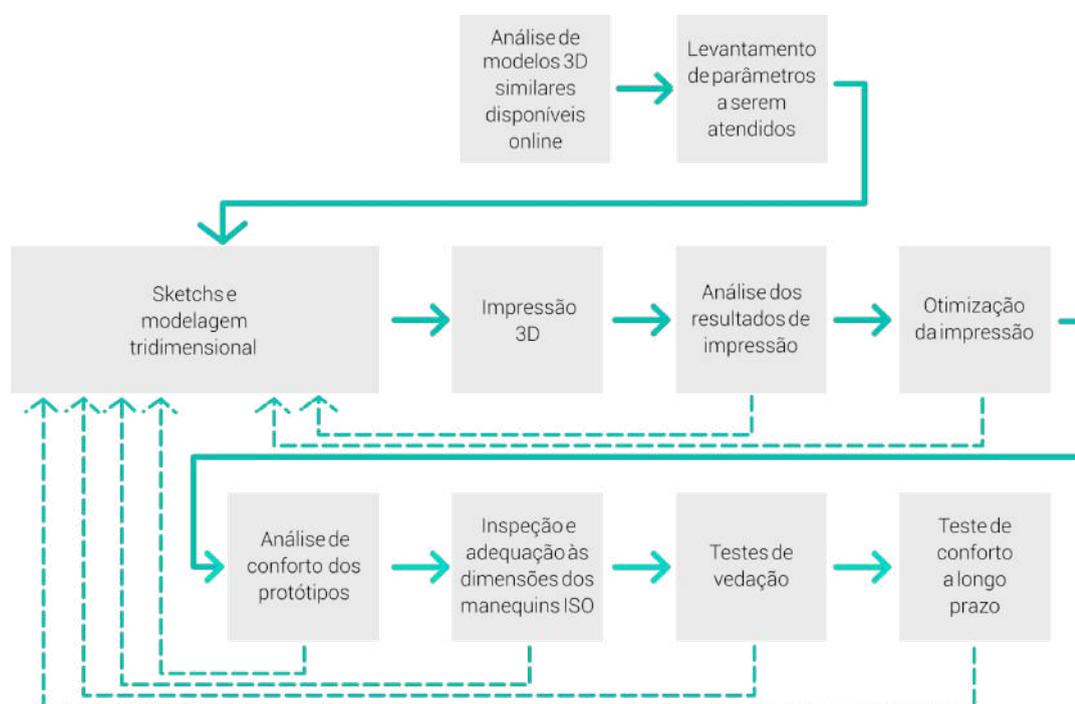
Dessa forma, o teste de vedação, combinado com a revisão bibliográfica que atesta a filtração da máscara cirúrgica (item 4.5) e os testes de respirabilidade de filtros (item 4.4), constituíram as ações desenvolvidas para alcançar os parâmetros da

investigação listados no item 4.3.

## 4.7

### Geração de alternativas e prototipagem

As etapas e procedimentos específicos utilizados para realização do trabalho estão sistematizados em um esquema visual apresentado na Figura 4.18. Os procedimentos consistiram em: análise de modelos 3D similares disponíveis online; levantamento de parâmetros a serem atendidos; *sketchs* e modelagem tridimensional; impressão 3D; análise de encaixes e montagem das partes; otimização da impressão; análise de conforto; inspeção e adequação aos manequins com as dimensões ISO; testes de vedação; teste de conforto a longo prazo.



**Figura 4.18** - Esquema visual das etapas e procedimentos utilizados para realização do trabalho.  
Fonte: Autor.

Ao longo da realização dos procedimentos adotados para o desenvolvimento dos modelos e da busca por aprimoramentos dos resultados obtidos, os pesquisadores retornaram inúmeras vezes a determinadas etapas e procedimentos, como geração de *sketchs*, modelagem tridimensional, impressão 3D e otimização da impressão 3D. Estes constantes retornos às etapas precedentes estão sinalizados no esquema visual da Figura 4.18.

Após a impressão de um modelo, este era submetido à análise da equipe. Caso a impressão fosse bem sucedida, o objeto avançava para a próxima etapa. Em caso de

verificação da necessidade de aprimoramentos, o modelo virtual era revisitado no software, corrigido e impresso novamente, até que os problemas verificados fossem solucionados. O trabalho de sucessivas melhorias ficou documentado pelos próprios modelos físicos impressos. A seguir, estão descritas as etapas e os procedimentos para o desenvolvimento do trabalho:

**Análise de modelos 3D similares disponíveis online:** Conforme mencionado, a pesquisa surgiu como um desdobramento da iniciativa do DAD da PUC-Rio (item 1.4), conforme descrito por Santos *et al.* (2020). Nesta iniciativa emergencial, a equipe teve acesso a diversos modelos disponibilizados online em plataformas de compartilhamento de modelos para impressão, que auxiliaram no entendimento do estado da arte da produção de EPI. Alguns dos modelos disponíveis já tinham, na época, sido avaliados em estudos especializados disponíveis na literatura, contendo informações sobre suas falhas e virtudes evidenciadas.

**Levantamento de parâmetros a serem atendidos:** Esta etapa correspondeu à pesquisa e levantamento de parâmetros necessários às máscaras de proteção individual, conforme descrito no item 4.3 - Parâmetros de Investigação.

**Sketchs e modelagem tridimensional:** Após a verificação dos parâmetros necessários foram geradas e debatidas ideias. As soluções eram desenhadas, discutidas e modeladas tridimensionalmente. Ao longo do desenvolvimento das diversas alternativas e versões, a equipe retornou a esta etapa inúmeras vezes, buscando o aprimoramento de ideias, que eram novamente desenhadas e modeladas no software.

**Impressão 3D:** Os modelos digitais elaborados eram exportados ao formato .STL, que é apropriado para impressão. Esse modelo exportado é “fatiado”, ou seja, é submetido ao software que irá listar todas as características de impressão, como a altura das camadas, tempo de impressão, velocidade, temperatura do processo, entre outros. O código gerado é transferido para as impressoras e o objeto é fabricado. Conforme supracitado no item 2.2, os modelos foram impressos por meio das tecnologias de Fabricação por Filamento Fundido (FDM), Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e por Estereolitografia (SLA).

**Análise dos resultados de impressão (dimensões, encaixes e montagem das partes):** Nesta etapa, as peças impressas eram submetidas à avaliação da equipe para que fosse possível verificar os resultados de impressão obtidos e elencar as necessidades e possibilidades de aprimoramento. Quando a peça obtida não atendia aos objetivos esperados pela equipe, como quanto às dimensões para encaixes e

montagem, retornava à fase de *sketch* e modelagem para correção. Em caso de reincidência, as irregularidades apontadas eram corrigidas para uma nova bateria de avaliações. Nessa fase, a metodologia RtD é veementemente observada, visto o uso da criatividade do designer e sua ação projetual direta atuando para resolução dos problemas verificados.

**Otimização da impressão:** A partir do momento em que a impressão era declarada como satisfatória, seus parâmetros eram verificados buscando a otimização. Esta otimização consistia em alterações, como no posicionamento da peça sobre a mesa de impressão ou correção de ângulos da peça.

**Análise de conforto dos protótipos:** Após impressos, os modelos eram verificados no rosto dos próprios pesquisadores. Isso ilustra um dos grandes benefícios do uso da manufatura aditiva. As peças impressas em 3D podem ser fabricadas e passar por determinadas avaliações iniciais, de modo rápido. Após essa avaliação por diferentes pessoas com formatos de rosto variados, o objeto passava para a próxima fase ou retornava às etapas anteriores.

**Inspeção e adequação às dimensões dos manequins ISO:** Nesta etapa, os modelos aprimorados foram submetidos à análise por meio da utilização dos manequins ISO impressos. Considerando que os manequins possuem dimensões que representam diferentes percentis da população, é essencial que a forma e o material aplicados na máscara forneçam a flexibilidade suficiente para atender, de modo efetivo, a todos os formatos. Para isso, os modelos impressos foram colocados em cada cabeça e foram realizadas inspeções visuais em busca de frestas que permitissem escape de ar.

**Testes de vedação:** Nesta etapa, o modelo foi submetido ao teste de vedação, por meio de máquina de fumaça, descrito no item 4.6.

**Teste de conforto a longo prazo:** Como último teste formal, foram impressas unidades dos modelos que chegaram até essa fase e distribuídas para a equipe para serem utilizadas em períodos mais longos. Visto que a máscara ainda é experimental, foi utilizada somente para verificar a percepção de conforto, no tempo livre de cada um, no ambiente em que estavam isolados, sempre que não representasse riscos à própria saúde. Após o uso contínuo, mais observações eram feitas sobre a vedação, conforto ao respirar, ancoragem dos elásticos e uso geral da máscara. Quando as observações eram avaliadas como pertinentes pela equipe, as modificações e ajustes finos sugeridos eram realizados.

A seguir, são apresentadas as cinco alternativas e versões desenvolvidas, bem como são descritos detalhes sobre os aprimoramentos e questionamentos resultantes dos principais modelos elaborados.

#### 4.7.1

##### Principais alternativas e versões

Após extensa experimentação formal, cinco alternativas de máscaras foram estabelecidas durante este trabalho, com diferentes formatos e preceitos, explorando diferentes formas de acomodação no rosto. Diferente do projeto do *face shield*, que teve um desenvolvimento linear, a pesquisa sobre máscaras desenvolveu-se mais complexa, pela quantidade de variáveis e modelos desenvolvidos. Por isso, foi organizado um sistema que buscou catalogar os modelos gerados ao longo do trabalho. A partir dos cinco primeiros modelos considerados mais relevantes, que foram batizados como **Alternativas**, surgiram suas **Versões**, desenvolvidas por refinamentos sucessivos. As alternativas e suas versões foram categorizadas de acordo com o formato da concha ou seu encaixe para acomodação do filtro. A regra para criação de cada alternativa variou de acordo com sua característica única mais notável.

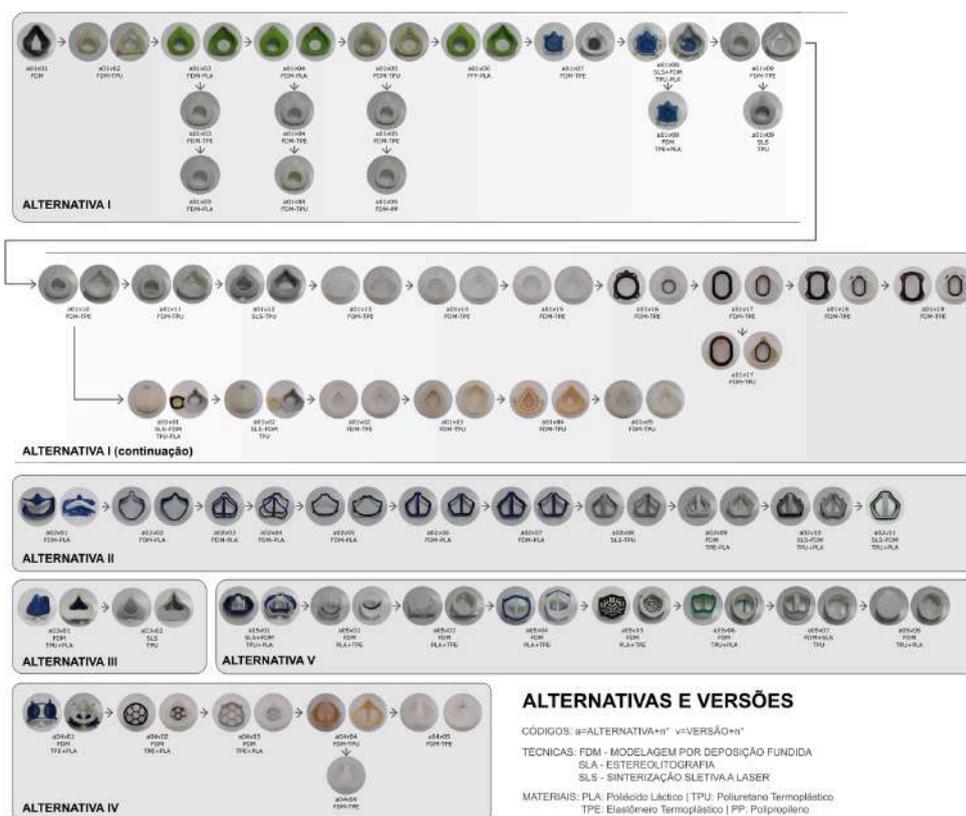
A Figura 4.19 apresenta o mapeamento das cinco alternativas de soluções e os aprimoramentos elaborados em cada uma. Os modelos são apresentados com o prefixo “A”, que identifica a Alternativa, seguido pelo seu número e o número da Versão “V”. O esquema visual apresenta as fotos da parte exterior da máscara ao lado da foto do interior de cada modelo, com o código identificador do modelo abaixo das fotos. Os modelos apresentados na vertical correspondem a uma mesma versão, porém impressa em uma técnica ou material diferente.

A Alternativa I foi fundamentada no formato triangular da concha, presente em diversos respiradores semifaciais disponíveis no mercado. A parte superior apoia-se acima do dorso do nariz, quase entre os olhos, na região conhecida como *násio*<sup>33</sup> e a parte inferior apoia-se acima do queixo logo abaixo dos lábios inferiores. Ao longo do seu desenvolvimento, uma vertente derivada foi criada, trabalhando a hipótese de uma máscara que possui dupla filtragem da respiração.

A Alternativa II baseia-se na montagem da máscara com o filtro, focada na simplificação do encaixe entre suas duas partes.

---

<sup>33</sup> Násio é o ponto anatômico no crânio onde se encontram a sutura frontonasal e a sutura internasal, ou o ponto mais profundo do rosto entre as sobrancelhas, logo acima da ponte do nariz.



**Figura 4.19** – Alternativas e suas versões desenvolvidas. Fonte: Autor (versão em alta resolução em Apêndices).

A Alternativa III também explora o formato triangular da concha, porém experimenta o aumento das abas de contato com a pele, aprimorando a hipótese de criar uma maior área de contato como forma de aumentar a vedação.

A Alternativa IV explora diferentes formatos de filtro, indo de formas ovais a triangulares para o tecido filtrante.

A Alternativa V desenvolve a possibilidade de um formato circular de concha, explorando novos moldes e tocando o rosto em diferentes pontos, em comparação com a Alternativa I.

Dentre as alternativas e versões elaboradas, foi realizado o recorte das Alternativas I e II para discussão neste trabalho. Os motivos que levaram à seleção destas alternativas para detalhamento da sua evolução consistem no volume de informações que o seu desenvolvimento proporcionou à pesquisa ao longo da produção de suas inúmeras versões, bem como a problemática que desencadeou o desenvolvimento das soluções. A Alternativa I explora o uso exclusivo da impressão FDM no seu projeto e fabricação, otimizando sua forma para essa tecnologia, já a Alternativa II propõe o uso mais desimpedido das tecnologias disponíveis no laboratório, e ambas concluem o desenvolvimento, chegando a um resultado final.

É importante ressaltar que o desenvolvimento dos diversos modelos não foi um processo linear. Várias formas, ideias, obtenção de dados, correções e discussões ocorreram simultaneamente, de forma circular e retroalimentada, de modo que a nomenclatura das Alternativas não significa a sua ordem de execução. Embora possa parecer incomum, o primeiro modelo a ser explanado será o desenvolvido na Alternativa II, seguido do modelo fruto da Alternativa I. Essa escolha foi feita porque, além da Alternativa II ter sido, de fato, realizada anteriormente à Alternativa I, muitas decisões acerca da Alternativa I foram tomadas devido ao aprendizado reunido pela Alternativa II.

## 4.8

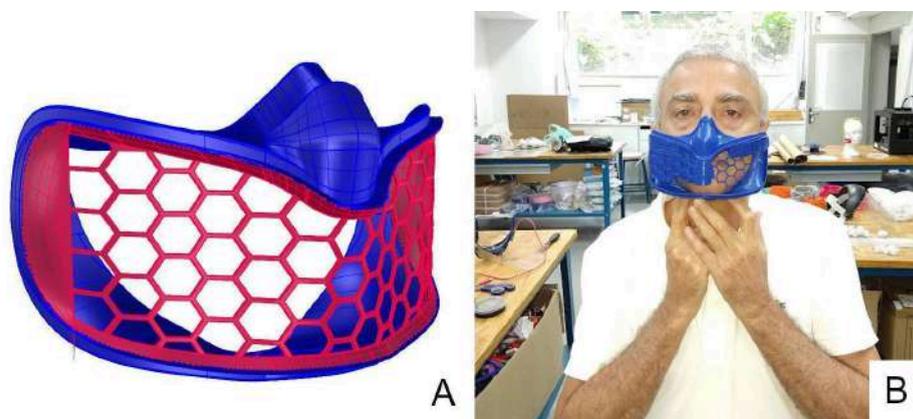
### Desenvolvimento da Alternativa II (Máscara A02V11)

O resultado da família de versões da Alternativa II é um dos modelos que a equipe considerou satisfatório para posterior envio ao processo de testagem. No trabalho também estão descritos, de modo mais detalhado, os modelos A02V01, A02V02, A02V03, A02V08, A02V10, A01V12 e A4V01.

#### 4.8.1

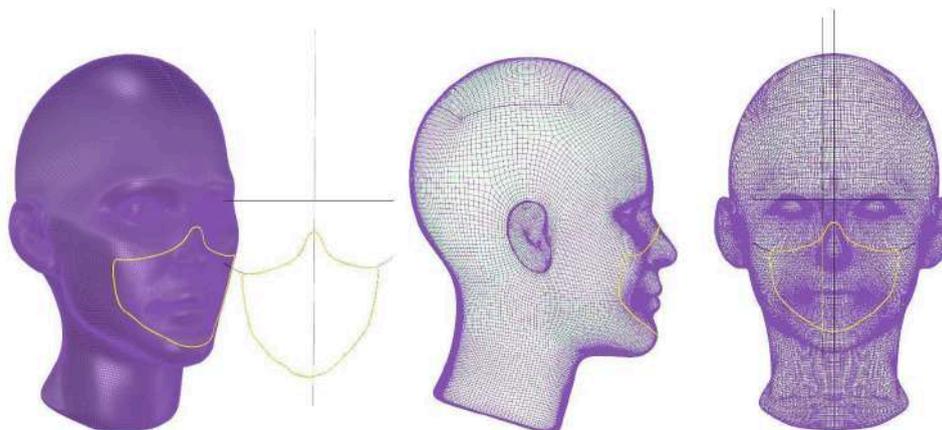
##### Modelo A02V01

O modelo A02V01 (Figura 4.20) trata-se de uma máscara composta por duas peças. Este primeiro modelo cumpriu o papel fundamental de treinamento, demonstrando os ângulos da peça que devem ser respeitados, o funcionamento das impressoras e as ferramentas dos programas utilizados.



**Figura 4.20** – (A) Modelagem da versão A02V01 no software *Rhinoceros*; (B) Impressão e verificação de medidas. Fonte: Autor.

Por se tratar da primeira máscara elaborada, neste modelo foram ensaiadas as técnicas de obtenção das linhas do rosto, modelagem virtual no software *Rhinoceros* (Figura 4.21), espessuras mínimas de impressão, potencialidades e limitações das impressoras de Fabricação por Filamento Fundido (FDM). Para obtenção da topografia do rosto, foi utilizado um manequim virtual genérico, obtido em repositórios online de modelos 3D. O processo envolve desenhar as linhas da máscara em um plano para posteriormente serem projetadas na face do modelo (Figura 4.21). Embora os manequins ISO ainda não estivessem sendo utilizados, as curvas do modelo genérico foram obtidas com sucesso, e a partir destas linhas, que correspondem fielmente ao relevo do rosto, a máscara foi modelada. Por se tratar de um modelo inicial, muitas vulnerabilidades foram observadas, como a desnecessária complexidade formal da grade e espessuras de parede demasiadamente finas, comprometendo a integridade estrutural do objeto. Seu atributo mais relevante, no entanto, já estava presente, que era a configuração da máscara em duas partes (Figura 4.20a, em azul e vermelho) que deveriam se encaixar para acomodação do filtro. Esta característica seguiu ao longo de suas versões, norteando sua evolução.



**Figura 4.21** – Linhas planificadas no contorno geral da máscara projetadas no manequim genérico. Fonte: Autor.

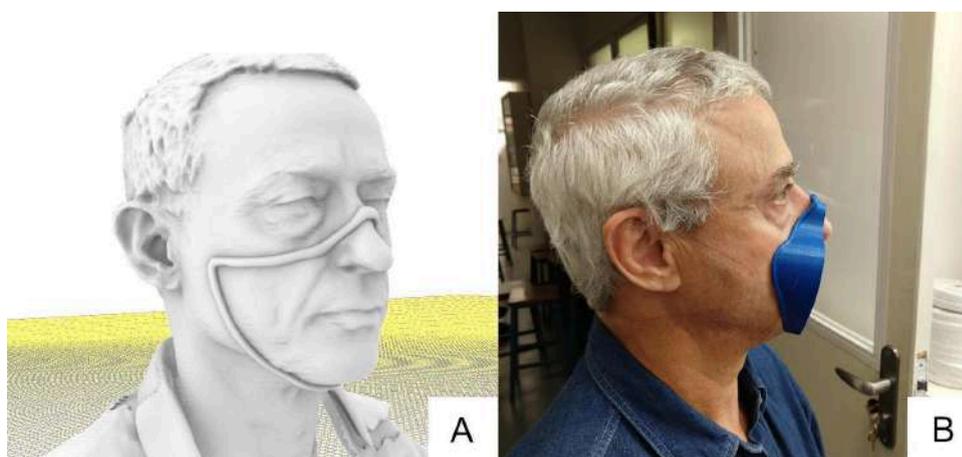
#### **4.8.2**

##### **Modelo A02V02**

O modelo A02V02 foi projetado a partir de um rosto real. O rosto de cada membro da equipe foi escaneado, e o arquivo gerado que resultou em um modelo de melhor qualidade foi selecionado. As malhas foram obtidas, como já mencionado, por meio do *scanner* de luz estruturada *Artec EVA* e processadas no software *Artec Studio*

3D. A Figura 4.22a representa o modelo 3D obtido por escaneamento com as linhas externas da máscara elaboradas pelo processo supracitado de projeção de linhas.

O modelo impresso (Figura 4.22b), ainda que não tivesse a preocupação de fechamento da concha, necessária para configuração da máscara, foi essencial para a confirmação da possibilidade de uma máscara feita sob medida a partir do objeto virtual derivado diretamente do rosto do usuário, pois as linhas modeladas baseadas no modelo escaneado concordaram com o rosto do voluntário. Apesar do resultado promissor obtido por meio deste modelo para a fabricação de máscaras personalizadas, neste momento foram introduzidos os modelos antropométricos impressos em 3D, apresentados no item 2.3, que seguem as dimensões da norma ISO. Esta escolha permitiu que os modelos produzidos estivessem adequados a uma parcela mais abrangente da população.



**Figura 4.22** – (A) Modelo 3D obtido por escaneamento e linhas externas da máscara modeladas a partir do mesmo processo de projeção de linhas; (B) Impressão do protótipo em PLA e teste no rosto. Fonte: Autor.

Outra lição percebida na prática com este modelo, o A02V02, foi a relevância da maleabilidade da concha, que faz contato com a pele do rosto. A máscara precisa ser flexível o suficiente para se adequar às diferentes expressões e movimentações típicas do rosto, pois o usuário da máscara não ficará imóvel durante todo o uso. A face possui diversos músculos que se movimentam de acordo com nossas expressões e falas. A mandíbula se movimenta continuamente durante a locução. Apesar de não ter sido o propósito original, este modelo (A02V02), que foi impresso experimentalmente em PLA rígido, sacramentou a importância deste requisito, ao ser observado e manipulado por meio da prototipagem.

### 4.8.3

#### Modelo A02V03

O modelo A02V03, apesar da simplicidade formal, foi o primeiro desenvolvido visando a configuração de união entre duas peças para fixação de tecido filtrante. As duas armações que compõem essa solução (Figura 4.23), uma menor que a outra, acomodam entre si o tecido. Apesar de não ter resultado em um sistema de encaixe aceitável, a estratégia de solução desse modelo e sua forma geral foram aproveitadas em soluções posteriores.



**Figura 4.23** – Modelo A02V03 impresso por FFF em PLA. Fonte: Autor.

Por meio deste modelo, a equipe observou a necessidade de utilizar a flexibilidade da impressão para obter um encaixe justo. A impressão das duas peças neste protótipo foi feita em PLA rígido e demonstrou que este material não iria satisfazer o requisito de um encaixe hermético, de modo que a peça “Concha” deveria ser fabricada em material flexível e a peça “Aro” em material rígido. Então, a maleabilidade da peça Concha irá possibilitar, de maneira simplificada, um encaixe preciso para fixação do tecido filtrante, sem escape de ar. A figura 4.24 exibe os modelos A02V01, A02V02 e A02V03 impressos pela técnica de FDM em PLA.



**Figura 4.24** - Modelos A02V01 e A02V02 e A02V03. Fonte: Autor.

#### 4.8.4

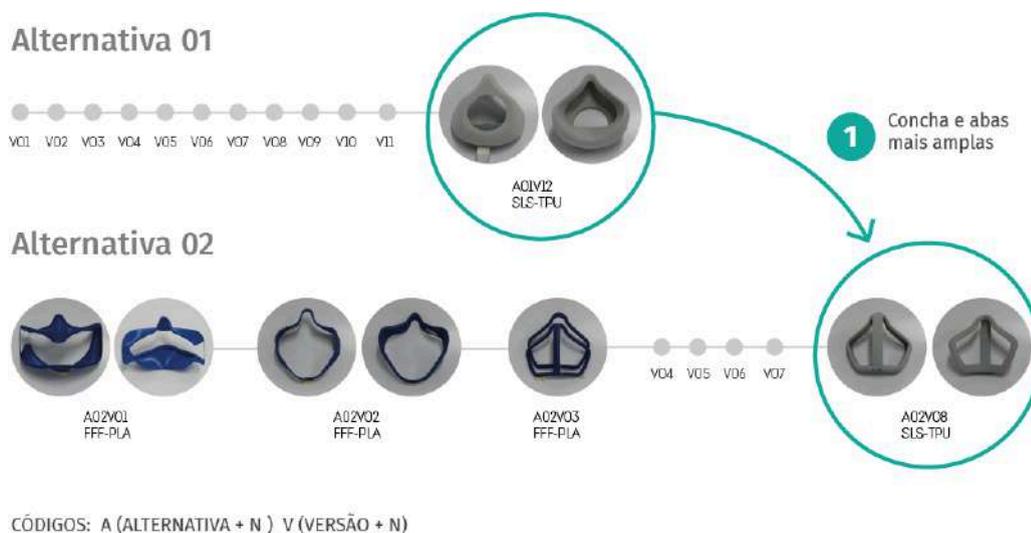
##### Modelo A02V08

O modelo A02V08 (Figura 4.25) consiste em uma evolução formal do modelo A02V03. As demais versões entre esses dois modelos (versões 04, 05, 06 e 07) representaram aprimoramentos gradativos para obtenção de um encaixe capaz de fixar, com precisão, o tecido filtrante entre as duas estruturas. Em paralelo a isso, a concha sofreu evoluções na forma e no material de impressão, com ênfase em obter flexibilidade.



**Figura 4.25** – Modelo A02V08 com sistema de suportes de elásticos em amarelo. Fonte: Autor.

Como característica nova, foi acrescentado ao aro (peça em azul da Figura 4.25) um sistema de suportes de elásticos (destacados em amarelo), utilizados para fixar a máscara ao rosto. Foram modelados três âncoras de cada lado para que fossem testados diferentes posicionamentos do elástico, buscando o conforto do usuário.

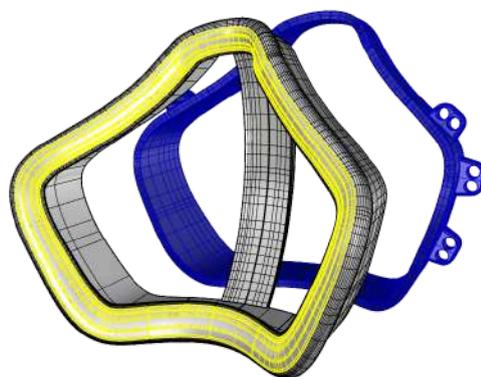


**Figura 4.26** – Influência advinda da Alternativa 01 aplicada ao modelo A02V08 Fonte: Autor.

Outros aperfeiçoamentos aplicados ao modelo A02V08 consistem em aprimoramentos da concha e das abas, de modo que a máscara contemple maior superfície de contato com o rosto dos usuários. A ampliação da concha e das abas foi inspirada também na modelagem desenvolvida para o modelo A01V12 (Figura 4.26). O modelo A01V12 foi desenvolvido com uma concha em diferente formato, contendo abas mais curvadas ao rosto e maior área de material em contato com a pele, melhorando assim sua vedação.

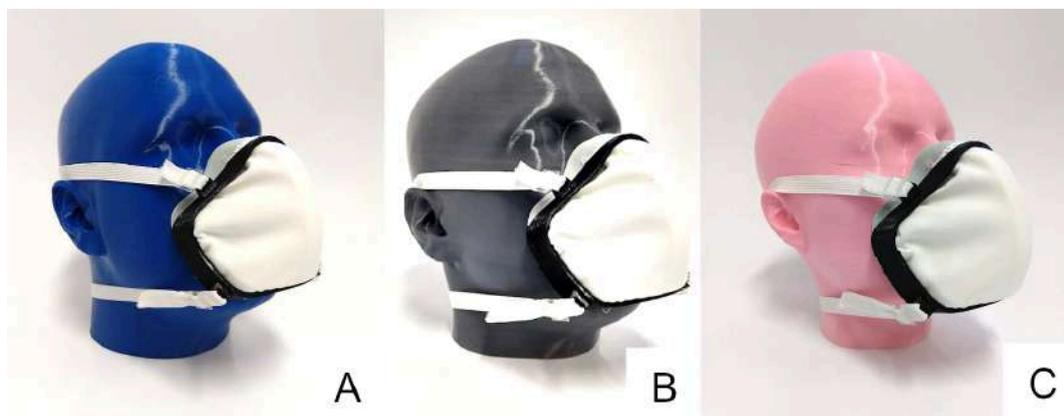
Outro ponto marcante foi a impressão deste modelo por SLS em material flexível. A peça foi produzida na impressora *Sinterit Lisa PRO*, que foi disponibilizada quando o projeto já estava em andamento. A utilização deste equipamento possibilitou à equipe produzir peças flexíveis, com formas de maior complexidade. Como já explicado, a impressão por meio desta técnica dispensa o uso de suportes para sustentação da peça durante a impressão, o que permite essa produção de peças com maior resistência e complexidade formal.

Os aprimoramentos desenvolvidos neste modelo (A02V08), bem como a técnica de impressão e os materiais utilizados, possibilitaram o aperfeiçoamento do sistema de fixação do elemento filtrante. A relação das duas peças, a concha flexível e o aro externo rígido, representaram um avanço no sistema de fixação da máscara cirúrgica entre as peças. No entanto, o encaixe entre as partes ainda demonstrou fragilidade, pois a superfície de contato sem encaixe hermético não conferia o travamento necessário. A solução para este aperfeiçoamento está descrita a seguir, junto a descrição do modelo A02V10. Além disso, a aba do modelo A02V08, destacada em amarelo na Figura 4.27, que fica em contato com a pele e cobre o nariz, queixo e bochechas, ainda não proporcionava a acomodação hermética necessária para a vedação entre a pele do rosto e a máscara em diferentes rostos.



**Figura 4.27** – Modelo A02V08 com a aba em contato com a pele destacada em amarelo. Fonte: Autor.

O modelo A02V08 foi desenvolvido a partir dos manequins ISO. A cabeça selecionada para essa tarefa foi a ISO médio e foi utilizada em todos os modelos subsequentes. Para a modelagem em software, o uso do modelo virtual da cabeça ISO, utilizando o mesmo processo já descrito no modelo A02V01, proporcionou linhas precisas.



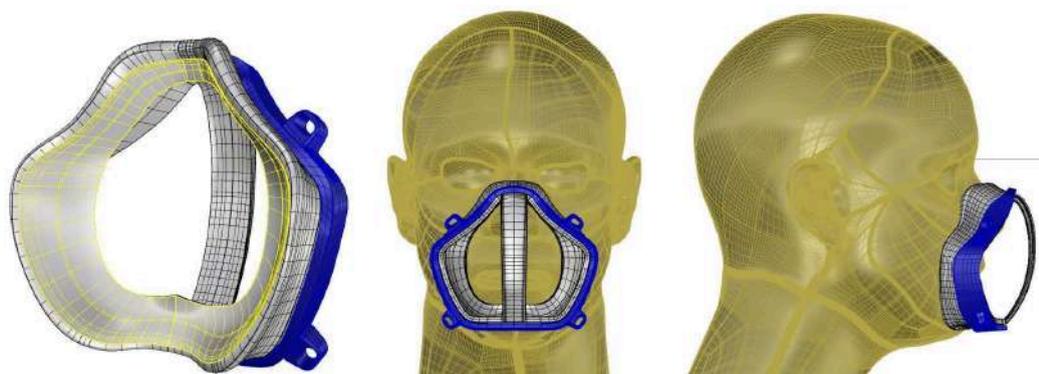
**Figura 4.28** – Exame visual de encaixe nas cabeças de diferentes tamanhos: (A) ISO grande; (B) ISO longo estreito; (C) ISO pequeno. Fonte: Autor.

O primeiro protótipo impresso deste modelo (A02V08) pode logo ser avaliado qualitativamente nos diversos outros tamanhos de cabeça. Os modelos de máscaras impressos foram testados nos modelos antropométricos, possibilitando a análise visual do encaixe (Figura 4.28). Apesar dos protótipos serem modelados a partir do ISO médio, sua adequação aos outros tamanhos de manequins foi considerada satisfatória.

#### 4.8.5

##### Modelo A02V10

Os aprimoramentos necessários verificados por meio do modelo A02V08 ocasionaram o desenvolvimento dos modelos A02V09 e A02V10 (Figura 4.29).



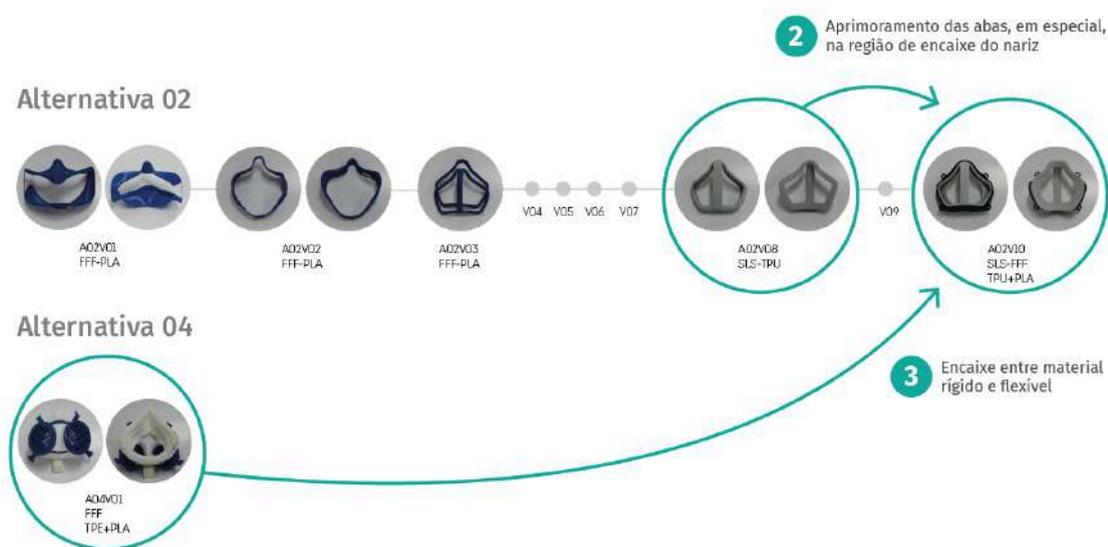
**Figura 4.29** – Modelo digital antropométrico ISO utilizando o Modelo A02V10 com abas mais generosas destacadas em amarelo. Fonte: Autor.

O modelo A02V10 apresenta uma união de aprimoramentos advindos dos modelos A02V08, e A04V01. O avanço advindo do modelo A02V08 consiste em um aprimoramento no desenho das abas, em especial, na região de encaixe do nariz. A Figura 4.30 apresenta os modelos A02V08 e A02V10 impressos.



**Figura 4.30** – Modelos impressos V08 e V010. Na impressão das conchas pode ser observada a diferença de tamanho entre as abas da concha. Fonte: Autor.

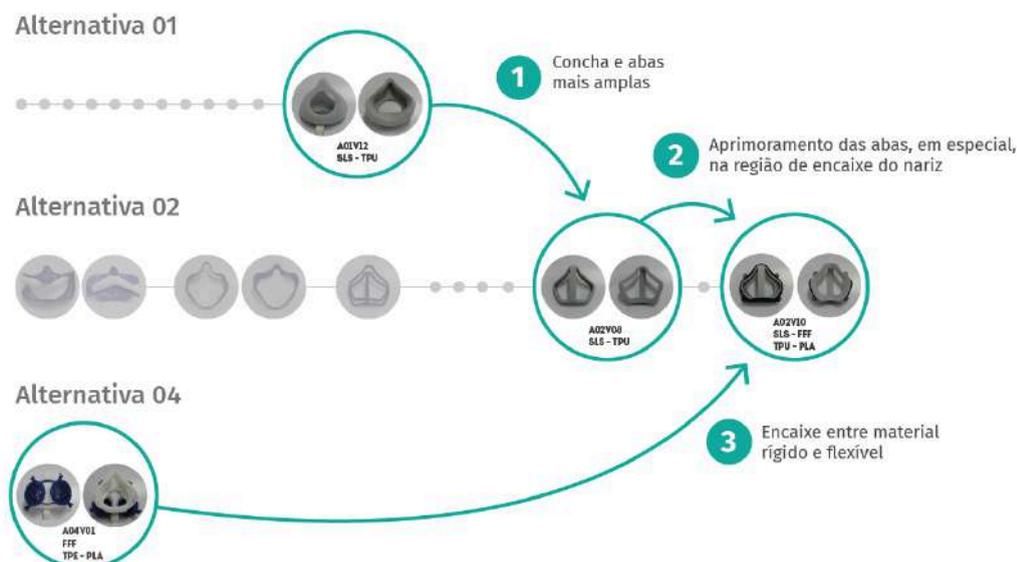
A máscara A04V01 também foi essencial para que a equipe conseguisse validar a possibilidade de produzir um equipamento com encaixe hermético unindo dois materiais com comportamentos diversos quanto a sua flexibilidade. Este conhecimento advindo do modelo A04V01 foi aplicado ao modelo A02V10, resultando na precisão de encaixe entre as peças da máscara. A Figura 4.31 exhibe os aprimoramentos supracitados, aplicados ao modelo A02V10, obtidos a partir dos modelos A02V08 e A04V01.



**Figura 4.31** - Aprimoramentos aplicados ao modelo A02V10. Fonte: Autor.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, as informações adquiridas em cada família de alternativas começaram a se mesclar, visto que as cinco alternativas e seus

desdobramentos foram desenvolvidos relativamente ao mesmo tempo durante a exploração. A Figura 4.32 apresenta um esquema visual resumido contendo as principais influências entre as linhas de alternativas neste ponto da pesquisa, considerando as soluções técnicas estudadas e aplicadas durante o projeto.



**Figura 4.32** – Principais influências entre alternativas e versões: (1) Observação do benefício de concha e abas mais amplas; (2) Aprimoramentos das abas, em especial na região do nariz; (3) Encaixe entre material rígido e flexível. Fonte: Autor.

#### 4.8.6

##### Modelo A02V11

Finalmente, a solução A02V11 (Figura 4.33) concentra todos os atributos assimilados ao longo do processo de pesquisa.



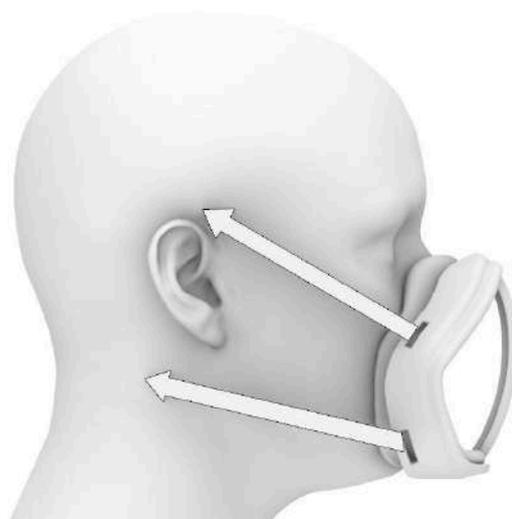
**Figura 4.33** – Modelo A02V11 - concha impressa por SLS em *FlexaBright* (cinza) e aro impresso por FDM em ABS (preto). Fonte: Autor.

Após diversos testes, o sistema de suportes de elásticos que fixam a máscara ao rosto, exibidos na Figura 4.34, foram descontinuados.



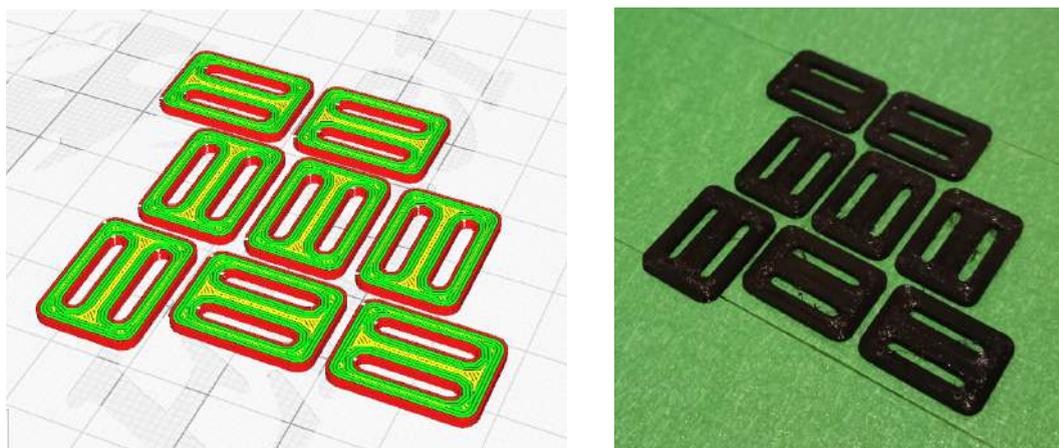
**Figura 4.34** – Alguns estudos do sistema de suportes de elásticos. Fonte: Autor.

O local utilizado para a ancoragem foi preservado, mas substituído por um furo retangular no aro (Figura 4.35). Esta solução facilita a impressão em FDM, pois reduz a necessidade de suportes e a quantidade de material necessário, diminuindo o tempo de impressão.



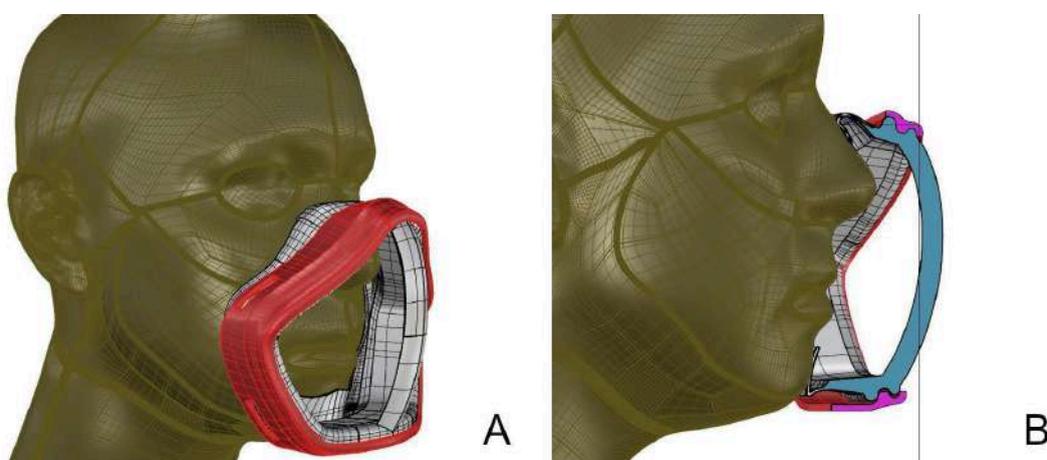
**Figura 4.35** – Vetores que demonstram a previsão dos elásticos para fixação no rosto, ancorados por furos retangulares. Fonte: Autor.

A recomendação para fixação da máscara no rosto é que seja feita com elásticos chatos de qualidade, com 10 milímetros de largura, que devem ser presos por fivelas ajustáveis simples, modeladas com 1,5 milímetros de espessura, que podem ser também impressas por FDM (Figura 4.36). Esse tipo de elástico, utilizado principalmente para costura, é um produto acessível e facilmente encontrado em lojas especializadas em rolos de até 100 metros.



**Figura 4.36** – Visualização no fatiador (esquerda) e impressão das fivelas para o elástico (direita).  
Fonte: Autor.

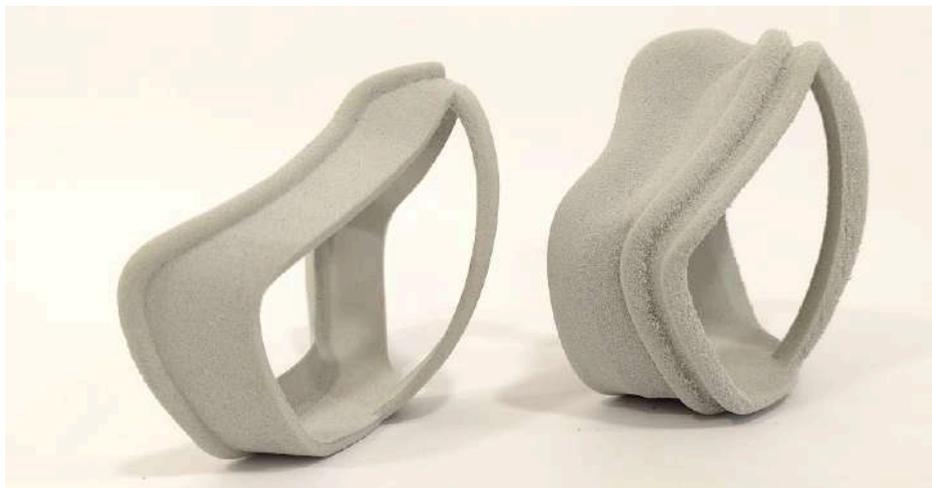
Outra modificação consiste no sistema para fixação do elemento filtrante (a máscara cirúrgica). Um encaixe capaz de prender o tecido com precisão e prevenir o escape de ar foi modelado (Figura 4.37). As abas de contato com o rosto também foram aprimoradas precisamente por meio de evoluções na modelagem. O desenho final de sua aba possibilitou que os usuários pudessem abrir a boca com conforto, sem que a máscara saísse da posição no rosto.



**Figura 4.37** – Modelo A02V11 no software *Rhinceros* em perspectiva (A) e em corte (B). No corte é possível observar as reentrâncias do encaixe no aro em rosa e na concha flexível em azul. O filtro fica posicionado entre essas duas cores. Fonte: Autor.

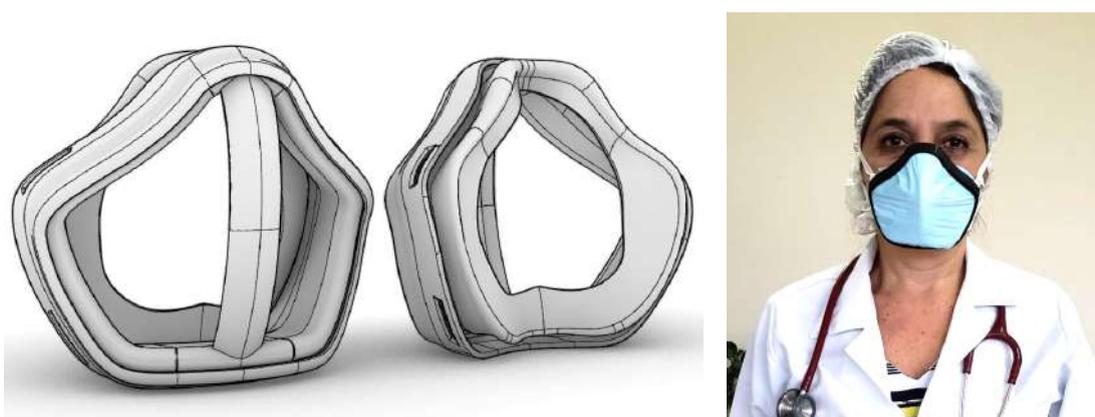
A Figura 4.37b representa um corte transversal no centro da máscara indicando a relação de encaixe entre as duas peças: a cor azul destaca o corte na concha e a cor rosa, o corte no aro. Note que a reentrância modelada garante um encaixe hermético e prende o tecido filtrante entre as duas partes. O formato e as dimensões dos elementos do modelo que proporcionam o encaixe da máscara cirúrgica foram projetados considerando o tamanho típico desta, com uma margem de erro ampla. Então, a pessoa

que será a futura usuária, poderá substituir somente a máscara cirúrgica que tiver acoplado ao produto e, quando necessário, poderá esterilizar e reutilizar as partes do equipamento desenvolvidas pela equipe. A Figura 4.38 exibe os modelos A02V08 e A02V11 impressos, demonstrando a diferença entre os dois modelos após as atualizações.



**Figura 4.38** - Modelos A02V08 e A02V11 em perfil. Pode-se notar a diferença entre as bordas lisas do modelo 08 e das bordas com reentrâncias do modelo 11. Fonte: Autor.

O modelo final ficou com a determinação da concha ser impressa por SLS em TPU flexível e o aro impresso por FDM em ABS. Como pós-processamento, a área da concha que fica em contato com o rosto foi tratada com uma demão de cola de silicone, diminuindo o atrito do material TPU com o rosto e trazendo maior conforto ao usuário. A figura 4.39 demonstra a máscara modelada nas vistas frontal e traseira.



**Figura 4.39** - Modelo A02V11 no software *Rhinoceros*, nas vistas frontal e traseira (esquerda) e sendo utilizada pela voluntária (direita). Fonte: Autor.

#### 4.8.7

### Resultados

Ao longo deste trabalho, foram apresentados e detalhados os modelos que contém soluções técnicas e aperfeiçoamentos que foram mais relevantes para a obtenção de um modelo de máscara que obedecesse aos parâmetros estabelecidos na fase inicial da pesquisa. Os parâmetros foram: máscara com estrutura reutilizável, capaz de aproveitar como elemento filtrante um elemento acessível e de baixo custo.

### Principais evoluções e aperfeiçoamentos observados por versão:

CÓDIGOS: A (ALTERNATIVA + N) V (VERSÃO + N)



**Figura 4.40** – Esquema com as principais evoluções técnicas e aperfeiçoamentos. Fonte: Autor.

A Figura 4.40 apresenta um esquema visual que sintetiza as principais soluções técnicas obtidas com a produção das versões que foram destacadas no decorrer da

pesquisa. Os esquemas também demonstram como essas soluções técnicas foram aperfeiçoadas e aplicadas nos modelos subsequentes. Em cada salto de um modelo para o outro, estão descritas as principais características observadas que foram aproveitadas ou sofreram evoluções.

## 4.9

### **Desenvolvimento da Alternativa I (Máscara A01V19)**

O resultado da família de versões da Alternativa I é outro dos modelos que a equipe considerou satisfatório para posterior envio ao processo de testagem. No trabalho também estão descritos, de modo mais detalhado, os modelos A01V11, A01V07, A01V14, A01V16, A01V17, A01V18 e A01V19.

Embora a máscara desenvolvida a partir da Alternativa II (A02V11, figura 4.33) tenha alcançado ótimos resultados na vedação da concha com o rosto, sua evolução foi beneficiada pela tecnologia de impressão SLS, que utiliza polímero flexível em pó como material. Conforme explicado, esse tipo de impressão realiza objetos com precisão e resistência superiores, além de dispensar suportes para a impressão, admitindo formas mais complexas e delicadas. Contudo, a impressão SLS ainda possui inacessibilidade pelo preço, limitando sua popularização. Com isso em mente, o desenvolvimento da Alternativa I foi direcionado para que fosse impressa utilizando a tecnologia FDM que, em oposição à SLS, é imensamente mais difundida.

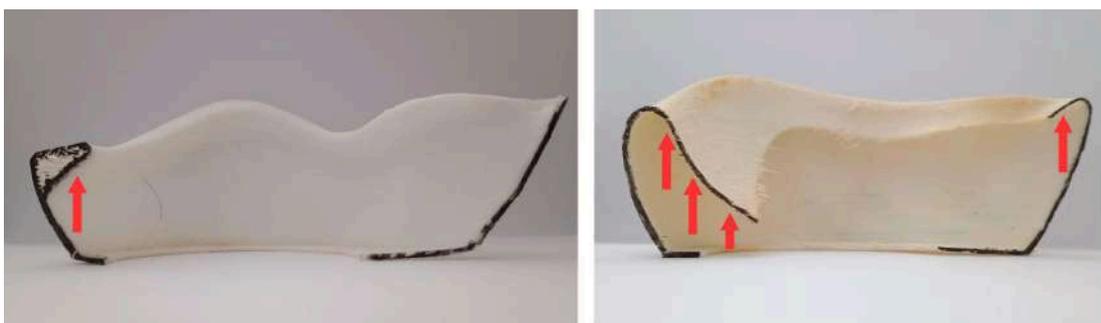
Algumas limitações tiveram, portanto, que ser consideradas. A impressão FDM já possui restrições em comparação com a SLS, conforme descrito. Além dessas limitações, é preciso lidar também com as especificidades do material utilizado (TPE) na impressão FDM que, por ser flexível, impõe ainda mais cuidados particulares quando comparados com filamentos rígidos (como PLA ou ABS). A impressão com filamentos flexíveis requer velocidades de impressão mais baixas para evitar problemas de extrusão, além de apresentar dificuldade de adesão à mesa de impressão, o que pode resultar em deformações ou descolamento durante o processo de manufatura. A precisão dimensional também é afetada, especialmente em peças com detalhes finos ou estruturas complexas, devido à maior compressibilidade do material. Utilizando filamentos rígidos, o maior ângulo de inclinação que pode ser impresso sem a necessidade de suporte geralmente é de aproximadamente 45 graus em relação à vertical. O uso de filamento flexível, no entanto, exige ângulos menores devido à sua

maior tendência a deformação, impondo superfícies com ângulos menos pronunciados.

#### 4.9.1

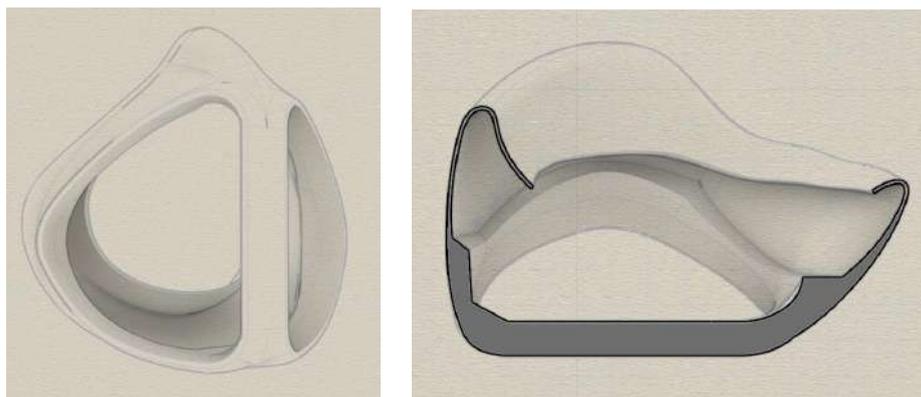
##### Modelo A01V11

As limitações impostas pelo filamento acarretam em mudanças severas na forma das conchas. Na Figura 4.41, é possível perceber a evolução formal que a concha passou do modelo A01V07 para o modelo A01V11. Em busca de uma maior área de contato com o rosto, a aba foi aumentada, tornou-se mais esbelta e acrescida de curvas. A lógica projetual por trás dessa mudança é aumentar a possibilidade de acoplamento em diferentes formatos de rostos, algo que funcionou muito bem no desenvolvimento da Alternativa II. Porém, considerando as limitações da FDM como tecnologia a ser empregada no desenvolvimento da Alternativa I, foi necessário voltar alguns modelos, readaptando a concha para esses novos parâmetros.



**Figura 4.41** - As máscaras A01V07 (esquerda) e A01V11 (direita) em corte. A seção foi destacada em preto, demonstrando a mudança na abordagem no contato da concha com o rosto. As setas em vermelho indicam as regiões que precisaram de suporte para que fossem impressas. Fonte: Autor.

A forma esbelta da concha observada em A01V11 não se traduziu bem na impressão por FDM, principalmente com a utilização do TPE. A aba da concha se mostrou frágil e dependente de suportes para impressão, aumentando o tempo do processo e aumentando o consumo de material. É notável também os pontos de apoio (marcados com setas vermelhas na Figura 4.41) que precisaram de suporte para a impressão. A Figura 4.42 demonstra a máscara A04V04 em perspectiva (esquerda) e corte (direita) que, apesar de fazer parte de outra linha de Alternativas, possui a concha com formato delgado similar ao modelo A01V11 e ilustra bem o problema.



**Figura 4.42** - Máscara A04V04 em perspectiva (esquerda) e corte (direita). Fonte: Autor.

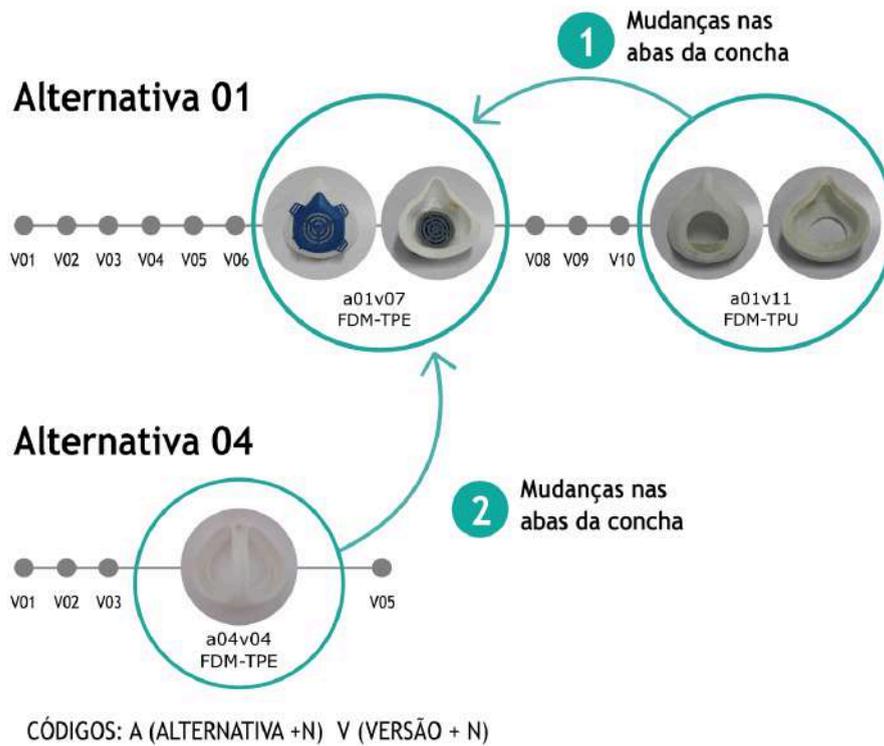
A Figura 4.43 mostra o modelo A04V04 impresso, em que é possível entender a quantidade de filamento necessária para a impressão dessa máscara. Para a impressão do formato com superfícies delgadas, foi necessária uma quantidade de material equivalente a 1/5 do material para toda concha. Como a impressão por FDM é feita em camadas, de baixo para cima, o uso de suportes é necessário nos casos em que as superfícies não possuem sustentação por si só. Ainda que a sua forma tenha sido projetada para impressão por SLS, algumas das máscaras eram impressas em diferentes tecnologias e materiais para aperfeiçoamento e cruzamento de dados. Mesmo que não fosse o material final, a impressão por FDM foi feita em diversos modelos pela sua agilidade e baixo custo, pois as impressões resultantes aceleraram o processo de análise formal das máscaras, trazendo ganhos inestimáveis de tempo para a pesquisa. Neste caso específico, a necessidade de suportes foi um dado que ficou bem claro.



**Figura 4.43** - A máscara A04V04 impressa à esquerda e os suportes necessários extraídos após a impressão à direita. Fonte: Autor.

A Figura 4.44 ilustra as influências no formato de concha entre as alternativas da pesquisa. Outro ensinamento que a máscara A04V04 evidencia (e já foi aplicado nos

modelos A01V07 e A01V11) é a necessidade da máscara possuir uma superfície plana em seu design. A impressão por FDM é feita a partir do plano da mesa de impressão, de forma que, se a máscara possui também uma superfície plana, ela se acomoda com maior facilidade na mesa, aumentando a superfície de contato e, conseqüentemente, sua adesão.



**Figura 4.44** – Principais influências entre alternativas e versões: (1) Atualização das abas segundo as adaptações para FDM; (2) Influência de outra alternativa, prevenindo o uso de suportes. Fonte: Autor.

#### 4.9.2

##### Modelo A01V07

Pelos motivos citados, a pesquisa retornou ao modelo A01V07 em que, embora sua forma estivesse melhor alinhada para a impressão FDM, ainda foram identificados ajustes a serem feitos. Conforme a Figura 4.41, a máscara ainda possuía pontos onde eram necessários suportes, e um dos propósitos do desenvolvimento dessa alternativa foi eliminar totalmente a necessidade deles. Outra questão observada foi o seu tamanho. Apesar de possuir a concha com formato triangular, que se adequa bem a diferentes formatos de rosto, seu tamanho se mostrou pequeno para os percentis ISO grande e médio quando testadas nos manequins. A Figura 4.45 demonstra os modelos A01V11 e A01V07.



**Figura 4.45** – Modelos Impressos V11 e V07. O andamento da pesquisa demandou a volta para o modelo anterior. Fonte: Autor.

### 4.9.3

#### Modelo A01V14

O modelo A01V14 aumentou o tamanho em comparação com o modelo anterior, sendo modelado a partir do modelo de rosto ISO médio (Figura 4.46). Na região de contato com o nariz, no entanto, foi observada uma falha de impressão que reflete a limitação de ângulo de inclinação imposto pela impressão por TPE (Figura 4.47).

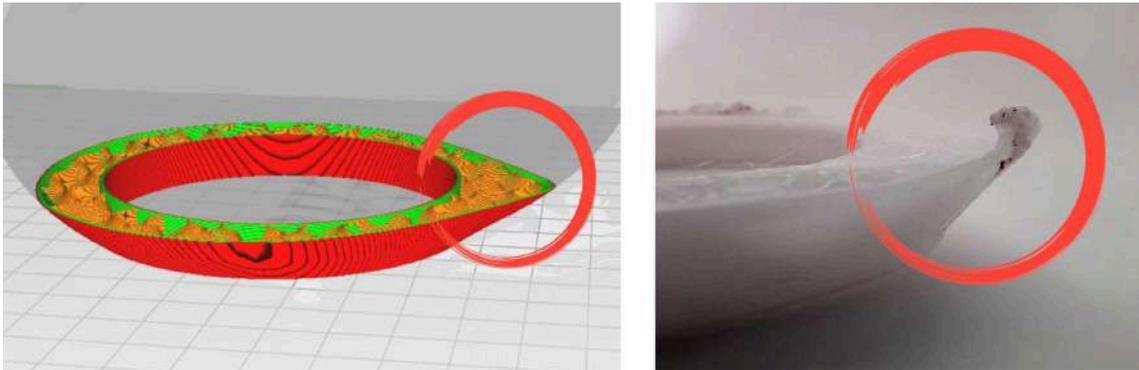


**Figura 4.46** - Modelos A01V07 (esquerda) e A01V14 (direita) em comparação lado a lado. Fonte: Autor.



**Figura 4.47** - Máscara A01V14 vista de topo evidenciando a falha de impressão observada na região do nariz. Fonte: Autor.

Essa falha é resultado do ângulo de impressão que a superfície dessa região solicitou e à qual o TPE não atendeu. A Figura 4.48 demonstra a previsão do software fatiador no momento de impressão em que a curva se torna mais acentuada (esquerda) e o resultado da impressão no mesmo momento, quando foi interrompido (direita). O “bico” formado pelo empeno do material é o causador da falha de impressão no objeto final, pois ao prosseguir a impressão, o erro vai se somando às camadas subsequentes.

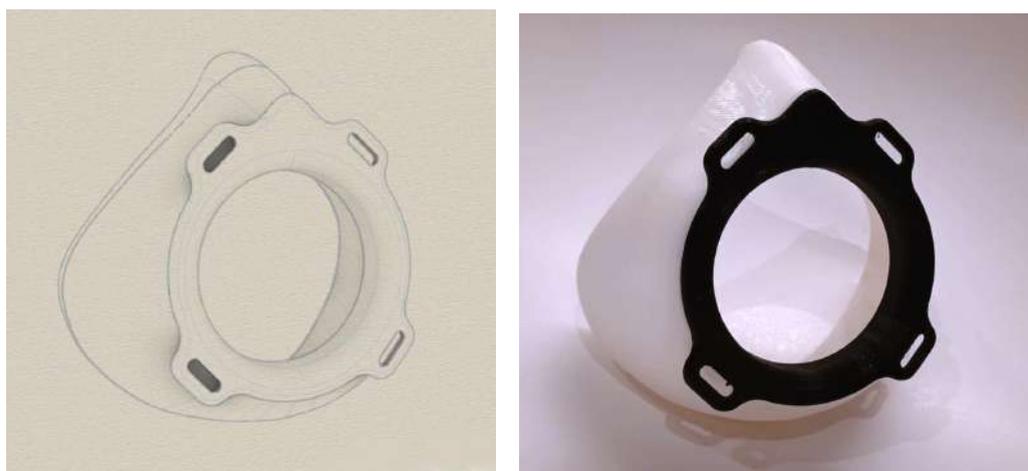


**Figura 4.48** - Previsão do fatiador (esquerda) e fotografia da impressão deformada (direita). Fonte: Autor.

#### 4.9.4

##### Modelo A01V16

O modelo A01V16 (Figura 4.49) corrige as inclinações da forma, deixando as superfícies mais próximas do ângulo perpendicular à mesa de impressão, além de começar a trabalhar a peça frontal que irá encaixar o elemento filtrante.



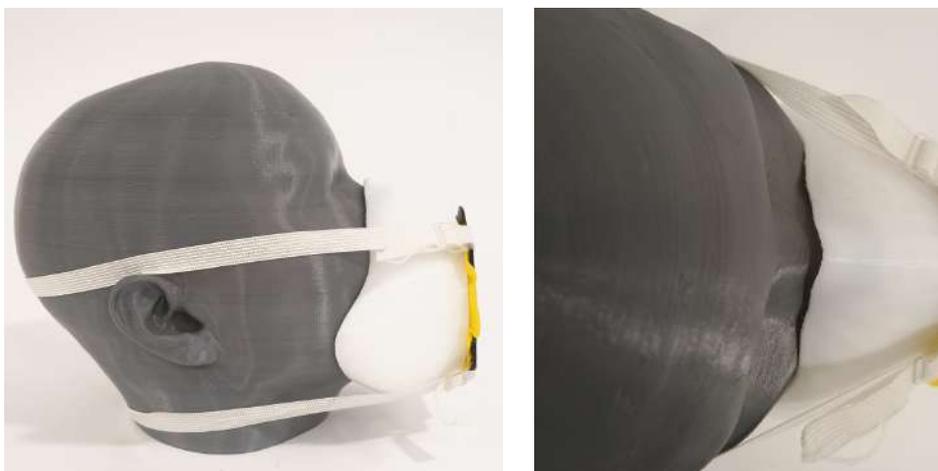
**Figura 4.49** - Modelo A01V16 na forma virtual (esquerda) e impressa (direita). Fonte: Autor.

Como o desenvolvimento partiu do modelo A01V07, que possui um furo de 54 milímetros de diâmetro na frente da máscara, suas derivações herdaram o furo

circular. Quando o momento de resolver a parte frontal da máscara fosse oportuno, não haveria problema, pois é possível seccionar o modelo no software *Rhinoceros* em dois, trabalhando os detalhes de forma independente, adaptando a concha para outros formatos de filtro. Este modelo de máscara, com formato frontal circular, será abordado novamente no Capítulo 5, que descreve o início da pesquisa de fabricação de filtros, por isso o seu desenvolvimento.

Neste ponto da pesquisa, a limitação formal derivada da impressão FDM ficou novamente exposta. Conforme descrito, o desenvolvimento da concha passou pela correção dimensional, sendo refeita a partir do rosto ISO médio. Seu encaixe no modelo de origem ficou preciso, obtendo bons resultados no teste de vedação para os manequins ISO médio e ISO pequeno. Nos modelos ISO curto, grande e longo, no entanto, a concha apresentou vazamentos na região acima do nariz no modelo ISO curto (Figura 4.50) e nas laterais no ISO grande e ISO longo.

O formato triangular da concha faz com que a parte superior da máscara fique apoiada na região próxima ao nariz, que é menos pronunciada no modelo ISO curto. Este fato, aliado à restrição formal da concha, causou uma fenda neste local. No caso dos modelos ISO grande e longo, a fenda foi observada nas laterais, causada simplesmente pelo tamanho superior dos modelos.



**Figura 4.50** - Modelo ISO curto apresentou vazamentos na região entre os olhos. Fonte: Autor.

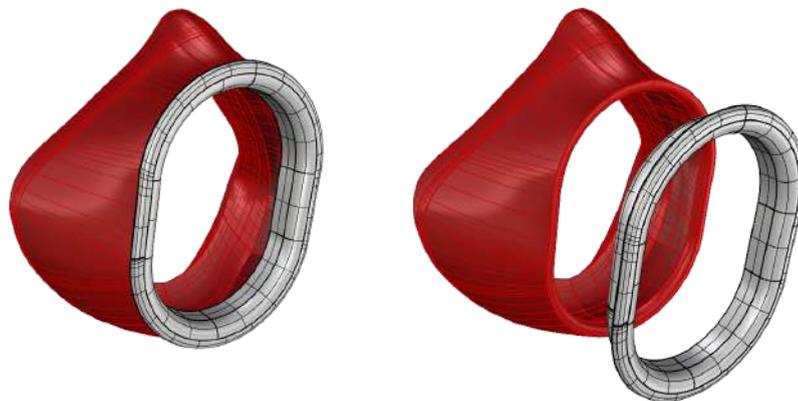
Com essa deficiência observada, ficou definido que a concha dessa Alternativa deveria contemplar todos os tamanhos ISO. Essa decisão foi tomada considerando que os cinco modelos de tamanho podem oferecer opções para os usuários, sempre buscando a melhor vedação. Diferentemente da máscara A02V11 (item 4.8.6), que possui uma concha com abas maiores, mais flexíveis e versáteis aos diferentes tipos de

rosto, o ajuste da concha feita por FDM é limitado, de forma que a produção dos cinco tamanhos se tornou necessária para manter a cobertura do maior número de pessoas possível.

#### 4.9.5

##### Modelo A01V17

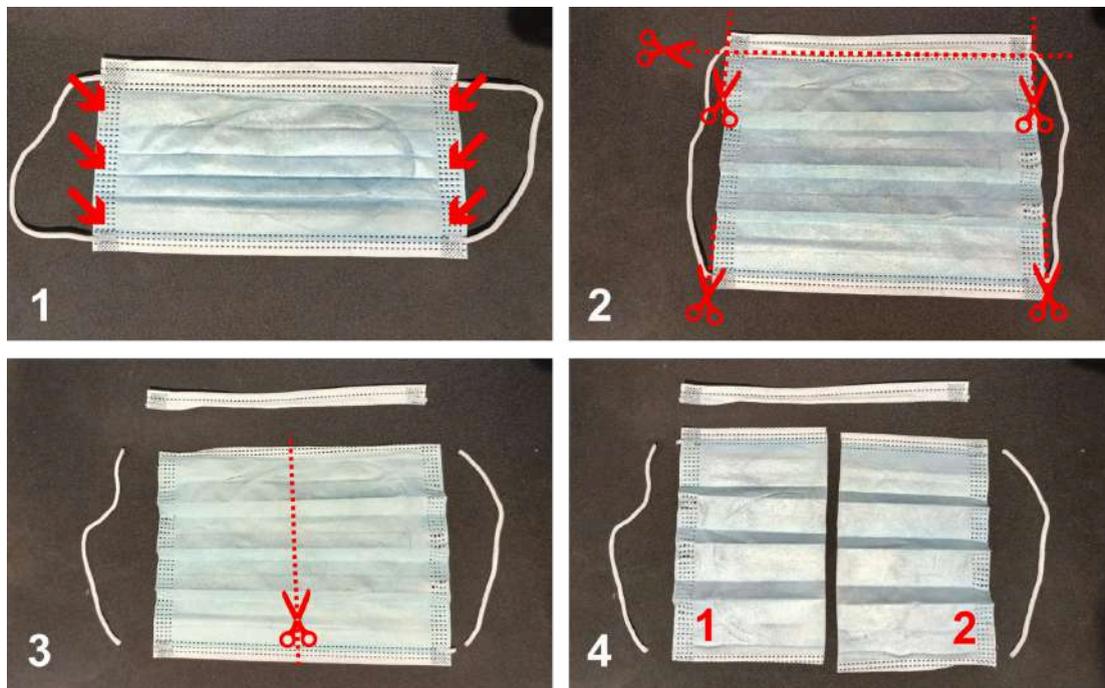
Este modelo foi adaptado considerando a parte frontal, já que sua divisão possibilita o trabalho independente da concha na parte que toca o rosto da parte que interage com o filtro (Figura 4.51). Conforme a especificação feita no item 4.5, a intenção da pesquisa sempre foi utilizar a máscara cirúrgica como elemento filtrante. Uma vez que a concha vinha sendo trabalhada em diferentes tamanhos de cabeça, este modelo aborda o encaixe do elemento filtrante com maior empenho.



**Figura 4.51** - Representações da máscara A01V17. Fonte: Autor.

Visto que a máscara cirúrgica obteve um desempenho tão promissor nos testes de respirabilidade (item 4.4), foi considerada a possibilidade de otimizar seu uso dividindo-a em duas partes. Tal iniciativa já foi observada em outros estudos, em que máscaras N95 foram divididas em quatro partes e utilizadas em uma máscara adaptada (Imbrie-Moore *et al*, 2020). O benefício gerado por essa ação é de dobrar o estoque de máscaras, em caso de deficiência no abastecimento. As especificações de diferentes marcas foram coletadas, chegando ao tamanho padrão de uma máscara cirúrgica, adaptável à maioria dos adultos, de 17,5 centímetros de comprimento por 9,5 centímetros de altura, contando sua configuração com pregas. As pregas da máscara cirúrgica são feitas, originalmente, para melhor acomodação no rosto, porém, para o uso no modelo desenvolvido, não são necessárias. Por isso, foi delineado o seguinte passo a passo para preparo do elemento filtrante (Figura 4.52):

1. Desatar as soldas laterais da máscara cirúrgica;
2. Cortar o arame do nariz e os elásticos laterais;
3. Dividir a máscara ao meio;
4. Utilizar os dois filtros resultantes, um por vez.



**Figura 4.52** - Passo a passo para preparo da máscara cirúrgica como filtro. Fonte: Autor.

A abertura circular do modelo anterior foi aumentada, buscando melhor aproveitamento da área de tecido. Sua forma com as bordas arredondadas foi projetada a fim de evitar dobras de tecido que se formariam nas arestas do encaixe, além da possibilidade de criar pontos de tensão e perfurar o tecido. A Figura 4.53 demonstra o desenvolvimento até o momento.

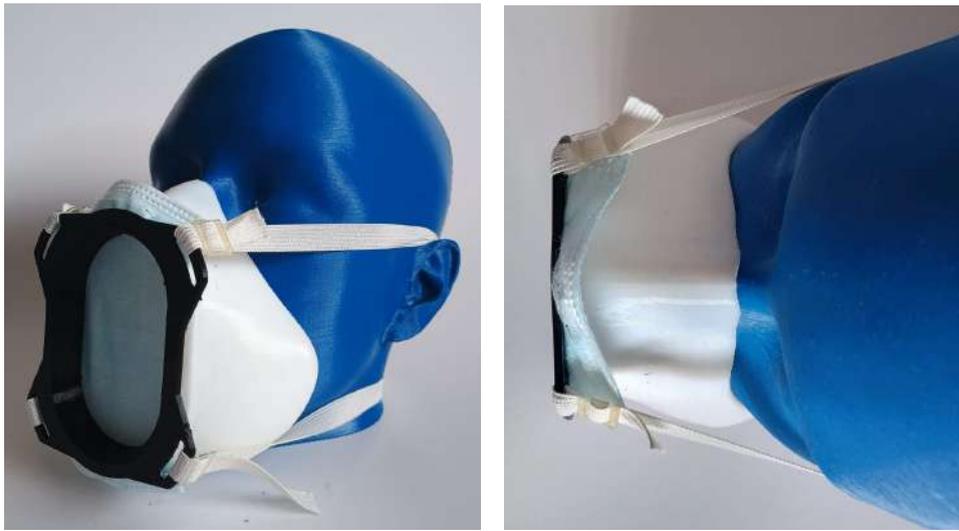


**Figura 4.53** - Modelos impressos V14, V16 e V17. Na impressão dos modelos pode-se notar a evolução formal do aro frontal. Fonte: Autor.

#### 4.9.6

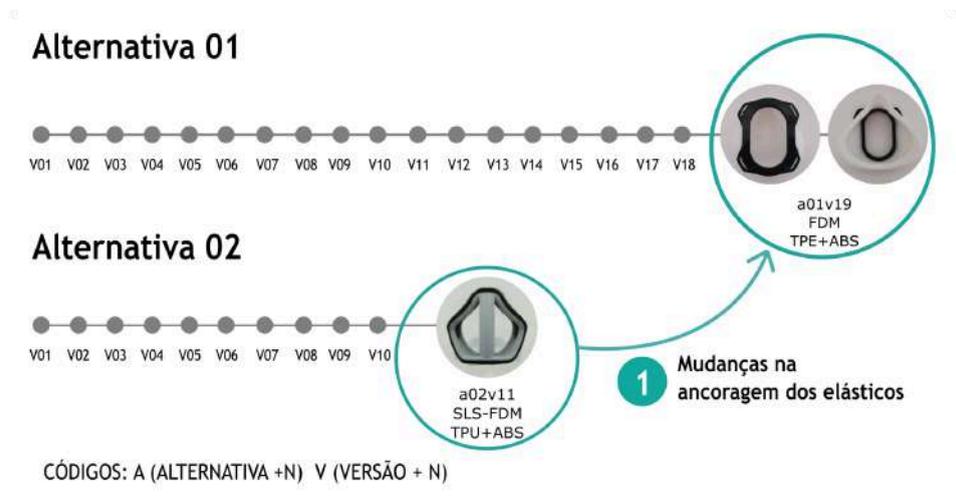
##### Modelo A01V18

O modelo A01V18 (Figura 4.54) trabalha os suportes para elástico e conclui a modelagem da concha para todos os manequins ISO. Os testes de conforto e respirabilidade foram bem sucedidos com uso prolongado dos voluntários, eliminando a apreensão da equipe em utilizar o tecido de máscara cirúrgica diminuído pela metade.



**Figura 4.54** - Máscara V18 impressa passou na inspeção visual no modelo ISO médio. Fonte: Autor.

Os testes de uso apontaram que os pontos de ancoragem dos elásticos não estavam corretamente posicionados. Portanto, assim como na máscara A02V11 (item 4.8.6), foi necessário realocar esses pontos para baixo, afastando-os da área dos olhos e resultando no modelo subsequente (Figura 4.55).

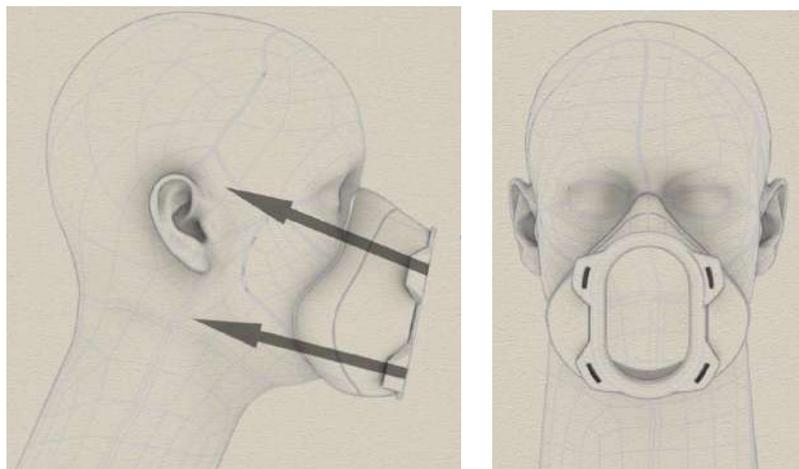


**Figura 4.55** – Influência advinda da Alternativa II aplicada ao modelo A01V19, posicionando a ancoragem dos elásticos em um local mais confortável. Fonte: Autor.

#### 4.9.7

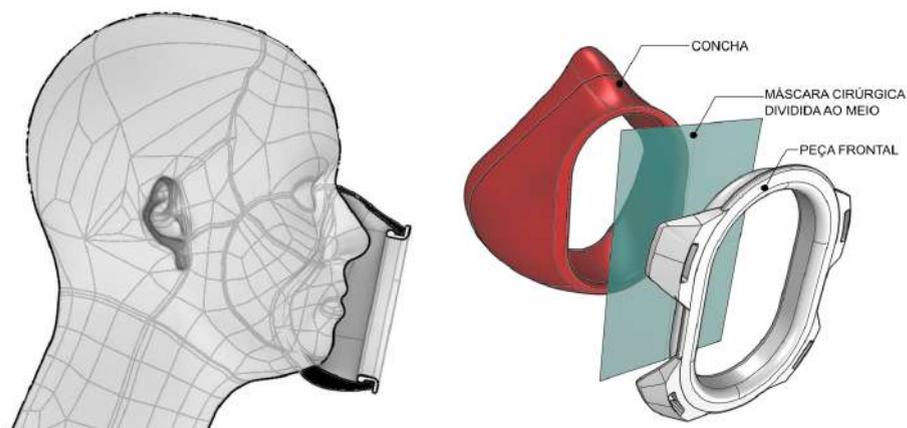
##### Modelo A01V19

O modelo A01V19 (Figura 4.56) concentra os ensinamento da pesquisa, corrigindo a ancoragem dos elásticos, e finalizando a Alternativa I com uma máscara projetada para impressão em TPE por FDM, que utiliza a metade de uma máscara cirúrgica como elemento filtrante. A amarração dessa máscara foi feita exatamente como a máscara da Alternativa II, com elásticos chatos de 10 milímetros de largura e as fivelas fabricadas por FDM (Figura 4.36).



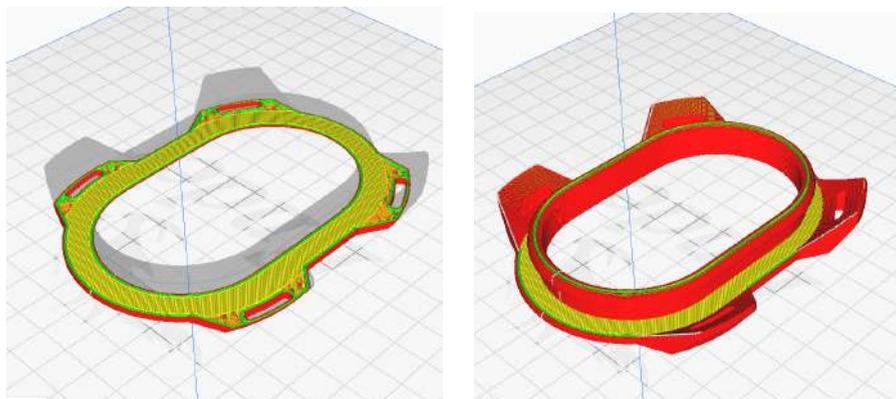
**Figura 4.56** - Representação do manequim ISO médio utilizando a máscara A01V19, de perfil, com os vetores que demonstram a previsão dos elásticos (esquerda) e de frente (direita). Fonte: Autor.

O modelo final é composto por duas partes: a concha e o aro (peça frontal) que fixa o filtro. A Figura 4.57 demonstra a vista em corte do manequim utilizando a máscara, indicando que o filtro fica acoplado a uma distância confortável do rosto, e sua lógica de montagem para uso, fixando o filtro entre a concha e a peça frontal.

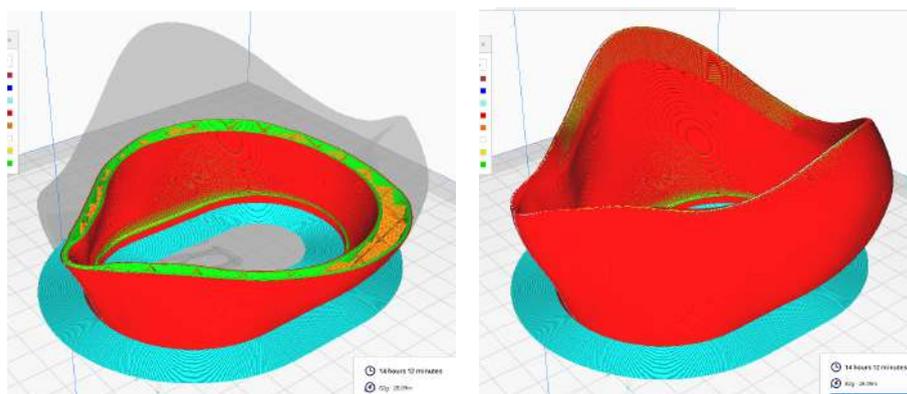


**Figura 4.57** - Corte do manequim ISO médio utilizando a máscara (direita) e a vista explodida demonstrando a montagem da máscara com o filtro (esquerda). Fonte: Autor.

A peça frontal deve ser impressa em ABS (Figura 4.58), pelos benefícios de resistência e higienização já mencionados no item 2.4. Já a impressão da concha deve ser feita com alguns cuidados: a velocidade de impressão deve ser diminuída, conforme já colocado, no valor de 40 milímetros por segundo na impressora *Ender-3*, mas como existem variações de configurações em diferentes marcas de impressoras, este valor deve ser testado para cada uma. Para garantir a fixação da impressão na mesa, é recomendado o uso de fita crepe na superfície sem aquecimento, criando uma textura mais áspera. Outra configuração que funcionou bem foi o uso da opção *brim* ajustada com 15 milímetros no software fatiador, que criou uma borda interna e outra externa na base da peça, aumentando sua fixação na mesa. Depois da impressão, essa borda é facilmente retirada (Figura 4.59). Ambas as peças não necessitam de suportes para a impressão.



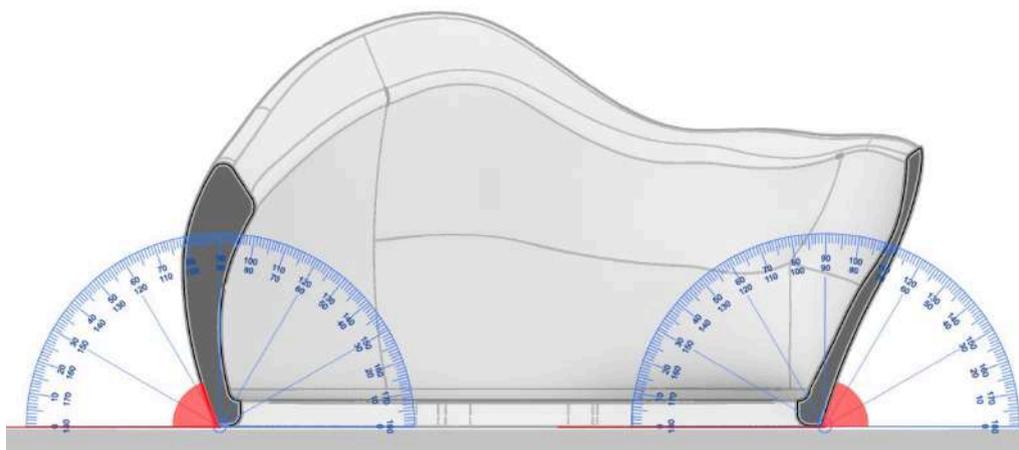
**Figura 4.58** - Previsão do fatiador para a peça frontal para as primeiras camadas (esquerda) e para a impressão completa (direita). Fonte: Autor.



**Figura 4.59** - Previsão do fatiador para as primeiras camadas (esquerda) e a impressão completa da concha (direita). O Ajuste do *brim* (em azul) interno e externo no fatiador aumenta a superfície de contato, e por conseguinte, a fixação da peça na mesa. Fonte: Autor.

Para a impressão das conchas dos diferentes tamanhos, sem uso de suportes e sem erros de superfície, foram utilizados ângulos que não ultrapassaram os  $70^\circ$

(Figura 4.60). Para garantir a sua impermeabilidade, a concha foi projetada com duas paredes, que devem ser impressas utilizando no mínimo quatro camadas cada. Para o preenchimento, é recomendado o padrão cúbico em 10%, para preservar sua maleabilidade. Essa espessura de parede diminui a chance de vazamentos de ar pela superfície, canalizando toda a respiração para o filtro. A Figura 4.61 apresenta os modelos A02V18 e A02V19.



**Figura 4.60** - Ângulos de impressão utilizados na concha Média do modelo A01V19. A cor cinza representa a área oca da concha que receberá o preenchimento de 10%. Fonte: Autor.



**Figura 4.61** - Modelos A01V18 e A01V19, últimos abordados na Alternativa I. Fonte: Autor.

#### 4.9.8

### Resultados

Assim como o desenvolvimento anterior, foram apresentados e detalhados os modelos que foram mais relevantes para a obtenção de um modelo de máscara que obedecesse aos parâmetros estabelecidos após a conclusão da Alternativa II. Os parâmetros para a Alternativa I foram: máscara com estrutura reutilizável, capaz de aproveitar como elemento filtrante a metade da máscara cirúrgica, além de ter sua fabricação feita toda por FDM. O desenvolvimento da Alternativa I apresenta o benefício de ser fabricado por uma tecnologia mais popularizada e ainda duplicar o

estoque disponível de máscaras cirúrgicas, algo valioso em períodos de carência do insumo. Com a limitação da tecnologia de impressão, tornou-se necessário o projeto da concha sob medida para os cinco tamanhos ISO, algo que foi dispensável na máscara da Alternativa II. A Figura 4.62 apresenta a máscara final (A01V19) montada nos manequins ISO. Cada modelo de concha apresentou bom encaixe nos respectivos rostos e alcançaram parâmetros consistentes de impressão, encaixes bem resolvidos e montagem simples, refletindo as diversas evoluções acumuladas ao longo da pesquisa. A Figura 4.63 apresenta as conchas de diferentes tamanhos lado a lado.

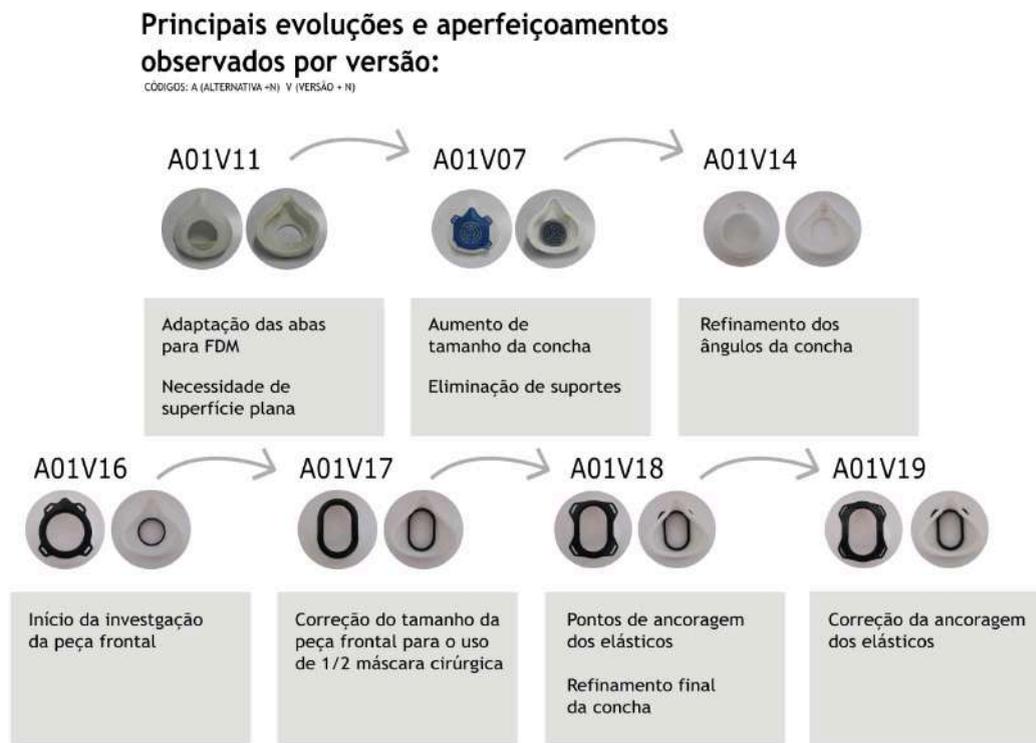


**Figura 4.62** - Máscara A01V19 impressa nos tamanhos ISO grande, médio, curto, pequeno e longo (da esquerda para direita, de cima para baixo), cada um com a concha própria para o modelo. Fonte: Autor.



**Figura 4.63** - Conchas da Máscara A01V19 impressas nos tamanhos ISO grande, médio, curto, pequeno e longo (da esquerda para direita, de cima para baixo). Fonte: Autor.

Novamente, a Figura 4.64 apresenta o esquema visual que sintetiza as principais soluções técnicas obtidas com a produção das versões que foram destacadas no decorrer da Alternativa I.



**Figura 4.64** - Esquema visual demonstrando as principais evoluções técnicas e aperfeiçoamentos na Alternativa I. Fonte: Autor.

## 5

### Máquina de algodão doce

Embora a pesquisa em EPI tenha sido direcionada em sua maior parte para a fabricação de máscaras impressas em 3D, ainda está para ser superada a produção do elemento filtrante. As máscaras estudadas utilizam a máscara cirúrgica como filtro, e por isso ainda dependem dele. Caso fosse possível, a fabricação do filtro junto com as máscaras seria uma combinação significativa para o abastecimento de unidades de saúde locais. Desta forma, a pesquisa deu início também a investigação que busca a viabilidade da aplicação da técnica de fundição de plástico por meio do *centrifugal melt spinning*, que é uma forma possível de ser replicada entre os processos existentes, de conceito simples e similar ao de fabricação de algodão doce.

O filtro de uma máscara é o elemento chave e principal responsável pela sua segurança. Assim, a busca pela produção de materiais filtrantes eficientes e economicamente viáveis se torna essencial para a fabricação completa da máscara respiratória, de forma inteiramente independente das cadeias de produção convencionais. Tipicamente, materiais como tecidos não-tecidos e outros polímeros são utilizados na fabricação de filtros para máscaras, através de métodos industriais como *electrospinning*, *melt blowing* e *centrifugal melt spinning* (Bandi, 2020). Dentre estes três métodos, o *centrifugal melt spinning*, ou fiação por fusão centrífuga (tradução livre), é a forma mais realizável de ser replicada em menor escala, pois não é necessária a presença de maquinário especializado, devido a sua simplicidade conceitual. De fato, esta técnica, que já foi executada e publicada, é o uso de fundição de plástico baseada no processo de fabricação de algodão doce. O método, conhecido pela produção de fibras finas de açúcar, pode ser adaptado para a criação de fibras poliméricas.

Bandi (2020) explora a aplicação da técnica do algodão doce para criar malhas para filtros que são carregadas eletricamente e comparadas com máscaras disponíveis comercialmente. O estudo aprofunda o método experimental de eletro carga de filtros para máscaras utilizando o tratamento de descarga corona, ou CDT (Bandi *et al.*, 2021). Ao submeter estes materiais fabricados localmente a descargas elétricas, a investigação visa melhorar o desempenho de filtração dos respiradores faciais, aumentando assim as suas capacidades de proteção contra partículas transportadas pelo ar e agentes patogênicos.

Molina (2020) também explora a implementação da fiação por fusão centrífuga para fabricação de filtros equiparáveis às máscaras N95. O estudo se centra no desenvolvimento e aplicação da técnica de produção de fibras utilizando máquinas de algodão doce modificadas. Ao utilizar materiais comuns, o estudo demonstra a viabilidade da fabricação distribuída para satisfazer a procura crescente de equipamento de proteção respiratória. O autor ainda discute as vantagens desta abordagem, tais como a escalabilidade, a sustentabilidade e a relação custo-eficácia.

A partir dos desenvolvimentos de tais autores, este estudo investiga a viabilidade da aplicação da técnica de fundição de polímero por meio do método de fabricação de algodão doce na produção de filtros para máscaras de proteção. O objetivo é apontar possíveis caminhos do uso da fabricação e reciclagem distribuída e adaptação de infraestrutura local na manufatura de elementos filtrantes viáveis, comparando-os com os gerados a partir de métodos tradicionais.

## 5.1

### **O método do algodão doce**

A ideia central, explorada nos trabalhos de Bandi (2020) e Molina (2020), é utilizar equipamentos comuns e adaptá-los para outro uso, ajustando suas especificações para a realidade de urgência observada na pandemia. Ao detalhar as ações e adaptações necessárias para transformar as máquinas de algodão doce, Bandi faz sugestões de substituição de ferramentas e recomendações, caso não haja disponibilidade de uma máquina de algodão doce para ser alterada. Segundo o estudo, as máquinas de algodão doce comerciais de pequeno porte utilizam, normalmente, elementos de aquecimento elétrico, enquanto as maiores são alimentadas a gás. Independentemente do método de aquecimento, a maioria das máquinas de algodão doce funciona a temperaturas de cerca de 160-175°C, o que é inferior ao intervalo de temperatura desejável para gerar fios de PP puro (polipropileno) ou PP-PS (compósito de polipropileno e poliestireno,  $T = 280-340^{\circ}$ ), que foram os termoplásticos utilizados em seu experimento. Ele recomenda que os circuitos e peças de aquecimento da máquina de algodão doce sejam substituídos para que o aquecimento atinja o intervalo de temperatura necessário. Caso seja possível construir a sua própria máquina, é desejável desenvolver o seu próprio elemento de aquecimento elétrico (com controle de ajuste), se tiver os conhecimentos de trabalho necessários. No entanto, uma alternativa mais simples é utilizar um maçarico a gás e ajustar a chama do maçarico e

a sua distância do copo emissor, verificando a temperatura do emissor com um termômetro comum para cozinha. Sobre o motor, o artigo prossegue afirmando que as máquinas de algodão doce comerciais chegam ao valor médio de 3000 a 4500 rpm, que é o suficiente para a formação dos fios. Porém, ele sugere que, caso seja possível, um motor mais potente que alcance até 15000 rpm é aconselhável.

Essas recomendações chamaram a atenção, pois apesar de ser descrito como um processo simples, a compra de uma máquina de algodão doce apenas com o intuito de desmontá-la e modificá-la não soa como um investimento fundado no primeiro momento. Além disso, a atualização do aparelho segundo as recomendações dos autores demanda um conhecimento específico de eletrônica. Portanto, o caminho proposto foi de levar o conceito de fabricação local e não industrial ao extremo, montando uma máquina que possui os mesmos princípios da máquina de algodão doce, porém utilizando somente a combinação de ferramentas existentes, sem adaptação de seus circuitos ou adicionando nem subtraindo componentes. Dessa forma, qualquer grupo, sem conhecimentos específicos de engenharia ou eletrônica, poderia replicar o processo e criar uma célula de fabricação local desse insumo tão valioso em situação emergencial.



**Figura 5.1** - Típica máquina de algodão doce. Fonte: [https://www.inovamaq.com.br/MLB-792963496-maquina-de-algodo-doce-industrial-12-sjuos-kit-\\_JM](https://www.inovamaq.com.br/MLB-792963496-maquina-de-algodo-doce-industrial-12-sjuos-kit-_JM) (Acesso em 17/06/2024).

A máquina de algodão doce tradicional (Figura 5.1) possui os seguintes elementos típicos: um motor central, que gira o copo emissor perfurado que possui uma resistência e os controles. Ao ser acionado, esse copo gira em alta velocidade, a

resistência esquentar e o conteúdo do copo derrete, extravasando pelos furos e formando os fios de açúcar, que é acumulado nas paredes de um recipiente externo que circunda o copo emissor. Seguindo as recomendações dos autores citados e adaptando segundo a hipótese da pesquisa, as seguintes substituições foram feitas para a montagem da nossa máquina:

O motor da máquina de algodão doce chega a 4500 rpm, que é o mínimo suficiente para a manufatura dos fios. Porém o autor recomenda que, caso seja possível, o motor deva chegar a até 15000 rpm. Para atender a esta especificação, foi utilizada uma esmerilhadeira angular de 830W, que chega até 11000 rpm, aproximando-se do valor máximo recomendado no artigo. Para controle de velocidade foi utilizado um dimmer, que pode diminuir a tensão e controlar as rotações da esmerilhadeira (Figura 5.2).



**Figura 5.2** - Esmerilhadeira *Skil 830W* e dimmer controlador de tensão utilizados na máquina. Fonte: <https://www.ritec.com.br/esmerilhadeira-angular-9004-4-1-2pol-830w-2-discos-bolsa-skil-v0015> e <https://lojaelitenet.com.br/item/regulador-de-velocidade-para-esmeril-dimmer-dimer-controlador-de-velocidade-ate-1000w-afiadora> (Acesso em 20/06/2024).

O copo emissor fica preso e gira no eixo do motor. É onde o açúcar (ou, no caso, o plástico) é colocado para derretimento e formação dos fios. O autor cita que uma simples lata de refrigerante cortada no meio pode servir como emissor, porém, ao testar a máquina ligada, verificamos que uma lata de refrigerante não aguentaria a velocidade do motor da esmerilhadeira. A solução foi, portanto, utilizar uma lata de leite em pó cortada ao meio, por possuir uma chapa de metal mais espessa e ter mais rigidez. Porém, a lata de leite em pó eventualmente também não resistiu e o emissor foi substituído por uma caneca de aço de 300ml cortada no meio, que além de possuir

maior espessura, possui o corpo íntegro e sem emendas pela fabricação por repuxo<sup>34</sup>.

Para fixação do copo emissor no eixo da esmerilhadeira, foi utilizado um disco diamantado para corte em concreto para dar maior estabilidade ao fundo. O disco selecionado possui espessura de 2,5 milímetros e 12 furos concêntricos que (além do eixo central) serviram de pontos de ancoragem no copo emissor por parafusos, dando rigidez ao conjunto (Figura 5.3).



**Figura 5.3** - Disco diamantado 4.½” e caneca de aço 300ml utilizados na montagem da máquina. Fonte: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/92199/37/641/disco-diamantado-turbo-115-x-22-mm-para-esmerilhadeira-rocast-340009> e [https://www.mandiali.com.br/caneca-de-aco-inox-300-ml-com-alca-caneca-para-cafe-e-cha\\_615](https://www.mandiali.com.br/caneca-de-aco-inox-300-ml-com-alca-caneca-para-cafe-e-cha_615) (Acesso em 20/06/2024).

Para atingir a temperatura ideal de fundição, foram testados três modos. O primeiro com maçarico, segundo recomendação do artigo, que não funcionou como esperado. Devido a alta rotação do emissor, um turbilhão de ar muito intenso era criado em torno do plástico, apagando a chama e interrompendo o processo. Após isso, foi testado um fogareiro elétrico, que excedeu a temperatura ideal. A alternativa que funcionou foi a utilização de um soprador térmico de 2000W, que chega a temperaturas de até 520°C, segundo o fabricante. O soprador utilizado possui três estágios: o primeiro alcança até 40°C, o segundo, até 350°C e o último, com fluxo de ar mais intenso, chega a até 520°C. O soprador foi, portanto, a ferramenta selecionada (Figura 5.4).

Conforme sugerido pelo material revisado, o controle de temperatura é realizado por meio de um termômetro culinário laser. Esse aparelho foi escolhido devido à sua

---

<sup>34</sup> Repuxo é um processo de fabricação utilizado na conformação de metais, onde uma chapa metálica plana é transformada em uma forma tridimensional, geralmente cônica ou cilíndrica, por meio da aplicação de força sobre a chapa enquanto ela é girada em um torno. Esse processo é amplamente utilizado para fabricar peças ocas e simétricas, como painéis, vasos, recipientes e outros componentes metálicos.

praticidade e acessibilidade, fundamentais para a realização do experimento. Além de facilitar a medição precisa da temperatura, o termômetro laser garante resultados precisos e eficientes, contribuindo significativamente para a coleta dos dados obtidos durante o experimento (Figura 5.4).



**Figura 5.4** - Termômetro laser digital e soprador térmico 2000W utilizados na montagem da máquina. Fonte: <https://www.maquinbal.com.br/utensilios/utensilios-de-cozinha/utilidades/termometro-laser-digital-infravermelho-ref-tc0380-ferimte> e <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/151057/21/228/soprador-termico-stv200-2000w-220v-com-3-estagios-vonder-6001020127> (Acesso em 20/06/2024).

A publicação de Bandi (2020) relata a utilização de uma broca de calibre 87 para fazer furos com 0,254 mm de diâmetro, mas recomenda que, se possível, seja utilizada uma malha com furos ainda menores. A fim de praticidade, na primeira tentativa foram feitos furos na lata de leite com uma broca de 2 milímetros de diâmetro. A segunda lata foi feita com furos ao longo da parede com 15 mm de diâmetro. Por dentro, foi utilizada uma malha dobrada em três camadas retirada de um conjunto de peneiras para fubá, que foi a mais fina encontrada comercialmente. Tipicamente, peneiras de fubá são fabricadas utilizando telas de aço de malha 16, com fios de 0,45 milímetros de diâmetro e abertura de 1,13 milímetro (Figura 5.7). Essa malha (Figura 5.5) permaneceu sendo utilizada até o último modelo com emissor proveniente da caneca de aço, mas como desdobramento, já está prevista a utilização de uma malha mais fina, conforme a especificação do autor.

Para capturar e guardar as fibras que seriam expulsas do emissor, foi utilizado um tacho de alumínio de 40 litros, com 22 centímetros de diâmetro na base, 32 centímetros de diâmetro na boca e 15 centímetros de altura (Figura 5.5). Foi feito um furo no fundo para passagem do eixo da esmerilhadeira e presa em uma base feita em MDF de medidas 43 centímetros por 28 centímetros e 20 milímetros de espessura. A

esmerilhadeira também foi fixada nesta base (Figura 5.11).



**Figura 5.5** - Peneira de fubá e tacho de alumínio de 40 litros. Fonte: <https://www.tegape.com.br/produto/peneira-de-fuba/> e <https://jaguaraluminios.com.br/produto/tacho/> (Acesso em 20/06/2024)

Foram utilizados nos experimentos pellets reciclados de polipropileno e sobras de filamentos de PLA - restos de impressões anteriores - trituradas. O polipropileno é o polímero indicado ao processo de manufatura de filtros, no entanto, o PLA também foi utilizado neste momento da pesquisa pela sua farta disponibilidade para a equipe (o laboratório imprime diversas peças por manufatura aditiva e muito resíduo é gerado por suportes necessários ou erros de impressão). Além disso, há também o interesse na reciclagem do PLA para outros potenciais usos, como fiação para fabricação de tecidos em geral.



**Figura 5.6** - Pellets reciclados de polipropileno de 4 milímetros e sobras de filamento de PLA. Fonte: Autor.

## 5.2

### Experimentos

As tentativas iniciais foram relevantes não somente no sentido metodológico de adaptação do maquinário como resolução de problemas, mas como significativos

alertas de segurança no manuseio das ferramentas. Ao se adaptar ferramentas em funções que não foram previstas pelos fabricantes, deve-se ter muita cautela e bom senso para que acidentes não aconteçam. Conforme já citado, a primeira tentativa foi feita utilizando-se uma lata de leite em pó cortada (Figura 5.7). No momento, acreditou-se que a solda das chapas seria forte o suficiente para comportar as altas rotações da esmerilhadeira.



**Figura 5.7** - Primeiros testes feitos para o copo emissor. As duas primeiras tentativas foram feitas utilizando latas de leite em pó, primeiramente fazendo pequenos furos na própria lata com uma broca (esq.) e depois fazendo furos maiores e utilizando uma peneira de fubá como tela para dispersão dos fios (dir.). Fonte: Autor.

Como os primeiros testes foram bem sucedidos, esse elemento foi admitido e o experimento teve continuidade. No entanto, em um dos testes, a lata não aguentou e a solda soltou, descolando o fundo da lata (que permaneceu preso ao disco da base) da chapa da parede, lançando lascas de chapa de metal em alta velocidade para fora. Felizmente, foi estabelecido que a máquina seria acionada somente com tampa e as demais práticas de segurança no trabalho, e ninguém se feriu.

Assim sendo, estas recomendações permanecem: O equipamento é acionado somente com a tampa de MDF; o operador sempre deve utilizar máscara respiratória, devido às partículas de plástico suspensas no ar; o operador deve utilizar protetor auricular, devido ao alto ruído do motor; o operador deve sempre utilizar óculos de proteção e *face shield* para proteger o rosto e caso seja necessário manusear material em alta temperatura, utilizar luvas.

Os primeiros experimentos não foram bem-sucedidos utilizando somente o soprador térmico. Para preservar o eixo da esmerilhadeira, a lata que funcionava como

emissor foi fixada com porcas espaçadoras entre o seu fundo e o disco (Figura 5.8).

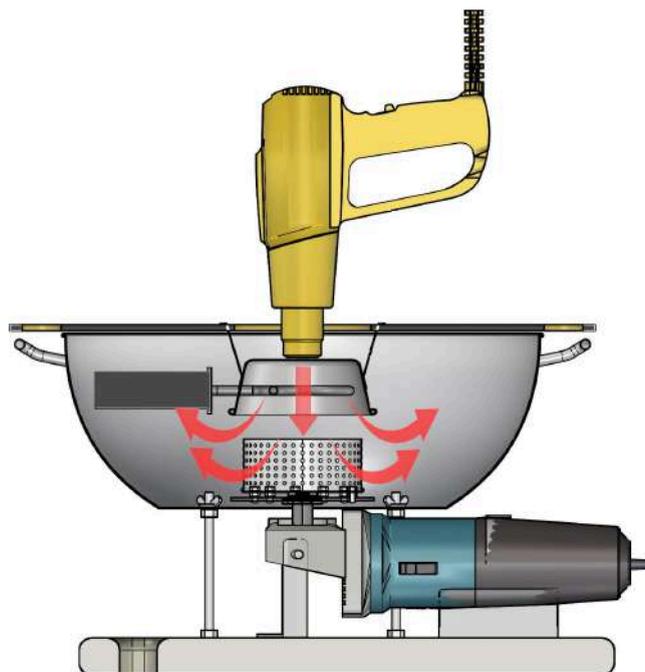


**Figura 5.8** - Detalhe do espaço entre o fundo da lata e o disco de base (esq.) e o fogareiro utilizado para auxiliar no derretimento do plástico (dir.). Fonte: Autor.

Porém, com a rotação do copo emissor, turbilhões de ar eram formados, impedindo o fluxo de ar quente de atingir o plástico. Para tentar resolver este problema, foi utilizado como auxílio um fogareiro elétrico (Figura 5.8) para facilitar o seu derretimento. Sua resistência foi posicionada logo acima do copo emissor, irradiando calor para o seu interior. Este método não se mostrou eficaz, atingindo temperaturas muito altas, sem possibilidade de controle da temperatura e do direcionamento do calor (Figura 5.10). Isso fez com que o plástico aquecesse demais, deixando-o em estado fluido, de forma que, ao acionar a máquina, ele fosse expulso sem formar os fios desejados, acumulando na parede do recipiente externo (Figura 5.9).



**Figura 5.9** - A temperatura alta derreteu o plástico deixando-o muito fluido, deixando um resíduo sólido na parede do recipiente. Fonte: Autor.



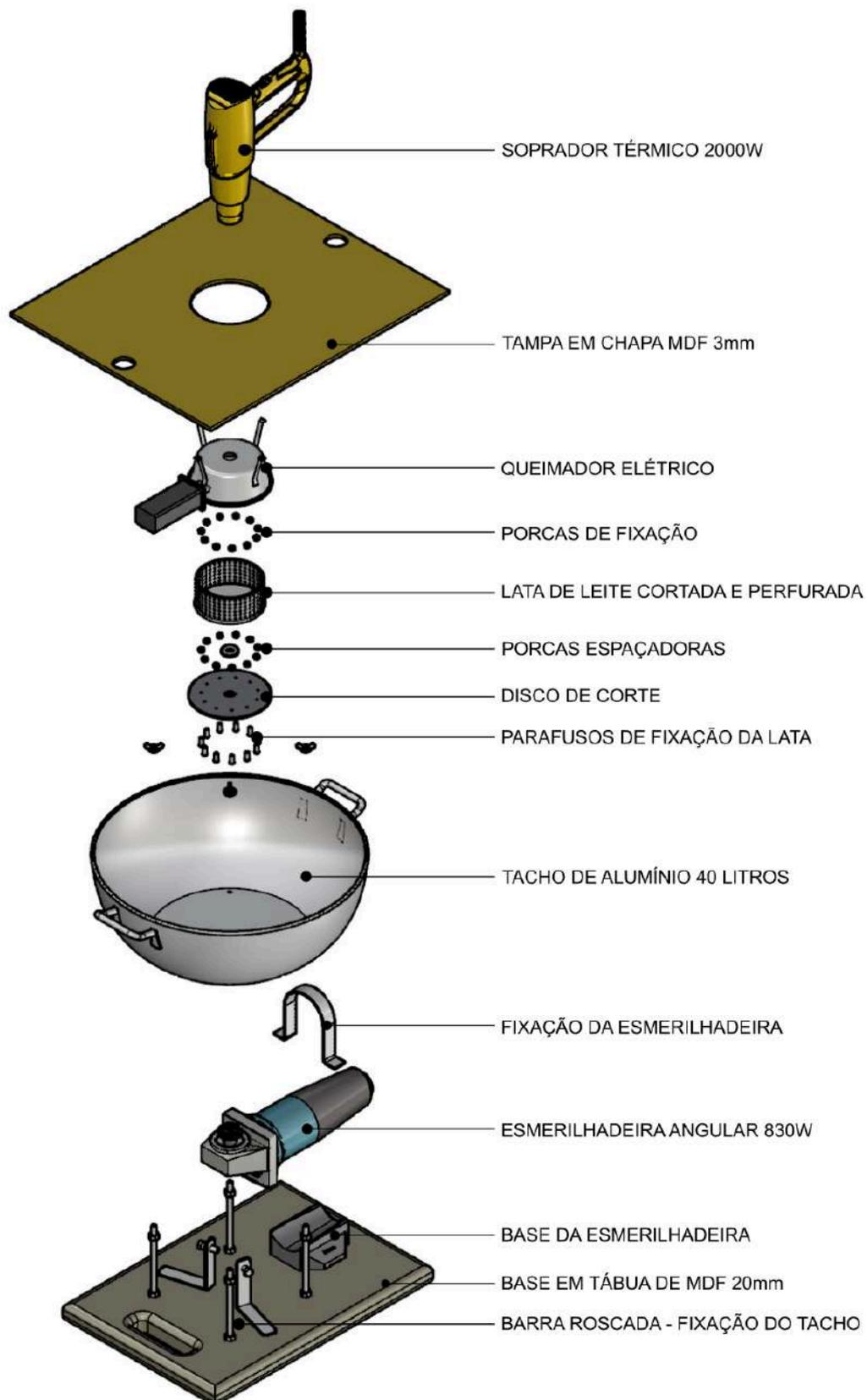
**Figura 5.10** - Corte da primeira tentativa da máquina. O fluxo de ar quente indicado pelas setas vermelhas. Fonte: Autor.

Para dar estabilidade ao conjunto, mas ainda deixá-lo portátil, foi utilizada uma chapa de MDF de 20 milímetros como base, com um corte formando uma alça para transporte (Figura 5.11). Para funcionamento da máquina, esta é sempre fixada em uma bancada de trabalho com grampos, devido à vibração do motor. A esmerilhadeira foi fixada por uma fita de aço perfurada e duas cantoneiras aparafusadas no corpo da ferramenta e na base. Para garantir que a ferramenta fique na posição horizontal, foi modelada e impressa por manufatura aditiva uma base personalizada. No entanto, é possível utilizar uma base de madeira para o mesmo fim.



**Figura 5.11** - Detalhe da montagem da base. Fonte: Autor.

A montagem do primeiro protótipo ficou conforme a Figura 5.12:



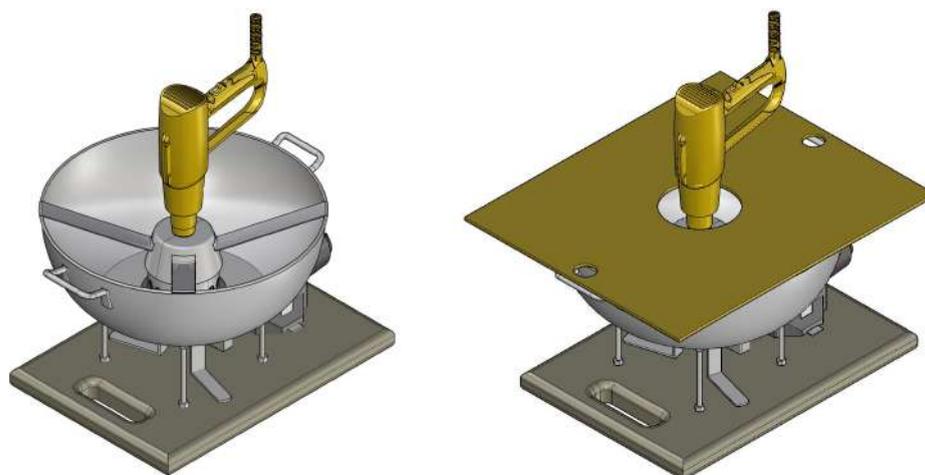
**Figura 5.12** - Vista explodida da primeira construção da máquina. Fonte: Autor.

Em vista disso, foi estabelecido que o copo emissor deveria ser fixado diretamente no disco, sem uso de espaçadores. Além disso, o ar do soprador deveria ser melhor canalizado para que não houvesse grandes perdas. Para isso, uma mini forma de pudim com 10,5 centímetros de boca, 7,5 centímetros de base e 5 centímetros de altura feita em alumínio foi posicionada invertida logo acima do copo emissor (Figura 5.13). Esse procedimento canalizou o fluxo de ar diretamente para o plástico no interior do copo, saindo pelas telas e criando o resultado desejado (Figura 5.17).



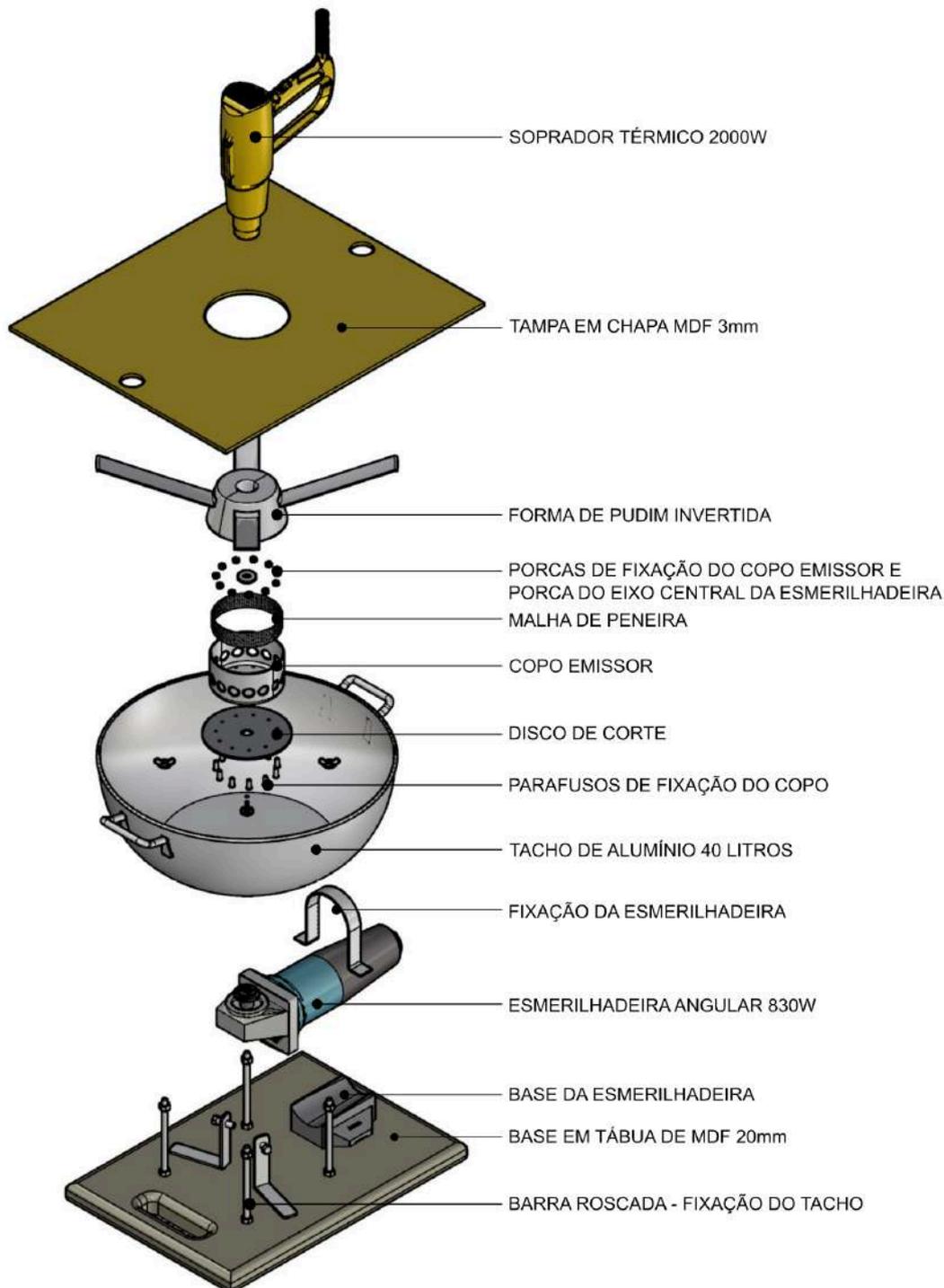
**Figura 5.13** - Mini forma de pudim utilizada para canalizar o ar. Um furo foi feito na parte central para passagem de ar. Fonte: Autor.

Com o tacho e a esmerilhadeira ancorados na base, deve-se fixar o copo cortado (já com a tela de peneira) no disco de corte e prender este conjunto no eixo da máquina. A forma de pudim fica presa nas paredes do tacho por tiras de chapa de aço, pregadas com rebite (Figura 5.13). A máquina é usada somente com a tampa, segundo a Figura 5.14.



**Figura 5.14** - Montagem final da máquina sem tampa (esq.) e com tampa (dir.). Fonte: Autor.

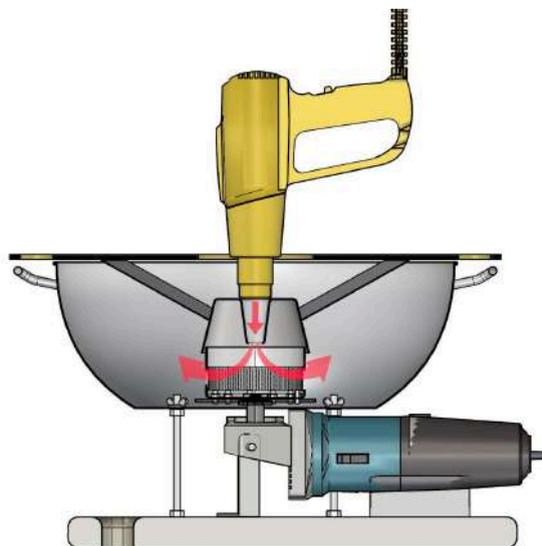
A construção da máquina de algodão doce adaptada se encontra na configuração ilustrada na Figura 5.15:



**Figura 5.15** - Vista explodida da construção da nova máquina de algodão doce. Fonte: Autor.

Conforme já descrito, o funcionamento da máquina é feito a partir do acionamento do motor com o plástico dentro do copo emissor. Para que o material não seja expulso sem derretimento ao ligar a máquina, recomendamos que seja feito um pré-aquecimento para que ele se conforme levemente. Após isso, o soprador deve ser

posicionado de forma que sopra o ar perpendicularmente para baixo, direcionando o fluxo de ar da forma de pudim (que é fixada nas paredes do tacho) para o interior do copo (que gira ao ligar a esmerilhadeira). Devidamente tampada, com a máquina em alta rotação, o ar entra por cima do copo e é expulso pelas laterais, gerando os fios desejados (Figuras 5.14 e 5.16).



**Figura 5.16** - Fluxo de ar quente indicado pelas setas vermelhas. Fonte: Autor.

### 5.3

#### Resultados preliminares

O polipropileno foi o primeiro material de testes na construção da máquina. Utilizando pellets de polipropileno no estado em que estavam (sem trituração - Figura 5.6), foi possível chegar a um velo<sup>35</sup> bruto ainda com fragmentos de plástico entrelaçados nos fios. Como estava ainda no modelo inicial da máquina, a forma de pudim ainda não tinha sido utilizada para otimizar o ar do soprador, de forma que o velo bruto foi alcançado utilizando aquecimento do material por fogareiro elétrico. Como o controle de temperatura é difícil por este método, parte do material tornou-se fluido, expulsando o polímero sem formar os fios.

O uso dos filamentos de PLA foi feito após a canalização do ar do soprador e demonstrou melhor formação dos velos. Por possuir temperatura de fundição menor (145°C), seu manejo se mostrou mais fácil, com resultados promissores (Figura 5.17).

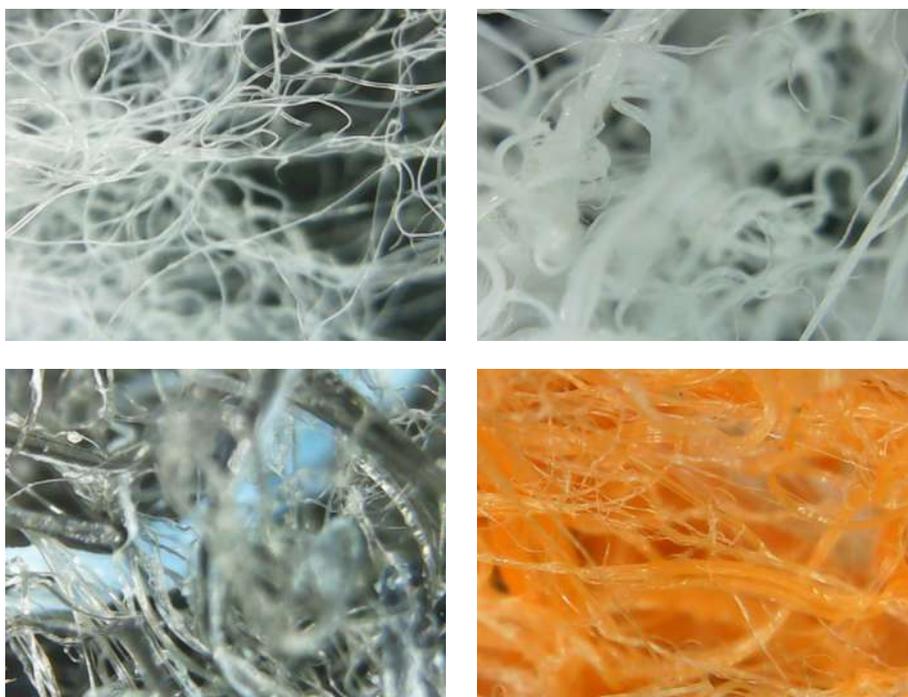
---

<sup>35</sup> Velo de lã refere-se à camada de lã que é cortada de uma ovelha ou outro animal lanífero durante o processo de tosquia. Neste trabalho, a palavra “velo” é utilizada para definir a fiação bruta extraída dos plásticos derretidos pela máquina projetada.



**Figura 5.17** - Velo obtido com os pellets de polipropileno reciclado (azul) e velos de PLA reciclado nas cores preta, branca e laranja. Fonte: Autor.

Como primeira análise, as amostras de PLA foram colocadas em um microscópio digital (ampliação x1000) para aferição do diâmetro dos fios, comparando-os ao material coletado de uma máscara N95 (Figura 5.18).



**Figura 5.18** - Ampliação (x1000) dos fios do filtro retirado de máscara N95 utilizada como controle (sup. esq.) e fios de PLA branco fabricados na máquina (sup. dir.). Ampliação (x1000) dos fios de PLA fabricados na máquina, preto (inf. esq.) e laranja (inf. dir.). Fonte: Autor

Como primeira análise visual, é possível perceber que, ao serem submetidos à mesma ampliação, os fios de PLA fabricados pela máquina ainda não alcançaram a uniformidade nem a espessura semelhante aos fios de polipropileno retirados da máscara N95. Apesar de alguns fios dos velos se aproximarem da amostra de controle, outros apresentam maior espessura. Isso já era esperado, visto que, além da diferença de material e diâmetro dos furos da tela utilizada, as amostras de PLA são somente as primeiras tentativas de fabricação dos fios, feitos ainda sem controle rígido de produção. Sendo assim, a análise corrobora que ainda existe um longo caminho a ser percorrido na investigação.

## 5.4

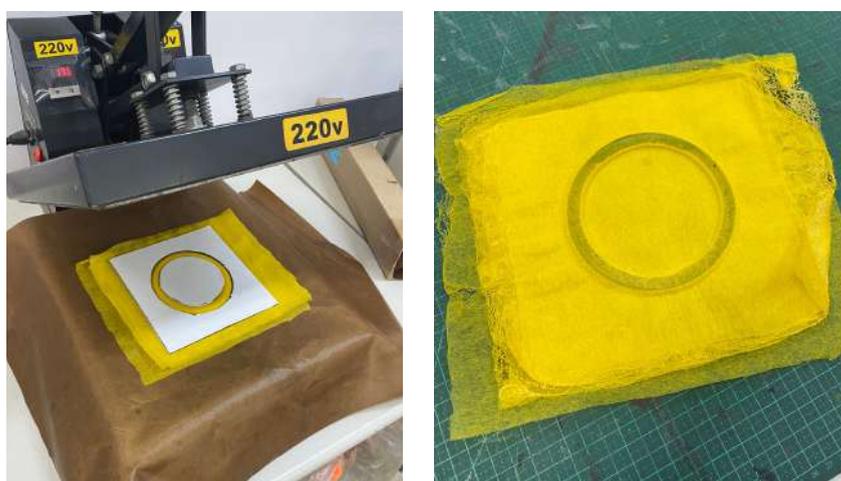
### Ensaio de fabricação do filtros

Mesmo que os velos não tivessem atingido ainda o resultado esperado, foi executado um ensaio do processo de fabricação dos filtros utilizando este material. Para isso, foi estabelecida a configuração em três camadas: TNT, velo e TNT. É importante ressaltar que os filtros finais, além de serem validados em sua estrutura física, ainda terão suas cargas eletrostáticas reforçadas com o uso de um ionizador de ar. Bandi (2020) recomenda a exposição do tecido polimérico fabricado à carga isotérmica por 10 minutos a uma distância de 1 cm de um ionizador de ar doméstico, mas esse processo será aprofundado quando for oportuno. Portanto, os resultados dos testes de solda para fabricação dos filtros abordados neste trabalho serão considerados apenas *mockups*, e não protótipos.

A diferença entre protótipo e *mockup* reside na natureza e no propósito de cada um desses artefatos no processo de design e desenvolvimento de produtos. Um protótipo é uma representação funcional e interativa de um produto em estágio inicial de desenvolvimento, que visa simular o funcionamento e a experiência do usuário com o produto final (Jia & Chung, 2003). Por outro lado, um *mockup* é uma representação estática e visual do design de um produto, geralmente utilizada para visualizar a aparência e o layout sem a funcionalidade interativa do protótipo (Bouchrika *et al.*, 2013). Os protótipos são utilizados para testar e validar a funcionalidade, a usabilidade e a experiência do usuário de um produto em desenvolvimento, permitindo identificar e corrigir problemas antes da produção em larga escala (Fanani, 2023). Como os filtros gerados neste momento da pesquisa não atendem a essas características e ainda

não possuem função além do ensaio do processo para solda de tecido, o status de *mockup* é considerado mais apropriado.

Sendo assim, as soldas para união de três camadas foram feitas com a adaptação de uma prensa quente de sublimação, que é um maquinário comum em confecções, utilizado para impressão de tecido de forma customizada. Esse maquinário também proporciona controle preciso de tempo e temperatura, necessários para realizar soldas em TNT com precisão sem gerar furos ou outras falhas no material. Para a confecção dos filtros foram utilizados moldes de MDF com espessura de 3 milímetros no formato circular e diâmetro de 110 milímetros (Figura 5.19).



**Figura 5.19** - Prensa de sublimação com as camadas de TNT, velo e MDF montada (esquerda) e o resultado prensado (direita). Fonte: Autor.



**Figura 5.20** - Três testes foram feitos, utilizando os diferentes velos formados pela máquina de algodão doce (esquerda). À direita, a máscara A01V16 com o filtro *mockup* integrado. Fonte: Autor.

O modelo de máscara A01V16 (item 4.9.4) foi eleito para o teste com os *mockups* de filtros. Sua escolha é justificada pelo formato amadurecido da concha e o encaixe bem resolvido para filtros de formato circular com diâmetro de 52 milímetros. Com o prosseguimento da pesquisa, o modelo A01V16 poderá fazer parte dela como conjunto máscara/filtro (Figura 5.20).

## 5.5

### Conclusão

A adaptação da lógica de uma máquina de algodão doce para produzir filtros para máscaras respiratórias surgiu como uma nova abordagem para atender à crescente demanda por equipamentos de proteção. Um equipamento que possibilita criar membranas fibrosas poliméricas eletrizadas para máscaras faciais dá aos pesquisadores a capacidade de aumentar rapidamente a produção de filtros durante a crise de saúde. Esse método atípico não apenas fornece uma solução econômica, como também demonstra a adaptabilidade dos processos de fabricação em momentos de necessidade urgente, como observado na pandemia da COVID-19. O presente desdobramento propõe uma abordagem ainda mais simplificada para a construção de um aparelho capaz de fabricar filtros para máscaras de proteção, com potencial para oferecer uma alternativa eficaz e de baixo custo aos métodos tradicionais, sem a necessidade de conhecimentos especializados. Ao explorar o uso de ferramentas comuns, apenas combinando e readaptando suas funções originais, busca-se contribuir para a disseminação e popularização do avanço tecnológico e a segurança na proteção individual.

A utilização da máquina inspirada no processo de algodão doce na produção de filtros para máscaras exemplifica a adaptabilidade e a inovação necessárias para lidar com as eventuais perturbações da cadeia de abastecimento e a escassez de equipamento de proteção essencial. Ao reorientar ferramentas existentes e explorar novas técnicas de fabrico, pólos independentes de fabricação podem complementar a produção de meios de filtragem para máscaras respiratórias, contribuindo para a resposta global aos desafios colocados, como pela pandemia que passamos. Embora ainda sejam necessários aprimoramentos, o experimento propõe a continuidade da pesquisa com foco na simplificação do processo de obtenção do elemento filtrante. Toda documentação gerada e detalhada dos primeiros passos da pesquisa é importante justamente para identificar as fragilidades dos elementos utilizados, operando suas

substituições ou aprimoramentos logo que possível.

Fundamentando-se em artigos publicados que relatam a possibilidade de manufatura de filtros para máscaras com qualidade e segurança equiparáveis a máscaras comerciais, em especial Bandi (2020) e Molina (2020), propõe-se futuramente trabalhar a frente nos seguintes itens:

- **Desenvolvimento do Processo de Produção:** Alcançar a fabricação de filtros com os mesmos princípios de uma máquina de algodão doce para a fundição de plásticos, estabelecendo parâmetros como materiais, temperatura de fusão, velocidade de extrusão e diâmetro das fibras. Revisar o método de eletrização das fibras de acordo com as referências publicadas.
- **Caracterização dos Materiais:** Analisar a morfologia, diâmetro das fibras e sua distribuição nos filtros produzidos.
- **Avaliação de Desempenho:** Testar a eficiência de filtragem dos filtros de plástico fundido, comparando com filtros comerciais em termos de retenção de partículas e resistência à passagem de ar.
- **Análise de Viabilidade Econômica:** Estudar os custos de produção e a viabilidade econômica do método em comparação com os processos de fabricação existentes. Originar um novo método de fabricação de filtros para máscaras faciais utilizando a combinação de ferramentas comuns, otimizando o processo de produção para garantir a escalabilidade, a relação custo-eficácia e a sustentabilidade do fabrico dos filtros

## 6

### Discussão

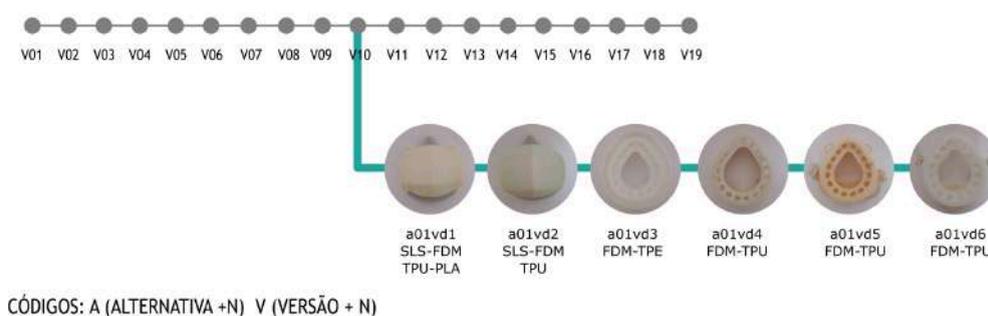
A investigação realizada nesta tese centrou-se na pesquisa documental e utilização da tecnologia de impressão 3D na concepção e prototipagem de três itens essenciais de Equipamentos de Proteção Individual (EPI): um protetor facial inteligente e duas máscaras respiratórias. As conclusões deste estudo são sustentadas por uma revisão abrangente do estado atual da impressão 3D em aplicações médicas, particularmente nos campos da engenharia, medicina e design. A revisão destacou o papel transformador da impressão 3D como resolução em situações de emergência, enfatizando como ela permite a produção de EPI de forma alternativa com segurança e eficácia (Santos *et al.*, 2020). O estudo sobre *Design for Addictive Manufacturing* (DfAM) enfatizou a importância de especificar os parâmetros da tecnologia empregada, visto as diversas variáveis envolvidas em um campo que ainda está em expansão. O desenvolvimento do *face shield* e das máscaras respiratórias alinha-se com a tendência mais ampla no setor de saúde para soluções ágeis e focadas nas pessoas, facilitadas pela tecnologia de manufatura aditiva (Raja, 2023; Advíncula *et al.*, 2020; Kunovjanek *et al.*, 2020; Tareq 2021; Bishop *et al.*, 2020).

Muitos rumos foram tomados durante a execução desta pesquisa, mas obviamente nem todos foram seguidos até sua conclusão. Das cinco alternativas criadas para o desenvolvimento do projeto das máscaras no Capítulo 4, apenas duas (Alternativas I e II) resultaram no produto final. Todavia, considerar que as Alternativas III, IV e V não foram relevantes para o processo seria um enorme equívoco, dada a abundância de dados colhidos durante o desencadeamento delas e aplicados nos modelos que de fato prosperaram. Conforme já colocado, o progresso da pesquisa gerou conhecimentos que se complementavam de forma circular, com uma alternativa influenciando a outra a todo momento. O desenvolvimento das abas da concha, trabalhado na Alternativa III, a exploração de formatos de filtros da Alternativa IV e a sondagem de formas de conchas na Alternativa V influenciaram profundamente as Alternativas I e II em diversos momentos.

No processo de pesquisa aplicado neste trabalho, toda ação gerou um dado relevante, independente do seu “sucesso” ou seu “fracasso”. Como exemplo disso, é interessante a análise de um dos caminhos que não prosperou, batizado como **Sistema**

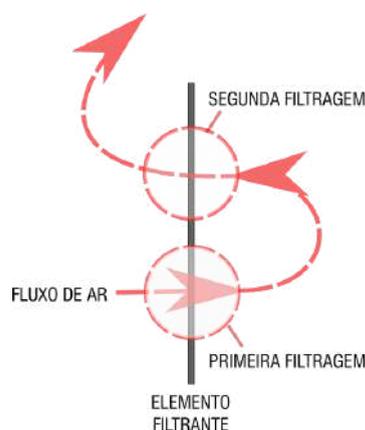
**de Filtragem Dupla**, que foi concebido pensando no aproveitamento do poder de filtragem do tecido de máscara cirúrgica. A investigação desse sistema envolve a Alternativa A01V10, criando uma vertente de pesquisa paralela que resultou no modelo A01Vd6 (Figura 6.1), que tentou responder à pergunta: Como seria possível melhorar a filtragem da máscara direcionando o fluxo de ar para mais passagens no mesmo filtro?

### Alternativa 01



**Figura 6.1** - Esquema da vertente criada dentro da Alternativa I. Fonte: Autor.

Essa vertente alternativa não partiu do modelo A01V10 por alguma característica especial, mas por pura cronologia. A hipótese surgiu quando o modelo estava em pauta, e por isso sua concha foi aproveitada para a nova linha exploratória. A lógica dessa linha foi aumentar o número de passagens do ar pelo filtro, sem adicionar camadas de tecido à máscara, já que isso implicaria em diminuição da respirabilidade, conforme observado nos testes de fluxo de ar (item 4.4) e adição de material filtrante. Portanto, o aumento da capacidade da máscara não poderia partir do aumento de material utilizado. O resultado foi um design que utiliza o mesmo tecido, mas o ar passa duas vezes por ele, segundo o esquema da Figura 6.2.



**Figura 6.2** - Esquema visual do funcionamento da filtragem dupla. Fonte: Autor.

As tentativas fracassadas na investigação em design desempenham um papel crucial no avanço do conhecimento e da inovação no campo. Embora o sucesso seja frequentemente comemorado, é igualmente importante reconhecer o valor das tentativas mal sucedidas. Arnold e McDermott (2013) destacam como as tentativas mal sucedidas podem, na verdade, aprimorar o aprendizado subsequente, enfatizando a importância de não se concentrar apenas nos resultados bem-sucedidos, mas também no processo de tentativa e fracasso. Embora o desenvolvimento da pesquisa tenha apontado que este caminho não valia a pena ser seguido, sua documentação foi importante para demonstrar que tentativas que dão errado são essenciais no campo da pesquisa e do projeto em design, pois promovem a aprendizagem contínua, incentivam a inovação e desenvolvem a resiliência dos pesquisadores.

O estudo passou por seis modelos que, conforme o modelo de pesquisa RtD, foram projetados revisando as deficiências observadas no modelo anterior, sempre buscando a iteração do produto. Para isso, foram feitas provas de conceito, constantes verificações de vedação nos manequins ISO e testes de encaixes entre peças.

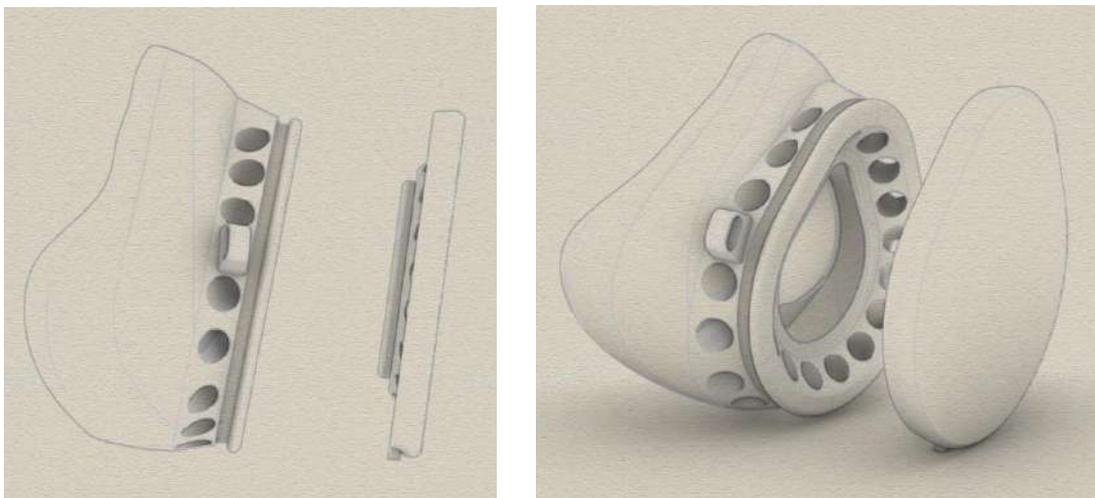
A Figura 6.3 mostra um teste feito soprando fumaça de charuto com a concha posicionada no rosto. Como a fumaça é carregada de impurezas, o objetivo do teste era marcar os locais de passagem do fluxo de respiração. Como pode ser observado, o ar se comportou conforme previsto, passando pelas duas filtragens corretamente e marcando no tecido as áreas utilizadas.



**Figura 6.3** - Previsão de áreas de passagem de ar e marcas da fumaça no filtro experimental. Fonte: Autor.

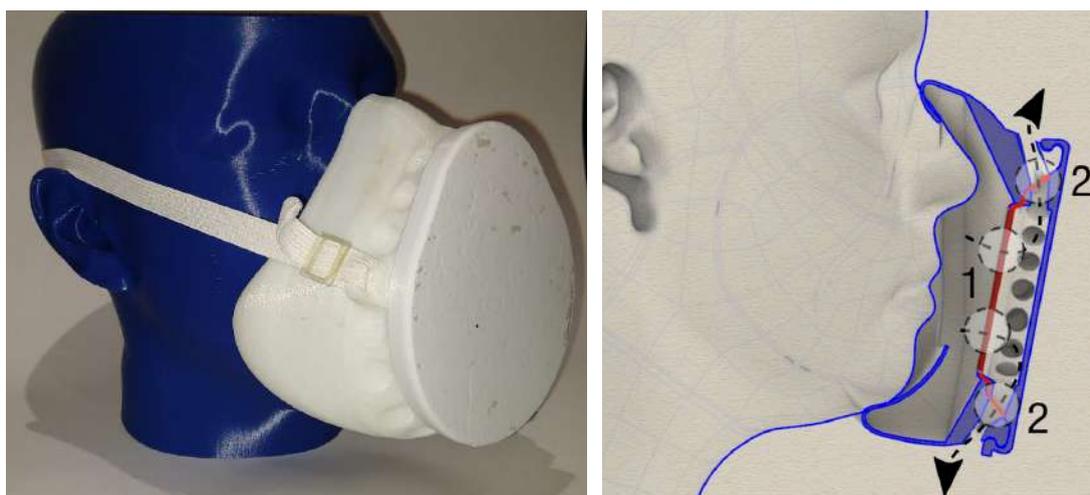
Os modelos foram trabalhados buscando a simplificação da montagem e solução das vulnerabilidades da forma, observadas com a impressão das conchas. Foi buscado otimizar a área de uso do tecido e otimização das impressões, já que as formas geradas com o objetivo de canalizar o ar a passar duas vezes no filtro foram se tornando cada

vez mais complexas. Após atualizações e correções do desenho, chegou-se ao modelo A01Vd6, conforme a figura 6.4:



**Figura 6.4** - Modelagem do modelo Vd6. Os furos circulares funcionam como dutos de ar. Fonte: Autor.

A concha incorporou grande parte dos dutos de ar em um único objeto. Esta atualização facilitou a impressão e buscou uma máscara mais fácil de ser higienizada. A concha e a grade externa, que ao longo dos modelos foi simplificada, teve todos os furos para passagem de ar remodelados no formato circular. Este formato facilitou a prototipagem em impressora FDM, pois o furo circular é autoportante e dispensa a presença de suportes para fabricação da peça. A Figura 6.5 demonstra a impressão e o esquema final da passagem de ar.

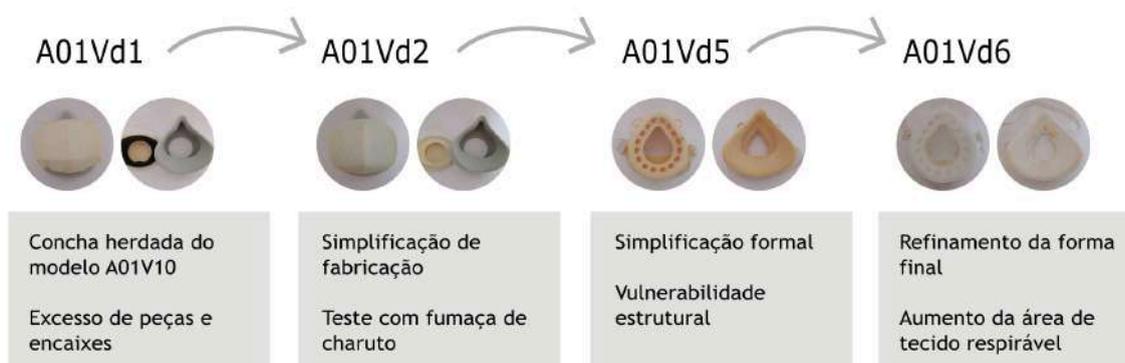


**Figura 6.5** - O modelo Vd6 no manequim à esquerda e à direita o esquema de funcionamento do filtro duplo. O ar passa pelo centro do filtro (filragem 1) e nas bordas (filragem 2). O filtro está representado em vermelho. Fonte: Autor.

A Figura 6.6 mostra um diagrama visual que resume as principais soluções técnicas alcançadas durante a produção das versões destacadas ao longo da pesquisa pela filtragem dupla.

### Principais evoluções e aperfeiçoamentos observados por versão:

CÓDIGOS: A (ALTERNATIVA + N) V (VERSÃO + N)



**Figura 6.6** - Esquema visual demonstrando as principais evoluções técnicas e aperfeiçoamentos na exploração da dupla filtragem. Fonte: Autor.

O modelo A01Vd6 demonstrou melhor manuseio, melhora em sua higienização e os problemas observados no modelo anterior foram sanados. No entanto, um grande impedimento observado foi a persistente dificuldade de respiração ao utilizar a máscara. Durante o teste de uso, a área de tecido utilizada para filtragem, mesmo que aumentada, ainda se demonstrou pequena para dar conforto ao usuário durante a respiração com uso da máscara cirúrgica como filtro.

É importante salientar que o objetivo da reflexão acerca desses modelos foi apresentá-los como uma oportunidade de aprendizado e parte integral do processo científico deste trabalho. Os testes envolvendo o conceito da filtragem dupla foram relevantes, ainda que o resultado alcançado não tenha sido considerado satisfatório. Embora sua evolução tenha se empenhado em solucionar as questões que foram se apresentando ao longo da pesquisa, finalmente ficou claro que o próprio conceito não estava atuando conforme o planejado, pois mesmo com a otimização da forma, os dutos de ar ainda se mostraram um desafio para a correta limpeza da máscara. A dificuldade de respiração do usuário, a complexidade formal e a própria ideia de aproveitamento de filtragem não fizeram sentido, e inevitavelmente esta intrincada ideia foi encerrada.

Ao reconhecer o valor da tentativa mal sucedida, os pesquisadores tiveram oportunidades valiosas de aprendizado e percepções que puderam impulsionar a inovação e o aprimoramento nos modelos seguintes. Benson (1986) enfatiza a importância de compreender e analisar os fracassos para obter resultados bem-sucedidos em projetos de design. Ao aprender com os fracassos, os designers podem refinar suas abordagens, identificar pontos fracos e tomar decisões informadas para aprimorar o processo geral de design, além de levar a uma compreensão mais profunda das complexidades envolvidas no projeto e suas limitações.

É comum que em uma metodologia como a RtD, em que a inventividade do designer está inserida no processo de pesquisa, o entusiasmo intrépido possa aflorar o desejo de fazer algo único e transformador. Esse sentimento é bem vindo, visto que a motivação encoraja a exploração de novas ideias e abordagens que podem não ter sido consideradas inicialmente, promovendo a criatividade. No entanto, a busca pela resolução dos parâmetros que deram início à investigação deve ser sempre o fio condutor da pesquisa, procurando sempre a solução mais elegante e objetiva. Situações como a ocorrida ajudaram no desenvolvimento de resistência, adaptabilidade e de uma mentalidade de crescimento e foco, pois mesmo que a ideia tenha se provado inadequada, seu estudo e documentação colaboraram no desenvolvimento de habilidades técnicas e de resolução de problemas. Os produtos gerados ajudaram a testar hipóteses e premissas subjacentes ao projeto, garantindo que as decisões de design tenham sido baseadas em dados concretos e observações reais.

Para progressão de toda a pesquisa, foi essencial que cada atualização dos modelos fosse impressa, testada e comparada aos parâmetros estabelecidos. O processo aqui descrito envolveu muitas idas e vindas em ações e decisões, muitas testagens, sugestões e caminhos que não seguem necessariamente uma linha previsível de raciocínio. O RtD, conforme já colocado, ordena e cataloga a pesquisa, estabelecendo um caminho de volta nos dados coletados, caso novas análises ou esclarecimentos sejam necessários. Para que isso fosse possível nesta pesquisa, a principal forma de registro do desenvolvimento dos EPIs foi a impressão e prototipagem das formas. Cada modelo que surgiu como evolução do anterior foi materializado, o que possibilitou não apenas o registro do estado do objeto, mas também sua análise concreta, presente no mundo real.

A obtenção rápida de modelos permitiu a interação com os pesquisadores e profissionais de saúde, pois possibilitou a realização das ideias e a compreensão de

quais aspectos se revelaram positivos ou passíveis de correção. A elaboração de uma sequência de protótipos pode efetivamente registrar todo processo de pesquisa e destacar restrições físicas ou técnicas imprevistas, promovendo o aperfeiçoamento das soluções e permitindo a estruturação do aprimoramento alcançado a cada passo.

O projeto do *face shield*, proposto no Capítulo 3, consistiu em estudar a viabilidade de uma solução que integrasse fabricação digital e Internet das Coisas (IoT) para proteger e auxiliar os profissionais de saúde na execução de suas atividades. O EPI com tecnologia embarcada representa uma inovação significativa na área de dispositivos de proteção individual para os Agentes Comunitários de Saúde. Com baixo custo e utilizando a impressão 3D como método de fabricação, o *face shield* combina proteção física com funcionalidades avançadas.

A integração da tecnologia de sensores para monitoramento do paciente e a capacidade de enviar essas informações de maneira instantânea para um sistema centralizado oferece uma solução eficiente e inteligente para o controle de sinais vitais, especialmente em cenários de atendimento a pacientes com doenças infecciosas. Em situações como a pandemia, o equipamento pode aprimorar o registro, controle e tratamento dos casos de infectados. O desenvolvimento deste projeto possibilitou uma melhor compreensão sobre necessidades e possibilidades que podem ser atendidas utilizando a aplicação de IoT no campo da saúde, assim como proveu um mapeamento dos principais obstáculos a serem ultrapassados nesta integração.

Este sistema não apenas minimiza o contato direto dos profissionais de saúde com os pacientes, reduzindo o risco de contaminação, mas também otimiza o processo de coleta e análise de dados clínicos, permitindo uma resposta mais rápida e precisa no tratamento. Os recursos adicionados ao equipamento permitem o reconhecimento facial, a medição de temperatura e o acesso ao histórico de atendimento, com essas informações projetadas no visor do equipamento para facilitar a realização das assistências.

O *face shield* demonstra não apenas a viabilidade técnica do uso de tecnologias embarcadas em dispositivos de proteção individual, mas também sua relevância prática e potencial para melhorar a qualidade do atendimento em comunidades, estabelecendo um precedente para futuras inovações que possam explorar ainda mais as capacidades da impressão 3D e da tecnologia embarcada em soluções voltadas para a saúde e abrindo caminho para o desenvolvimento de novos dispositivos que contribuam para um atendimento mais seguro, eficiente e conectado.

A pesquisa sobre a produção de máscaras respiratórias apresentada no Capítulo 4 destacou o processo de evolução e aprimoramento contínuo dos modelos, resultando em dispositivos de proteção mais eficientes e adaptados às necessidades de uso. Ao longo do desenvolvimento, cada iteração de máscara incorporou melhorias significativas em relação à versão anterior, refletindo um esforço constante em otimizar tanto a usabilidade quanto a eficácia do produto final. A integração da máscara cirúrgica como elemento filtrante não apenas preservou a eficácia reconhecida do material, mas também melhorou a fixação no rosto e a vedação, aspectos críticos para a proteção respiratória. As soluções projetadas para garantir uma vedação mais eficaz foram fundamentais para maximizar a proteção do usuário, minimizando a entrada de partículas nocivas e assegurando que o filtro desempenhasse sua função de forma otimizada.

Como alternativa à máscara cirúrgica, no Capítulo 5, a tese apresentou também a partida para um estudo sobre a produção de fios de plástico reciclado utilizando o método de *centrifugal melt spinning*, uma técnica inspirada no processo de fabricação de algodão doce. Este método demonstrou ser uma abordagem viável e eficiente para a criação de fios finos e uniformes a partir de materiais reciclados, abrindo novas possibilidades para a reutilização de resíduos plásticos em aplicações médicas, como a produção de filtros para máscaras respiratórias impressas em 3D, ou até mesmo em aplicações para vestuário em moda.

Uma das grandes vantagens desse processo é que a máquina utilizada para a produção dos fios é composta por ferramentas facilmente encontradas, tornando o método acessível e replicável em diferentes contextos. A pesquisa em fase inicial demonstra o potencial de produzir fios que futuramente podem ser eletrizados para fabricação de elementos filtrantes em dispositivos de proteção respiratória. A eletrização dos fios é um passo crucial a ser dado, pois aumenta sua capacidade de atrair e reter partículas, elevando a eficiência dos filtros produzidos.

Os resultados alcançados abrem caminho para futuras pesquisas e aplicações da manufatura aditiva na área da saúde, sugerindo um futuro promissor para a criação de dispositivos de proteção personalizados, acessíveis e eficientes.

## Considerações finais

A pandemia da COVID-19 serviu de catalisador para a rápida adoção da impressão 3D nos cuidados de saúde, particularmente para a produção de EPI. O estudo de Novak *et al.* (2020) também salientou a forma como a impressão 3D foi fundamental para resolver a escassez de EPI durante a pandemia, demonstrando a agilidade e versatilidade desta tecnologia na resposta a necessidades urgentes de cuidados de saúde. A pesquisa sobre a esterilização e higienização de itens de EPI impressos em 3D confirmou a possibilidade de higienização e reuso dos equipamentos fabricados com uso da impressão 3D (Welch *et al.*, 2021).

O desenvolvimento deste trabalho demonstra como uma pesquisa interdisciplinar, envolvendo as áreas de design, saúde e engenharia, possibilitou os projetos dos EPIs. O uso das diferentes tecnologias de impressão 3D permitiu uma modelagem adaptada para cada uma, que foi otimizada visando o desenvolvimento do produto por meio de cada técnica. Como os modelos foram impressos por meio de técnicas diversas, de acordo com suas especificidades, diferentes tolerâncias de distância foram adotadas para cada tipo de impressão. Isso significa que um encaixe que deseja-se hermético, precisa ser testado em diferentes tolerâncias em milímetros para funcionar. Então, as peças voltavam para o processo de modelagem conforme as dimensões ou a rigidez resultante não permitissem o encaixe desejado. Logo, ocorreram diversos retornos e redesenhos das formas para se chegar aos resultados esperados para determinados encaixes. Além disso, a manipulação do objeto permite a verificação prática da ideia que foi modelada virtualmente, de maneira que os gestos manuais previstos para a montagem das máscaras possam ser aferidos e julgados.

Alguns fatores podem interferir na resistência do objeto impresso. Na impressão em FDM, por exemplo, em que fios de polímero são extrudados criando camadas, cria-se uma diferença na resistência do objeto, de acordo com a direção dessas linhas. Caso a força seja aplicada na direção das camadas geradas pela impressão, a resistência será maior que a mesma força aplicada na direção perpendicular. Isso faz com que o posicionamento do objeto na mesa de impressão tenha um grande impacto na sua resistência geral, então isso foi revisado a favor das tensões mecânicas previstas.

Outro ponto importante foi a abstenção do uso de suportes durante as impressões em FDM, sempre que possível. As estruturas de suporte são responsáveis por sustentar as camadas do objeto que não se sustentariam por si só e são utilizadas apenas para a impressão do objeto, mas não fazem parte dele, de forma que devem ser destacadas e dispensadas. Mesmo que possam ser reciclados para uso posterior, as impressões foram otimizadas para o menor uso de suportes possível no caso do *face shield* e para a ausência deles no caso da máscara A01V19. Isso confere velocidade à impressão e evita desperdício de energia e material.

É notável que, embora este trabalho tenha sugerido muitas recomendações e precauções acerca da impressão por FDM, o mesmo não foi feito para as tecnologias SLS e SLA. Isso ocorre porque essas impressões se beneficiam de um processo mais controlado e padronizado, o que reduz a necessidade de ajustes manuais detalhados no software de fatiamento. No caso da SLA, a resina líquida utilizada se nivela automaticamente devido à gravidade, criando uma superfície inicial uniforme para cada nova camada. Isso elimina a necessidade de ajustes detalhados de parâmetros relacionados à deposição de material, como ocorre em FDM. O processo de cura da resina é também melhor controlado pela exposição à luz, resultando em uma fusão precisa e consistente de cada camada. Muitos sistemas de SLA vêm com configurações de impressão pré-definidas para diferentes resinas fornecidas pelo fabricante, e esses parâmetros garantem a qualidade e a consistência das impressões, de forma que as principais variáveis de SLA, como a intensidade da luz, tempo de exposição e a espessura da camada, são bastante padronizadas e não exigem ajustes frequentes por parte do usuário.

No caso da impressão por SLS, a necessidade de ajustes é algo ainda mais raro. O processo de SLS ocorre em um ambiente de impressão fechado e bem controlado, com temperaturas elevadas que mantêm o objeto enclausurado até o final da impressão. Por segurança, a impressora SLS só inicia o processo quando as instruções de preparo são revisadas e a porta fechada, garantindo que o comportamento do pó durante a sinterização seja uniforme e previsível. O laser que transforma o material é altamente focado, permitindo uma fusão controlada e precisa do material. Por isso, muitos dos parâmetros críticos estão mais relacionados ao próprio equipamento e menos ao processo de fatiamento. Conforme colocado diversas vezes, as peças são suportadas pelo próprio pó não sinterizado, eliminando o planejamento de estruturas de suporte. Como também não há necessidade de ajustar a temperatura de extrusão,

velocidade de impressão, ou parâmetros de retração como na FDM, a configuração se torna mais objetiva e com menos variáveis para o usuário.

Dito isso, o constante desenvolvimento e produção de novos modelos permitiu a avaliação do comportamento dos modelos impressos, de acordo com cada material ou técnica utilizada (Figura 7.1). A manipulação dos objetos impressos também facilitou as discussões entre a equipe multidisciplinar, formada por designers, médicos e engenheiros. O ato de tocar o objeto, sentir sua textura, resistência e flexibilidade forneceu inestimável contribuição para os conhecimentos e aprimoramentos obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho.



**Figura 7.1** – Conchas finais do modelo A02V11 impressas em diferentes materiais e tecnologias. Da esquerda para a direita: 3dx Shore 88-92 TPE em FDM; Tpu 96 d60 em FDM; *Flexabright* shore 92a em SLS e Resina *high temp* rígida em SLA. Fonte: Autor.

Embora as máscaras apresentadas neste estudo (Modelos A02V11 e A01V19) manifestem melhorias sobre uma máscara cirúrgica padrão, não pretendemos que estas sejam percebidas como substitutas para uma máscara filtrante aprovada, como os produtos que seguem os padrões N95 ou PFF2. A mesma lógica é aplicável ao *face shield*, uma vez que sua aplicação esbarra em questões além da pesquisa. Mesmo que todas as ações desenvolvidas sejam fundamentadas nos experimentos e na bibliografia apresentada, a eficiência dos produtos ainda deve ser atestada pelos órgãos responsáveis. No momento mais dramático da pandemia, diversas soluções foram aplicadas, pois a urgência do período demandou ações drásticas. Como qualquer nova tecnologia, a impressão 3D introduziu muitas vantagens e possibilidades, com exemplos demonstrados em cada caso específico em que a impressão 3D encontrou aplicação. No entanto, neste período pós pandemia, em que a vacina se mostrou eficaz e a vida segue voltando ao normal, o uso dos equipamentos projetados neste trabalho deve ser acompanhado de legislação atualizada, de forma a garantir a sua correta aplicabilidade, e não devem ser utilizados até que sejam obtidas as certificações necessárias.

Esta tese visou documentar o processo de pesquisa e projeto do laboratório BioDesign e seus esforços que começaram durante o período de confinamento causado pela COVID-19, desenvolvendo insumos demandados por hospitais na cidade do Rio de Janeiro. Ao explorar as potencialidades da metodologia RtD, combinada com o Design em Parceria e o DfAM no desenvolvimento de equipamentos de proteção individual, este estudo deixa como contribuição não apenas os EPIs projetados, mas também a compreensão do papel transformador da manufatura aditiva na saúde. Este estudo evidencia como essa tecnologia pode impulsionar a inovação e a personalização dos cuidados de saúde aqui, no Rio de Janeiro, focando especificamente na criação de um modelo de *face shield* com tecnologia embarcada e dois modelos de máscaras respiratórias que utilizam máscaras cirúrgicas como elementos filtrantes (Figura 7.2).

### EPI desenvolvidos na pesquisa:



**Figura 7.2** – Resumo dos EPIs desenvolvidos ao longo deste trabalho, com as técnicas de impressão recomendadas. Fonte: Autor.

Os modelos estão disponíveis para download na plataforma *Thingiverse* pelos links:

- *Face Shield*: <https://www.thingiverse.com/thing:6806111>
- Máscara A02V11: <https://www.thingiverse.com/thing:6806089>
- Máscara A01V19: <https://www.thingiverse.com/thing:6806103>

A modelagem e a impressão 3D aplicadas nesta pesquisa foram fundamentais para a velocidade de obtenção e cruzamento de dados, com criação e manipulação de

objetos com formas excepcionalmente sofisticadas, de forma que este trabalho somente foi possível devido às tecnologias disponíveis no laboratório de BioDesign da PUC-Rio.

## 7.1

### Trabalhos futuros

Os desafios enfrentados durante a pesquisa incluíram a necessidade de equilibrar a proteção eficaz com o conforto do usuário, além da utilização dos materiais de impressão 3D para garantir a durabilidade e a segurança dos EPI. Para ações futuras, sugere-se a testagem dos EPIs projetados segundo os órgãos reguladores e a continuidade no desenvolvimento de EPI utilizando tecnologias emergentes e metodologias de design centradas no usuário. A exploração de novos materiais de impressão 3D, a integração de sensores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real são caminhos promissores que podem ampliar ainda mais a eficácia e a usabilidade dos equipamentos desenvolvidos.

Porém, é importante lembrar que o *face shield*, sendo capaz de transmitir dados dos pacientes, levanta uma série de questões legais e éticas, especialmente relacionadas à privacidade, segurança de dados e conformidade regulatória. Dados de saúde são considerados sensíveis pela Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), o que exige uma proteção ainda mais rigorosa e limita a possibilidade de compartilhamento desses dados sem o consentimento do paciente. Para futuros testes e eventual uso em campo, é necessário garantir a proteção dos dados armazenados e transmitidos, com implementação de mecanismos robustos de criptografia, além de uma solução em conjunto com o Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) e regulamentação junto ao DATASUS, que é o órgão que fomenta, regulamenta e avalia as ações de informatização do Sistema Único de Saúde (SUS).

Este trabalho deixa também como contribuição o início de uma pesquisa voltada para a produção de filtros, o elemento final para a completa produção de uma máscara de proteção. Os resultados alcançados até o momento abrem novas possibilidades para a fabricação de filtros respiratórios, de forma autônoma, especialmente em cenários onde os recursos são limitados, mas a necessidade de soluções é urgente.

## Referências Bibliográficas

ABBAS, M. Industrial applications of 3d printing to scale-up production of covid-19-related medical equipment. **Journal of 3d Printing in Medicine**, 5(2), 97-110. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2217/3dp-2021-0003>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ABD-ELSAYED, Alaa; KARRI, Jay. Utility of substandard face mask options for health care workers during the COVID-19 pandemic. **Anesthesia and analgesia**, 2020. DOI: 10.1213/ANE.0000000000004841 Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7172555/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ADVÍNCULA, R., DIZON, J., CHEN, Q., NIU, I., CHUNG, J., KILPATRICK, L., ... & NEWMAN, R. Additive manufacturing for covid-19: devices, materials, prospects, and challenges. **Mrs Communications**, 10(3), 413-427. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/mrc.2020.57>. Acesso em: 12 ago. 2024.

AHMADI, C., WEDASHWARA, W., PUSPITA, N., & CHEN, J. Iot-based smart village transaction system using rfid and load cell modules. **First Mandalika International Multi-Conference on Science and Engineering 2022**, MIMSE 2022, 341-351, 2022. Disponível em: [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-084-8\\_29](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-084-8_29). Acesso em: 12 ago. 2024.

ALARCÓN-PAREDES, A., FRANCISCO-GARCÍA, V., GUZMÁN-GUZMÁN, I., CANTILLO-NEGRETE, J., CUEVAS-VALENCIA, R., & ALONSO-SILVERIO, G. An iot-based non-invasive glucose level monitoring system using raspberry pi. **Applied Sciences**, 9(15), 3046, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9153046>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ALBUSAC, J., CASTRO-SCHEZ, J., CASTRO-GARCÍA, M., PÉREZ-FLORES, J., & CANALES-VÁZQUEZ, J. Design and evaluation of a system for decentralized management of solidarity actions during the covid-19 crisis. **Applied Sciences**, 10(22), 8064, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10228064>. Acesso em: 12 ago. 2024.

AMIN, D., NGUYEN, N., ROSER, S., & ABRAMOWICZ, S. 3d printing of face shields during covid-19 pandemic: a technical note. **Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, 78(8), 1275-1278. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joms.2020.04.040>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ANTONINI, M., PLANA, D., SRINIVASAN, S., ATTA, L., ACHANTA, A., YANG, H., ... & SORGER, P. A crisis-responsive framework for medical device development during the covid-19 pandemic. **Preprints**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20944/preprints202009.0577.v1>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ARAÚJO, R. A educação popular em saúde e o papel social do agente comunitário de saúde de uma comunidade ribeirinha. **Revista Amor Mundi**, 2(9), 3-15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.46550/amormundi.v2i9.142>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ARNOLD, K; MCDERMOTT, K. Test-potentiated learning: distinguishing between direct and indirect effects of tests. **Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition**, 39(3), 940-945, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1037/a0029199>. Acesso em: 12 ago. 2024.

AWAD, A., FINA, F., GOYANES, Á., GAISFORD, S., & BASIT, A. 3d printing: principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. **International Journal of Pharmaceutics**, 586, 119594, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>. Acesso em: 12 ago. 2024.

AYDIN, A., DEMIRTAS, Z., OK, M., ERKUS, H., CEBI, G., UYSAL, E., ... & ÜSTÜNDAĞ, C. 3d printing in the battle against covid-19. **Emergent Materials**, 4(1), 363-386. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00164-y>. Acesso em 12 ago. 2024.

BANDI MM. Electrocharged facepiece respirator fabrics using common materials. **Proc. R. Soc. A** 476: 20200469, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0469>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BANDI, M., ISHIZU, N., KANG, H. Electrocharging face masks with corona discharge treatment. **Proceedings of the Royal Society a Mathematical Physical**

**and Engineering Sciences**, 477(2251), 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0062>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BARBOSA, L. Projeto colaborativo para preparação e resposta após desastres. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Maceió, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.17012/entac2014.429>. Acesso em 12 ago. 2024.

BARDZELL, J; BARDZELL, S. What is "critical" about critical design? **SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 3297–3306, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2470654.2466451>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BELHOUIDEG, S. Impact of 3d printed medical equipment on the management of the covid19 pandemic. **The International Journal of Health Planning and Management**, 35(5), 1014-1022. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hpm.3009>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BENAS, J., HUANG, C. J., YAN, Z., LIANG, F., LI, P., LEE, C., ... & KUO, C. Nanofiber-based odor-free medical mask fabrication using polyvinyl butyral and eucalyptus anti odor agent. **Polymers**, 14(20), 4447, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14204447>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BENSON, D. The role of failure in successful design. **Acm Sigsoft Software Engineering Notes**, 11(1), 15, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/382300.382302>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BHARTI, N. & SINGH, S. Covid-19: the use of 3d printing to address ppe shortage during a pandemic—a safety perspective. **Acs Chemical Health & Safety**, 27(6), 335-340, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.chas.0c00089>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BHARTI, N; SINGH, S. Covid-19: the use of 3d printing to address ppe shortage during a pandemic—a safety perspective. **Acs Chemical Health & Safety**, 27(6), 335-340, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.0c00089>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BISHOP, E. & LEIGH, S. Using large-scale additive manufacturing as a bridge manufacturing process in response to shortages in personal protective equipment

during the covid-19 outbreak. **International Journal of Bioprinting**, 6(4), 51-58, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18063/ijb.v6i4.281>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BLACHÈRE, F. M., LEMONS, A. R., COYLE, J. P., DERK, R. C., LINDSLEY, W. G., BEEZHOLD, D. H., ... & NOTI, J. D. Face mask fit modifications that improve source control performance. **American Journal of Infection Control**, 50(2), 133-140, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2021.10.041>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BOCHNIA, J., BŁASIAK, M., & KOZIOR, T. A comparative study of the mechanical properties of fdm 3d prints made of pla and carbon fiber-reinforced pla for thin-walled applications. **Materials**, 14(22), 7062, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14227062>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BORGES, M. Factors associated with covid-19 vaccination among pregnant women in Rio de Janeiro city, Brazil. **Scientific Reports**, 13(1), 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44370-6>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BORRÀS-NOVELL, C., CAUSAPIÉ, M., MURCIA, M., DJIAN, D., & GARCÍA-ALGAR, Ó. Development of a 3d individualized mask for neonatal non-invasive ventilation. **International Journal of Bioprinting**, 8(2), 516. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18063/ijb.v8i2.516>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BOUCHRIKA, I., AIT-OUBELLI, L., RABIR, A., & HARRATHI, N. Mockup-based navigational diagram for the development of interactive web applications. **Proceedings of the 2013 International Conference on Information Systems and Design of Communication**, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2503859.2503864>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BRAMSTEDT, K. Covid-19 as a cause of death for catholic priests in italy : an ethical and occupational health crisis. **Health and Social Care Chaplaincy**, 8(2), 180-190. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1558/hssc.41620>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **Política Nacional de Atenção Básica / Ministério da Saúde**. Secretaria de Atenção à Saúde. 2012. 110 p. Disponível em: <http://189.28.128.100/dab/docs/publicacoes/geral/pnab.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção à Saúde. Departamento de Atenção Básica. **O trabalho do agente comunitário de saúde / Ministério da Saúde**, Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Atenção Básica. – Brasília : Ministério da Saúde, 2009. 84 p. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/cd09\\_05a.pdf](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/cd09_05a.pdf). Acesso em: 12 ago. 2024.

BUDHWANI, K., PIERCE, A., & ARORA, N. Attenuating pandemic supply shocks with 3d printed emergency use equipment, **PREPRINT** (Version 1). Research Square, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1229836/v1>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CALDEIRA, M. O papel dos agentes comunitários de saúde no programa saúde da família-psf: valorização e impacto na promoção da saúde. *Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar* - Issn 2675-6218, 5(1), e514892, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i1.4892>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CANTÚ, Evandro; MONTEZ, Carlos Barros. Protocolos, Tecnologias, Ferramentas e Laboratórios para Aplicações de Internet das Coisas. **Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware)**, 17. , 2020, Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020 . p. 7-15. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.5753/latinoware.2020.18602>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CESÁRIO, J. O impacto da internet das coisas (iot) na educação digital. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 06, Ed. 03, Vol. 11, pp. 33-47. Março de 2021. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/saude/impacto-da-internet>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CHATURVEDI, S., GUPTA, A., S, V., & BHAT, A. Design, usage and review of a cost effective and innovative face shield in a tertiary care teaching hospital during covid-19 pandemic. **Journal of Orthopaedics**, 21, 331-336. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jor.2020.07.003>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CHEN, Y., LIN, Y., KUNG, C., CHUNG, M., & YEN, I. Design and implementation of cloud analytics-assisted smart power meters considering advanced artificial

intelligence as edge analytics in demand-side management for smart homes. **Sensors**, 19(9), 2047, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19092047>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CHINBAT, T. Machine learning cryptography methods for iot in healthcare. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, 24(1), 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02548-6>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CHOPRA, J., ABIKAM, N., KIM, H., METCALF, C., WORSLEY, P., & CHEONG, Y. The influence of gender and ethnicity on facemasks and respiratory protective equipment fit: a systematic review and meta-analysis. **BMJ Global Health**, 6(11), e005537, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2021-005537>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CLIFTON, W., DAMON, A., & MARTIN, A. Considerations and cautions for three-dimensional-printed personal protective equipment in the covid-19 crisis. **3d Printing and Additive Manufacturing**, 7(3), 97-99, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0101>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CORREGER, E., MURIAS, T., CHACON, E., ESTRUGA, A., SALES, B., LÓPEZ-AGUILAR, J., ... & BLANCH, L. Interpretación de las curvas del respirador en pacientes con insuficiencia respiratoria aguda. **Medicina Intensiva**, 36(4), 294-306, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.medin.2011.08.005>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CORREIA, L., YASSIN, A., AYRES, D., LUCENA, R., PASSARINHO, M., & ARAGÃO, M. Atenção à saúde do portador de tuberculose: atuação do agente comunitário de saúde: revisão integrativa. **Research Society and Development**, 11(1), e4111124394, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24394>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CORTES, Arthur Rodriguez Gonzalez *et al.* Use of free CAD software for 3D printing individualized face masks based on face scans. **International journal of computerized dentistry**, v. 23, n. 2, p. 183-189, 2020. PMID: 32337516. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32337516/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

COTRIN, P., MOURA, W., GAMBARDELA-TKACZ, C. M., PELLOSO, F. C., SANTOS, L. d., CARVALHO, M. D. d. B., ... & FREITAS, K. M. S. d. Healthcare workers in brazil during the covid-19 pandemic: a cross-sectional online survey. **INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing**, 57, 004695802096371, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0046958020963711>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CROSS, Nigel. Design Thinking: Understanding How Designers Think and Work. Oxford: Berg, 2011. **Bloomsbury Collections**. Web. 13 Aug. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5040/9781474293884>. Acesso em: 12 ago. 2024.

CRUZ OLIVO, E. A. 3D Printing in Dental Science. **Revista Estomatología**, [S. l.], v. 30, n. 1, 2022. DOI: 10.25100/re.v30i1.11947. Disponível em: [https://estomatologia.univalle.edu.co/index.php/revista\\_estomatologia/article/view/11947](https://estomatologia.univalle.edu.co/index.php/revista_estomatologia/article/view/11947). Acesso em: 23 jul. 2024.

D'ANTONIO, G., SEGONDS, F., BEDOLLA, J., CHIABERT, P., & ANWER, N. A proposal of manufacturing execution system integration in design for additive manufacturing. **Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things. IFIP Advances in Information and Communication Technology**, vol 467, 761-770, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33111-9\\_69](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33111-9_69). Acesso em: 12 ago. 2024.

DALSGAARD, Peter; HALSKOV, Kim. Reflective design documentation. **Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference**. 2012. p. 428-437. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2317956.2318020>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DE LESEGNO, B. Viaris; BENACHI, A. Medicine 2.0. **Journal de gynecologie, obstetrique et biologie de la reproduction**, v. 45, n. 7, p. 659-660, 2016. Disponível em: <https://www.em-consulte.com/article/1075256/article/medecine-2-0>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DUA, K. Implementation of an efficient, portable and platform-agnostic cryptocurrency mining algorithm for internet of things devices. **arXiv preprint arXiv:2205.01646**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2205.01646>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DUARTE, R., MEDEIROS, L., ARAÚJO, M., CAVALCANTE, A., SOUZA, E., ALENCAR, O., ... & SILVA, M. Agentes comunitários de saúde frente à covid-19: vivências junto aos profissionais de enfermagem. **Enfermagem Em Foco**, 11(1.ESP), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21675/2357-707x.2020.v11.n1.esp.3597>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DUGDALE, C. M; WALENSKY, R. P. Filtration efficiency, effectiveness, and availability of n95 face masks for covid-19 prevention. **JAMA Internal Medicine**, 180(12), 1612, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2020.4218>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DWIVEDI, R., Mehrotra, D., & Chandra, S. Potential of Internet of Medical Things (IoMT) applications in building a smart healthcare system: A systematic review. **Journal of Oral Biology and Craniofacial Research**. J Oral Biol Craniofac Res. Mar-Apr;12(2):302-318. 2021. DOI: 10.1016/j.jobcr.2021.11.010 Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34926140/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

DZHODZHUA V, SERRANHEIRA F, LEITE ES, GRILLO MM, UVA AS. Visual demands and visual fatigue among ophthalmologists. **Rev Bras Med Trab**. 2017;15(3):209-216. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7104846/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

EDDELBUETTEL, D; BALAMUTA, J. Extending r with c++: a brief introduction to rcpp. **PeerJ Preprints** 5:e3188v1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.3188>. Acesso em: 12 ago. 2024.

EPPLER, J. M., HELIAS, M., MÜLLER, E., DIESMANN, M., & GEWALTIG, M. Pynest: a convenient interface to the nest simulator. **Frontiers in Neuroinformatics**, 2, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/neuro.11.012.2008>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ESPERA, A., VALINO, A., PALAGANAS, J., SOUZA, L., CHEN, Q., & ADVINCULA, R. 3d printing of a robust polyamide-12-carbon black composite via selective laser sintering: thermal and electrical conductivity. **Macromolecular Materials and Engineering**, 304(4), 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/mame.201800718>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FAFENROT, S., GRIMMELSMANN, N., WORTMANN, M., & EHRMANN, A. Three-dimensional (3d) printing of polymer-metal hybrid materials by fused deposition modeling. **Materials**, 10(10), 1199, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma10101199>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FAKHERPOUR, A., JAHANGIRI, M., & SEIF, M. Qualitative fitting characteristics of filtering face-piece respirators on iranian people. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, 18(2), 587-597, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00484-x>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FALTA PROTEÇÃO NA LINHA DE FRENTE. **Programa Bom Dia Rio**, Rede Globo em 02 abr. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/bom-dia-rio/video/bom-dia-rio-edicao-de-quinta-feira-02042020-8451618.ghtml>. Acesso em: 09 abr. 2020.

FANANI, L. User experience design for nutrition information applications using design thinking. MATICS: **Jurnal Ilmu Komputer Dan Teknologi Informatika (Journal of Computer Science and Information Technology)**, 15(1), 43-50, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18860/mat.v15i1.23025>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FONSECA, Adrilene; DE SOUSA, Denis; CHAGAS, Matheus; MAIA, Paulo Henrique M.. Lidando com Componentes Resistentes a Mudanças no Contexto de Internet das Coisas. Concurso De Trabalhos De Iniciação Científica Em Engenharia De Software(Ctic-Es) - **Congresso Brasileiro De Software: Teoria E Prática (CBSOFT)**, 11. , 2020, Evento Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020. p. 235-244. Disponível em: [https://doi.org/10.5753/cbsoft\\_estendido.2020.14631](https://doi.org/10.5753/cbsoft_estendido.2020.14631). Acesso em: 12 ago. 2024.

FONTOURA, Antonio Martiniano. A interdisciplinaridade e o ensino do design. In: **Projética Revista Científica de Design**. V.2, N.2, Universidade Estadual de Londrina, Dezembro, 2011. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/projetica/article/view/8855/9264>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FRAYLING, Christopher. Research in Art and Design. **Royal College of Art Research Papers**, Vol 1, No 1, 1993. Disponível em: <https://researchonline.rca.ac.uk/384/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FURNER, Jonathan. Definitions of “metadata”: a brief survey of international standards. **Journal of the Association for Information Science and Technology**. 2019;71(6). Disponível em: <https://doi.org/10.1002/asi.24295>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GAO, X., ZHANG, D., WEN, X., QI, S., SU, Y., & DONG, X. Fused deposition modeling with polyamide 1012. **Rapid Prototyping Journal**, 25(7), 1145-1154, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2018-0258>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GAWAI, D. M. J., LAKHADE, K., PATIL, R., & MESHRAM, R. Connected robotics for intelligent surveillance: an iot approach. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, 12(4), 714-719, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.59311>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GERAISSATE, E. Hipermetropia. **Arquivos Brasileiros De Oftalmologia**, 63(6), 499-501, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0004-27492000000600013>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GIERTHMUEHLEN, Mortimer *et al.* Evaluation and discussion of handmade face-masks and commercial diving-equipment as personal protection in pandemic scenarios. **PLoS one**, v. 15, n. 8, p. e0237899, 2020. Aug 19;15(8):e0237899. DOI: 10.1371/journal.pone.0237899. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7437915/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GOLDWASSERMICHAEL, H. Teaching an object-oriented CS1 -: with Python. 40(3), 42-46, 2008. **13th annual conference on Innovation and technology in computer science education (ITiCSE '08)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 42–46, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1597849.1384285>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GOMES, B., QUEIROZ, F., PEREIRA, P., BARBOSA, T., TRAMONTANA, M., AFONSO, F., ... & BORBA, A. In-house three-dimensional printing workflow for face shield during covid-19 pandemic. **Journal of Craniofacial Surgery**, 31(6), e652-e653. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/scs.00000000000006723>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GOODMAN, E., STOLTERMAN, E., & WAKKARY, R. Understanding interaction design practices. **SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1061–1070, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1978942.1979100>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GORDEEV, Evgeniy G.; GALUSHKO, Alexey S.; ANANIKOV, Valentine P. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling. **PloS one**, v. 13, n. 6, p. e0198370, 2018. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0198370>. Acesso em: 12 ago. 2024.

GRANT, K., ANDRUCHOW, J., CONLY, J., MAZURIK, L., ATKINSON, P., & LANG, E. Personal protective equipment preservation strategies in the covid-19 era: a narrative review. **Infection Prevention in Practice**, 3(3), 100146. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.infpip.2021.100146>. Acesso em 12 ago. 2024.

GREENHALGH, T., HINTON, L., FINLAY, T., MACFARLANE, A., FAHY, N., CLYDE, B., ... & CHANT, A. Frameworks for supporting patient and public involvement in research: systematic review and co-design pilot. **Health Expectations**, 22(4), 785-801, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/hex.12888>. Acesso em: 12 ago. 2024.

HALL, S., POLLER, B., BAILEY, C., GREGORY, S., CLARK, R., ROBERTS, P., ... & CROOK, B. Use of ultraviolet-fluorescence-based simulation in evaluation of personal protective equipment worn for first assessment and care of a patient with suspected high-consequence infectious disease. **Journal of Hospital Infection**, 99(2), 218-228, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2018.01.002>. Acesso em: 12 ago. 2024.

HAN, S., CHA, K., YOO, S., & HAN, J. Comparison of n95 respiratory mask fit testing. **Korean Journal of Healthcare-Associated Infection Control and Prevention**, 26(2), 108-114, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14192/kjicp.2021.26.2.108>. Acesso em: 12 ago. 2024.

HASSAN, A., NAHAR, H., SHAH, W., ABD-AZIZ, A., SAHIRAN, S., BAHAMAN, N., ... & SIDIK, M. Performance evaluation of raspberry pi as an iot edge signal

processing device for a real-time flash flood forecasting system. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, 13(10), 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2022.01310100>. Acesso em: 12 ago. 2024.

HEALY, A., FUENMAYOR, E., DORAN, P., GEEVER, L., HIGGINBOTHAM, C., & LYONS, J. Additive manufacturing of personalized pharmaceutical dosage forms via stereolithography. **Pharmaceutics**, 11(12), 645, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11120645>. Acesso em: 12 ago. 2024.

HIRVE, Ashvini Shrikrushna; JAISWAL, Siddhant Sanjay. Vision safe (esp32 cam-based eyeglass monitoring solution with eyewear detection system). **International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology**, 56-64, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-15010>. Acesso em: 12 ago. 2024.

IMBRIE-MOORE AM, PARK MH, ZHU Y, PAULSEN MJ, WANG H, WOO YJ. Quadrupling the N95 Supply during the COVID-19 Crisis with an Innovative 3D-Printed Mask Adaptor. **Healthcare (Basel)**. 2020 Jul 23;8(3):225. doi: 10.3390/healthcare8030225. PMID: 32717841; PMCID: PMC7551339. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32717841/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ISHACK, S; LIPNER, S. Applications of 3d printing technology to address covid-19–related supply shortages. **The American Journal of Medicine**, 133(7), 771-773, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2020.04.002>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ISO/TS 16976-2 / LEUI PUC-Rio. DADOS ANTROPOMÉTRICOS **Technical Specification Respiratory protective devices – Human Factors – Part 2: Anthropometrics** Disponível em: <https://www.iso.org/standard/81705.html>. Acesso em: 12 ago. 2024.

JACKSON, K. 3d printers in hospitals: bacterial contamination of common and antimicrobial 3d-printed material. **bioRxiv 2024**. 03.30.587440, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2024.03.30.587440>. Acesso em: 12 ago. 2024.

JAMIL, I; HOSSAIN, A. Do governance capacity and legitimacy affect citizens' satisfaction with covid-19 management? some evidence from south asia. **International Journal of Public Sector Management**, 35(6), 676-691, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ijpsm-03-2022-0087>. Acesso em: 12 ago. 2024.

JARDIM, T; LANCMAN, S. Aspectos subjetivos do morar e trabalhar na mesma comunidade: a realidade vivenciada pelo agente comunitário de saúde. **Interface - Comunicação Saúde Educação**, 13(28), 123-135, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1414-32832009000100011>. Acesso em: 12 ago. 2024.

JIA, Z; CHUNG, J. Mockup-driven fast-prototyping methodology for web application development. **Software: Practice and Experience**, 33(13), 1251-1272, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/spe.547>. Acesso em: 12 ago. 2024.

JÚNIOR, E., SILVA, A., SOUSA, C., JOSINO, L., & BRANCO, L. Didática e projeto de produto 4: a coerência de um desafio metodológico colaborativo. p. 2689-2701 . In: **Anais do 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design** [= Blucher Design Proceedings, v. 9, n. 2]. São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/despro-ped2016-0230. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/despro-ped2016-0230>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KARUPPASAMY, Karunakaravel; OBUCHOWSKI, Nancy. Comparison of fit for sealed and loose-fitting surgical masks and N95 filtering facepiece respirators. **Annals of work exposures and health**, v. 65, n. 4, p. 463-474, 2021. DOI: 10.1093/annweh/wxaa125. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33458738/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KISTMANN, Virginia Borges. Interdisciplinaridade: questões quanto à pesquisa e à inovação em design. **Estudos em Design | Revista (online)**. Rio de Janeiro: v. 22 | n. 3 [2014], p. 81 – 99 | ISSN 1983-196X. Disponível em: <https://estudosemdesign.emnuvens.com.br/design/article/view/122>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KORBEL, C. Managing copyright in digital collections: a focus on creative commons licences. **Dalhousie Journal of Interdisciplinary Management**, 14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5931/djim.v14i0.7852>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KOSKINEN, I., ZIMMERMAN, J., BINDER, T., REDSTRÖM, J., & WENSVEEN, S. Design research through practice: from the lab, field, and showroom. **Ieee Transactions on Dependable and Secure Computing**, 56(3), 262-263, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tpc.2013.2274109>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KUMAR, R; RAJASEKARAN, M. An iot based patient monitoring system using raspberry pi. **International Conference on Computing Technologies and Intelligent Data Engineering (ICCTIDE'16)**, Kovilpatti, India, 2016, pp. 1-4, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icctide.2016.7725378>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KUNOVJANEK, M; WANKMÜLLER, C. An analysis of the global additive manufacturing response to the covid-19 pandemic. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 32(9), 75-100, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/jmtm-07-2020-0263>. Acesso em: 12 ago. 2024.

KWONG LH, WILSON R, KUMAR S, CRIDER YS, REYES SANCHEZ Y, REMPEL D, PILLARISSETTI A. Review of the Breathability and Filtration Efficiency of Common Household Materials for Face Masks. **ACS Nano**. 2021 Apr 27;15(4):5904-5924. doi: 10.1021/acsnano.0c10146. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8900768/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

LAFUENTE D, COHEN B, FIORINI G, GARCÍA A, BRINGAS M, MORZAN E, *et al*. Introduction to Machine Learning for Chemists: An Undergraduate Course Using Python Notebooks for Visualization, Data Processing, Data Analysis, and Data Modeling. **ChemRxiv**. 2021; doi:10.26434/chemrxiv.13749199.v1. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/349184628\\_Introduction\\_to\\_Machine\\_Learning\\_for\\_Chemists\\_An\\_Undergraduate\\_Course\\_Using\\_Python\\_Notebooks\\_for\\_Visualization\\_Data\\_Processing\\_Data\\_Analysis\\_and\\_Data\\_Modeling](https://www.researchgate.net/publication/349184628_Introduction_to_Machine_Learning_for_Chemists_An_Undergraduate_Course_Using_Python_Notebooks_for_Visualization_Data_Processing_Data_Analysis_and_Data_Modeling). Acesso em: 12 ago. 2024.

LANGENBUCHER, A., EPPIG, T., CAYLESS, A., GATZIOUFAS, Z., WENDELSTEIN, J., HOFFMANN, P., ... & SZENTMÁRY, N. Simulation of corneal imaging properties for near objects. **Ophthalmic and Physiological Optics**, 41(5), 1152-1160, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/opo.12861>. Acesso em: 12 ago. 2024.

LEE, K. P., YIP, J., KAN, C. W., CHIOU, J., & YUNG, K. F. Reusable face masks as alternative for disposable medical masks: factors that affect their wear-comfort. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17(18), 6623, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17186623>. Acesso em: 12 ago. 2024.

LIN, Y; CHEN, C. Characterization of small-to-medium head-and-face dimensions for developing respirator fit test panels and evaluating fit of filtering facepiece respirators with different face seal design. **Plos One**, 12(11), e0188638, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188638>. Acesso em: 12 ago. 2024.

LONG, Li. Research on status information monitoring of power equipment based on Internet of Things. **International Conference on Clean Energy and Power Generation Technology**. Set. 10–12, 2021, Shanghai, China. Energy Reports, V8, Pages 281-286. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.018>. Acesso em: 12 ago. 2024.

LOPES, T., SILVA, D., MELO, M., BATISTA, M., & BRITO, M. Análise da função de elo do agente comunitário de saúde frente a sua tendência de descaracterização. **Revista Multidisciplinar em Saúde**, V. 4, Nº 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.51161/conasf/14446>. Acesso em: 12 ago. 2024.

LUCERO, A., DESJARDINS, A., NEUSTAEDTER, C., HÖÖK, K., HASSENZAHN, M., & CECCHINATO, M. A Sample of One: First-Person Research Methods in HCI. **Designing Interactive Systems Conference 2019 Companion (DIS '19 Companion)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 385–388, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3301019.3319996>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MACIEL, Fernanda Beatriz Melo *et al.* Agente comunitário de saúde: reflexões sobre o processo de trabalho em saúde em tempos de pandemia de Covid-19. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 25, p. 4185-4195, 2020. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-812320202510.2.28102020>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MAHER, A., ABDO, M., & ABDO, H. Nanotechnology-enhanced face masks: future scopes and perspectives. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2022,

1-13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/1497910>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MANERO, A., SMITH, P., KOONTZ, A., DOMBROWSKI, M., SPARKMAN, J., COURBIN, D., ... & CHI, A. Leveraging 3d printing capacity in times of crisis: recommendations for covid-19 distributed manufacturing for medical equipment rapid response. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17(13), 4634. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17134634>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MATÚŠ, M., BECHNÝ, V., JOCH, R., DRBÚL, M., HOLUBJÁK, J., CZÁN, A., ... & ŠAJGALÍK, M. Geometric accuracy of components manufactured by sls technology regarding the orientation of the model during 3d printing. **Manufacturing Technology**, 23(2), 233-240, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21062/mft.2023.027>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MELO, João Victor Correia de; SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos; FRAJHOF, Leonardo; KAUFFMANN, Aline Reis. O design em parceria e o enfrentamento aos desafios da pandemia de Covid-19. p. 405-420 . In: **Anais do 9º Congresso Internacional MXRIO DESIGN Conference 2021**. São Paulo: Blucher, 2022. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/mxriodc2021-28. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/37312>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MENBERU, T., MEKONNEN, R., MANAYE, Y., KEBEDE, M., SOLOMON, Y., SEMA, A., ... & AYALEW, A. Preparedness toward covid-19 pandemics and associated factors among health care workers in dire dawa hospitals, eastern ethiopia: a facility-based cross-sectional study. **Sage Open Medicine**, 9, 205031212110549. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/20503121211054970>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MIEDZIŃSKA, D. Selection of material model of chosen photocurable resin for application in finite element analyses. **Technical Sciences**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31648/ts.6134>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MISHRA, Sanjeeb; SINGH, Neeraj Kumar; ROUSSEAU, Vijayakrishnan. System on chip interfaces for low power design. **Morgan Kaufmann**, 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/book/9780128016305/system-on-chip-interfaces-for-low-power-design>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MOLINA, A. Project 1000 x 1000: centrifugal melt spinning for distributed manufacturing of n95 filtering facepiece respirators. **arXiv preprint** arXiv:2004.13494, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2004.13494>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MONTEIRO, V., SILVA, I., & FREITAS, T. Análise de tecnologias da iot para uso em logística humanitária e busca e salvamento de pessoas: uma revisão da literatura recente. **Anais do VCIMATech**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21452/issn2447-5378.v1i5.2018p.10620>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MOULLIN, J., DICKSON, K., STADNICK, N., RABIN, B., & AARONS, G. Systematic review of the exploration, preparation, implementation, sustainment (epis) framework. **Implementation Science**, 14(1), 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13012-018-0842-6>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MURUGAN, Sakthivel; VINODH, Sekar. Prioritization and deployment of design for additive manufacturing strategies to an automotive component. **Rapid Prototyping Journal**, 29(10), 2193-2215, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/rpj-02-2023-0051>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MUHAMMAD, N., ARIYANTO, E., & YUDO, Y. A. S. Improved face detection accuracy using haar cascade classifier method and esp32-cam for iot-based home door security. **JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian Dan Pembelajaran Informatika)**, 8(1), 154-161, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29100/jipi.v8i1.3365>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MUKHAMEDYAROVA, A., RAKHYPBEKOV, T., DAULETYAROVA, M., ZHUNUSSOVA, D., TSIGENGAGEL, O., & KHISMETOVA, Z. Measures to strengthen the role of primary care nurses during the covid-19 pandemic: a concept analysis. **Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences**, 9(F), 534-540, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3889/oamjms.2021.7204>. Acesso em: 12 ago. 2024.

NAGPAL, G., SINGH, G., SINGH, J., & YADAV, N. Facial detection and recognition using opencv on raspberry pi zero. **International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)**, Greater Noida, India, 2018, pp. 945-950. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icacccn.2018.8748389>. Acesso em: 12 ago. 2024.

NILASAROYA, A., KOP, A., COLLIER, R., KENNEDY, B., KELSEY, L., POLLARD, F., ... & MORRISON, D. Establishing local manufacture of ppe for healthcare workers in the time of a global pandemic. **Heliyon**, 9(2), e13349, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13349>. Acesso em: 12 ago. 2024.

NIRANJAN, Y.C.; CHANNABASAVANNA, S.G.; KRISHNAPILLAI, S.; VELMURUGAN, R.; KANNAN, A.R.; G. MOHAN, D.; KARGANROUDI, S.S. The Unprecedented Role of 3D Printing Technology in Fighting the COVID-19 Pandemic: A Comprehensive Review. **Materials** 2022, 15, 6827, 2022. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202208.0434/v1#>. Acesso em 12 ago. 2024.

NOVAK, James I.; LOY, Jennifer. A critical review of initial 3D printed products responding to COVID-19 health and supply chain challenges. **Emerald Open Research**, v. 2, 2020. DOI: 10.35241/emeraldopenres.13697.1. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7292530/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

NUNES, N., RODRIGUEZ, A., & CINACCHI, G. Health and social care inequalities: the impact of covid-19 on people experiencing homelessness in Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 18(11), 5545, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph18115545>. Acesso em: 12 ago. 2024.

O'KELLY, E., ARORA, A., PIROG, S., WARD, J., & CLARKSON, P. J. Comparing the fit of n95, kn95, surgical, and cloth face masks and assessing the accuracy of fit checking. **Plos One**, 16(1), e0245688, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245688>. Acesso em: 12 ago. 2024.

OBAID, O. I; SALMAN, S. A. Security and privacy in iot-based healthcare systems: a review. **Mesopotamian Journal of Computer Science**, 29-40, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.58496/mjcs/2022/007>. Acesso em: 12 ago. 2024.

OGUNYEMI, A., LAMAS, D., LÁRUSDÓTTIR, M., & LOIZIDES, F. A systematic mapping study of hci practice research. **International Journal of Human-Computer Interaction**, 35(16), 1461-1486, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1541544>. Acesso em: 12 ago. 2024.

PADMANABAN, N., KONRAD, R., STRAMER, T., COOPER, E., & WETZSTEIN, G. Optimizing virtual reality for all users through gaze-contingent and adaptive focus displays. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 114(9), 2183-2188, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1617251114>. Acesso em: 12 ago. 2024.

PALMEIRA, L., KEUSEN, A., NETO, E., RIBEIRO, R., BARRETO, S., LEAO, O., ... & CAVALCANTI, M. Psychological impact of the covid-19 pandemic on families of people with severe mental disorders participating in community peer support groups in brazil. **Trends in Psychology**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43076-022-00195-2>. Acesso em: 12 ago. 2024.

PAN, J., HARB, C., LENG, W., & MARR, L. C. Inward and outward effectiveness of cloth masks, a surgical mask, and a face shield. **medRxiv**, 2020. 11.18.20233353, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2020.11.18.20233353>. Acesso em: 12 ago. 2024.

PAN, Xiangbin *et al.* Assessment of use and fit of face masks among individuals in public during the COVID-19 pandemic in China. **JAMA network open**, v. 4, n. 3, p. e212574-e212574, 2021. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2021.2574. Disponível em: [https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2777405#google\\_vignette](https://jamanetwork.com/journals/jamanetworkopen/fullarticle/2777405#google_vignette). Acesso em: 12 ago. 2024.

PARK, S., SHOU, W., MAKATURA, L., MATUSIK, W., & FU, K. 3d printing of polymer composites: materials, processes, and applications. **Matter**, 5(1), 43-76. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>. Acesso em 12 ago. 2024.

RADFAR, P., BAZAZ, S., MIRAKHORLI, F., & WARKIANI, M. The role of 3d printing in the fight against covid-19 outbreak. **Journal of 3d Printing in Medicine**, 5(1), 51-60. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2217/3dp-2020-0028>. Acesso em: 12 ago. 2024.

RAJA, S, RAJAN, A. Challenges and opportunities in additive manufacturing polymer technology: a review based on optimization perspective. **Advances in Polymer Technology**, 2023, 1-18. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2023/8639185>. Acesso em: 12 ago. 2024.

RAUCH, Erwin; DALLASEGA, Patrick; MATT, Dominik. Sustainable production in emerging markets through distributed manufacturing systems (dms), **Journal of Cleaner Production**, 135:127-138, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.106>. Acesso em: 12 ago. 2024.

REDE DE SOLIDARIEDADE, **Programa Bom Dia Rio**, Rede Globo em 26 mar. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/bom-dia-rio/video/bom-dia-rio-edicao-de-quinta-feira-26032020-8433127.ghtml>. Acesso em: 28 mar. 2020.

RENDEKI, S., NAGY, B., BENE, M., PENTEK, A., TOTH, L., SZÁNTÓ, Z., ... & MARÓTI, P. An overview on personal protective equipment (ppe) fabricated with additive manufacturing technologies in the era of covid-19 pandemic. **Polymers**, 12(11), 2703, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12112703>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ROCHA, R. G., ATUN, R., MASSUDA, A., RACHE, B., SPINOLA, P., NUNES, L., ... & CASTRO, M. C. Effect of socioeconomic inequalities and vulnerabilities on health-system preparedness and response to covid-19 in brazil: a comprehensive analysis. **The Lancet Global Health**, 9(6), e782-e792. 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(21\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(21)00081-4). Acesso em: 12 ago. 2024.

RODRIGUES, N. Design study of a temporary, emergencial and sustentable shelter in light wood framing and bamboo. **Revista De Gestão Social E Ambiental**, 18(3), e04548. 2023. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-017>

RODRÍGUEZ, A., ESCANILLA, D., CAROCA, L., ALBORNOZ, C., MARSHALL, P., MOLENBROEK, J., ... & CASTELLUCCI, I. Level of match between facial dimensions of chilean workers and respirator fit test panels proposed by lanl and niosh. **International Journal of Industrial Ergonomics**, 80, 103015, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.103015>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ROWAN, N. & LAFFEY, J. Unlocking the surge in demand for personal and protective equipment (ppe) and improvised face coverings arising from coronavirus disease (covid-19) pandemic – implications for efficacy, re-use and sustainable waste management. **The Science of the Total Environment**, 752, 142259. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142259>. Acesso em: 12 ago. 2024.

RUNDE, Daniel P. *et al.* The “double eights mask brace” improves the fit and protection of a basic surgical mask amidst COVID-19 pandemic. **Journal of the American College of Emergency Physicians Open**, v. 2, n. 1, p. e12335, 2021. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1002/emp2.12335>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SAAID, M. F., YASSIN, A. I. M., & TAHIR, N. M. Automated monitoring and controlling ph levels for hydroponics cultivation technique. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, 18(3), 1236, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1236-1243>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SAHIL, R., DEEPAK, K., KASHI, P., SHIVANI, R., & PRADEEP, S. Y. Wifirebot: smart esp32 based surveillance car with temperature and fire detectio. **I-Manager’s Journal on Embedded Systems**, 12(1), 32, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.26634/jes.12.1.20310>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SALMI, M., AKMAL, J., PEI, E., WOLFF, J., JARIBION, A., & KHAJAVI, S. 3d printing in covid-19: productivity estimation of the most promising open source solutions in emergency situations. **Applied Sciences**, 10 (11), 4004, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10114004>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SAMPAIO, T., LEVINO, N., BITTENCOURT, I., & MONTE, M. Ensino remoto emergencial na pandemia: uma análise a partir da revisão bibliométrica de literatura. **Revista Interdisciplinar De Ciência Aplicada**, 6(11), 10-21. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18226/25253824.v6.n11.02>. Acesso em 12 ago. 2024.

SANTIAGO, Elida Belquice Araújo; NORONHA, Raquel Gomes; ZANDOMENEGHI, Ana Lucia Alexandre de Oliveira. Metodologias colaborativas do design para modelagem plana do vestuário. **Revista de Ensino em Artes, Moda e Design**, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 92–108, 2020. DOI: 10.5965/25944630422020092. Disponível em: <https://periodicos.udesc.br/index.php/ensinarmode/article/view/17049>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos *et al.* Confronting COVID-19-The case of PPE and Medical Devices production using Digital Fabrication at PUC-Rio. **Strategic Design Research Journal**, v. 13, n. 3, p. 488-501, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/347915807\\_Confronting\\_COVID-19\\_-The\\_case\\_of\\_PPE\\_and\\_Medical\\_Devices\\_production\\_using\\_Digital\\_Fabrication\\_at\\_PUC-Rio](https://www.researchgate.net/publication/347915807_Confronting_COVID-19_-The_case_of_PPE_and_Medical_Devices_production_using_Digital_Fabrication_at_PUC-Rio). Acesso em: 12 ago. 2024.

SEBOLD, L., SILVA, F., SILVEIRA, B., KAGAOCHI, T., AMANTE, L., & GIRONDI, J. Protagonismo dos agentes comunitários de saúde nas ações de cuidado a pessoa obesa. **Enfermagem Em Foco**, 13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21675/2357-707x.2022.v13.e-202217>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SEED, G. M. **An introduction to object-oriented programming in c++**. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3378-0>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SEKHAR, S. C., PABBA, M., TALLAM, A., FATIMA, S., BUTTI, S. K., VANI, B., ... & SUNDERGOPAL, S. Design and development of an affordable and washable multilayered mask with a recycled hydrophobic layer for preventive health care. **PREPRINT** (Version 1), 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2120324/v1>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SILVA, F., SILVA, F., & SOBREIRA, M. O papel do agente comunitário de saúde (acs) na saúde mental na atenção básica: revisão da literatura. **Temas Em Saúde**, 21(1), 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/213319.21.1-9>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SILVEIRA, V., ALENCAR, R., BELÉM, J., CARRILHO, C., & MAIA, E. Processo de trabalho dos agentes comunitários de saúde em territórios de vulnerabilidade. **Revista De Atenção À Saúde**, 20(72), 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.13037/2359-4330.8456>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SINHA, M., BOURGEOIS, F., & SORGER, P. Personal protective equipment for covid-19: distributed fabrication and additive manufacturing. **American Journal of Public Health**, 110(8), 1162-1164, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2105/ajph.2020.305753>. Acesso em: 12 ago. 2024.

STANNARD, C., FREEMAN, C., STRAWDERMAN, L., MOORE, M., NEWHAUSER, W., BURCH, R., ... & SAUCIER, D. Evaluating the fit-effectiveness of fabric-based reusable face masks on 3d printed niosh headforms. **Textile Research Journal**, 92(19-20), 3619-3628, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00405175221089287>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SUREKA, Binit; GARG, Mahendra Kumar; MISRA, Sanjeev. N95 respirator and surgical mask in the pandemic of COVID-19. **Annals of Thoracic Medicine**, v. 15, n. 4, p. 247, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7720739/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

SWENNEN, G., POTTEL, L., HAERS, P. Custom-made 3d-printed face masks in case of pandemic crisis situations with a lack of commercially available ffp2/3 masks. **International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, 49(5), 673-677, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.03.015>. Acesso em: 12 ago. 2024.

TAKEMOTO, M. L. S., MENEZES, M. d. O., ANDREUCCI, C. B., NAKAMURA-PEREIRA, M., AMORIM, M. M. R., KATZ, L., ... & KNOBEL, R. The tragedy of covid-19 in brazil: 124 maternal deaths and counting. **International Journal of Gynecology & Obstetrics**, 151(1), 154-156. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ijgo.13300>. Acesso em 12 ago. 2024.

TAORMINA, G., SCIANCALEPORE, C., BONDIOLI, F., & MESSORI, M. Special resins for stereolithography: in situ generation of silver nanoparticles. **Polymers**, 10(2), 212, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym10020212>. Acesso em: 12 ago. 2024.

TAREQ, M., RAHMAN, T., HOSSAIN, M., & DORRINGTON, P. Additive manufacturing and the covid-19 challenges: an in-depth study. **Journal of Manufacturing Systems**, 60, 787-798, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.021>. Acesso em: 12 ago. 2024.

TARFAOUI, M., NACHTANE, M., GODA, I., QURESHI, Y., & BENYAHIA, H. Additive manufacturing in fighting against novel coronavirus covid-19. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 110(11-12), 2913-2927, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06077-0>. Acesso em: 12 ago. 2024.

TORRES, J., ABO, E., & SUGAR, A. Effects of annealing and acetone vapor smoothing on the tensile properties and surface roughness of fdm printed abs components. **Rapid Prototyping Journal**, 29(5), 921-934, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/rpj-03-2022-0088>. Acesso em: 12 ago. 2024.

TÜZÜN, G. Providing a knowledge-based design catalog as an approach to support the development of design for additive manufacturing skills. **Design Society**, 4, 1869-1878, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/pds.2024.189>. Acesso em: 12 ago. 2024.

VENANCIO, L; ROCHA, B. Impressão 3d e processo de projeto paramétrico aplicado ao design emergencial. p. 269-274 . In: . São Paulo: **Blucher**, 2017. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/sigradi2017-043. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/27638>. Acesso em 12 ago. 2024.

VILLELA, E., ALMEIDA, W., NASCIMENTO, W., BASTOS, L., DUTRA, G., & OLIVEIRA, F. A comunicação em saúde aproximando trabalhadores da saúde e estudantes de medicina: uma estratégia para o controle da dengue no Brasil. **New Trends in Qualitative Research**, 151-161, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36367/ntqr.3.2020.151-161>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WACHARAMANOTHAM, C., YANG, F., PU, X., SARMA, A., & PADILLA, L. Transparent practices for quantitative empirical research. **CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22)**. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 122, 1–5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3491101.3503760>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WANG, B; CIUFFREDA, K. Depth-of-focus of the human eye in the near retinal periphery. **Vision Research**, Volume 44, Issue 11, Pages 1115-1125, ISSN 0042-6989, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.01.001>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WATSON, C; KHARRUFA, A. Hci - h is also for hazard: using hazop to identify undesirable consequences in socio-technical systems. **4th ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies (COMPASS '21)**. Association for

Computing Machinery, New York, NY, USA, 230–242. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3460112.3471959>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WELCH JL, XIANG J, MACKIN SR, *et al.* Inactivation of Severe Acute Respiratory Coronavirus Virus 2 (*SARS-CoV-2*) and Diverse RNA and DNA Viruses on Three-Dimensionally Printed Surgical Mask Materials. **Infection Control & Hospital Epidemiology**. 2021;42(3):253-260. doi:10.1017/ice.2020.417. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32783787/>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WISDOM, C. Point-of-need additive manufacturing in austere arctic environments: an evaluation of medical logistics requirements and capabilities demonstration. **Bioengineering**, 11(3), 232, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11030232>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION *et al.* **Advice on the use of masks in the context of COVID-19: interim guidance**, 5 June 2020. World Health Organization, 2020a. Disponível em: <https://reliefweb.int/report/world/advice-use-masks-context-covid-19-interim-guidance-5-june-2020>. Acesso em: 12 ago. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION *et al.* **Mask use in the context of COVID-19: interim guidance**, 1 December 2020. World Health Organization, 2020b. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/337199>. Acesso em: 12 ago. 2024.

YAMAKI, Roberto Takao; CORREIA DE MELO, João Victor; SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos; KAUFFMANN, Aline Reis. **Desenvolvimento de máscara de proteção contra a COVID-19 utilizando manufatura aditiva**. 14º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Dezembro 2022. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/designproceedings/ped2022/7791844.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZHANG, B., SEONG, B., NGUYEN, V., & BYUN, D. 3d printing of high-resolution pla-based structures by hybrid electrohydrodynamic and fused deposition modeling techniques. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, 26(2), 025015, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/2/025015>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZHANG, P.C., AHMED, Y., HUSSEIN, I.M. *et al.* Optimization of community-led 3D printing for the production of protective face shields. **3D Print Med** 6, 35. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s41205-020-00089-y>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZHUANG, Z., SLICE, D., BENSON, S., LYNCH, S., & VISCUSI, D. Shape analysis of 3d head scan data for u.s. respirator users. **Eurasip Journal on Advances in Signal Processing**, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2010/248954>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZHUANG, Z; BRADTMILLER, B. Head-and-face anthropometric survey of u.s. respirator users. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, 2(11), 567-576, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15459620500324727>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZI, X., CHEN, C., WANG, X., WANG, P., ZHANG, X., & ZHOU, K. Spheroidisation of tungsten powder by radio frequency plasma for selective laser melting. **Materials Science and Technology**, 34(6), 735-742. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1410955>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZIMMERMAN, John; FORLIZZI, Jodi; EVENSON, Shelley. Research through design as a method for interaction design research in HCI. **Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems**. 2007. p. 493-502. DOI: Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1240624.1240704>. Acesso em: 12 ago. 2024.

ZOHREHVANDI, S. A heuristic scheduling algorithm in cloud-based additive manufacturing; an approach to using critical chain buffer management technique. **Preprints**, 2024041569, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.20944/preprints202404.1569.v1>. Acesso em: 12 ago. 202

## **Apêndices**

		RESULTADOS COMPARADOS										
		TESTE ZERO	TESTE OTO PFF2	TESTE ALGODÃO	TESTE AURA 3M	TESTE CIRÚRGICA	TESTE OTO CIRÚRGICA	TESTE ÉPA	TESTE KN95	TESTE PFF2	TESTE 3M CONCHA	TESTE CIRÚRGICA x4
FLOW	Min. (LPM)	-34,42	-22,18	-25,73	-25,15	-27,15	-25,62	-24,46	-17,51	-21,27	-24,54	-13,67
	Máx. (LPM)	32,17	20,68	24,25	23,95	25,64	24,265	23,28	17,72	20,77	23,68	14,7
	Avg. (LPM)	0,01	0,075	-0,025	0,005	-0,055	0,04	0,085	0,07	0,11	0,08	0,15
AIRWAY PRESSURE	Min. (cmH2O)	5,8	5,8	5,8	5,9	5,9	5,9	5,7	5,98	5,6	5,9	5,8
	Máx. (cmH2O)	12,1	11,7	12	11,9	12,1	12	11,9	11,5	11,7	11,9	10,9
	Avg. (cmH2O)	7,9	7,8	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,95	7,8	7,9	7,8
VOLUME	Min. (mL)	-7,2	0,1	-8,8	0,45	-10,4	-2,8	2,5	5,12	4	-1,2	4,3
	Máx. (mL)	279,2	256,8	266,8	268,35	268,9	270,8	267,6	242,3	256,7	267	217,3
	Avg. (mL)	87,3	83,55	82,9	86,8	82,4	86,9	87,8	85,48	86,55	87,55	80,75
BREATH PARAMETERS												
TIDAL VOLUME	mL	273,47	255,53	264,60	266,73	267,33	267,67	266,37	241,52	254,97	265,47	215,83
MINUTE VOLUME	LPM	3,29	3,07	3,19	3,20	3,21	3,21	3,20	2,91	3,07	3,20	2,60
PEAK INSPIRATORY FLOW	LPM	31,24	20,48	23,53	23,50	24,64	24,12	22,35	17,14	19,97	22,89	14,18
PEAK EXPIRATORY FLOW	LPM	33,51	21,85	25,32	24,55	26,54	24,65	23,58	17,05	20,61	23,81	13,04
BASE FLOW	LPM	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
MEAN AIRWAY PRESSURE	cmH2O	7,9	7,8	7,8	7,83	7,90	7,83	7,83	7,9	7,80	7,90	7,90
PEAK INSPIRATORY PRESSURE	cmH2O	12,1	11,7	11,7	11,9	12,07	11,9	11,87	11,5	11,63	11,8	11,8
PEEP	cmH2O	5,9	5,9	5,9	5,9	5,97	5,9	5,9	5,99	5,9	5,9	5,9
INSPIRATORY PAUSE PRESSURE	cmH2O	12	11,5	11,5	11,9	12	11,9	11,8	11,3	11,47	11,73	11,73
MIN. AIRWAY PRESSURE	cmH2O	5,9	5,87	5,87	5,90	6,00	5,90	5,90	6	5,90	5,90	5,90
ASSIST. PRESSURE	cmH2O	0	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
TI - INSPIRATORY TIME	sec	1,59	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	1,62	1,62	1,61	1,61	1,61
TE - EXPIRATORY TIME	sec	3,40	3,38	3,38	3,39	3,38	3,39	3,38	3,35	3,37	3,36	3,36
INSPIRATORY HOLD TIME	sec	0,49	0,02	0,02	0,04	0,15	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
EXPIRATORY HOLD TIME	sec	2,40	1,76	1,76	1,87	1,93	1,87	1,81	1,45	1,64	1,79	1,79
I: E RATIO	1:___	2,13	2,10	2,10	2,11	2,10	2,11	2,09	2,08	2,09	2,08	2,08
RESPIRATORY RATE	BPM	-12	-12	-12	-12,00	-12,03	-12,00	-12,00	-12,04	-12,03	-12,07	-12,07
COMPLIANCE	ml/cmH2O	47,83	47,33	47,33	45,60	47,47	45,60	46,57	46,23	46,57	47,07	47,07
O2 PERCENT	%	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,8	-9,9	-9,9	-9,9
BAROMETRIC PRESSURE	mmHg	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LOW PRESSURE	Min. (cmH2O)	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4
	Máx. (cmH2O)	0,3	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	Avg. (cmH2O)	-0,1	0	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0	0
HIGH PRESSURE	Min. (PSI)	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
	Máx. (PSI)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
	Avg. (PSI)	-0,05	-0,05	-0,05	0,06	-0,04	0,06	-0,04	0,05	-0,04	-0,04	-0,04
OXYGEN	Min. (%)	-9,9	-9,8	-9,8	-9,9	-9,9	-9,9	-9,9	-9,8	-9,9	-9,9	-9,9
	Máx. (%)	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8
	Avg. (%)	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8
PRESSÃO	cm H2O	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12	6/12
Vte	ml	305	277	289	292	295	289	285	258	272	285	221
Vazão	l/min	0,4	0,4	0,3	0,8	0,4	0,3	0,3	0,5	0,7	0,8	0,5
Vent. Min.	l/min	3,7	3,3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4	3,1	3,3	3,4	2,6
FR	RPM	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Relação	I : E	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01	01:02:01
ΔP (PIP - PIPzero)	cmH2O	12,1	-0,4	-0,4	-0,2	-0,03	-0,2	-0,23	-0,6	-0,47	-0,3	-0,3
ΔT SUBIDA INSP (TI - Insp.HoldTime)		1,10	1,59	1,59	1,57	1,46	1,57	1,58	1,6	1,59	1,58	1,58
ΔT DESCIDA INSP TE - Exp.HoldTime)		0,99	1,62	1,62	1,51	1,45	1,51	1,57	1,9	1,73	1,57	1,57
			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>

Tabela 4.2 - Valores finais comparados entre todos os testes. Fonte: Autor

**PESQUISA EM EPI - ALTERNATIVAS E VERSÕES**

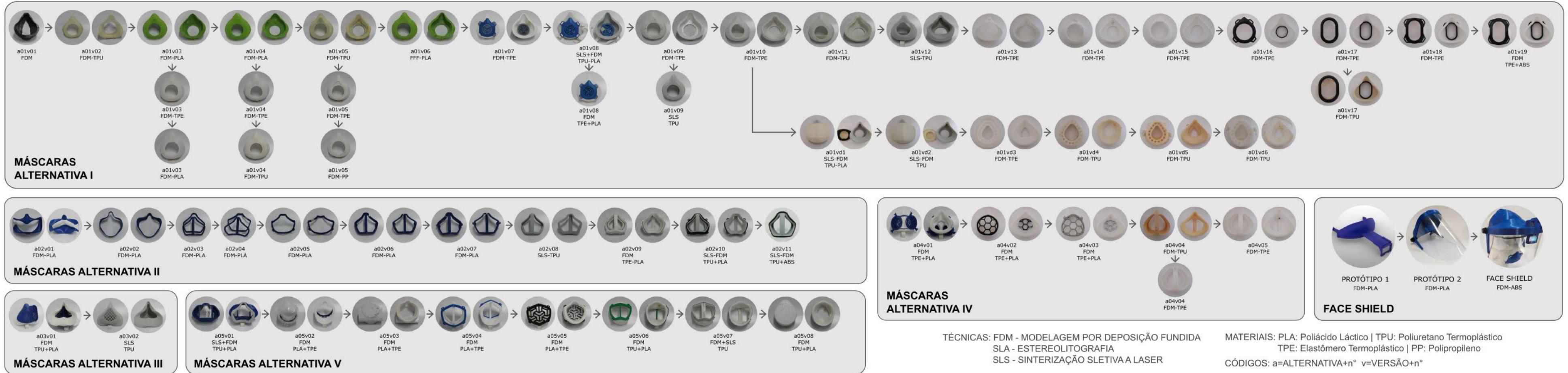


Figura 4.19 – Alternativas e suas versões desenvolvidas. Fonte: Autor