



**RELATÓRIO CIRCUNSTANCIADO LPP-ITA 02/2021**

***ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE FILTRAGEM DE PARTÍCULAS DE  
3,2  $\mu\text{m}$  EM MÁSCARAS FACIAIS DE TNT***

Dr. Gilberto Petraconi Filho – Professor Titular

Dr. Argemiro Soares da Silva Sobrinho – Professor Associado

Dr. Rodrigo Sávio Pessoa – Professor Adjunto

Dr. Douglas Marcel Gonçalves Leite – Tecnologista Pleno

**São José dos Campos, 20 de abril de 2021**

## 1. Introdução

Existem 2 tipos de máscaras regulamentadas para uso médico e hospitalar: a cirúrgica e a peça semifacial filtrante (PFF2S ou N95). A máscara conhecida como N95 refere-se a uma classificação de filtro para aerossóis adotada nos EUA e equivale, no Brasil, à PFF2 ou ao EPR do tipo peça semifacial com filtro P2, pois ambos apresentam o mesmo nível de proteção. As máscaras cirúrgicas devem ser confeccionadas em material não-tecido para uso odonto-médico-hospitalar, possuir, no mínimo, uma camada interna e uma camada externa e, obrigatoriamente, um elemento filtrante (de forma consolidada ou não), de forma a atender aos requisitos estabelecidos nas seguintes normas técnicas:

- ABNT NBR 15052:2004 | *Artigos de não-tecido de uso odonto-médico-hospitalar – Máscaras cirúrgicas – Requisitos*;
- ABNT NBR 14873:2002 | *Não-tecido para artigos de uso odonto-médico-hospitalar – Determinação da eficiência da filtração bacteriológica*.

Para o índice de qualificação de máscaras respiratórias, existem a Eficiência de Filtração Bacteriana (EFB) e Eficiência de Filtragem de Partículas (EFP). A **Eficiência de filtração bacteriana (EFB)** indica a eficiência da filtragem quando partículas, incluindo bactérias, cujo tamanho médio é de 3  $\mu\text{m}$ , são filtradas. No caso de máscaras médicas esta eficiência deve ser superior a 95%. A **Eficiência de filtragem de partículas (EFP)** indica a eficácia da filtração quando partículas finas, cujo diâmetro médio da contagem média é de aproximadamente 0,1  $\mu\text{m}$ , são filtradas.

As máscaras cirúrgicas são usadas para proteger o usuário de sprays, respingos e gotículas de partículas grandes (acima de 10  $\mu\text{m}$ ) e impedir a propagação de secreções respiratórias potencialmente infecciosas do usuário para outros. Um respirador N95 ou uma PFF2 é uma máscara facial mais justa. Essas máscaras precisam estar em conformidade com os critérios N95 ou DS2 onde os critérios como o de eficiência da filtragem de partículas (EFP, tamanho médio de partícula 0,1  $\mu\text{m}$  de látex) e eficiência de filtragem bacteriana (EFB, tamanho médio de partícula de 3,0  $\mu\text{m}$  de bactérias), são empregados. O estafilococo (aproximadamente 3  $\mu\text{m}$ ) é usado para testar esta função.

Neste cenário, o presente estudo realizado pela equipe do Laboratório de Plasmas e Processos (LPP) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) tem como objetivo atender a uma demanda do CEO BRICS-PED Rodrigo Dora, no sentido de avaliar a eficiência de filtragem de partículas de 3,2  $\mu\text{m}$  de diâmetro em modelo específico de máscara facial, da marca ANZU. Justifica o presente estudo o fato de o tamanho de partícula de interesse não compor o padrão de testes de eficiência de filtragem disponíveis nos institutos nacionais de análises de certificação de máscaras quanto as eficiências de filtragem de partículas (EFP). Cabe relembrar que a eficiência de filtragem de partículas é determinada utilizando partículas de 0,1  $\mu\text{m}$ , que é o tamanho de partículas de teste preconizado pela norma ABNT NBR 15052:2004 – *Artigos de não tecido de uso odonto-médico-hospitalar - Máscaras cirúrgicas – Requisitos* (ABNT, 2020), e, em atenção a esta norma, foram encomendados pelo solicitante os testes de EFP, na referida máscara facial, na forma de laudos fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Atendendo a esta demanda, os estudos apresentados neste relatório fundamentam-se em análises de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das camadas de TNT das máscaras fornecidas e objetivam, tendo como base os valores experimentais das eficiências de filtragem obtidas para partículas de 0,1  $\mu\text{m}$  realizadas pelo IPT, investigar por meio de uma modelagem matemática, a extrapolação dos valores de eficiência para partículas de 3,2  $\mu\text{m}$ . Em paralelo, um estudo aprofundado da literatura forneceu subsídio para a confirmação tanto do modelo quanto dos resultados obtidos.

## 2. Objetivos

### Objetivo principal:

- Estudo da extrapolação da eficiência de filtragem de partículas de máscara facial comercial de TNT de três camadas para partículas de  $3,2\ \mu\text{m}$  de diâmetro, a partir de valores de eficiência de filtragem obtidas experimentalmente para partículas de  $0,1\ \mu\text{m}$ .

### Objetivos Secundários:

Para atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos secundários foram elencados:

- Estudo da estrutura microscópica da máscara por microscopia eletrônica de varredura - MEV;
- Desenvolvimento de um modelo de análise de imagens obtidas por MEV para determinar a porosidade (número e tamanho de poros) de cada camada de TNT, assim como, da porosidade resultante das combinações entre as três camadas de TNT que compõem a máscara;
- Desenvolvimento de modelo matemático para estimar a eficiência de filtragem utilizando os dados de porosidade e os valores das medidas experimentais de eficiência de filtragem fornecidas pelo Laboratório de Análises do IPT.

## 3. Materiais e Informações Fornecidos

A Figura 1 apresenta a foto de uma máscara representativa da marca ANZU, fornecidas pelo solicitante para serem investigadas pelo presente estudo.

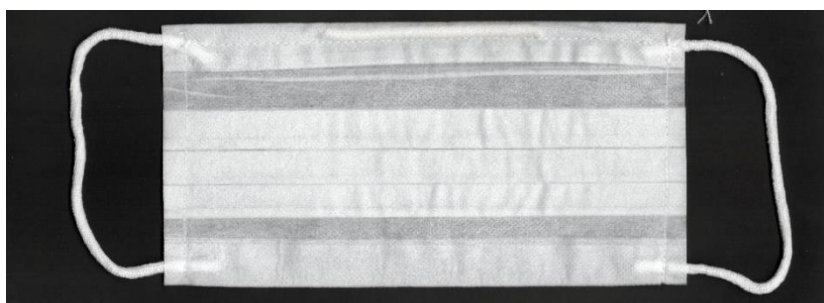


Figura 1: Foto de uma das máscaras fornecidas da marca ANZU e objeto dos estudos propostos.

O solicitante do presente estudo também forneceu o laudo de certificação com o valor da eficiência de filtragem de partículas (EFP) obtido experimentalmente para este mesmo modelo da marca ANZU de máscara facial contra partículas de  $0,1\ \mu\text{m}$  de diâmetro realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (IPT, 2020). O referido laudo apresentou o valor de EFP de 93% para a máscara analisada neste presente estudo.

## 4. Metodologia

### 4.1. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Para a análise de MEV foi utilizado um microscópio da marca TESCAN, modelo Vega 3. Antes da análise de MEV, cada máscara analisada teve suas três (3) camadas constituintes separadas (Figura 2) e submetidas à metalização por ouro (recobrimento de cada substrato por uma camada de aproximadamente 10 nm de espessura).

As imagens de MEV foram realizadas em diferentes pontos de cada camada das máscaras analisadas utilizando diferentes ampliações: 100x, 500x e 1.000x, conforme ilustrado nas imagens representativas da Figura 3.

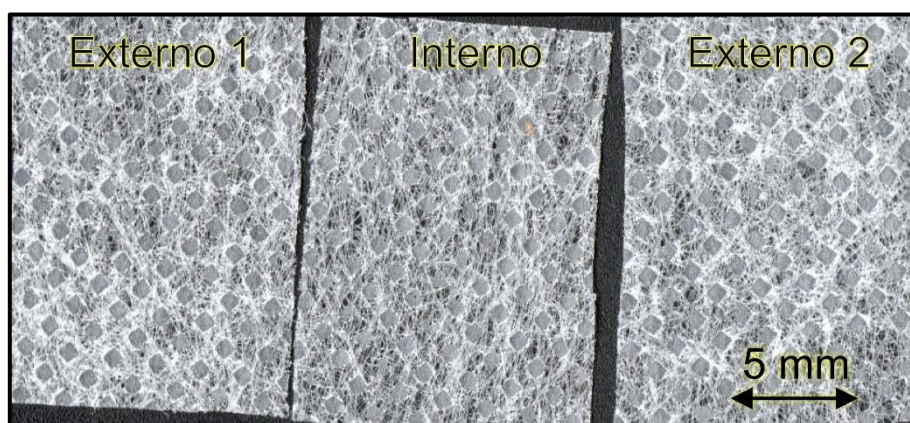


Figura 2: Foto de amostragens das três camadas de TNT que constituem a máscara em análise.

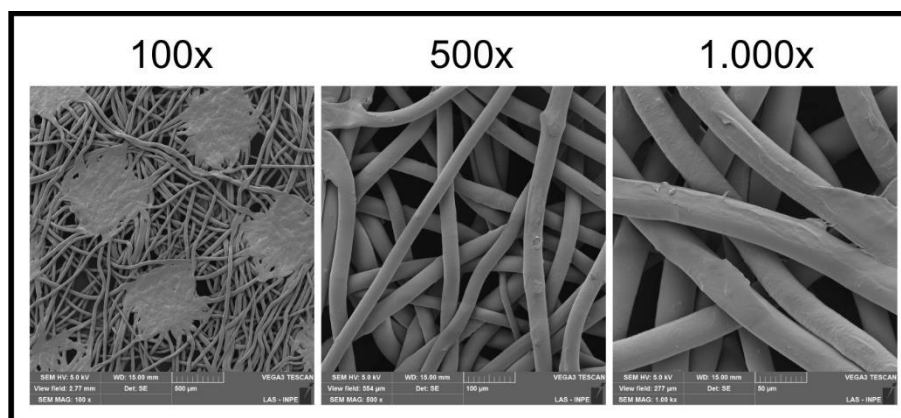


Figura 3: Imagens representativas em diferentes ampliações de uma das camadas da máscara analisada.

## 4.2. Extrapolação da Eficiência de Filtragem por Análise de Porosidade

O presente estudo faz uso de modelos matemáticos e rotinas computacionais para analisar a porosidade e então estimar a eficiência final de filtragem de partículas de diferentes tamanhos a partir de imagens obtidas por MEV das camadas de barreiras que compõe as máscaras objeto deste estudo.

Tanto os procedimentos quanto o modelo matemático-computacional utilizado seguem os padrões amplamente reportados na literatura corrente sobre o assunto (BAI et al., 2020; BERGAOUI et al., 2016; CHUA et al., 2020; DREWNICK et al., 2021; EICHHORN; SAMPSON, 2005; FOSCHINI et al., 2020; HILL; HULL; MACCUSPIE, 2020; JOSHI; KHAN; SAPRA, 2020; KONDA et al., 2020; LURIE et al., 2017; MAHDAVI, 2013; NIMMO, 2013; RAGAB A, FOUDA A, 2017; SAMPSON, 2009; TCHARKHTCHI et al., 2021; WANG; SCHILLER, 2020; WIRJADI, 2009).

A Figura 4 apresenta o esquema resumido dos procedimentos adotados, os quais são detalhados na sequência.

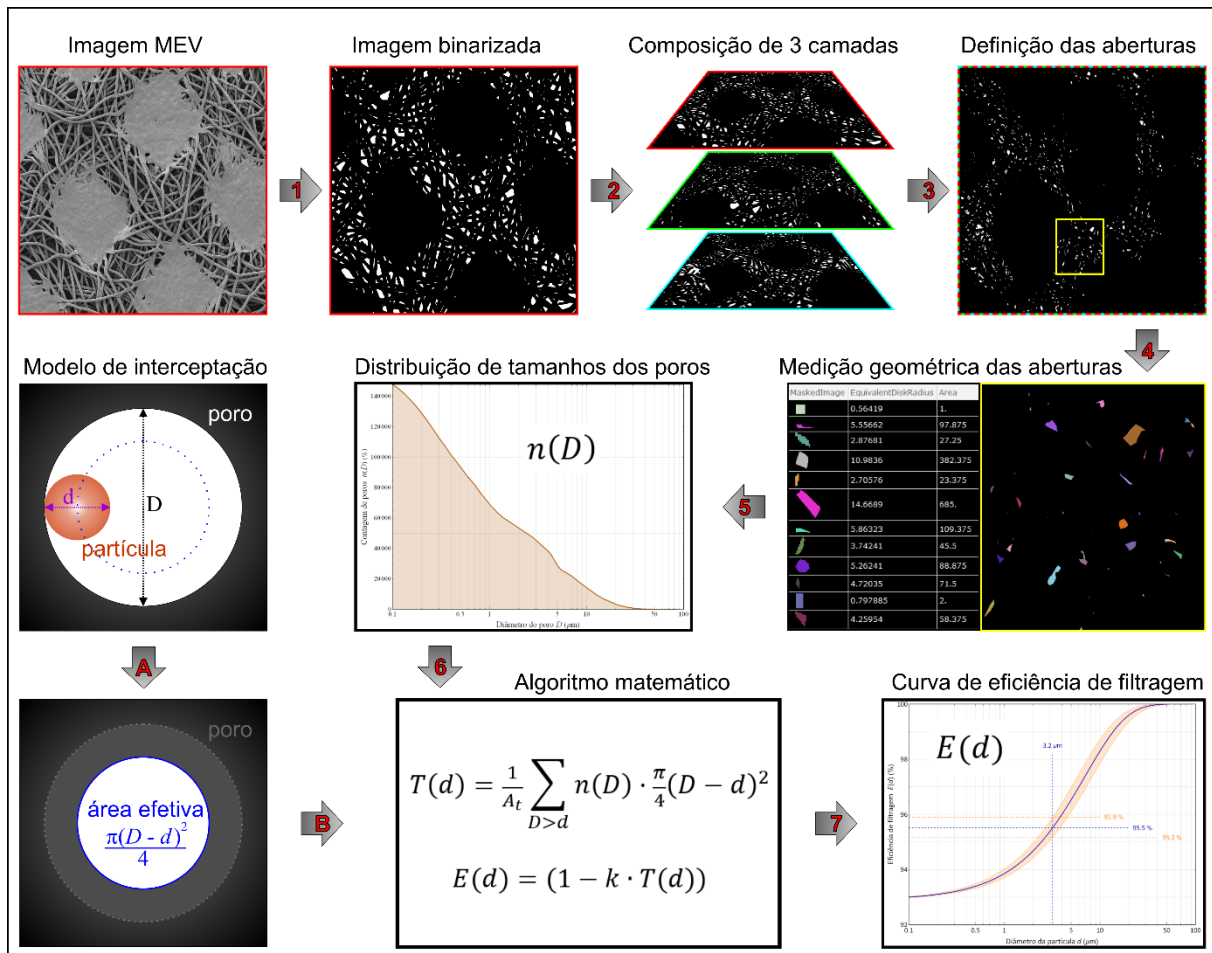


Figura 4: Representação esquemática das etapas de análise das imagens de microscopia, até obter a estimativa da curva de eficiência de filtragem em função do tamanho da partícula.



- Na etapa 1, uma imagem obtida por MEV de cada camada de um tipo de máscara é tratada por uma rotina computacional padronizada, resultando em uma imagem em branco e preto (imagem binária), da qual a parte branca representa as aberturas (poros geométricos) daquela camada, e a parte preta representa as fibras (barreiras);
- Na etapa 2, três imagens, uma de cada camada que compõe a máscara, são sobrepostas e submetidas a uma nova rotina computacional padronizada que determina a intersecção entre as aberturas de cada camada;
- Na etapa 3, a intersecção das aberturas de cada camada é computada em uma única imagem resultante, definindo assim, as aberturas (poros geométricos) finais da máscara de camada tripla;
- Na etapa 4, uma rotina computacional identifica, mede e quantifica todas as aberturas da imagem resultante. Cada abertura passa então a ser representada estatisticamente por um poro circular de diâmetro  $D$ , com mesma área da abertura (poro geométrico) original;
- Na etapa 5, os dados resultantes das análises de todas as imagens de uma máscara são reunidos e organizados gerando a curva de distribuição da quantidade de poros,  $n(D)$ , em função de seu diâmetro  $D$ ;
- Na etapa 6, os dados da distribuição de tamanhos de poros alimentam o algoritmo matemático desenvolvido para o cálculo da permeabilidade da máscara em função do diâmetro das partículas;
- Na etapa 7, a função eficiência de interceptação  $E(d)$  é obtida ao combinar o perfil de permeabilidade com o valor de eficiência de interceptação para partículas de diâmetro de  $0,1 \mu\text{m}$  (valor fornecido pelos laudos entregues pelo solicitante).

O resultado final do processo de análise é uma curva da eficiência de filtragem em função do tamanho dos poros, que é iniciada a partir dos dados experimentais obtidos para filtragem de partículas de  $0,1 \mu\text{m}$ , levando em consideração a distribuição de tamanho de poros analisadas por imagens de microscopia eletrônica de varredura.

#### 4.2.1 Estatística, Ampliações e Representatividade

Para compor a curva de distribuição de tamanhos dos poros  $n(D)$ , o subprocesso contendo as etapas de 1 a 4 da Figura 4 é repetido para cada imagem obtida de cada camada que compõe a máscara. Para se obter uma estatística confiável foram realizadas um total de 13.068 análises para cada ampliação de imagens obtidas por MEV. Este procedimento utiliza um total de três imagens de MEV de diferentes pontos de cada camada, o que por si só gera um total de  $3 \times 3 \times 3 = 27$  combinações diferentes, produzindo, portanto, 27 imagens a serem tratadas na etapa 4. Em procedimento conjugado, foi realizada a rotação de duas das camadas em 11 ângulos diferentes em relação à terceira camada e entre si, resultando em  $27 \times 11 \times 11 = 3.267$  combinações diferentes. Adiciona-se a este passo o espelhamento de duas das camadas em relação à terceira, resultando então nas  $3.267 \times 2 \times 2 = 13.068$  combinações diferentes, para cada ampliação.

Foram utilizadas três ampliações de MEV (100x, 500x e 1.000x), possibilitando a análise de poros e aberturas desde  $0,1 \mu\text{m}$  até  $500 \mu\text{m}$ . Portanto a curva de distribuição de tamanhos de poros,  $n(D)$ , foi obtida utilizando um total de 39.204 análises de imagens resultantes, demandando um tempo total de aproximadamente 90 horas de processo computacional (Intel i9, 9ª geração + 64GB RAM + GeForce RTX2080) para cada análise em cada máscara.

A representatividade das imagens de MEV utilizadas foi assegurada pela medição, de forma padronizada, de três amostras (três máscaras), medindo as três camadas de cada máscara em três diferentes

amplificações de microscopia eletrônica de varredura. Vale mencionar que, para todas as imagens obtidas, não foi possível identificar diferenças entre as camadas que compõe a máscara sob estudo, no entanto, e, para efeito de análise, a composição das três camadas de imagens conforme Figura 4, foi realizada mantendo sempre uma imagem de cada camada da máscara.

#### 4.2.2 Modelo Matemático Desenvolvido

Remetendo à Figura 4, quanto ao modelo matemático desenvolvido segue que:

- Passo A: um poro é representado estatisticamente por um orifício circular de diâmetro  $D$ , o qual será permeável a uma partícula esférica de diâmetro  $d$ , se e somente se, a partícula conseguir atravessar o poro sem tocar na parede deste. Este processo remete à definição da seção de choque entre o poro e a partícula, obtendo uma área efetiva pela subtração dos diâmetros ( $D - d$ );
- Passo B: A curva de permeabilidade relativa da máscara, representada por  $T(d)$ , em função do diâmetro  $d$  da partícula é obtida pelo produto da área efetiva com a respectiva quantidade de poros, dada pela curva de função distribuição  $n(D)$ , somado para os diferentes diâmetros  $D$  de poros maiores que  $d$ , e dividida pela área de todos os poros somada ( $A_t$ ), ou seja:

$$T(d) = \frac{1}{A_t} \sum_{D>d} n(D) \cdot \frac{\pi}{4} (D - d)^2 \quad (1)$$

- A curva de eficiência de filtragem  $E(d)$ , ou, em outras palavras, a probabilidade de uma partícula de diâmetro  $d$  ser capturada pelo material poroso, é determinada como o complemento unitário do produto da curva de permeabilidade relativa  $T(d)$  com o valor de permeabilidade de referência,  $k$ , ou seja:

$$E(d) = (1 - k \cdot T(d)) \quad (2)$$

Onde,  $k$  é obtido como o complemento unitário da eficiência de filtragem para partículas de menor diâmetro ( $d = d_{min}$ ), para o qual  $T(d_{min}) \rightarrow 1$ . Como um exemplo, para o caso em que o valor de eficiência de filtragem é 90% para partículas de  $d = d_{min} = 0,1 \mu m$ , ou seja,  $E(d_{min}) = 0,9$ , então o respectivo valor de  $k$  é de 0,1.

#### 4.3. Extrapolação da Eficiência de Filtragem Fundamentada em Dados da Literatura

Complementarmente ao modelamento matemático, foi realizado um estudo aprofundado sobre os dados experimentais disponíveis na literatura científica recente que viabilizem procedimentos de extrapolação da eficiência de filtragem para diferentes tamanhos de partículas.

Os principais trabalhos encontrados sobre o assunto (CHUA et al., 2020; DREWNICK et al., 2021; FOSCHINI et al., 2020; HILL; HULL; MACCUSPIE, 2020; KONDA et al., 2020; SAMPSON, 2009) apresentam evidências experimentais claras de que a eficiência de filtragem dos vários meios filtrantes, em especial de

máscaras constituídas de uma ou múltiplas camadas de TNT, tendem a um aumento monotônico em função do aumento da dimensão da partícula a ser filtrada, a partir de partículas com  $0,1\ \mu\text{m}$  de diâmetro.

Para conseguir uma extrapolação dos valores de eficiência para a máscara do presente estudo com base nos dados da literatura, foi gerado um gráfico que confronta os valores de eficiência de filtragem obtidos para partículas com dimensões entre  $0,5$  e  $10\ \mu\text{m}$  com os valores de eficiência de filtragem, dos mesmos elementos filtrantes, obtidos para partículas com dimensões entre  $0,03$  e  $0,25\ \mu\text{m}$ . Os dados para obtenção deste gráfico foram retirados diretamente da Figura 2 do artigo de revisão (DREWNICK et al., 2021), os quais foram então submetidos a uma regressão de segundo grau, gerando uma curva média representativa dos pontos e, portanto, mais adequada para a referida extrapolação.

## 5. Resultados

### 5.1. Resultados Obtidos pela Análise de Porosidade

A Figura 5 apresenta o gráfico da função distribuição de poros,  $n(D)$ , consistindo da contagem de poros para cada diâmetro  $D$ , obtido para a máscara em estudo.

Com base neste resultado, foi então obtida a curva de extrapolação de eficiência de filtragem  $E(d)$ , apresentada na Figura 6.

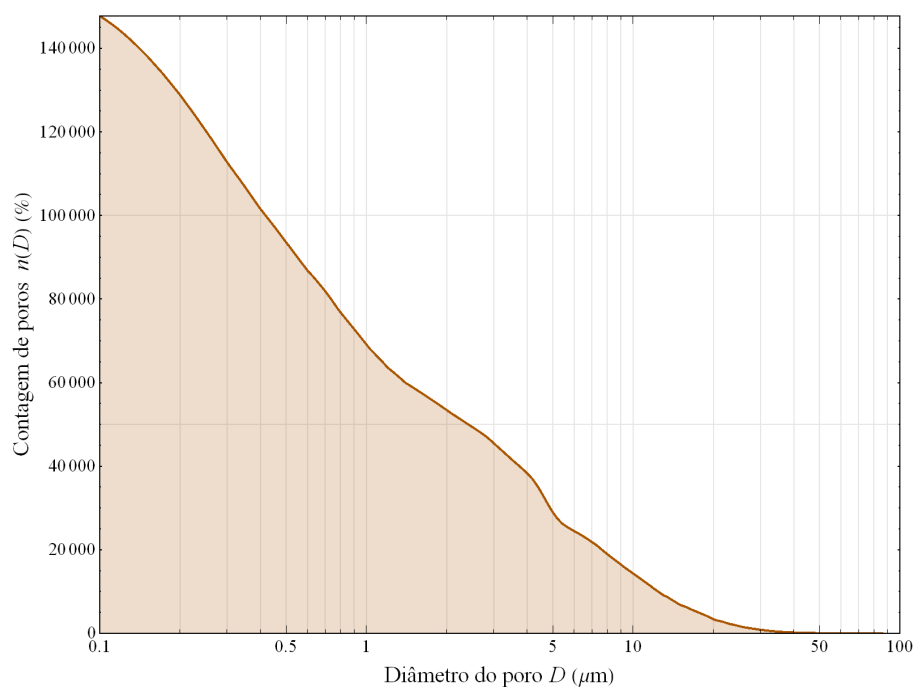


Figura 5: Gráfico da contagem de poros,  $n(D)$ , em função de seu diâmetro  $D$ , da máscara em estudo.



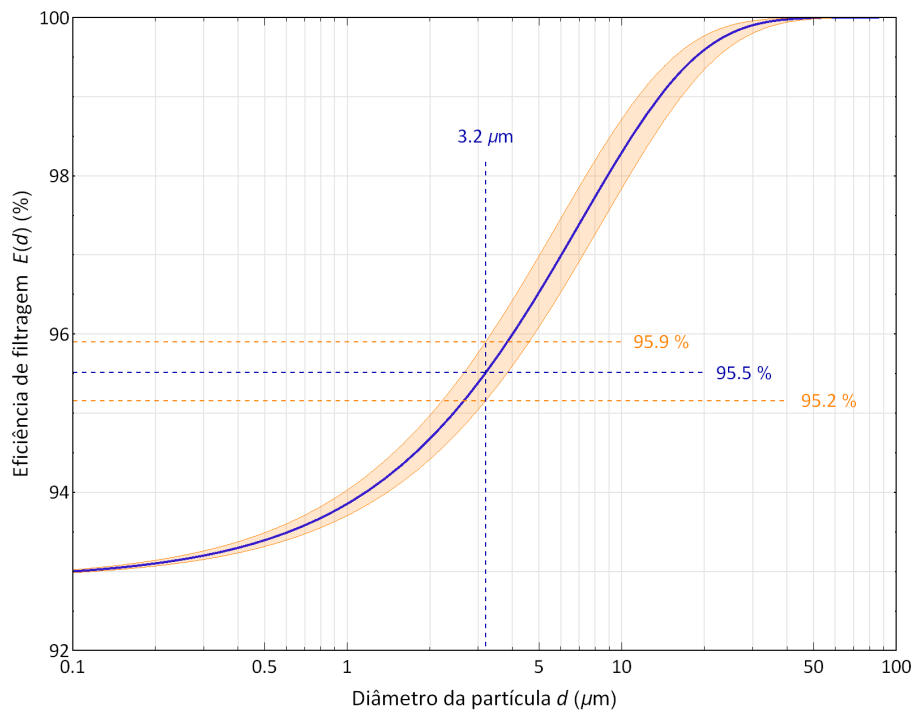


Figura 6: Curva de eficiência de filtragem,  $E(d)$ , extrapolado para uma máscara do presente estudo. A curva azul representa o resultado direto das análises enquanto a área hachurada em laranja representa a faixa de confiabilidade considerando um desvio de 20% na distribuição de tamanhos dos poros.

Analisando a Figura 6 é possível observar que o valor extrapolado da eficiência de filtragem para a máscara analisada é de 95,5% para partículas de diâmetro 3,2  $\mu\text{m}$ . Considerando ainda uma possível, mas improvável, margem de erro de 20% para mais ou para menos na distribuição de tamanhos de poros, a estimativa da eficiência de filtragem observada abrange uma faixa de confiança entre 95,2% e 95,9% para partículas de diâmetro de 3,2  $\mu\text{m}$ . De forma que o resultado da presente análise segue resumido na Tabela 1.

Tabela 1: Resultado de extrapolação da eficiência de filtragem de partículas para a máscara em estudo.

	Eficiência de Filtragem de Partículas (%)	
	Partículas 0,1 $\mu\text{m}$ (fornecido)	Partículas 3,2 $\mu\text{m}$ (extrapolado)
<b>Valor</b>	93	95,5
<b>Faixa de confiança</b>	-	95,2 - 95,9

## 5.2. Resultados da Extrapolação Baseada em Dados da Literatura

A Figura 7 apresenta o gráfico com a extrapolação da eficiência de filtragem de acordo com os dados experimentais reportados da literatura (DREWNICK et al., 2021), para vários tipos de elementos filtrantes, inclusive máscaras tipo cirúrgicas (pontos vermelhos).

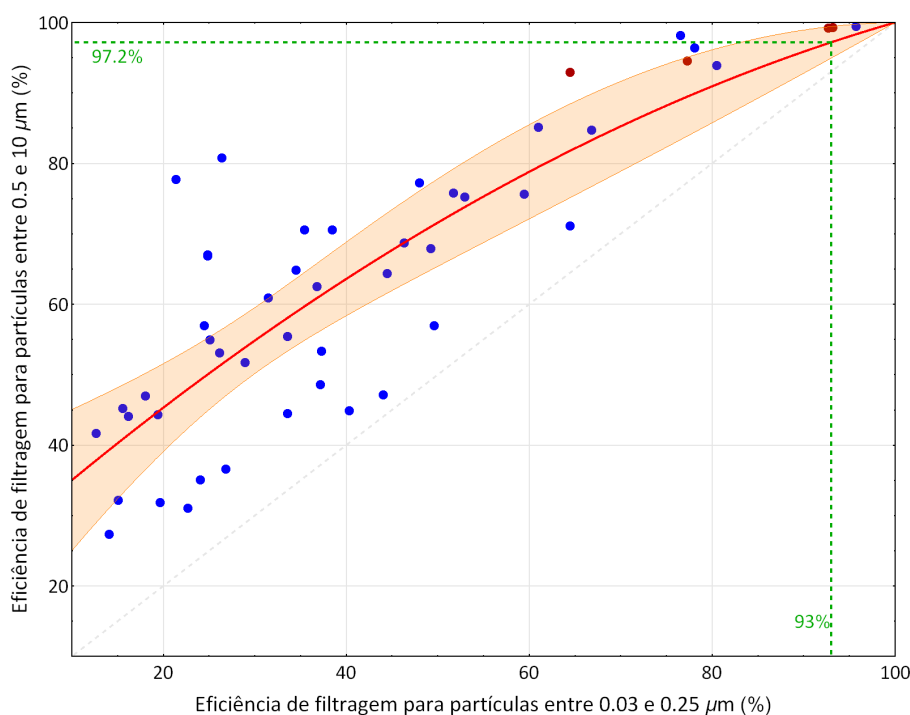


Figura 7: Gráfico de confronto entre as eficiências de filtragem medidas experimentalmente para dois diferentes intervalos de tamanhos de partículas: de 0,03 a 0,25  $\mu\text{m}$  (eixo horizontal) e de 0,5 a 10  $\mu\text{m}$  (eixo vertical), para vários tipos de barreiras porosas – pontos azuis, incluindo máscaras tipo cirúrgicas – pontos vermelhos, retirados diretamente da Figura 2 da referência (DREWNICK et al., 2021). A curva vermelha é a regressão polinomial de segundo grau dos dados (melhor ajuste com  $R^2 = 0.9725$ ). A região hachurada em laranja delimita a faixa de 99% de confiança do ajuste. As linhas tracejadas em verde indicam a extrapolação da eficiência de filtragem para partículas com tamanhos entre 0,5 e 10  $\mu\text{m}$ , considerando 93% como valor de eficiência para partículas entre 0,03 e 0,25  $\mu\text{m}$ .

A Tabela 2 resume os resultados obtidos pela análise da Figura 7.

Tabela 2: Resultado de extrapolação de eficiência de filtragem levando-se em consideração os dados da literatura do gráfico da Figura 7.

	Eficiência de Filtragem de Partículas (%)	
	Partículas entre 0,03 e 0,25 $\mu\text{m}$ (fornecido para 0,1 $\mu\text{m}$ )	Partículas entre 0,5 e 10 $\mu\text{m}$ (extrapolado)
<b>Valor</b>	93	97,2
<b>Faixa de confiança</b>	-	94,9 - 99,4

## 6. Conclusões

O presente estudo apresenta o desenvolvimento e a utilização prática de um método matemático para estimar a eficiência de filtragem para partículas de  $3,2\ \mu\text{m}$  de diâmetro a partir da extrapolação de dados de eficiência de filtragem para partículas de  $0,1\ \mu\text{m}$  de diâmetro, utilizando a análise da porosidade de máscaras de TNT por imagens de MEV.

Como esperado, os valores obtidos para a eficiência de filtragem de partículas de  $3,2\ \mu\text{m}$  de diâmetro são superiores aos valores medidos experimentalmente para eficiência de filtragem de partículas com  $0,1\ \mu\text{m}$  de diâmetro. Para a máscara da marca ANZU analisada neste relatório, a eficiência de filtragem para partículas de  $3,2\ \mu\text{m}$  obtida pelo método da extrapolação é de 96% comparado aos 93% de eficiência de filtragem obtido experimentalmente para partículas de  $0,1\ \mu\text{m}$ .

O valor de 96% obtido para a eficiência de filtragem para partículas de  $3,2\ \mu\text{m}$  está em pleno acordo com os valores de eficiência de filtragem reportados na literatura recente para o tipo de máscara analisado. Esta corroboração de resultados atesta a solidez e a confiabilidade da metodologia de análise desenvolvida e empregada neste estudo para a extrapolação da eficiência de filtragem de máscaras para partículas de maior dimensão quando é fornecido o valor da eficiência de filtragem obtida por medida experimental para partículas de dimensões menores.

## 7. Equipe responsável

Dr. Gilberto Petraconi Filho – Professor Titular

Dr. Argemiro Soares da Silva Sobrinho – Professor Associado

Dr. Rodrigo Sávio Pessoa – Professor Adjunto

Dr. Douglas Marcel Gonçalves Leite – Tecnologista Pleno

São José dos Campos, 20 de abril de 2021.

IMPORTANTE: Este relatório só poderá ser reproduzido por inteiro e com a aprovação escrita do solicitante do estudo.

## 8. Referências

- ABNT. **NBR 15052 - Artigos de não tecido de uso odonto-médico hospitalar - Máscaras cirúrgicas - Requisitos**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- BAI, H. et al. Computing Pore Size Distribution in Non-woven Fibrous Filter Media. **Fibers and Polymers**, v. 21, n. 1, p. 196–203, 2020.
- BERGAOUI, M. et al. New insights on estimating pore size distribution of latex particles: Statistical mechanics approach and modeling. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 224, p. 360–371, 2016.
- CHUA, M. H. et al. Face Masks in the New COVID-19 Normal: Materials, Testing, and Perspectives. **Research**, v. 2020, p. 1–40, 2020.
- DREWNICK, F. et al. Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks. **Aerosol Science and Technology**, v. 55, n. 1, p. 63–79, 2021.
- EICHHORN, S. J.; SAMPSON, W. W. Statistical geometry of pores and statistics of porous nanofibrous assemblies. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 2, n. 4, p. 309–318, 2005.
- FOSCHINI, M. et al. Aerosol blocking assessment by different types of fabrics for homemade respiratory masks: Spectroscopy and imaging study. **medRxiv**, 2020.
- HILL, W. C.; HULL, M. S.; MACCUSPIE, R. I. Testing of Commercial Masks and Respirators and Cotton Mask Insert Materials using SARS-CoV-2 Virion-Sized Particulates: Comparison of Ideal Aerosol Filtration Efficiency versus Fitted Filtration Efficiency. **Nano Letters**, v. 20, n. 10, p. 7642–7647, 2020.
- IPT. **Parecer Técnico 21 200-301**, São Paulo, 2020.
- JOSHI, M.; KHAN, A.; SAPRA, B. K. Quick laboratory methodology for determining the particle filtration efficiency of face masks/respirators in the wake of COVID-19 pandemic. **Journal of Industrial Textiles**, p. 1–19, 2020.
- KONDA, A. et al. Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks. **ACS Nano**, v. 14, n. 5, p. 6339–6347, 2020.
- LURIE, S. A. et al. Influence of mean distance between fibers on the effective gas thermal conductivity in highly porous fibrous materials. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 109, p. 511–519, 2017.
- MAHDAVI, A. Efficiency Measurement of N95 Filtering Facepiece Respirators against Ultrafine Particles under Cyclic and Constant Flows School of Graduate Studies. n. September, 2013.
- NIMMO, J. R. **Porosity and Pore Size Distribution**. [s.l.] Published by Elsevier Inc., 2013.
- RAGAB A, FOUDA A, E.-D. H. AND A.-T. H. Determination of Pore Size, Porosity and Pore Size Distribution of Woven Structures by Image Analysis Techniques. **Journal of Textile Science & Engineering**, v. 07, n. 05, 2017.
- SAMPSON, W. W. **Modelling Stochastic Fibrous Materials with Mathematica®**. London: Springer London, 2009. v. 44
- TCHARKHTCHI, A. et al. An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. **Bioactive Materials**, v. 6, n. 1, p. 106–122, 2021.
- WANG, F.; SCHILLER, U. D. Computational characterization of nonwoven fibrous media: I. Pore-network extraction and morphological analysis. **Physical Review Materials**, v. 4, n. 8, 2020.
- WIRJADI, O. Models and Algorithms for Image-Based Analysis of Microstructures. v. 2009, n. D 386, p. 139, 2009.