

Desenvolvimento de máscara de proteção contra a COVID-19 utilizando manufatura aditiva

Paths and evolutions in the development of COVID-19 protective masking using additive manufacturing

YAMAKI, Roberto Takao; Doutorando; PUC-Rio

takaoarquitetura@gmail.com

CORREIA DE MELO, João Victor; Doutor; PUC-Rio

jvictor@puc-rio.br

SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos; Doutor; PUC-Rio

jorge.lopes@puc-rio.br

KAUFFMANN, Aline Reis; Mestranda; UFRGS

aline.kauffmann@ufrgs.br

O presente trabalho apresenta parte da pesquisa da PUC-Rio dedicada à investigação de modelos de máscaras de proteção contra a COVID-19 de baixo custo, reaproveitáveis, facilmente fabricáveis e obedecendo às normas vigentes de filtragem. O objetivo deste trabalho consiste em apresentar o processo de design e a progressão de uma das alternativas de modelo para máscaras de proteção individual desenvolvidas pela equipe. Para isso foi desenvolvido um mapeamento que demonstra os avanços obtidos com os contínuos esforços para aprimoramento e desenvolvimento de novas soluções. Os procedimentos de desenvolvimento estão alinhados à metodologia Research through Design (RtD). O critério para a seleção das máscaras que estão detalhadas neste trabalho consistiu em abordar as versões desenvolvidas que contém desdobramentos e soluções técnicas essenciais à obtenção de um modelo de máscara de proteção individual que será encaminhado aos órgãos responsáveis pela regulamentação de tais equipamentos.

Palavras-chave: Máscara de Proteção; COVID-19; Máscara Cirúrgica.

This paper presents part of the research at PUC-Rio dedicated to the investigation of models of protective masks against COVID-19 that are low cost, reusable, easily manufactured, and comply with current filtering standards. The objective of this work is to present the design process and the progression of one of the model alternatives for individual protection masks developed by the team. To this end, a chart was developed that demonstrates the progress obtained with the continuous efforts for improvement and development of new solutions. The development procedures are aligned with the Research through Design (RtD) methodology. The criterion for the selection of the masks that are detailed in this work consisted in approaching the developed versions that contain unfoldings and technical solutions essential to

obtain a model of individual protection mask that will be forwarded to the agencies responsible for the regulation of such equipment.

Keywords: Protective Mask; COVID-19; Surgical Mask.

1 Introdução

A Covid-19 trouxe desafios nunca pensados para o ano de 2020. Com fácil propagação e sintomas ao início desconhecidos, o número de casos da doença em hospitais subiu vertiginosamente e demandou quantidades de equipamentos de proteção individual que mesmo países economicamente desenvolvidos não tinham em estoque (WANG *et al.*, 2020). 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 máscaras fabricadas em tecido) foram consideradas alternativas improvisadas viáveis para uso da população e até mesmo por profissionais da saúde que tratavam do combate direto à doença, mesmo que sua eficácia tivesse resultados variados (ABD-ELSAYED; KARRY; 2020). A demanda emergencial desencadeou ações emergenciais de pesquisadores, empresas e membros de organizações relacionadas à pesquisa e produção de peças por meio de manufatura aditiva. Esses grupos optaram por fabricar equipamentos para suprir as demandas locais (ISHACK; LIPNER; 2020). Neste contexto, alternativas diversas de máscaras foram criadas para uso da população em geral, mesmo que suas capacidades de proteção não tivessem comprovação padronizada. Muitos desses projetos de máscaras e equipamentos de proteção, sem certificações, foram disponibilizados em repositórios de modelos 3D on-line.

Santos e colaboradores (2020) descreveram a iniciativa do DAD PUC-Rio na organização e fabricação para suprir a falta de equipamentos de proteção individual (EPIs) em hospitais e unidades de saúde do Rio de Janeiro. A ação emergencial na PUC-Rio desencadeou o início dos estudos para obter e avaliar esses equipamentos, utilizando as técnicas de fabricação digital disponíveis no laboratório. O trabalho descrito apresenta parte dos desdobramentos dessa iniciativa.

2 Research through Design (RtD)

O presente artigo seguiu diretrizes já estabelecidas de pesquisa em design, especificamente a metodologia de “Pesquisa através do Design”. 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).

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 servirá de base não apenas para os próximos passos da investigação, mas de repositório para futuros projetos (DALSGAARD; HALSKOV; 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 reinterpretation. Para que isso fosse possível nesta pesquisa, a principal forma de registro do desenvolvimento das máscaras foi a impressão e prototipagem das formas. Cada modelo que surgiu como evolução do anterior foi impresso por tecnologia aditiva, isso viabilizou não apenas o registro do estado do objeto, mas também sua análise material, presente no mundo real. A manufatura aditiva foi essencial para a obtenção rápida de modelos que permitiram 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 aprimorou o registro e a documentação do processo de pesquisa e auxiliou os pesquisadores a identificar e aprimorar as sucessivas evoluções. Como forma de catalogar os objetos gerados e simplificar a visualização dos aprimoramentos e suas sequências, foi realizado um mapeamento visual (Figura 5) das alternativas e versões desenvolvidas. Neste mapeamento estão detalhadas as técnicas de impressão e os materiais utilizados em cada modelo produzido.

3 Manufatura aditiva e a produção de máscaras de proteção individual

A manufatura aditiva permite soluções inovadoras para equipamentos de proteção individual, principalmente em tempos de crise. 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).

Novak e colaboradores (2020) realizaram a análise de modelos de máscaras disponibilizados on-line 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 cumpriam 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 concha¹ ter sido impressa em TPU, um material flexível que se acomoda melhor ao rosto, enquanto as demais máscaras analisadas possuem concha rígida impressas em Poliácido láctico (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 modelagem tridimensional, desenvolvida por meio do software Rhinoceros, foi utilizada para a geração dos modelos que foram posteriormente impressos. Após a construção dos modelos digitais, os mesmos foram fabricados por técnicas diversas de manufatura aditiva. Os modelos

¹ Concha é a nomenclatura dada à parte da máscara que toca a face do usuário.

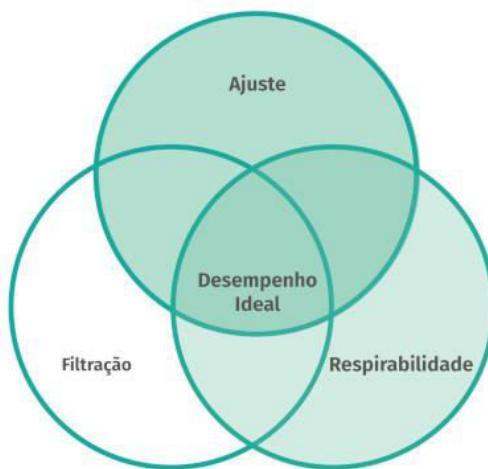
foram prototipados por meio das tecnologias de Fabricação por Filamento Fundido (FFF), Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e por Estereolitografia (SLA). Os equipamentos utilizados para produção dos modelos foram as impressoras Creality Ender 3 (FFF), Intamsys Funmat HT (FFF), Sinterit Lisa PRO (SLS), AnyCubic Photon Mono X 4K (SLA), Elegoo Mars (SLA). As impressões em FFF foram fabricadas em filamento de Poliácido láctico (PLA) e Acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Os modelos produzidos por SLS foram impressos em Poliuretano (TPU) e Poliamida (PA) em pó.

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.

4 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 inicial da pesquisa. Estes parâmetros são divididos entre ajuste, filtragem e respirabilidade (Figura 1).

Figura 1 – Relação entre ajuste, filtragem e respirabilidade para máscaras não médicas.



Fonte: Adaptado de WHO (2020a)

As máscaras devem possuir um ajuste no rosto que não possibilite escape de ar, uma filtragem adequada de acordo com os requisitos estabelecidos e proporcionar respirabilidade adequada, que não cause desconforto às pessoas usuárias. A boa performance da máscara é alcançada quando comprehende estas três características. Além de atender a estes requisitos, os parâmetros estabelecidos para a máscara descrita neste trabalho foram uma estrutura reutilizável e capaz de aproveitar como elemento filtrante um elemento eficiente de custo reduzido.

4.1 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 foi eleita como um material respirável confiável, de baixo custo, vasta distribuição e adequado ao trabalho. A máscara cirúrgica típica possui tripla camada em Polipropileno (PP), sendo duas camadas de tecido não tecido (TNT) e uma camada de tecido SMS (Spunbonded, Meltblown e Spunbonded). 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).

Máscaras cirúrgicas podem diminuir a disseminação de vírus quando usada por alguém contaminado entre 67% a 75%, e até 100% nos casos de coronavírus sazonais (LEUNG *et al.*, 2020; MILTON *et al.*, 2013). A máscara cirúrgica também já se demonstrou eficaz na prevenção de disseminação de Influenza (JOHNSON *et al.*, 2009). A Organização Mundial de Saúde confirmou a efetividade do uso de máscaras cirúrgicas no controle do avanço da COVID-19 (WHO, 2020b).

A questão presente na máscara cirúrgica, no entanto, é que sua proteção é apenas unidirecional. Seu objetivo não é proteger a pessoa usuária, 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 µm) (RUNDE *et al.*, 2021).

O motivo para seu uso como mídia filtrante neste trabalho foi, portanto, sua eficácia com potencial de melhoramentos, seu baixo custo em relação às máscaras N95 ou PFF2 e maior disponibilidade no mercado. 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 µm 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 µm de diâmetro , o que cobre a gama de 5 a 10 µm, 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 (GALZO, 2021), é imprescindível que a máscara cirúrgica possua certificação conforme a norma técnica, no Brasil, 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 utilização de fita adesiva para selar as bordas resultou em um aumento da eficiência de máscaras faciais comuns (GIERTHMUEHLEN *et al.*, 2020). Kruppasamy e Obuchowski realizaram testes com modificações na máscara cirúrgica, utilizando fitas para selá-la ao rosto. Os resultados apresentaram uma expressiva redução de vazamento de aerossóis. O que torna este modelo uma opção viável em uma situação de escassez de máscaras N95.

4.2 Modelos antropométricos impressos em 3D

O escaneamento facial foi o primeiro método de obtenção da topografia real do rosto com o objetivo de produção de máscaras personalizadas. Para realização do escaneamento foi utilizado o scanner de luz estruturada Artec EVA. As malhas obtidas durante o escaneamento foram processadas por meio do software Artec Studio 3D. Apesar dessa possibilidade ter sido

considerada no início da pesquisa, seu desenvolvimento foi abandonado tendo em vista a grande variedade de rostos, o tempo e a grande complexidade operacional necessários para obter a forma do rosto de cada pessoa.

Para que as dimensões da face humana fossem alcançadas corretamente, foi adicionado à pesquisa a utilização de modelos de representação da cabeça humana, impressos em manufatura aditiva, que seguem os padrões descritos na norma técnica ISO/TS 16976-2. Os modelos retratam os percentis mais comuns na população. Para este estudo foram impressos cinco modelos correspondentes às dimensões ISO grande, ISO médio, ISO curto/largo, ISO pequeno e ISO longo estreito (Figura 2). Os modelos foram impressos pela técnica de Fabricação por Fio Fundido (FFF), em ABS, em escala 1:1. A introdução destes modelos durante a pesquisa foi fundamental para obtenção precisa das dimensões da cabeça e da face típicas da população.

Figura 2 – Modelos 3D conforme a Norma ISO/TS 16976-2. Da esquerda para a direita: ISO grande, ISO médio, ISO curto/largo, ISO pequeno e ISO longo estreito.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 Teste de vedação

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 a um modelo de cabeça ISO Médio, de maneira que a fumaça sob pressão fosse expelida pela boca do manequim (Figura 3). 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. Sem a aplicação do silicone, a superfície do modelo em plástico ABS não teria a mesma aderência típica da pele, prejudicando a simulação do contato da máscara com a superfície do rosto. Quando a máquina foi acionada, a fumaça branca expelida evidenciava as áreas mais vulneráveis, apontando os locais de vazamento que deveriam ser corrigidos.

Figura 3 – Cabeça ISO médio adaptada a máquina de fumaça para verificação de vazamentos. Os pontos de maior vulnerabilidade foram observados por este processo.

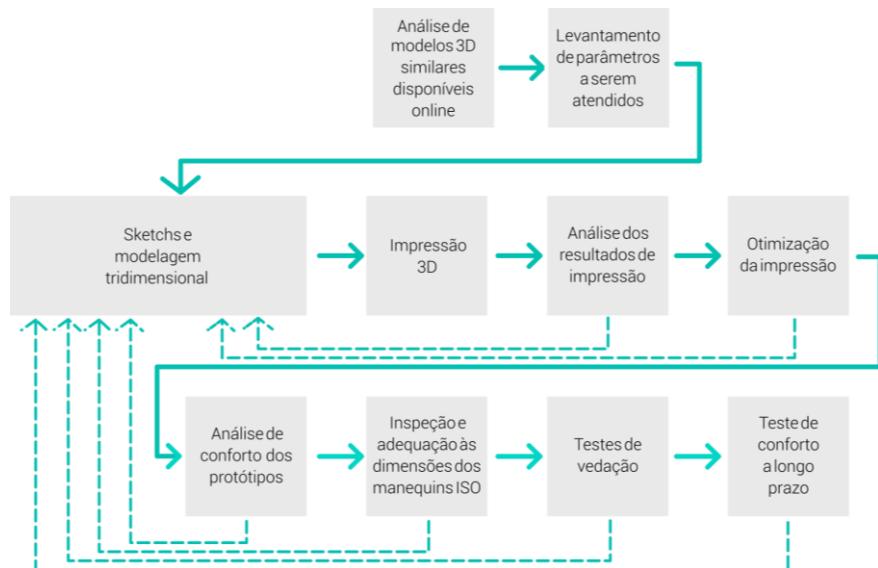


Fonte: Elaborada pelos autores.

5 Etapas e procedimentos utilizados para o desenvolvimento das alternativas e versões

As etapas e procedimentos utilizados para realização do trabalho estão sistematizados em um esquema visual apresentado na Figura 4. Os procedimentos consistiram em: análise de modelos 3D similares disponíveis online; levantamento de parâmetros a serem atendidos; sketches 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 - Esquema visual das etapas e procedimentos utilizados para realização do trabalho.



Fonte: Elaborado pelos autores.

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 sketches, modelagem

tridimensional, impressão 3D e otimização da impressão 3D. Estes constantes retornos às etapas precedentes estão sinalizados no esquema visual da Figura 4.

Após a impressão de um modelo, o mesmo 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 apresentados no esquema visual da Figura 4.

Análise de modelos 3D similares disponíveis online: Conforme mencionado, a pesquisa surgiu como um desdobramento da iniciativa do DAD da PUC-Rio, conforme descrito por Santos e colaboradores (2020). Nesta iniciativa emergencial, a equipe teve acesso a diversos modelos disponibilizados online em plataformas de compartilhamento de modelos para impressão. 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 - 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 3, os modelos foram impressos por meio das tecnologias de Fabricação por Filamento Fundido (FFF), 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 a 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 são 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 que a impressão era declarada como satisfatória, seus parâmetros eram verificados buscando a otimização. Esta otimização consistia em alterações como no posicionamento da peça sob a mesa de impressão.

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 a análise por meio da utilização dos manequins impressos, com dimensões correspondentes a norma ISO. 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 4.3.

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 da 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 alternativas e versões desenvolvidas, bem como, são descritos detalhes sobre os aprimoramentos e questionamentos resultantes dos principais modelos elaborados.

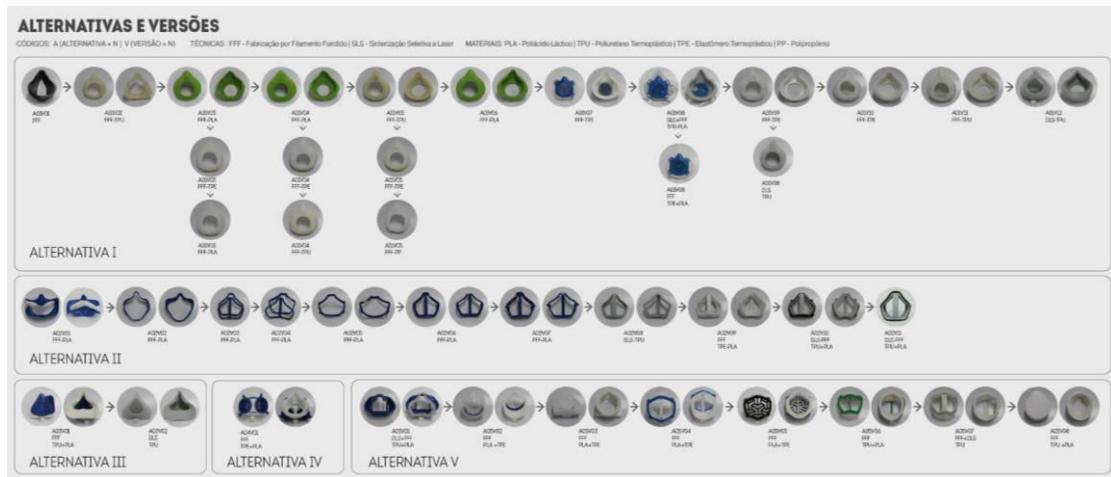
6. Principais alternativas e versões

Seguindo as etapas e procedimentos descritos, cinco alternativas de máscaras foram estabelecidas durante este trabalho, com diferentes formatos e preceitos, explorando diferentes formas de acomodação no rosto.

A partir dos cinco primeiros modelos, surgiram suas versões desenvolvidas por evoluções sucessivas. 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 relevante.

A figura 5 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.

Figura 5 – Alternativas e suas versões desenvolvidas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

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, e a parte inferior apoia-se acima do queixo logo abaixo dos lábios inferiores.

A Alternativa II baseia-se na montagem da máscara com o filtro, focada na simplificação do encaixe entre as partes, de forma que acomode uma máscara cirúrgica como elemento filtrante.

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

A Alternativa IV procura novas formas de acomodação do filtro, porém utilizando uma menor área que a alternativa II. A diminuição da área do elemento filtrante cria a possibilidade de utilizar na máscara materiais transparentes, aumentando a visibilidade da fala e expressões.

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

Entre as alternativas e versões elaboradas, foi realizado o recorte da Alternativa II para discussão neste trabalho. Os motivos que levaram a equipe a selecionar esta alternativa para detalhamento da sua evolução consistem no volume de informações que o seu desenvolvimento proporcionou a pesquisa ao longo da produção de suas inúmeras versões, bem como, a problemática que desencadeou o desenvolvimento desta solução. A Alternativa II propõe garantir a vedação da máscara cirúrgica, que possui um filtro eficaz, mas falha ao permitir vazamentos de ar durante seu uso.

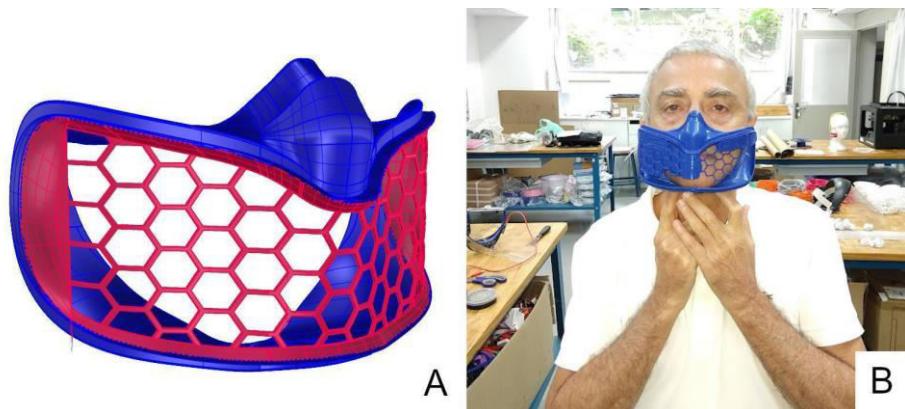
O resultado da família de versões da alternativa II é um modelo que a equipe considerou satisfatório para posterior envio ao processo de testagem segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. No trabalho também estão descritos, de modo mais detalhado, os modelos A02V01, A02V02, A02V03, A02V08, A02V10, A01V12 e A4V01.

6.1 Modelo A02V01

O modelo A02V01 (Figura 6) trata 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. Neste modelo foram ensaiadas as técnicas de obtenção das linhas do rosto, modelagem virtual no software Rhinoceros (Figura 6a), espessuras mínimas de impressão, potencialidades e limitações das impressoras de Fabricação por Filamento Fundido (FFF).

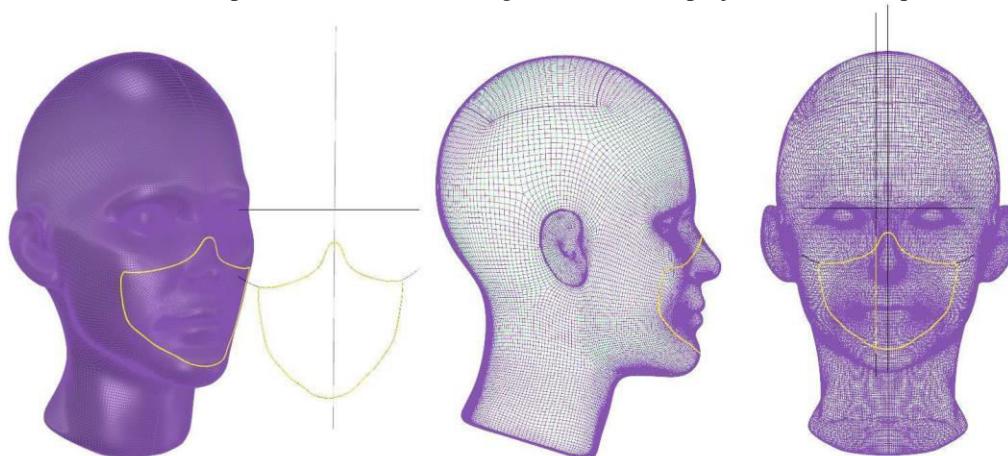
Figura 6 – (A) Modelagem da versão A02V01 no software Rhinoceros; (B) Impressão e verificação de medidas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para obtenção da topografia do rosto do manequim, as linhas da máscara são planificadas e desenhadas em um plano para posteriormente serem projetadas na face (Figura 7). Desta forma, as curvas do rosto são obtidas com exatidão. A partir destas linhas, que correspondem fielmente ao relevo do rosto do manequim, a máscara é 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 6a, em azul e vermelho) que deveriam se encaixar para acomodação do filtro. Esta característica seguiu ao longo de suas versões, norteando sua evolução.

Figura 7 – Linhas planificadas no contorno geral da máscara projetadas no manequim.

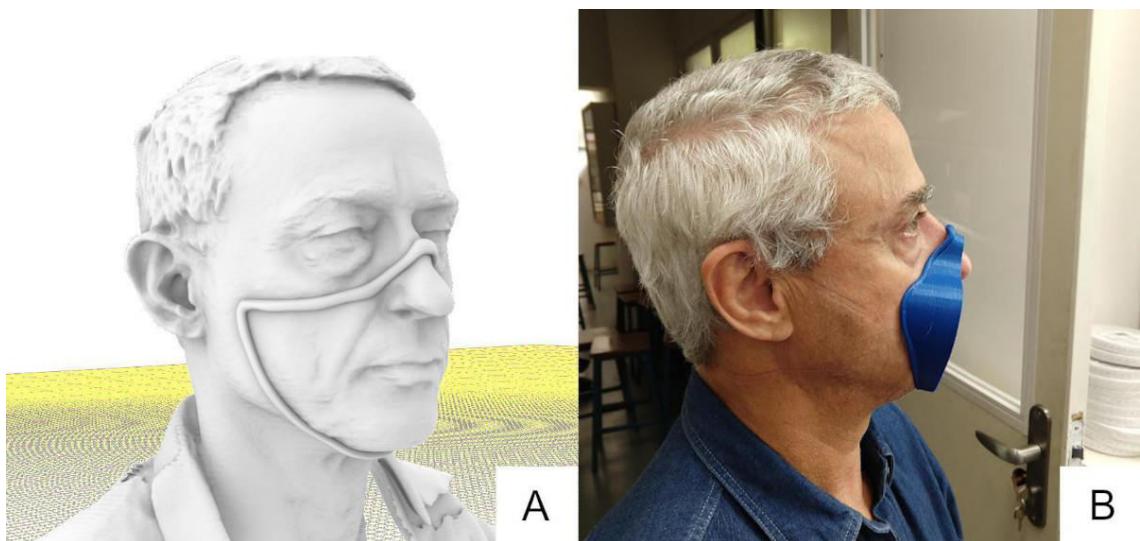


Fonte: Elaborada pelos autores.

6.2 Modelo A02V02

O modelo A02V02 foi projetado a partir de um rosto real. O rosto de cada membro da equipe foi escaneado e o escaneamento que resultou em um modelo de melhor qualidade foi selecionado. As malhas foram obtidas por meio do scanner de luz estruturada Artec EVA e processadas no software Artec Studio 3D. A Figura 8a representa o modelo 3D obtido por escaneamento com as linhas externas da máscara elaboradas pelo processo supracitado de projeção de linhas.

Figura 8 – (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: Elaborada pelos autores.

O modelo impresso (Figura 8b), 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. 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, a equipe optou por utilizar os modelos antropométricos impressos em 3D, apresentados no item 4.2, que seguiam as dimensões da norma ISO. Esta escolha permite que os modelos produzidos estejam adequados a uma parcela mais abrangente da população.

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. O usuário da máscara não ficará imóvel durante todo uso. A face possui diversos músculos que se movimentam de acordo com nossas expressões e falas. A mandíbula se movimenta continuamente durante a alocução. 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.

6.3 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 9), 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 9 – Modelo A02V03 impresso por FFF em PLA.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por meio deste modelo a equipe percebeu que necessitava utilizar a flexibilidade da impressão para obter um encaixe preciso. A impressão das duas peças neste protótipo (Figura 9) foi feita em PLA rígido e demonstrou que este material não iria satisfazer o requisito de um encaixe hermético. A impressão destas peças possibilitou a compreensão de que em um modelo que fosse constituído pelo encaixe de duas partes, 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 10 exibe os modelos A02V01, A02V02 e A02V03 impressos pela técnica de FFF em PLA.

Figura 10 - Modelos A02V01 e A02V02 e A02V03.



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

FFF: Fabricação por Filamento Fundido

PLA: Poliácido láctico

Fonte: Elaborada pelos autores.

6.4 Modelo A02V08

O modelo A02V08 (Figura 11) 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 formais e no material de impressão, com ênfase em obter flexibilidade. Como característica nova, foi acrescentado ao aro (peça em azul da figura 11) um sistema de suportes de elásticos (destacados em amarelo na figura 11), utilizados para fixar a máscara ao rosto. Foram modelados três fixadores de cada lado para que fossem testados diferentes posicionamentos do elástico, buscando o conforto da pessoa usuária.

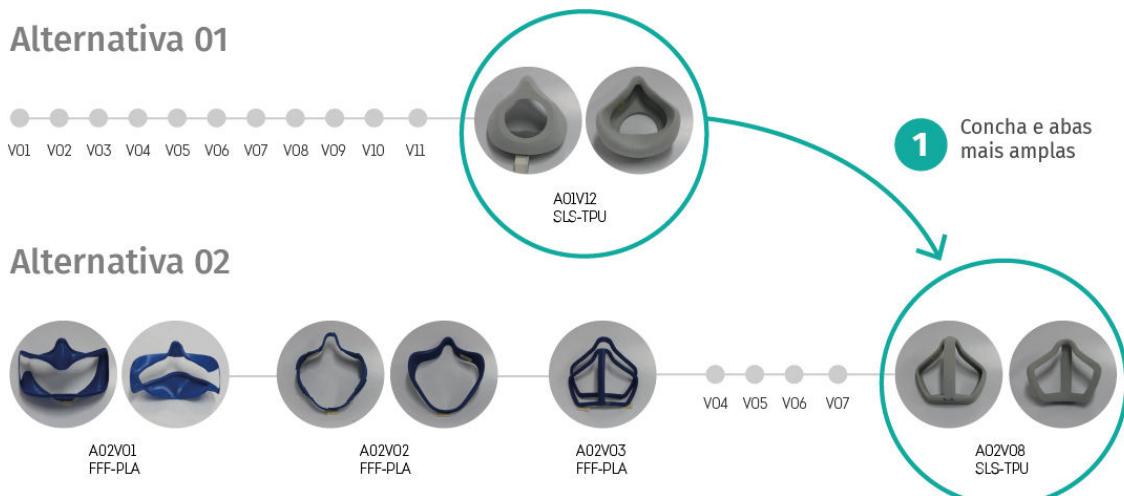
Figura 11 – Modelo A02V08 com sistema de suportes de elásticos em amarelo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Outros aperfeiçoamentos aplicados ao modelo A02V08 consistem em aprimoramentos da concha e das abas, de modo que a máscara conte com maior superfície de contato com o rosto das pessoas usuárias. A ampliação da concha e das abas foi inspirada também na modelagem desenvolvida para o modelo A01V12 (Figura 12). 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.

Figura 12 – Influência advinda da Alternativa 01 aplicada ao modelo A02V08



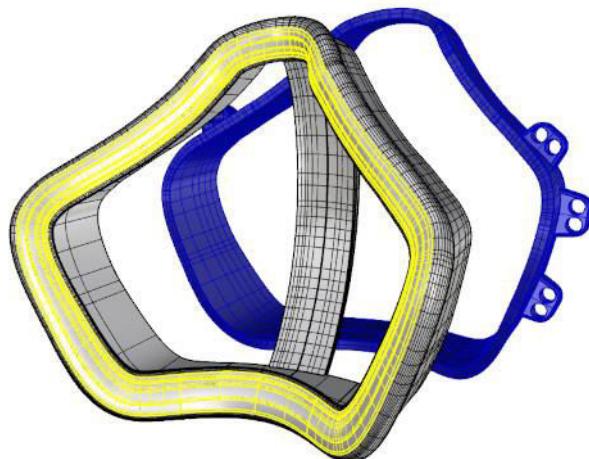
CÓDIGOS: A (ALTERNATIVA + N) V (VERSÃO + N)

Fonte: Elaborada pelos autores

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. 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 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 13, 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.

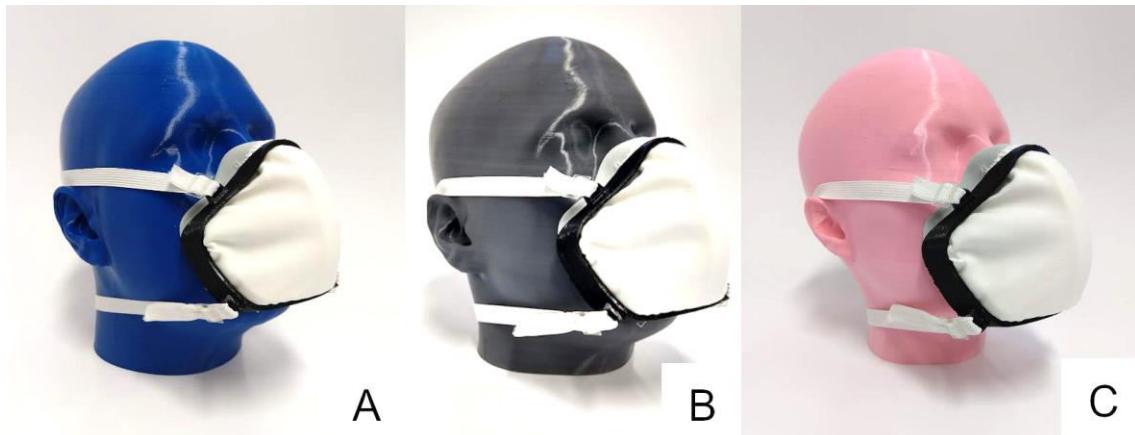
Figura 13 – Modelo A02V08 com os espaços para elástico destacados em amarelo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O modelo A02V08 foi desenvolvido a partir dos manequins ISO. A cabeça selecionada para essa tarefa foi a ISO médio, pois contemplava a maior parcela da população 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 mais precisas. O primeiro protótipo impresso deste modelo (A02V08) pôde 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 14). Apesar dos protótipos serem modelados a partir do ISO médio, sua adequação aos outros tamanhos de manequins foi considerada satisfatória.

Figura 14 – Exame visual de encaixe nas cabeças de diferentes tamanhos: (A) ISO grande; (B) ISO longo estreito; (C) ISO pequeno.

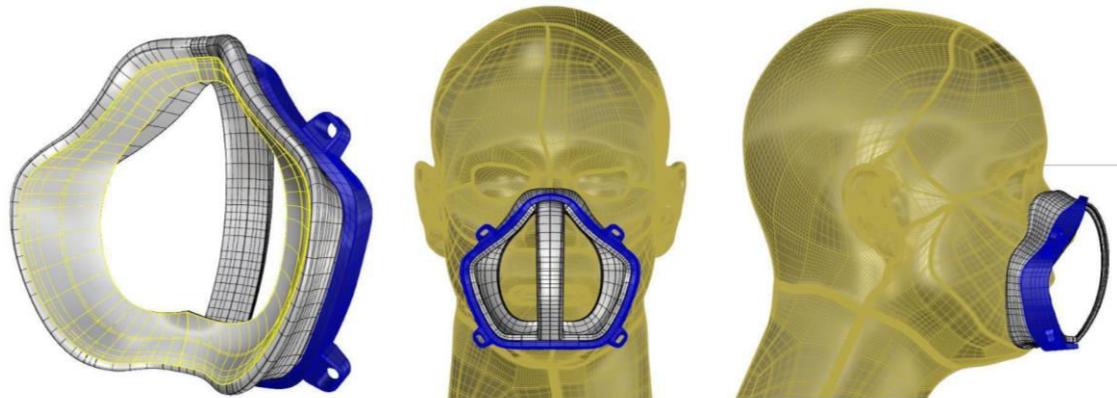


Fonte: Elaborada pelos autores.

6.5 Modelo A02V10

Os aprimoramentos necessários verificados por meio do modelo A02V08 ocasionaram o desenvolvimento dos modelos A02V09 e A02V10 (Figura 15).

Figura 15 – Modelo digital antropométrico ISO utilizando o Modelo A02V10 com abas mais generosas destacadas em amarelo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

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 16 apresenta os modelos A02V08 e A02V10 impressos.

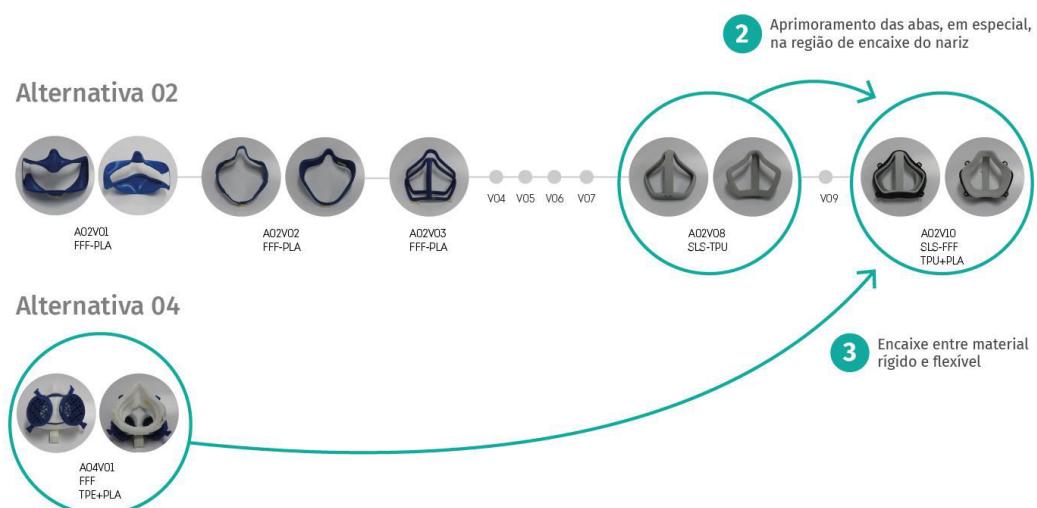
Figura 16 – Modelos Impressos V08 e V010. na impressão das conchas pode ser observada a diferença de tamanho entre as abas da concha.



Fonte: Elaborada pelos autores.

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 17 exibe os aprimoramentos, supracitados, aplicados ao modelo A02V10 advindos dos modelos A02V08 e A04V01.

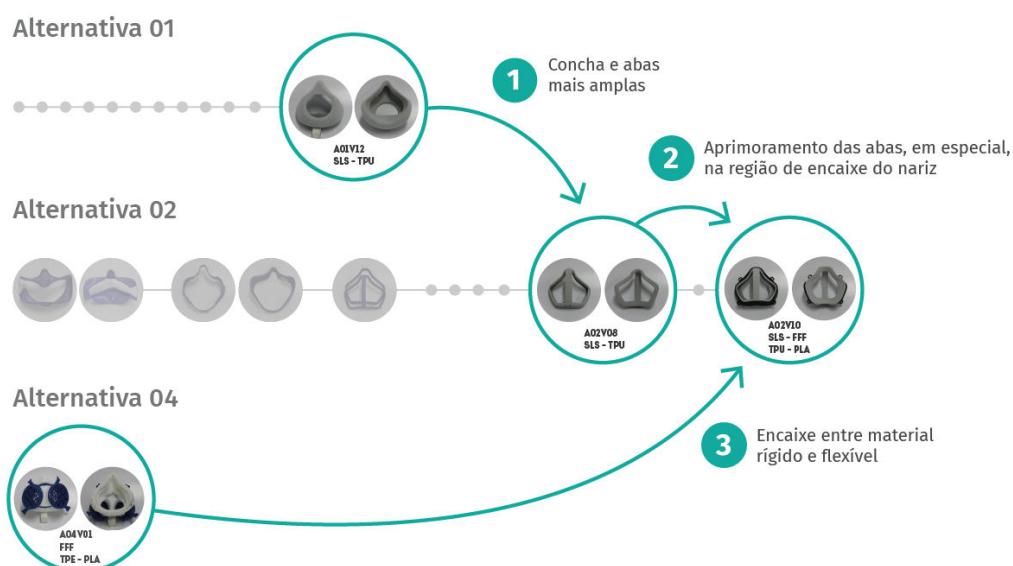
Figura 17 - Aprimoramentos aplicados ao modelo A02V10



Fonte: Elaborado pelos autores

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 ao mesmo tempo durante a exploração. A figura 18 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 18 – 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: Elaborada pelos autores.

6.6 Modelo A02V11

Finalmente, a solução A02V11 (Figura 19) concentra todos os atributos assimilados ao longo do processo de pesquisa até o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 19 – Modelo A02V11 - concha impressa por SLS em FlexaBright (cinza) e aro impresso por FFF em PLA (preto).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Após diversos testes, o sistema de suportes de elásticos que fixam a máscara ao rosto, exibidos na Figura 20, foram descontinuados.

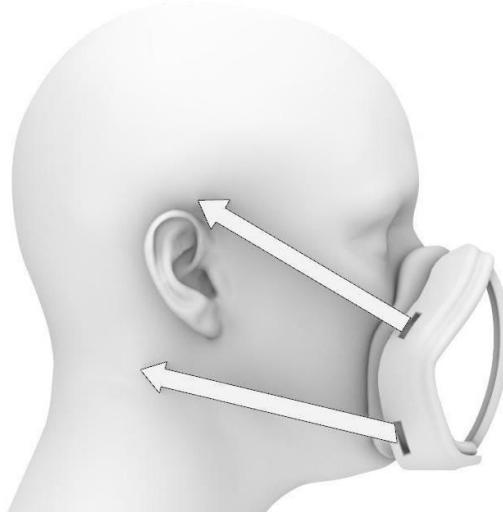
Figura 20 – Alguns estudos do sistema de suportes de elásticos.



Fonte: Elaborada pelos autores

O local utilizado para a ancoragem foi preservado, mas substituído por um furo retangular no aro (Figura 21). Esta solução facilita a impressão em FFF, pois reduz a necessidade de suportes e a quantidade de material necessário, diminuindo o tempo de impressão.

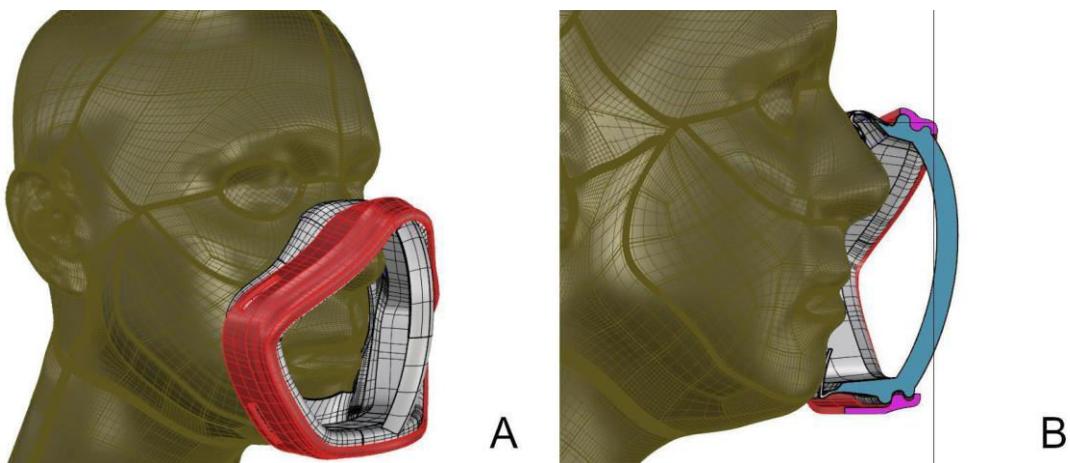
Figura 21 – Vetores que demonstram a previsão dos elásticos para fixação no rosto, ancorados por furos retangulares.



Fonte: Elaborada pelos autores.

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 22a). As abas de contato com o rosto também foram aprimoradas precisamente por meio de evoluções na modelagem.

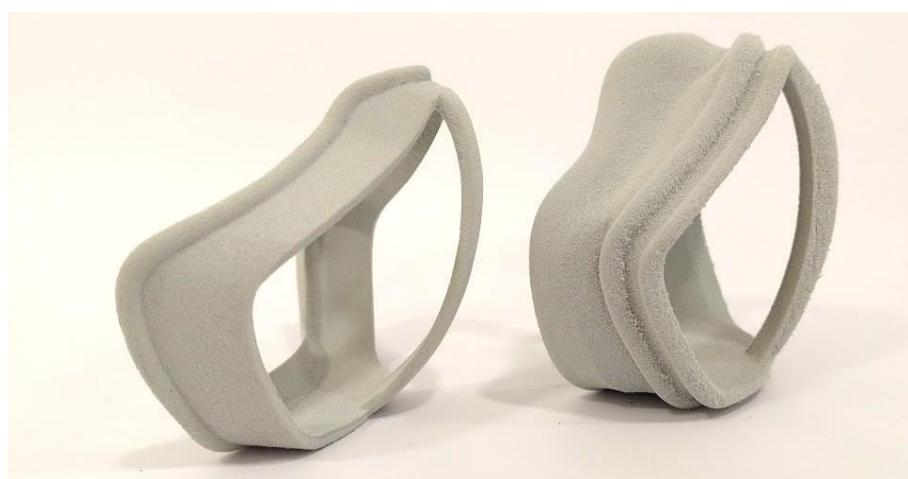
Figura 22 – Modelo A02V11 no software Rhinoceros em perspectiva (A) e em corte (B). No corte é possível observar as reentrâncias do encaixe no aro em rosa e na concha flexível em azul. O filtro fica posicionado entre essas duas cores.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 22b 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 de modo que, mesmo que ocorra variação de tamanho entre fabricantes, o produto permita uma margem de erro ampla. Então, a pessoa que será futura usuária poderá substituir somente a máscara cirúrgica que tiver acoplado ao produto e, quando necessário, poderá lavar e reutilizar as partes do equipamento desenvolvidas pela equipe. A Figura 23 exibe os modelos A02V08 e A02V11 impressos e a Figura 23 apresenta o modelo A02V11 sendo utilizado por um membro da equipe.

Figura 23 - 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: Elaborada pelos autores.

Figura 24 – Modelo A02V11 com filtro sendo utilizado com a boca aberta (A) e a boca fechada (B).



Fonte: Elaborada pelos autores.

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 que foram 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.

As Figura 25 e 26 apresentam esquemas visuais que sintetizam as principais soluções técnicas obtidas com a produção das versões que foram destacadas no decorrer deste trabalho. 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.

Figura 25 – Esquema visual demonstrando as principais evoluções técnicas e aperfeiçoamentos.

Principais evoluções e aperfeiçoamentos observados por versão:

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



Fonte: Elaborada pelos autores.

A figura 25 apresenta um resumo dos aprendizados e soluções obtidas com o desenvolvimento dos modelos A02V01, A02V02 e A02V03. A figura 26 exibe os desdobramentos relacionados aos modelos A02V08, A02V10 e A02V11.

Figura 26 – Continuação do esquema visual demonstrando as principais evoluções técnicas e aperfeiçoamentos.



Fonte: Elaborada pelos autores.

8 Discussão

A modelagem e 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. Este trabalho somente foi possível devido às tecnologias disponíveis no laboratório de Biodesign.

O uso das diferentes técnicas de impressão 3D permitiu uma modelagem livre em formas, que foram otimizadas visando o desenvolvimento do produto por meio dessas técnicas. Como os modelos foram impressos por meio de técnicas diversas, de acordo com sua especificidade,

diferentes tolerâncias de distância são 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 hermético.

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 FFF, 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, se 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 é revisado a favor das tensões mecânicas previstas.

Outro ponto importante é a observação do uso de suportes durante as impressões. Como toda impressão é feita em camadas, de baixo para cima, o uso de suportes é necessário. As estruturas de suporte são responsáveis por sustentar as camadas que compõem o objeto, mas extravasam os limites das camadas anteriores e estariam sem sustentação (exceto na tecnologia SLS). Como os suportes são utilizados apenas para a impressão do objeto, mas não fazem parte do mesmo, estes devem ser destacados e dispensados. Mesmo que possam ser reciclados para uso posterior, as impressões devem ser otimizadas também para o menor uso de suportes possível. Isso dá velocidade à impressão e evita desperdício de energia.

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. 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 projeto. A prototipagem também foi essencial para o registro da pesquisa, em conformidade com a metodologia RtD já mencionada.

Figura 27 – Conchas finais do modelo A02V11 impressas em diferentes materiais e tecnologias. Da esquerda para a direita: 3dx Shore 88-92 TPE em FFF; Tpu 96 d60 em FFF; Flexabright shore 92a em SLS e Resina high temp rígida em SLA.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Embora a máscara apresentada neste estudo (Modelo A02V11) (Figura 27) manifeste melhorias sobre uma máscara cirúrgica padrão, não pretendemos que a mesma seja percebida como substituta para uma máscara filtrante aprovada, como os produtos que seguem os padrões N95 ou PFF2. Mesmo que todas as ações desenvolvidas sejam fundamentadas na bibliografia apresentada, a eficiência do produto ainda não foi atestada pelos órgãos responsáveis. Então, a solução aprimorada até o modelo A02V11 não deve ser utilizada como substituta às máscaras de proteção regulamentadas até que sejam obtidas as certificações necessárias.

9 Conclusão

A revolução produtiva causada pela utilização da tecnologia de impressão 3D fica evidentemente ilustrada já nos primeiros episódios da atuação da PUC-Rio na produção emergencial de EPIs. A aplicação das tecnologias e técnicas disponíveis na ação emergencial possibilitou uma escala de produção relevante e distinta da indústria tradicional. A consolidação desta ação, que ocorreu com a continuidade da pesquisa para produção de equipamentos de proteção individual, descrita em parte neste trabalho, demonstra o elevado potencial destas tecnologias para revolucionar o projeto e produção de novos produtos. O processo de obtenção dos modelos por meio de técnicas de impressão 3D agiliza a obtenção de protótipos e proporciona a fabricação de formas complexas, que não seriam possíveis por métodos tradicionais de fabricação.

A materialização de todos os protótipos foi fundamental para a documentação do processo e agilidade nas avaliações feitas pela equipe, como a realização de testes de flexibilidade dos materiais e adequação das máscaras aos modelos antropométricos impressos em 3D. A produção dos modelos físicos também permitiu a observação de diferentes padrões de impressão, como as variações nos resultados conforme o posicionamento na mesa da impressora ou da tecnologia utilizada.

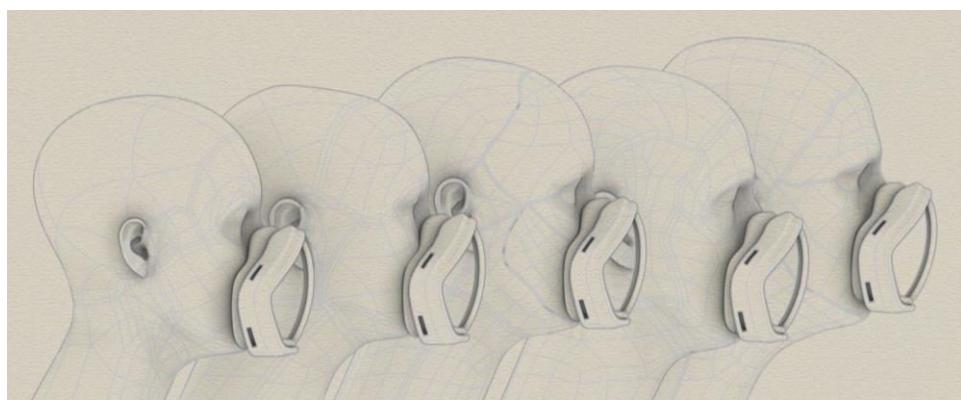
O desenvolvimento desta pesquisa ocorreu por meio de pequenas evoluções, ou aproximações sucessivas, que partiram de um elemento primário, o modelo A01V01. Ironicamente, é possível traçar um trágico paralelo das evoluções e aprimoramentos alcançados nos diversos modelos, máscara a máscara, com as mutações observadas no próprio vírus que este trabalho se propõe a auxiliar a combater. Assim como as versões sucessivas que evoluíram a partir das cinco alternativas de máscaras primordiais, os clados do coronavírus evoluíram a partir do seu ancestral comum na árvore filogenética. Ambos evoluindo e se aperfeiçoando em busca de sobrevivência.

Um dos próximos desafios da equipe consiste na validação do último modelo da Alternativa II em campo, o modelo A02V11, com testes de usabilidade, conforto e durabilidade. Apesar da

equipe do projeto contar com membros que são profissionais da área da saúde, é importante observar que o conforto e a usabilidade do protótipo A04V11 não foram formalmente avaliados por um estudo independente e justificam uma investigação mais aprofundada. Esse estudo, que contempla especialmente essas verificações, está em desenvolvimento por outros membros da equipe do projeto. Isso ocorre por respeito à autorização para desenvolvimento das avaliações pela Câmara de Ética em Pesquisa. Após a realização e obtenção dos resultados do respectivo estudo o modelo será encaminhado para homologação.

Outro objeto de estudo futuro é a exploração de um modelo com transparência na área da boca, de forma que as pessoas com necessidade de leitura labial possam ser contempladas. Estas linhas de alternativas e versões não estão concluídas. A equipe continua projetando e prototipando novas ideias e aprimorando os conhecimentos e aprendizados alcançados.

Figura 28 –Representação das cabeças ISO utilizando a máscara versão A02V11.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer todos os membros da equipe e salientar que, mesmo que não componham a lista de autores, a sua participação foi essencial no desenvolvimento deste trabalho. Em especial, o agradecimento às constantes contribuições do Prof. Dr. Leonardo Frajhof e da Prof. Dra. Claudia Borges e Souza Paraizo.

A presente pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Referências

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

CLAPP, Phillip W. et al. Evaluation of cloth masks and modified procedure masks as personal protective equipment for the public during the COVID-19 pandemic. *JAMA Internal Medicine*, v. 181, n. 4, p. 463-469, 2021. DOI:10.1001/jamainternmed.2020.8168

CORTES, Arthur Rodriguez Gonzalez et al. Use of free CAD software for 3D printing individualized face masks based on face scans Einsatz von CAD-Freeware zur Individualisierung 3-D-gedruckter Atemschutzmasken anhand von Gesichtsscans. *International journal of computerized dentistry*, v. 23, n. 2, p. 183-189, 2020. PMID: 32337516

DALSGAARD, Peter; HALSKOV, Kim. Reflective design documentation. In: **Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference**. 2012. p. 428-437.

GALZO, Wesley. Máscaras N95 falsificadas são vendidas ‘livamente’; saiba como identificar. **CNN**, São Paulo. 2021. Disponível em:
<https://www.cnnbrasil.com.br/saude/mascaras-n95-falsificadas-sao-vendidas-livemente-saiba-como-identificar>. Acesso em: 17 mar 2022.

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. PMID: 32813727; PMCID: PMC7437915.

ISHACK, Stephanie; LIPNER, Shari R. Applications of 3D printing technology to address COVID-19-related supply shortages. **The American journal of medicine**, v. 133, n. 7, p. 771, 2020. DOI: 10.1016/j.amjmed.2020.04.002

ISO/TS 16976-2. Technical Specification: Respiratory protective devices - Human factors. Part 2: Anthropometrics. Second Edition, 01/04/2015. ISO/TS 16976-2:2015(E)

JOHNSON, D. F. *et al.* A quantitative assessment of the efficacy of surgical and N95 masks to filter influenza virus in patients with acute influenza infection. **Clinical Infectious Diseases**, v. 49, n. 2, p. 275-277, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1086/600041>.

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/wxa125. PMID: 33458738; PMCID: PMC7929389.

LEUNG, Nancy HL *et al.* Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. **Nature medicine**, v. 26, n. 5, p. 676-680, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>.

MILTON, Donald K. *et al.* Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks. **PLoS pathogens**, v. 9, n. 3, p. e1003205, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003205>

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

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. PMID: 33704478; PMCID: PMC7953274.

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: <https://doi.org/10.1002/emp2.12335>

SANTOS, Jorge Roberto Lopes *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. DOI: 10.4013/sdrj.2020.133.15.

SILVA, Marivaldo Cavalcante. Descarte de máscaras nas imediações de equipamentos de saúde pública na pandemia do COVID-19 em Araguaína-TO. **Holos**, v. 5, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.10136>

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.

SWENNEN, Gwen RJ; POTTEL, Lies; HAERS, Piet E. 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**, v. 49, n. 5, p. 673-677, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.03.015>

WANG, M. W. *et al.* Mask crisis during the COVID-19 outbreak. **Eur Rev Med Pharmacol Sci**, v. 24, n. 6, p. 3397-3399, 2020. DOI: 10.26355/eurrev_202003_20707. PMID: 32271457.

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.

WORLD HEALTH ORGANIZATION *et al.* **Mask use in the context of COVID-19: interim guidance, 1 December 2020**. World Health Organization, 2020b.

ZIMMERMAN, John; FORLIZZI, Jodi; EVENSON, Shelley. Research through design as a method for interaction design research in HCI. In: **Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems**. 2007. p. 493-502. DOI: <https://doi.org/10.1145/1240624.1240704>

Anexo 1 - Esquema visual contendo as principais influências entre alternativas e versões

Principais influências entre alternativas e versões

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

Alternativa 01

V01 V02 V03 V04 V05 V06 V07 V08 V09 V10 V11



1

Alternativa 02



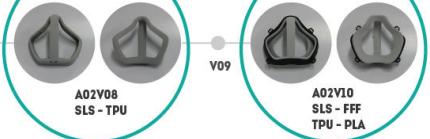
A02V01
FFF - PLA

A02V02
FFF - PLA

A02V03
FFF - PLA

V04 V05 V06 V07

V09



A02V08
SLS - TPU

A02V10
SLS - FFF
TPU - PLA

2

Alternativa 03

V01 V02

Alternativa 04



A04V01
FFF
TPE - PLA

3

Alternativa 05

V01 V02 V03 V04 V05 V06 V07 V08

TÉCNICAS : FFF - Fabricação por Filamento Fundido | SLS - Sintetização Seletiva à Laser

MATERIAIS: PLA - Poliácido Láctico | TPU - Poliuretano Termoplástico | TPE - Elastômero Termoplástico | PP - Polipropileno