

DO ALGODÃO DOCE À N95: explorações de técnicas e equipamentos locais na confecção de microfibras plásticas para elementos filtrantes de máscaras faciais

FROM COTTON CANDY TO N95: explorations of local techniques and equipment in the manufacture of plastic microfiber for filtering elements of face masks

YAMAKI, Roberto Takao; Doutorando; PUC-Rio

takaoarquitectura@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

VINAGRE, Raphael de Pinho

raphael.vinagre@gmail.com

Resumo

A pandemia trouxe obstáculos sem precedentes. Um dos desafios críticos foi a carência no abastecimento de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). Para atender à demanda, a manufatura aditiva surgiu como uma solução viável para resolver a falta de alguns equipamentos. Máscaras impressas em 3D foram desenvolvidas para combater a falta do mercado, porém ainda está para ser superada a produção do elemento filtrante. Este estudo documenta a investigação que busca a viabilidade da aplicação da técnica de fundição de plástico por meio do centrífugo 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 objetivo é apontar possíveis caminhos do uso da fabricação e reciclagem distribuída e adaptação de infraestrutura local na manufatura de filtros viáveis, comparando-os com os gerados a partir de métodos tradicionais.

Palavras Chave: algodão doce; melt spinning; filtro.

Abstract

The pandemic has brought unprecedented obstacles. One of the critical challenges was the shortage of Personal Protective Equipment (PPE). To meet the demand, additive manufacturing has emerged as a viable solution to solve the shortage of some equipment. 3D-printed masks have been developed to combat the market shortage, but the production of the filter element has yet to be overcome. This study documents research into the feasibility of applying the plastic casting technique using centrifugal melt spinning, which is a possible way of replicating existing processes. The concept is simple and similar to the way cotton candy is made. The aim is to point out possible ways of using distributed manufacturing and recycling and adapting local infrastructure to manufacture viable filters, comparing them with those generated using traditional methods.

Keywords: *cotton candy; melt spinning; filter.*

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. Com fácil propagação e sintomas, ao início, desconhecidos, o número de casos da doença em hospitais subiu vertiginosamente e demandou quantidades de EPIs para os profissionais de saúde que ninguém tinha em estoque. EPIs como máscaras, luvas, aventais e protetores faciais desempenham um papel vital na prevenção da transmissão do vírus, protegendo os usuários e mitigando a propagação comunitária. A escassez desses equipamentos, inclusive de respiradores com filtro facial N95, foi exacerbada pelo aumento da demanda global, sobrecarregando as cadeias de suprimentos e criando desafios para atender às necessidades dos profissionais de saúde (Ehrlich et al., 2020).

A disponibilidade limitada de EPIs não só colocou em risco a segurança do pessoal da linha de frente, como também prejudicou o gerenciamento eficaz dos pacientes com COVID-19, enfatizando a importância fundamental de garantir um suprimento estável e suficiente de equipamentos de proteção durante as crises de saúde (Valdez et al., 2022). Em resposta à carência de EPIs, foram implementadas soluções e estratégias inovadoras para resolver as lacunas de fornecimento e proteger os médicos e enfermeiras. Alguns hospitais recorreram à reutilização de máscaras ou à improvisação com os recursos disponíveis para lidar com a disponibilidade limitada de equipamentos de proteção (Grossman et al., 2020). Além disso, iniciativas como a desinfecção de respiradores N95 usando peróxido de hidrogênio vaporizado foram introduzidas para ampliar a usabilidade do EPI e otimizar a utilização de recursos durante a pandemia (Fram et al., 2020). Os desafios apresentados pela falta de EPIs ressaltaram a necessidade de aquisição, distribuição e utilização eficientes de equipamentos de proteção para proteger o bem-estar dos profissionais de saúde (Schmidt et al., 2021).

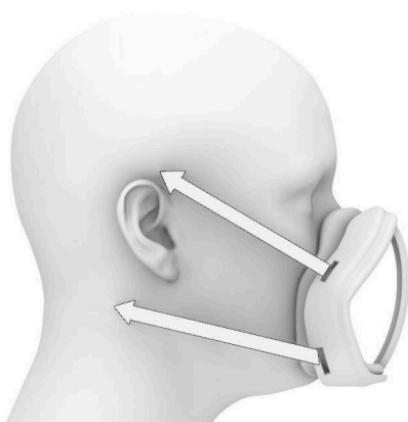
A ausência de EPIs durante a pandemia teve consequências de longo alcance para os profissionais de saúde, exigindo abordagens alternativas e esforços conjuntos para lidar com as interrupções na cadeia de suprimentos e garantir a segurança de todos. Os desafios enfrentados ressaltaram a importância do planejamento proativo, da alocação de recursos e de alternativas de produção não-centralizadas de insumos para mitigar a escassez e proteger a todos durante emergências de saúde pública.

Com esse aumento de demanda, novas técnicas de fabricação tiveram uma importante atribuição. A utilização da tecnologia de manufatura aditiva surgiu como uma solução viável para resolver a grande falta de alguns equipamentos durante a pandemia de COVID-19. Ao tirar partido das capacidades de impressão 3D, as comunidades conseguiram produzir rapidamente Equipamentos de Proteção Individual essenciais em resposta à insuficiência de fornecimento (Amir & Amir, 2022). Máscaras faciais impressas em 3D feitas sob medida também foram desenvolvidas para combater a falta de máscaras FFP2/3 disponíveis no mercado, oferecendo soluções personalizadas adaptadas a necessidades específicas (Swennen et al., 2020). Essas máscaras consistem tipicamente em componentes reutilizáveis impressos em 3D que, combinados com elementos filtrantes, proporcionam uma abordagem alternativa de produção durante crises epidêmicas (Swennen et al., 2020).

2 A Pesquisa

Na atual pesquisa desenvolvida no BioDesign da PUC-Rio, modelos de máscaras que aproveitam o tecido de máscaras cirúrgicas, aumentando significativamente sua eficácia (Yamaki et al., 2022), estão em desenvolvimento. No entanto, uma grande dificuldade que ainda está para ser superada é a produção do próprio elemento filtrante. O filtro de uma máscara é o elemento chave e principal responsável pela sua segurança. Deste modo, 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. A Figura 1 demonstra a máscara feita por manufatura aditiva utilizando máscara cirúrgica como mídia filtrante.

Figura 1 - Máscara feita por manufatura aditiva utilizando máscara cirúrgica como mídia filtrante.



Fonte: Yamaki et al., 2020.

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.

3 A Fabricação Emergencial De Filtros

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 centra-se 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.

4 Materiais e métodos

4.1 Research through Design

A pesquisa utiliza o método “Research through Design” (RtD), uma sistematização que integra processos de investigação e design para criar novos conhecimentos e soluções. Compreende a análise interativa, a concepção, o desenvolvimento e a implementação de produtos em contextos reais, conduzindo à criação de princípios e teorias de concepção contextualmente sensíveis (Basballe & Halskov, 2012). Esta abordagem está intimamente relacionada com a investigação através da prática, onde a criação de objetos impulsiona a geração de conhecimento.

RtD utiliza a práxis e pensamento de design como metodologia, de forma que a criatividade e o design crítico se desenvolvem em 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 que utilizam a técnica RtD criam artefatos destinados a serem trabalhados em questões criteriosamente colocadas (Zimmerman et al., 2007). Envolve a criação de protótipos, testes e aperfeiçoamento de soluções para resolver problemas complexos ou desenvolver novos produtos. Esta metodologia enfatiza a integração do design thinking, da experimentação e da análise para gerar novos conhecimentos e resultados práticos.

O valor do RtD reside na sua capacidade de complementar a lacuna entre a investigação e o design, como enfatizado no seu estudo sobre a dinâmica da investigação através do design (Basballe & Halskov, 2012). O RtD não se resume à criação de objetos, mas também ao desenvolvimento de protocolos, descrições e orientações para garantir a fiabilidade, a repetibilidade e a validade do processo (Reeves, 2015). O RtD é uma metodologia multifacetada que promove a inovação e o desenvolvimento de soluções práticas. Ao integrar diversos métodos de investigação, estratégias de amostragem intencionais e colaboração interdisciplinar, os investigadores podem abordar problemas complexos e gerar ideias e soluções contextualmente relevantes.

4.2 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 ou PP-PS ($T = 280-340^\circ$), 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 pessoa, 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.

A máquina de algodão doce tradicional, representada na Figura 2, possui os seguintes elementos típicos: um motor central, que gira o copo emissor perfurado que possui uma resistência. Ao ser acionado, esse copo gira em alta velocidade, a resistência esquenta 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, foram feitas as substituições para a montagem da nossa máquina utilizando as ferramentas comuns a seguir.

Figura 2 - Típica máquina de algodão doce.



Fonte: https://www.inovamaq.com.br/MLB-792963496-maquina-de-algodo-doce-industrial-12-sjuros-kit-_JM (acesso em 17/06/2024).

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, ambos representados na Figura 3.

Figura 3 - 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 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 (Figura 4).

Para fixação do copo emissor no eixo da esmerilhadeira, foi utilizado um disco diamantado para corte em concreto para dar maior estabilidade ao fundo, conforme demonstra também a Figura 4. 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 4 - 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 (acesso em 20/06/2024).

Para substituir a resistência e 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).

O controle de temperatura, conforme sugerido pelo material revisado, é realizado por meio de um termômetro culinário laser. Esse aparelho, representado também na Figura 5, foi escolhido devido à sua praticidade e acessibilidade, fundamentais para a realização do experimento. Além de facilitar a medição precisa da temperatura, o termômetro laser garante resultados confiáveis e eficientes, contribuindo significativamente para a precisão dos dados obtidos durante o experimento.

Figura 5 - 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).

Sobre a furação do copo emissor, a publicação de Bandi (2020) relata a utilização de uma broca de calibre 87 para fazer furos com 0,254mm 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 15mm de diâmetro (Figura 8). 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 (Figura 6). 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. Essa malha permanece sendo utilizada até o momento no modelo com emissor proveniente da caneca de aço, mas como desdobramento, já está prevista a utilização de uma malha mais fina.

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 6). 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 6 - 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)

4.3 Materiais utilizados

Foram utilizados nos experimentos pellets reciclados de polipropileno e sobras de filamentos de PLA - restos de impressões anteriores - trituradas, conforme a Figura 7. 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 7 - Pellets reciclados de polipropileno de 4 milímetros e sobras de filamento de PLA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 Experimentos

As tentativas iniciais foram relevantes não somente no sentido metodológico de adaptação do maquinário como resolução de problemas, mas como significativas 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 8). No momento, acreditou-se que a solda das chapas seria forte o suficiente para comportar as altas rotações da esmerilhadeira. 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.

Figura 8 - 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.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim sendo, as recomendações para uso da máquina permanecem as seguintes: o equipamento deve ser acionado somente com a tampa de MDF; o operador deve sempre utilizar máscara respiratória devido às partículas de plástico suspensas no ar; é necessário o uso de protetor auricular em função do alto ruído do motor; o operador deve utilizar óculos de proteção e face shield para proteger o rosto; e, caso seja necessário manusear material em alta temperatura, devem ser utilizadas luvas protetoras.

Os primeiros experimentos não foram bem-sucedidos utilizando somente o uso do 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, conforme demonstra a Figura 9. 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 para facilitar o seu derretimento, também representado na Figura 9. 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, conforme esquema da Figura 13. Isso fez com que o plástico aquecesse demais, tornando-se fluido, de forma que, ao acionar a máquina, ele fosse expulso sem formar os fios desejados, acumulando na parede do recipiente externo, representado na Figura 10.

Figura 9 - 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: Elaborado pelos autores.

Figura 10 - A temperatura alta derreteu o plástico deixando-o muito fluido, deixando um resíduo sólido na parede do recipiente.



Fonte: Elaborado pelos autores.

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 (Figura11). 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.

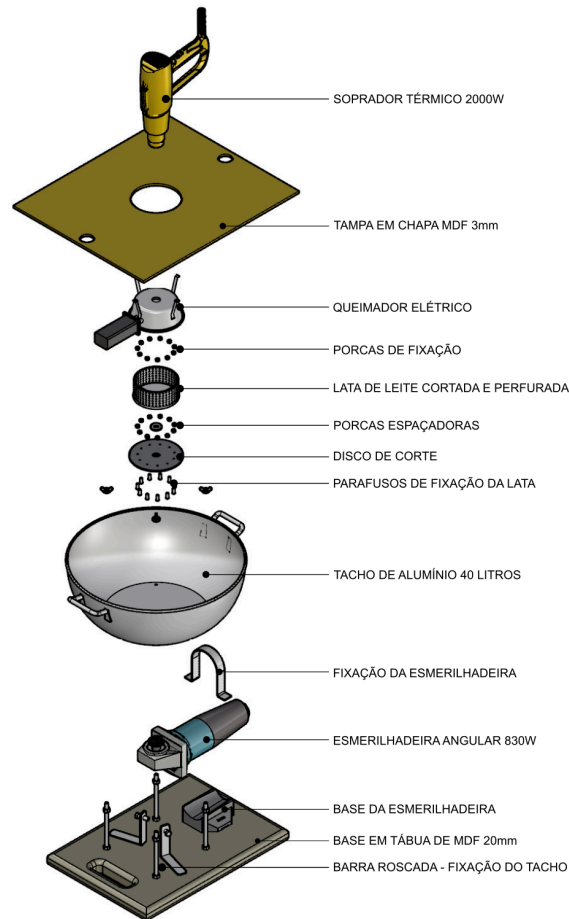
Figura 11 - Detalhe da montagem da base.



Fonte: Elaborado pelos autores.

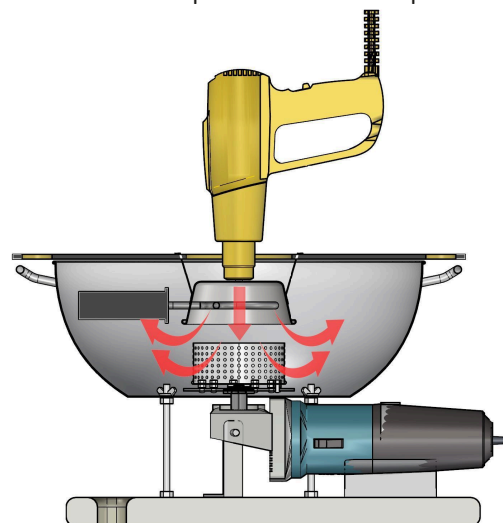
A montagem do primeiro protótipo ficou conforme a Figura 12:

Figura 12 - Vista explodida da primeira construção da máquina.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13 - Corte da primeira tentativa da máquina. O fluxo de ar quente indicado pelas setas vermelhas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em vista disso, foi estabelecido que o copo emissor deverá 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 (Figura 14) foi posicionada invertida logo acima do copo emissor. Esse procedimento canalizou o fluxo de ar diretamente para o plástico no interior do copo, saindo pelas telas e criando o resultado desejado.

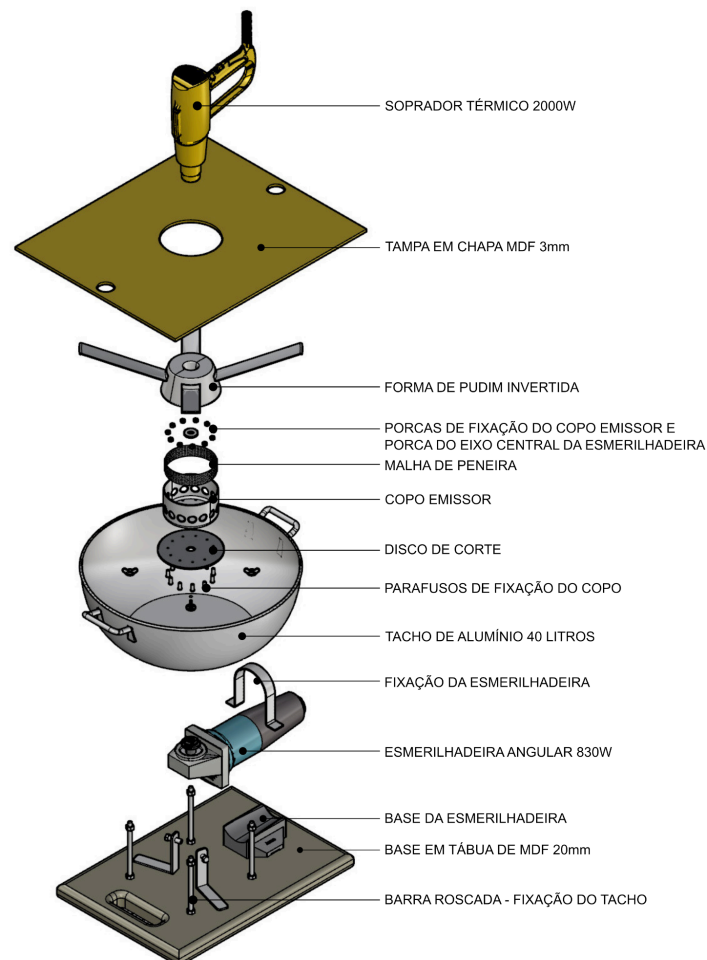
Figura 14 - Mini forma de pudim utilizada para canalizar o ar. Um furo foi feito na parte central para passagem de ar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A construção da máquina de algodão doce adaptada se encontra conforme a Figura 15:

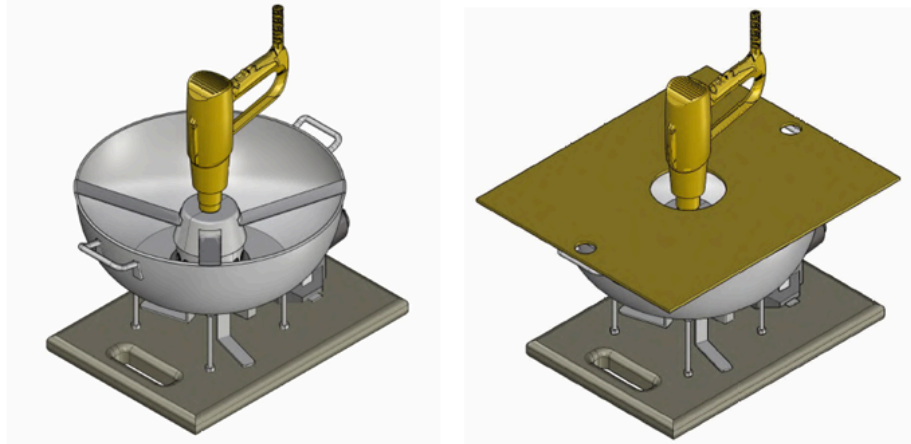
Figura 15 - Vista explodida da construção da nova máquina de algodão doce.



Fonte: Elaborado pelos autores.

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.

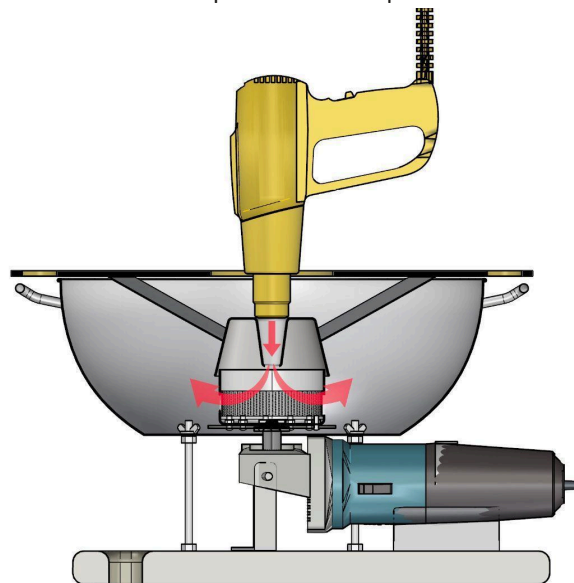
Figura 16 - Montagem final da máquina sem tampa (esq.) e com tampa (dir.).



Fonte: Elaborado pelos autores.

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, a tampa deve ser fechada, conforme demonstra a Figura 16 e o soprador deve ser posicionado de forma que sopre 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). Assim, com a máquina em alta rotação, o ar entra por cima do copo e é expulso pelas laterais, gerando os fios desejados (Figura 17).

Figura 17 - Fluxo de ar quente indicado pelas setas vermelhas.



Fonte: Elaborado pelos autores.



6 Resultados preliminares

O polipropileno foi o primeiro material de testes na construção da máquina. Utilizando pellets de polipropileno no estado em que estavam, foi possível chegar a um velo bruto ainda com fragmentos de plástico entrelaçados nos fios (Figura 18). 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, como também pode ser visto da Figura 18. Por ser um material com temperatura de fundição menor (145°C), seu manejo se mostrou mais fácil, com resultados promissores.

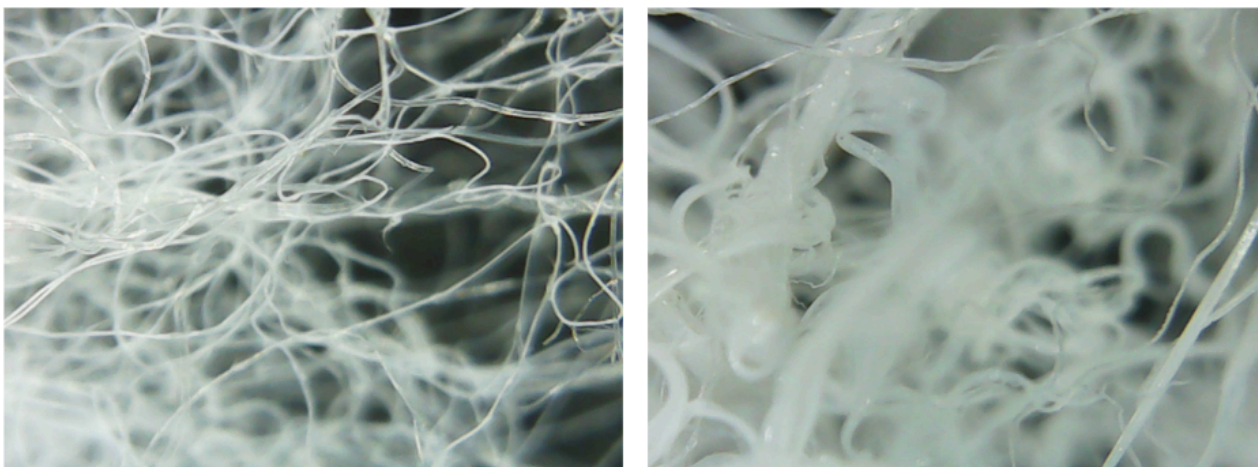
Figura 18 - Velo obtido com os pellets de polipropileno reciclado (azul) e velos de PLA reciclado nas cores preta, branca e laranja.



Fonte: Elaborado pelos autores.

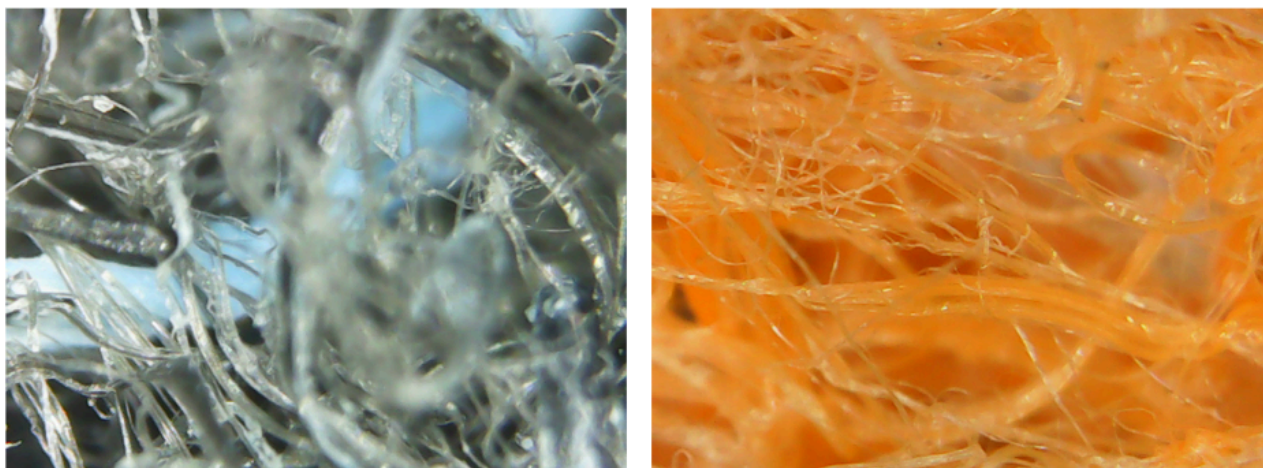
Como primeira análise, as amostras de PLA foram colocadas em um microscópio digital (ampliação x1000) para aferição do diâmetro dos fios, comparando-os ao material coletado de uma máscara N95, como mostram as Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Ampliação (x1000) dos fios de mÍdia retirada de máscara N95 utilizada como controle (esq.) e fios de PLA branco fabricados na máquina.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 20 - Ampliação (x1000) dos fios de PLA fabricados na máquina, preto (esq.) e laranja (dir.).



Fonte: Elaborado pelos autores.

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. No entanto, a documentação detalhada dos primeiros passos da pesquisa é importante justamente para identificar as fragilidades dos elementos utilizados, operando suas substituições ou aprimoramentos logo que possível.

7 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 (Wibisono et al., 2020). Esse método atípico não apenas fornece uma solução econômica, como também demonstra a adaptabilidade dos processos de fabricação em momentos de necessidade urgente, como a pandemia da COVID-19 (Wibisono et al., 2020).

Este estudo 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.

Não apenas isso, a construção dessa máquina possibilita a reciclagem de diversos plásticos para usos que não fazem parte da intenção original da pesquisa, com desdobramentos para a área da moda no uso da lã de plástico no seu modo rudimentar ou na fabricação de tecidos para os mais diversos empregos.

A utilização da máquina inspirada no processo de algodão doce no fabrico 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 continua em curso com foco na simplificação do processo de obtenção da mídia filtrante.

8 Trabalhos Futuros

Fundamentando-se em artigos publicados relatando 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 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.

9 Referências

- AMIR, A. and AMIR, B. (2022). **Combating the covid-19 pandemic using 3d printed ppe: challenges and recommendations.** The Open Public Health Journal, 15(1). <https://doi.org/10.2174/18749445-v15-e2206010>
- BANDI MM. (2020). **Electrocharged facepiece respirator fabrics using common materials.** Proc. R. Soc. A 476: 20200469. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0469>
- BANDI, M., ISHIZU, N., KANG, H. (2021). **Electrocharging face masks with corona discharge treatment.** Proceedings of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences, 477(2251). <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0062>
- BASBALLE, D., HALSKOV, K. (2012). **Dynamics of research through design.** In Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference (DIS '12). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 58–67. <https://doi.org/10.1145/2317956.2317967>
- EHRlich, H., MCKENNEY, M., ELKBULI, A. (2020). **Protecting our healthcare workers during the covid-19 pandemic.** The American Journal of Emergency Medicine, 38(7), 1527-1528. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2020.04.024>
- FRAM, D., ESCUDERO, D., MATIAS, L., COELHO, W., ANTONELLI, T., FERREIRA, D., MEDEIROS, E. (2020). **Personal protective equipment: shortage or waste?.** Infection Control and Hospital Epidemiology, 42(6), 786-787. <https://doi.org/10.1017/ice.2020.354>
- GROSSMAN, J., PIERCE, A., MODY, J., GAGNE, J., SYKORA, C., SAYOOD, S., ECKHOUSE, S. (2020). **Institution of a novel process for n95 respirator disinfection with vaporized hydrogen peroxide in the setting of the covid-19 pandemic at a large academic medical center.** Journal of the American College of Surgeons, 231(2), 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2020.04.029>
- MOLINA, A. (2020). **Project 1000 x 1000: centrifugal melt spinning for distributed manufacturing of n95 filtering facepiece respirators.** <https://doi.org/10.48550/arxiv.2004.13494>
- REEVES, S. (2015). **Human-computer interaction as science.** In Proceedings of The Fifth Decennial Aarhus Conference on Critical Alternatives (CA '15). Aarhus University Press, Aarhus N, 73–84. <https://doi.org/10.7146/aahcc.v1i1.21296>
- SCHMIDT, J., WALDOVA, E., BALKOVA, S., PILBAUEROVA, N., SMUCLER, R. (2021). **Impact of covid-19 on czech dentistry: a nationwide cross-sectional preliminary study among dentists in the czech republic.** International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(17), 9121. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179121>
- SWENNEN, G., POTTEL, L., HAERS, P. (2020). **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. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.03.015>
- VALDEZ, S., WALTON, K., LORESTO, F., NYQUIST, A., GIVENS, P. (2022). **Protecting pediatric healthcare personnel with personal protective equipment—specific roles.** Jona the Journal of Nursing Administration, 52(6), 330-331. <https://doi.org/10.1097/nna.0000000000001157>
- WIBISONO, Y., FADILA, C. R., SAIFUL, S., BILAD, M. R. (2020). **Facile approaches of polymeric face**

masks reuse and reinforcements for micro-aerosol droplets and viruses filtration: a review.
Polymers, 12(11), 2516. <https://doi.org/10.3390/polym12112516>

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**", p. 1866-1893 . In: Anais do 14º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. São Paulo: Blucher, 2022. ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/ped2022-7791844

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>