

FIBRAS ELETROFIADAS PARA FILTRAÇÃO DE AR

DOI: 10.22533/at.ed.5282313129

Daniela Patrícia Freire Bonfim

Laboratório de Controle Ambiental do
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar), São Carlos – SP

Vádila Giovana Guerra Béttega

Laboratório de Controle Ambiental do
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar), São Carlos – SP

Mônica Lopes Aguiar

Laboratório de Controle Ambiental do
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar), São Carlos – SP

9.1 FILTRAÇÃO DE AR E POLUIÇÃO AMBIENTAL

A poluição ambiental é um problema mundial que gera inúmeras consequências na vida diária da população, sendo as atividades antrópicas a principal ameaça ao meio ambiente sustentável, pois levam ao acúmulo de poluentes perigosos no solo, na água e no ar, afetando, significativamente, todos os ecossistemas.

Neste contexto, a população cada vez mais consciente sobre os malefícios que a poluição, principalmente a atmosférica, acarreta, está cobrando dos seus governantes medidas urgentes para a sua redução.^{1,2}

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), nove em cada dez pessoas respiram ar contendo altíssima concentração de poluentes, o que mostra que os níveis de poluição do ar permanecem perigosamente altos em muitas partes do mundo. Estimativas revelam um alarmante número de mortes de, aproximadamente, 7 milhões de pessoas todos os anos, causadas pela poluição do ar, sendo 3,8 milhões devido à exposição em ambientes fechados.³ Uma solução para a proteção contra poluentes presentes no ar em ambientes internos é utilizar um filtro de ar e, se não for possível, equipamentos de proteção individual (EPI's), como máscaras faciais e respiradores.⁴

A preocupação com os riscos à saúde associados à poluição do ar decorre da expansão da atividade industrial

sequente à Revolução Industrial do século XVIII e episódios de excessivos índices de poluição. Em decorrência destes episódios, diversos países passaram a adotar medidas que pretendiam evitar o comprometimento da qualidade do ar.⁵ Nesse cenário, surgiu a Epidemiologia Ambiental que visa gerenciar a saúde ambiental de forma eficaz e desenvolver estratégias de prevenção e mitigação, sendo fundamental para compreender percepções de risco para a saúde pública.^{1,6}

Recentemente, várias são as pesquisas que apontam para os efeitos prejudiciais da poluição atmosférica na saúde humana, desde complicações de origem fisiológica, como comprometimento do sistema nervoso, função cerebral e cognitiva; aumento da taxa de mortalidade e internações hospitalares, devido às doenças respiratórias e cardiovasculares e até diabetes; impactos psicológicos que acometem indivíduos ou grupos, uma vez que reduzem as condições de bem-estar, promovendo ansiedade e depressão, podendo até mesmo aumentar o risco de suicídio.⁷

Nos últimos anos, as evidências que relacionam a poluição do ar às doenças musculoesqueléticas tem aumentado, à medida que as pesquisas avançam.⁷⁻¹² De acordo com o estudo da *Global Burden of Disease* (GBD), a exposição a material particulado é a causa mais frequente de mortes relacionadas à poluição ambiental em todo o mundo, estimada em 8,8 milhões de mortes prematuras por ano.¹³ Além disso, estudos recentes indicaram que a poluição do ar é um fator adicional na letalidade da doença do Coronavírus (COVID-19), responsável pela pandemia iniciada em 2020.^{14,15} Zoran e colaboradores¹⁶ quantificaram o impacto da sazonalidade dos fatores climáticos e da poluição do ar na incidência e severidade das ondas da COVID-19 na região metropolitana de Madri, na Espanha. Segundo os autores, a alta taxa de disseminação do vírus é favorecida pelos altos índices de partículas poluentes, principalmente, $PM_{2,5}$, PM_{10} , ozônio ao nível do solo e dióxido de nitrogênio. Do ponto de vista da saúde pública, este estudo fornece informações úteis às autoridades de saúde porque permite otimizar as intervenções e estratégias precoces de controle durante as pandemias, a partir de informações adequadas sobre os fatores ambientais, que podem, inclusive, agravar as condições cardiovasculares e respiratórias.¹⁶

O material particulado (MP) se destaca como um dos principais poluentes do ar devido ao grande mal que ele provoca para a saúde da população e para o meio ambiente de um modo geral. Ele é uma mistura complexa de partículas e gotículas de líquidos, sendo seus principais componentes o carbono orgânico e elementar, além de outras matérias orgânicas e substâncias inorgânicas como sílica, nitrato e sulfato.¹⁷ Ademais, microrganismos aerotransportados, como vírus, bactérias e fungos (e seus fragmentos), também são classificados como material particulado, ou mais especificamente, bioaerossóis, que devido ao seu tamanho muito pequeno (de nano a micrômetros) são facilmente carregados pelo vento e podem flutuar por um longo tempo na atmosfera.^{18,19} Influenza vírus, Rhinovirus, *Mycobacterium tuberculosis* e o SARS-CoV-2, causador da COVID-19, são exemplos

de agentes patogênicos que podem permanecer suspensos na atmosfera e que quando inalados causam graves problemas à saúde humana.^{4,20}

A classificação do material particulado é realizada de acordo com o tamanho da partícula em: material particulado grosso, que correspondem às partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 10 micrometros (MP_{10}); material particulado fino, que são partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 2,5 micrometros ($MP_{2,5}$) e material particulado ultrafino, que são partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 1,0 micrometro ($MP_{1,0}$), sendo estes indicadores-chave de poluição do ar e fator determinante da qualidade do ar interno e externo.^{21–25}

Apesar dos riscos oferecidos à saúde pela alta concentração de material particulado, principalmente, os superfinos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) lançou somente em 2018 novos limites para os padrões de qualidade do ar, diferenciando as emissões de particulados por diâmetros e estabelecendo fases progressivas de limites com o intuito de alcançar a média anual desejável pela OMS, que é de $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para $MP_{2,5}$ e de $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para MP_{10} .^{26,27} Vale ressaltar que no estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) já vinha aplicando estes padrões desde 2013.²⁸ Como já mencionado, quanto menor o tamanho das partículas, maior é o seu potencial para causar problemas à saúde, e por isso, a implementação de meios mais eficientes para a remoção de material particulado do ar é extremamente necessária. Um dos equipamentos mais utilizados para fazer esse controle são os filtros de ar, tanto na indústria como em ambientes internos, porque eles possuem alta eficiência de coleta para o material particulado, para uma grande faixa granulométrica, podendo alcançar valores superiores a 99,9%, dependendo do meio filtrante utilizado.²⁹ Por isso, a filtração é um dos métodos mais utilizados para capturar partículas do ar sendo este financeiramente viável, de fácil operação e altamente eficiente.^{30–33}

A filtração é uma operação unitária que através de um meio poroso realiza a separação mecânica entre as fases particulada e fluida. Este meio poroso, que recebe o nome de meio filtrante ou filtro, tem a propriedade de reter a fase particulada e ser permeável a fase fluida, assim, o fluido que escoar através do meio filtrante é chamado filtrado e as partículas que se acumulam sobre o meio filtrante recebem o nome de torta de filtração.³⁴

A filtração em processos industriais pode ocorrer de duas maneiras diferentes, a depender, principalmente, da região em que atua. Quando a filtração ocorre no interior do meio filtrante, constituído de fibras não tecidas, esse mecanismo intitula-se filtração de profundidade e ainda não há a formação da torta de filtração. À medida que as partículas percorrem o meio filtrante, elas vão sendo capturadas pelas fibras que compõem este meio e, após algum tempo de operação, a torta de filtração vai se formando em sua superfície. Após a torta de filtração ser formada, a filtração passa a ser classificada como filtração superficial, etapa em que a torta de filtração passa a ser responsável pela captura de partículas e não mais o meio filtrante.³⁴

Os filtros são classificados por normas que os padronizam através de testes de eficiência e de permeabilidade, sendo as principais normas a ASHRAE 52.2 (americana), a ABNT NBR 16101:2012 (brasileira) e a EN799 e EN1822 (europeias). A norma americana classifica os filtros de acordo com o aumento da eficiência em valores mínimos até valores máximos conhecida como *minimum efficiency reporting values* (MERV). Essa escala compreende 20 valores sendo *MERV* 1-4 a classificação para filtros menos eficientes e *MERV* 16-20, para os mais eficientes.³⁵ A norma brasileira é baseada na norma europeia EN799 e qualifica os filtros (meios filtrantes) como grossos, médios e finos, a depender da eficiência de filtração de partículas em suspensão no ar,³⁶ e os filtros absolutos são classificados de acordo com a EN1822. Esta última classifica os filtros em relação à eficiência como EPA, HEPA e ULPA (norma americana), os quais apresentam eficiência de 85 a 99,999995%, para partículas de 0,1 a 0,3 μm .^{36,37} Os filtros absolutos são conhecidos por estarem entre os mais eficientes filtros disponíveis para aprisionar partículas de diâmetros diferentes e são rotineiramente usados para filtragem de ar em locais com rigoroso controle de qualidade do ar. No entanto, o uso de filtros absolutos, principalmente HEPA, vem sendo repensado nos últimos anos devido aos problemas apresentados quanto a gasto energético e durabilidade.^{37,38}

Os filtros de sistemas de ventilação de ambientes internos possuem diversos tipos de arranjos com distintas performances de eficiência de filtração. Por exemplo, para os filtros de ar condicionado residenciais são utilizados filtros grossos, enquanto que para os ambientes denominados salas limpas (indústria alimentícia, farmacêutica, de componentes eletrônicos, de pintura de veículos, entre outras), ambientes hospitalares, respiradores mecânicos, escapamento de veículos, entre outros, devem ser utilizados os filtros finos ou absolutos.^{37,39}

Conforme relatado na literatura, o uso de meios filtrantes também têm apresentado grande potencial para a fabricação de tecidos de proteção, máscaras e respiradores devido às suas propriedades de barreira (interações entre bioaerossóis e as fibras).⁴⁰⁻⁴² Neste caso, os meios filtrantes são também responsáveis por manter a qualidade do ar isenta de patógenos em ambientes internos e também por conter a disseminação de aerotransportados de pessoa a pessoa.

No mercado, independente da aplicação ser interna ou externa, existe uma grande variedade de meios filtrantes, com as mais diversas funções, características, preços e podem ser confeccionados a partir de diferentes materiais e métodos. Cada tipo de filtro tem um conjunto de características que devem ser escolhidas de acordo com a aplicação. A escolha de qual é o mais adequado para um determinado uso ainda é um grande desafio, e se for feita de forma inadequada, pode levar à redução da vida útil dos filtros e uma eficiência de coleta insatisfatória, acarretando no aumento do custo do processo.⁴³

Em relação às características do meio filtrante, é necessário observar fatores como: a gramatura, uma vez que se for muito baixa, dependendo do processo, pode gerar altas

emissões de material particulado e redução de vida útil; a densidade de empacotamento, que é a razão entre a gramatura e a espessura, e se esse valor for baixo, diminui a eficiência de coleta e favorece o desgaste precoce devido à abrasão do material particulado; e a permeabilidade e a porosidade que estão diretamente relacionadas com a queda de pressão do meio filtrante e sua eficiência de coleta.⁴⁴

Entre os possíveis meios filtrantes existentes no mercado destacam-se aqueles revestidos por uma fina camada de membrana polimérica, a qual garante alta eficiência de coleta durante todo o processo de filtração, inclusive para remoção de partículas nanométricas. Contudo, eles são caros, possuem alta queda de pressão e, a maioria destes meios filtrantes ainda não é comercializada no Brasil.⁴⁵ Sendo assim, para que o processo se torne viável espera-se que estes meios filtrantes tenham alta eficiência de coleta para material particulado superfino e baixa queda de pressão durante a filtração, o que garante alto fator de qualidade.^{46,47} Neste cenário, meios filtrantes nanofibrosos vêm demonstrando performances superiores quando comparadas aos materiais de filtração tradicionais formados unicamente por microfibras, especialmente por apresentarem baixa queda de pressão e durabilidade.³³ Por esse motivo, meios filtrantes formados por nanofibras são de grande interesse para aplicação em vários campos industriais e de ambientes internos, devido às suas características desejáveis, como elevada relação superfície-volume, alta porosidade, possibilidade de funcionalização, baixo diâmetro de fibras e alto desempenho de filtração. Adicionalmente, possibilita o controle de morfologia, estrutura e orientação das fibras durante o processo de confecção das mesmas. Assim, conclui-se que o uso de nanofibras de forma isolada ou combinadas aos filtros convencionais tem a capacidade de melhorar eficiência de coleta das partículas.^{46,48-50}

9.2 MECANISMOS DE FILTRAÇÃO

A predominância de um ou mais mecanismos está relacionada ao tamanho da partícula a ser filtrada, à vazão de escoamento, às características do fluido e à geometria estrutural do meio filtrante, como já mencionado.^{33,51} Existem modelos matemáticos que preveem a eficiência de coleta das partículas, os quais se baseiam nas equações empíricas que descrevem cada mecanismo. Essas equações estão disponíveis no trabalho de Hinds,⁵² incluindo o somatório delas. A Figura 9.1 mostra um esquema dos mecanismos de coleta a partir de uma fibra única centralizada, apresentada em corte transversal, denominada de coletor.⁵³

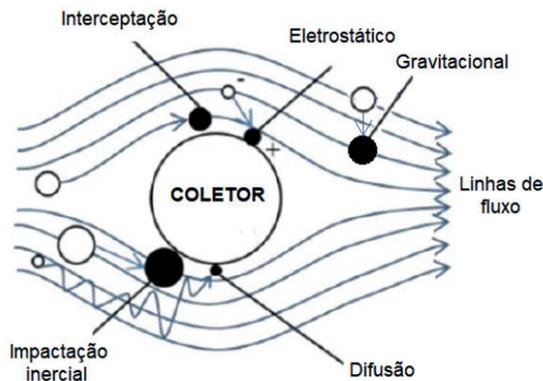


Figura 9.1. Mecanismos físicos de coleta. Adaptada com permissão da referência ⁵³. Copyright 2021 American Chemical Society.

9.2.1 Intercepção direta

O mecanismo de intercepção direta é resultado da relação entre o tamanho da partícula e o diâmetro das fibras do coletor.⁵⁴ Logo, uma partícula que segue as linhas de corrente do gás pode ser capturada pela fibra se a distância entre a partícula e a fibra for menor que o raio da partícula. Para altas velocidades de escoamento, a inércia das partículas faz com que elas colidam diretamente com o coletor, e para baixas velocidades de escoamento, as partículas deslocam-se segundo as linhas de escoamento do fluido, tornando desprezível este mecanismo de coleta.⁵⁴

9.2.2 Impactação Inercial

A impactação inercial ocorre quando a partícula, na faixa de diâmetro de 0,3 a 1 μm , não acompanha o desvio das linhas de fluxo ao passar pelo coletor e colide com a fibra do meio filtrante, ficando aderida. A capacidade da partícula de acompanhar as linhas de corrente decresce com o aumento de sua massa e sua ocorrência aumenta com o aumento da velocidade de filtração.³⁴ Esse mecanismo é governado pelo número de Stokes (Stk) que é o parâmetro que descreve o mecanismo inercial para coleta de partículas em meios filtrantes considerando o diâmetro da partícula do aerossol, densidade da partícula, a velocidade e a viscosidade do gás. A probabilidade de coleta é maior para maiores números de Stokes, e baixa para menores números de Stokes.²⁹ Também é importante considerar o tipo de escoamento do fluido definido pelo número de Reynolds (Re), se laminar, turbulento ou em transição. Isso porque existe considerável possibilidade de a partícula chocar-se com o coletor e em seguida retornar à corrente gasosa por choque elástico em escoamentos com elevados Re.⁵⁵

9.2.3 Difusão Browniana

Este mecanismo resulta do movimento aleatório a que pequenas partículas estão sujeitas em um gás, conhecido como difusão browniana e ocorre, principalmente, em partículas submicrômicas (abaixo de $0,1 \mu\text{m}$) e em baixas velocidades de filtração. Pela teoria cinética dos gases, as moléculas do ar estão em constante movimento, chocando-se entre si com grande frequência. Assim, pequenas partículas também são deslocadas por estas constantes colisões, difundindo-se tão rapidamente quanto menor for sua massa. Ao se deslocar pelo fluido, devido ao movimento desordenado, as partículas colidem com as fibras aderindo-se a elas.⁵⁶ A difusão browniana pode ser considerada como um processo de transferência de massa.⁵⁷

9.2.4 Efeito Eletrostático

O mecanismo eletrostático ocorre quando a deposição das partículas sob as fibras é devido às forças eletrostáticas tanto para partículas quanto para fibras carregadas ou ambas. As forças eletrostáticas podem aumentar significativamente a eficiência da coleta; portanto, a aplicação de forças eletrostáticas é amplamente utilizada para aumentar o desempenho de filtração.⁵⁵

9.2.5 Efeito Gravitacional

Nesse mecanismo a coleta ocorre por deposição das partículas sob as fibras por ação da força gravitacional. Um arranjo vertical que favoreça a deposição também pode ser utilizado. Para a nanofiltração, no entanto, esse mecanismo pode ser desprezível uma vez que as partículas são muito pequenas.⁵⁸

9.2.6 Coleta simultânea por diversos mecanismos

Conforme relatado na literatura, a diminuição do tamanho das fibras do coletor aumenta a eficiência de coleta para todas as faixas de tamanho de partícula, assim como para variações na porosidade e velocidade do ar,⁵⁹ o que justifica o uso de nanofibras em aplicações de filtração de ar.⁵⁸

Na filtração de nanopartículas, existe um comportamento esperado para baixas velocidades de filtração, com possíveis pequenos desvios relacionados à geometria estrutural do meio filtrante. Em geral, espera-se uma queda na eficiência global de coleta à medida que o diâmetro das nanopartículas aumenta. Isso ocorre porque para diâmetros de partículas menores que $0,1 \mu\text{m}$ há o predomínio do mecanismo de difusão browniana e para partículas com diâmetros maiores que $1,0 \mu\text{m}$ predominam os efeitos de interceptação direta e inercial.⁶⁰ Logo, para o intervalo de diâmetro entre $0,1$ e $1,0 \mu\text{m}$, coexistem três mecanismos caracterizando a região como de eficiência mínima. Neste intervalo há uma

maior penetração de partículas no filtro levando a uma queda na eficiência global de coleta.^{59,61,62} Huang e colaboradores⁶³ observaram redução da eficiência de coleta associada ao aumento da velocidade do ar que, segundo os autores, desfavoreceu o mecanismo de difusão browniana para a faixa de diâmetro de partículas estudada. Já Bortolassi e colaboradores⁴⁵ verificaram que alterações na porosidade do meio filtrante interferem na eficiência de coleta para nanopartículas já que o aumento de vazios do meio filtrante diminui a eficiência da coleta. Para a nanofiltração com alto fator de qualidade é necessário avaliar todas as características do meio filtrante, ou seja, a relação entre a geometria estrutural e o desempenho de coleta.⁶⁴

Oliveira e colaboradores⁶⁵ analisaram teoricamente o fenômeno da filtração através de um meio filtrante microfibrado comercial de celulose no qual foram depositadas nanofibras de PVA. Para uma melhor compreensão, os autores consideraram o fator hidrodinâmico de Kuwabara para o ajuste da faixa de diâmetro considerada (5,94 – 224,7 nm), assim como assumiram a distribuição de carga de partícula segundo a constante de Boltzmann e o efeito dos principais mecanismos de coleta. Neste estudo, a eficiência de coleta aumentou de 6,39 para 94,2% devido à adição de nanofibras no substrato de celulose com predomínio do mecanismo difusional e interceptação direta para partículas de tamanhos até 150 nm. O aumento da porosidade com a adição das nanofibras favoreceu o mecanismo difusional enquanto a geometria estrutural do meio filtrante favoreceu o mecanismo de interceptação direta, principalmente, para diâmetros de partícula maiores que 150 nm. Portanto, segundo os autores, a teoria clássica de filtração de ar foi extremamente útil para o aprimoramento do desempenho de um meio filtrante composto por micro/nanofibras.⁶⁵

Para a análise da eficiência total de um meio filtrante deve-se levar em conta a influência de um mecanismo sobre outro, principalmente, porque para cada tamanho de partícula haverá um mecanismo dominante.⁶¹

9.3 FILTROS FIBROSOS E NANOFILTRAÇÃO

Os filtros (meios filtrantes) fibrosos são os mais utilizados na purificação e no controle de poluentes de correntes de ar devido à sua habilidade de alcançar altas eficiências de coleta para micro/nanopartículas e baixa queda de pressão.⁵¹ Eles são compostos por diversas fibras finas que são arrançadas de forma a permitir alta porosidade e uma superfície de contato suficiente para a adesão das partículas. Isso se torna possível, principalmente, pelo grande número de materiais que podem ser utilizados para produzir esses filtros, como vidros, plásticos, metais, entre outros.^{39,66} Além disso, podem ser confeccionados por inúmeros processos de fabricação como modelo de síntese, separação de fases, automontagem, eletrofiação,⁶⁷ *forcespinning*,⁶⁸ deposição de camada atômica,^{69,70} entre outros. Portanto, eles podem apresentar características diferentes em relação à densidade de empacotamento, espessura, porosidade ou distribuição do tamanho da fibra.⁴⁶

O fator de qualidade (QF, do inglês *quality fator*) de um filtro é um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o desempenho geral do meio filtrante, já que combina o efeito da eficiência global de coleta com a queda de pressão. O fator de qualidade pode ser obtido através da equação:⁵⁰

$$QF = -\frac{\ln(1 - \eta)}{\Delta P} \quad (1)$$

sendo η a eficiência global de filtração e ΔP a queda de pressão através das membranas.

Wang e colaboradores⁷¹ investigaram o fator de qualidade de filtros obtidos a partir da deposição de uma única camada de fibras de vidro sob um substrato. Quando comparados com filtros convencionais de fibras de vidro, os filtros de nanofibras apresentaram melhor QF para partículas maiores do que 100 nm, no entanto, para partículas menores que 100 nm, os filtros convencionais apresentaram desempenho superior. Os autores destacaram ainda que um aumento da espessura e da densidade de empacotamento da camada de nanofibras em filtros de camada dupla melhora a eficiência de filtração para partículas maiores que 100 nm. Entretanto, como reportado na literatura, o aumento da camada de nanofibras resulta em membranas mais espessas e densas, o que acarreta em uma maior queda de pressão.^{30,72}

Bortolassi e colaboradores,³¹ ao compararem o desempenho de filtração de meios filtrantes fibrosos comerciais de fibra de vidro e de quartzo (filtros HEPA de diâmetro médio na faixa de 0,37 a 0,62 μm), concluíram que todos os meios filtrantes apresentaram eficiência de coleta próximas e iguais a 99% para nanopartículas durante os ensaios de filtração. Neste estudo, verificou-se que a constante de permeabilidade dos meios filtrantes foi o fator que mais influenciou a queda de pressão, e, portanto, o QF, sendo determinante para que o filtro HEPA de fibras de vidro apresentasse o melhor desempenho.

A permeabilidade de um filtro pode influenciar o escoamento de fluidos e por isso é uma propriedade de transporte importante, já que está relacionada à geometria estrutural de materiais fibrosos.⁷³ O arranjo das fibras pode impedir ou favorecer a passagem do ar através do filtro, sendo a permeabilidade um parâmetro relacionado à resistência encontrada pelo fluido ao atravessar um meio filtrante. Portanto, a completa interação entre o fluido e a estrutura do meio filtrante é um fator importante para a determinação deste parâmetro.

A Equação de Forchheimer é empregada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos:⁵⁷

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho_g}{k_2} v_s^2 \quad (2)$$

em que ΔP representa a queda de pressão através de um filtro de espessura L , μ a viscosidade do fluido, ρ_g a densidade do gás, v_s a velocidade superficial do gás e k_1 e k_2 as constantes de permeabilidade do meio poroso, sendo que o primeiro termo da equação refere-se aos

efeitos puramente viscosos e o segundo termo refere-se aos efeitos inerciais.³¹ Para o escoamento de fluidos através de meios porosos fibrosos cuja velocidade de filtração é baixa, a constante de permeabilidade pode ser obtida pela Equação de Darcy:^{57,74}

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (3)$$

sendo L a espessura do filtro, μ a viscosidade do fluido, v_s a velocidade superficial do gás, k_1 a constante de permeabilidade do meio poroso e ΔP a queda de pressão através do meio filtrante.

A porosidade total do meio filtrante assim como a quantidade e área dos poros também devem ser avaliados como constituintes da estrutura geométrica do meio filtrante. No entanto, segundo Oliveira e colaboradores,⁵⁸ a filtração do ar se concentra na porosidade total do meio filtrante uma vez que está relacionada à resistência à passagem do gás pela membrana (constante de permeabilidade). A porosidade teórica pode ser determinada através da Equação de Ergun, que considera a fração de vazios entre as fibras:³²

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{(150(1 - \varepsilon)^2 \mu v_s)}{\varepsilon^3 d_f^2} + \frac{(1,75(1 - \varepsilon) \rho_g v_s^2)}{\varepsilon^3 d_f} \quad (4)$$

em que ρ_g é a densidade do gás, μ é a viscosidade do gás, ε é a porosidade, v_s é a velocidade superficial de filtração, d_f é o diâmetro da fibra e L é a espessura do meio filtrante.³²

Bonfim e colaboradores⁴² estudaram o efeito da variação da distribuição do diâmetro das fibras na eficiência de coleta de nanopartículas durante a filtração do ar e concluíram que os meios filtrantes formados por micro/nanofibras aumentam a eficiência de coleta. Segundo os autores, a redução do diâmetro médio das fibras de 3,25 para 1,29 μm resultou em um aumento de 38 para 98,4% na eficiência global de coleta. Isso aconteceu porque a redução do diâmetro médio das fibras favoreceu a difusão browniana, que é o principal mecanismo de captura de partículas para a faixa de diâmetro utilizada nos testes de filtração (7 a 300 nm). A eficiência total de filtração de cada fibra inclui vários mecanismos de coleta, que devem ser claramente definidos para melhor compreender o sistema: aerossol a ser filtrado, meio filtrante e condições de escoamento.^{47,75} Como a filtração de nanopartículas é bastante complexa, não há como definir previamente as características morfológicas isoladas que um meio filtrante deve possuir para apresentar para alto desempenho. Portanto, o desempenho final é dependente de uma combinação de parâmetros relacionados às suas característica estruturais como: espessura, constante de permeabilidade, estrutura de poros interconectada, distribuição de diâmetros das fibras, entre outros fatores.^{33,42}

Ao longo dos anos, várias teorias sobre o mecanismo de filtração foram difundidas, principalmente, aquelas baseadas no movimento browniano, que sugerem que o processo

de filtração do ar ocorre em diferentes estágios: estado estacionário e não estacionário.⁴⁷ Quando não há variação na eficiência de filtração e na queda de pressão, pode-se considerar estado estacionário já que estes parâmetros dependem apenas das propriedades inerentes do meio filtrante, da natureza das partículas e da velocidade do fluxo de gás. Nesse estágio, o fluido percorre a região entre as fibras e as partículas são coletadas pela colisão e aderência à superfície das fibras.^{76,77} Por outro lado, quando há acúmulo de partículas sob o filtro, o mecanismo passa a ser governado pelas interações partícula-partícula e, neste caso, a filtração é dita como não estacionária.⁵⁶ A ocorrência de uma ou mais etapas durante a filtração em filtros fibrosos vai depender de como a torta é formada. Sendo assim, para a nanofiltração, devido à baixa concentração de nanopartículas no ar, o processo é considerado estacionário devido ao longo tempo de operação necessário para formar a torta de filtração.⁷⁷

Portanto, de acordo com a teoria clássica, nos instantes iniciais da filtração ocorre a interação entre a fibra e a partícula, sendo predominante a força de adesão entre a partícula e a superfície da fibra rígida, até que uma fina camada de pó seja depositada em sua superfície formando a torta de filtração. Esta interação acontece devido aos cinco mecanismos de coleta principais: interceptação direta, impactação inercial, difusão browniana, efeito eletrostático e efeito gravitacional. A eficiência total do meio filtrante será a soma da contribuição individual destes mecanismos de coleta.⁷⁸

9.4 USO DE FIBRAS ELETROFIADAS PARA FILTRAÇÃO DE AR

O avanço da nanociência e nanotecnologia permitiu a obtenção de novos materiais com propriedades otimizadas que, quando aplicados à filtração de ar, permitem a adaptação de funcionalidades relacionadas à tamanho e área superficial, que, além de melhorar o desempenho de filtração, oferecem excelentes perspectivas para o projeto de novos dispositivos/sistemas.^{24,47,79} Em particular, membranas de nanofibras são promissoras para filtração por apresentarem um comportamento semipermeável para vapores e gases, bem como excelente eficiência de filtração para várias aplicações, desde filtros interiores até equipamentos de proteção individual. Por esse motivo, os meios filtrantes contendo nanofibras eletrofiadas vêm se destacando dentre a grande variedade de filtros existentes no mercado, por apresentarem elevada relação área de superfície-volume, estrutura microporosa adequada à filtração, alta eficiência de coleta e baixos valores de queda de pressão quando em operação.^{41,42,46,80,81} Tais nanofibras, ao serem usadas como meios filtrantes promovem o aumento da eficiência de coleta das partículas comparadas aos filtros convencionais.^{33,82}

Uma grande variedade de materiais tem sido empregada na preparação dessas nanofibras, principalmente polímeros, por apresentarem propriedades adequadas para a fabricação de meios filtrantes para as mais diversas aplicações e alta retenção de materiais

particulados.^{38,41,58,63,83} As membranas podem ser constituídas de um único polímero, de uma blenda polimérica, de materiais compósitos por meio da adição de nanopartículas orgânicas e inorgânicas a matrizes poliméricas, ou ainda de materiais inorgânicos. Dentre os polímeros mais utilizados estão as poliâmidas, as poliimidas, o poliestireno, a poliacrilonitrila, o poliácido acético, o acetato de polivinila,^{30,45,72} além dos polímeros naturais como celulose e quitosana.^{30,41,72,84}

Devido às propriedades estruturais das camadas de nanofibras, a combinação destas fibras aos filtros absolutos tem sido descrita na literatura. De acordo com dados bibliográficos, essa associação melhora o desempenho de filtração uma vez que aumenta a permeabilidade, logo, reduz o aumento da queda de pressão, melhorando a eficiência de coleta.³⁸ Charvet e colaboradores³⁹ adicionaram uma fina camada de nanofibras (de vidro, de politereftalato de etileno e de polipropileno) antes e depois de um filtro HEPA e avaliaram eficiência de coleta e durabilidade do meio filtrante combinado. Os pesquisadores verificaram o aumento na eficiência de filtração e redução da queda de pressão devido à presença das nanofibras, e melhor resistência mecânica quando adicionadas após o filtro absoluto, aumentando o tempo de vida útil do sistema de filtração.

Bonfim e colaboradores³² também eletrofiaram membranas para uso em filtração de ar a partir de politereftalato de etileno (PET) reciclado de garrafas plásticas pós consumo. Neste trabalho, o elevado desempenho de filtração e resistência mecânica foram consequência da combinação dos parâmetros operacionais (concentração da solução, vazão de alimentação, velocidade de rotação do coletor, voltagem e distância de trabalho). Para concentrações de 10% em peso de PET foram obtidos meios filtrantes cuja distribuição de diâmetros da ordem de $0,65 \mu\text{m}$ favoreceu a coleta, principalmente, pelo mecanismo da difusão browniana, apresentando eficiência de coleta de 99%. Segundo os autores, conforme o diâmetro médio diminuiu de $3,25$ para $0,67 \mu\text{m}$, a resistência mecânica aumentou de $3,2$ para $4,5 \text{ Mpa}$, o que permitiu a obtenção de um meio filtrante resistente constituído apenas de nanofibras com alto fator de qualidade ($0,35 \text{ Pa}^{-1}$). Song e colaboradores⁸⁵ também eletrofiaram membranas de PET reciclado, porém, seguido de pós-tratamento com solventes orgânicos. Segundo os autores, foi possível controlar com sucesso a morfologia da superfície das fibras neste processo em duas etapas, o que garantiu que as membranas que receberam pós-tratamento apresentassem maior eficiência de captura de partículas, principalmente, $\text{PM}_{2,5}$. Dessa forma, os autores concluíram que as membranas obtidas podem ser utilizadas em equipamentos de filtração de uso doméstico e industrial devido ao alto desempenho apresentado.

Um polímero que tem recebido atenção é a poliacrilonitrila (PAN), já que meios filtrantes produzidos com estas nanofibras têm apresentando excelente desempenho em relação à limpeza do ar.³⁰ Recentemente, vários pesquisadores relataram o uso de membranas de PAN combinadas para melhorar eficiência de coleta e resistência mecânica como também a sua funcionalização, conferindo às membranas propriedades biocidas.

Chen e colaboradores¹⁸ eletrofiaram um filtro multifuncional composto por nanofibras de PAN para capturar $PM_{2,5}$ com a adição de TiO_2 comercial (Degussa P25) e esferas mesoporosas do mesmo óxido para favorecer atividade fotocatalítica e antibacteriana. Os autores concluíram que a adição de esferas mesoporosas de TiO_2 melhoraram a eficiência de coleta devido ao aumento da atração eletrostática que favoreceu a captura de $PM_{2,5}$. Os filtros binários alcançaram eficiência de coleta de até 96,75% com baixa queda de pressão (88 Pa), resultando em meios filtrantes com alto fator de qualidade além de elevada atividade antibacteriana. A eficiência do filtro binário foi 177% superior à filtros somente de PAN.

Bortolassi e colaboradores⁴⁵ eletrofiaram nanofibras de PAN sob um substrato de PET para conferir resistência ao meio filtrante e adicionaram nanopartículas de prata. Segundo os autores, a adição das nanopartículas não comprometeu a eficiência de filtração. A adição de apenas 1% em peso de $AgNO_3$ na solução de PAN, por exemplo, levou à obtenção de meios filtrantes com alta eficiência de filtração e atividade antibacteriana. Em geral, a eficiência foi próxima a 100% para remover nanopartículas na faixa de 9 a 300 nm com alto fator qualidade, próximo a $0,05 Pa^{-1}$. Os autores concluíram que os filtros obtidos se apresentaram resistentes para os testes de filtração e podem ser usados em diferentes aplicações que requerem alta eficiência de filtragem e controle bacteriológico.

Além da deposição de nanofibras sob um substrato poroso, a combinação de polímeros em solução também tem sido investigada como alternativa para reforçar as propriedades mecânicas. Por exemplo, Wang e colaboradores⁸⁶ desenvolveram uma membrana nanoestruturada a partir de misturas de policloreto de vinila e poliuretano (PVC/PU) cujo desempenho de filtração foi excelente, apresentando alta eficiência de filtração (99,5%), baixa queda de pressão (144 Pa) e resistência à tração próxima a 9,9 MPa.

Matulevicius e colaboradores⁴⁶ eletrofiaram nanofibras de poliamida (PA6 e PA6/6) em diferentes condições operacionais. Como consequência das variações da concentração do polímero na solução e do tempo de eletrofiliação, foram obtidas fibras com diferentes aspectos morfológicos (uniformes ou não) e os autores concluíram que a variável que apresenta maior influência no diâmetro das fibras é concentração da solução. A partir dos resultados obtidos os autores consideraram promissores os meios filtrantes obtidos uma vez que apresentaram 90% de eficiência e baixa queda de pressão para operações de purificação de ar.

Nanofibras eletrofiadas de poli(álcool vinílico) (PVA) e quitosana também foram relatadas na literatura como eficientes no controle da poluição do ar. Zhu e colaboradores⁸⁷ funcionalizaram as membranas com nanopartículas de sílica e de prata para conferir caráter antibacteriano. Segundo os autores, a incorporação de SiO_2 levou à obtenção de uma estrutura rugosa que favoreceu a coleta de nanopartículas, característica muito importante do ponto de vista da filtração, já que essa morfologia promove aumento da área superficial. As membranas obtidas mostram-se favoráveis para aplicações em filtração de ar devido ao alto desempenho de filtração e propriedades antibacterianas, as quais são desejáveis para

equipamentos de proteção individual.

A incorporação de catalisadores nas membranas também tem sido relatada como importante medida de controle de poluição de ar. Hu e colaboradores⁸⁸ introduziram estruturas de imidazolato zeolítico (ZIF-67) em membranas nanofibrosas de poliestireno (ZIF-67/PS HPNFM) para filtragem de material particulado e SO₂. Foi relatado que a adição do catalisador promoveu aumento da permeabilidade o que garantiu baixa queda de pressão (91 Pa). A estrutura obtida, devido à maior porosidade, favoreceu a coleta de material particulado de até 99,92% e a alta adsorção de SO₂ (1362 mg g⁻¹) à temperatura ambiente. Os autores concluíram que o material obtido é multifuncional, com destaque para a elevada porosidade, que pode contribuir para a remoção simultânea de vários contaminantes do ar, incluído gases e vapores.

Para aumentar a eficiência de filtração de material particulado também foram investigadas nanofibras obtidas a partir da combinação de diferentes materiais e estruturas. Li e colaboradores⁸⁹ eletrofiaram nanofibras de poliimida em feltro de aramida perfurado para aumentar a adesão entre as camadas de fibras. Os autores relataram que a presença das nanofibras diminuiu os custos operacionais de limpeza e troca do meio filtrante. Além disso, o filtro híbrido alcançou eficiência de coleta de 94,83% cujo fator de qualidade foi igual a 0,0214 Pa⁻¹. Liu e colaboradores⁹⁰ confeccionaram membranas a partir da junção de nanofibras eletrofiadas e redes de poliamida-56 de base biológica. Essa estrutura bimodal apresentou características integradas de diâmetro ultrafino, alta porosidade e estrutura tipo andaime que favoreceram a filtração de superfície, alcançando eficiências de 99,995% e baixa queda de pressão, próxima a 111 Pa. Segundo os autores, as membranas (PA-56 NFN) apresentaram elevada capacidade de filtração por interceptação devido ao baixo diâmetro das fibras o que as tornam promissoras para uma ampla gama de aplicações desde filtros de ar até roupas de proteção. Também foram relatadas alta resistência mecânica (11,02 MPa) e capacidade de regeneração.

O uso de surfactantes tem sido relatado na literatura como alternativa eficaz na redução de defeitos estruturais (pequenas aglomerações na superfície da fibra, também conhecidos como “*beads*”) e de diâmetro de nanofibras, além da possibilidade de conferir propriedades biocidas às mesmas.^{41,91,92} Segundo Maze e colaboradores,⁴⁷ fibras de menores diâmetros aumentam a área superficial, o que também foi relatado por Sundarrajan e colaboradores⁹⁵ que concluíram que a redução do diâmetro da fibra implica em aumento da eficiência de filtração. Oliveira e colaboradores⁵⁸ eletrofiaram meios filtrantes a partir de acetato de polivinila usando ácido cítrico (como agente de reticulação para aumentar a resistência das nanofibras de PVA) e diferentes concentrações de surfactante Triton X-100. Os pesquisadores concluíram que a adição de surfactante influenciou positivamente a estrutura morfológica do material resultando em uma rede mais densa de nanofibras o que favoreceu os mecanismos de coleta. De acordo com a pesquisa, a eficiência de coleta aumentou em até 92,5% para partículas com diâmetros de até 224,7 nm.

Membranas fibrosas de eletreto (material capaz de se manter eletricamente carregado por longos períodos) provaram ser um material eficiente e promissor para a adsorção de partículas transportadas pelo ar de forma eficaz por força eletrostática. Telas anti-embacamento constituídas de membranas PU-Si₃N₄ para contenção de material particulado também foram produzidas por eletrofiacção com injeção de eletreto inorgânico para favorecer o mecanismo eletrostático de coleta. Segundo os autores,⁹³ as nanofibras apresentaram diâmetro médio próximos a 350 nm e distribuição de diâmetro mais estreita do que as fibras das membranas com eletreto convencionais (Boemita, SiO₂ e TiO₂), o que permitiu alta eficiência de filtração (79,36%) e baixa queda de pressão (25 Pa). A morfologia, estrutura porosa, permeabilidade ao ar e resistência da membrana foram controladas a partir da concentração das nanopartículas de eletreto. Portanto, as telas de janela nanofibras de eletreto de poliuretano/nitreto de silício têm amplas perspectivas de aplicação além de transmitância de luz adequada (40%).

O desenvolvimento de nanomateriais inorgânicos também tem sido relatado como promissor para aplicações em filtração de ar. Mao e colaboradores⁹⁴ confeccionaram membranas nanofibras de sílica que demonstraram alta flexibilidade e resistência a temperaturas elevadas. Neste trabalho, a eficiência de coleta para aerossóis de NaCl alcançada foi de 99,99% e queda de pressão igual a 163 Pa pelas membranas SNF que apresentaram também propriedades mecânicas excelentes para aplicações industriais.

A filtração de ar vai além dos poluentes comumente conhecidos, como mencionado anteriormente, sendo os bioaerossóis um grupo importante de material particulado devido aos inúmeros problemas de saúde pública que podem causar. A demanda por EPI's cresceu no ano de 2020 devido à pandemia da COVID-19, e assim como em 2009 e em 2002, devido à gripe suína e ao SARS-COV-1, pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de materiais com excelentes desempenhos de filtração e características biocidas foram impulsionadas, em especial, máscaras e respiradores. Almeida e colaboradores⁹⁵ eletrofiaram membranas biodegradáveis de acetato de celulose (CA)/brometo de cetilpiridínio (CEB) e avaliaram as propriedades antibacterianas. Os autores concluíram que o surfactante utilizado tem 100% de ação bactericida comprovada em testes com *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Além disso, a eficiência de filtração alcançada, de acordo com as normas para máscaras cirúrgicas (no Brasil, ABNT NBR 15052), foi de 77%, e que podem ser otimizadas a partir de ajustes na porosidade e espessura do meio filtrante.

A eficiência de filtração efetiva para a faixa de diâmetro do novo coronavírus foi testada por Leung e Sun⁸¹, os quais eletrofiaram nanofibras de PVDF carregada sob um substrato e em diferentes configurações. Os resultados para coleta de nano-aerossol de 100 nm foram superiores a 90% com baixa queda de pressão, configurando um material com alto fator de qualidade. Segundo os autores, a captura dessas nanopartículas de 100 nm e abaixo, na faixa de tamanho característica do novo coronavírus, foi principalmente devido aos mecanismos de difusão e eletrostático. Os autores concluíram que este material fornece a engenharia necessária para a proteção da população frente ao coronavírus e

outros poluentes. Nanofibras de acetato de celulose e fluoreto de polivinilideno (PVDF) depositadas em substrato de polipropileno também foram desenvolvidas por Akduman⁹⁶ como materiais eficazes para a produção de filtros para respiradores N95 de acordo com os padrões do Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH, do inglês *National Institute for Occupational Safety and Health*). De acordo com este estudo, o diâmetro das nanofibras foi associado a concentração da solução e a espessura, ao tempo de coleta, sendo que ambos foram relacionados ao desempenho de filtração. Como resultado, meios filtrantes de camada dupla atenderam aos requisitos do NIOSH e podem ser utilizados para a produção de EPI's.

Liu e colaboradores⁹⁷ também eletrofiaram uma microfibras biodegradável de fibroína de seda/poli(ácido lático-co-glicólico)/óxido de grafeno (SF/PLGA/GO) para usar como tecido de proteção, o qual apresentou grande eficácia para remoção de poluentes particulados e agentes patogênicos presentes no ar. Além disso, estudos também relataram a funcionalização de nanofibras com biocidas (sal de amônio quaternário, polihexametileno biguanida e nanopartículas de prata) promovendo redução de bactérias gram positivas e negativas.^{98,99} A adição de compostos naturais, como o própolis, também tem sido relatada na literatura devido ao seu caráter bactericida.^{47,100}

Esses resultados revelam a grande aplicabilidade e a ampla gama de utilização dos meios filtrantes na remediação da poluição do ar, permitindo que fibras eletrofiadas sejam empregadas com sucesso no combate à poluição nas mais diversas configurações.

9.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

A preocupação com a qualidade do ar deve ser um compromisso de todos para a manutenção da vida na Terra, uma vez que os níveis elevados de poluição, antes característicos das grandes cidades, já são realidade também em médias e pequenas cidades. Somado a isso, os efeitos prejudiciais para a população humana são enormes, principalmente, ao sistema cadiorrespiratório devido a variedade de doenças decorrentes da inalação de material particulado.

A filtração de ar utilizando meios filtrantes eletrofiados tem se mostrado uma técnica muito promissora devido ao desenvolvimento econômico e eficiente desses filtros, os quais são capazes de coletar partículas ultrafinas, voláteis, bactérias e vírus, os quais são danosos à saúde humana. Ao serem adicionadas em meios filtrantes, as nanofibras promovem o aumento da eficiência de coleta das partículas comparadas aos meios filtrantes convencionais por possuírem características como alta relação área de superfície/volume, estrutura de poros interconectada e pequenos diâmetros de fibras, favorecendo baixa queda de pressão quando em operação.

Diversos materiais têm sido usados para a confecção dessas nanofibras, com destaque para os polímeros, que permitem a obtenção de diferentes meios filtrantes. Por

esse motivo, a pesquisa e o desenvolvimento de materiais nesta área apresentam-se como um grande desafio na busca de melhoria de condições ambientais de forma efetiva e com garantia de resultados favoráveis.

Neste cenário, os nanomateriais desempenham um papel importante, uma vez que a possibilidade de adaptar funcionalidades de tamanho e superfície oferecem excelentes perspectivas para o projeto de novos materiais, além de melhorar seu desempenho. O que se espera é que o grande potencial de meios filtrantes seja continuamente avaliado para que o espectro de utilização desses filtros seja totalmente explorado em salas limpas, salas de pintura, indústria nuclear, alimentícia, cosméticos, farmacêutica, dentre outras aplicações, como tecidos de proteção e EPI's. Adicionalmente, espera-se também uma maior fiscalização por parte dos órgãos competentes em relação a emissão de material particulado por grandes setores da cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS

1. Yadav, N.; Garg, V. K.; Chhillar, A. K.; Rana, J. S. ;*Chemosphere* **2021**, *280*, 130792.
2. Lee, Y.-G.; Lee, P.-H.; Choi, S.-M.; An, M.-H.; Jang, A.-S. ;*Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 9905.
3. Schraufnagel, D. E.; Balmes, J. R.; Cowl, C. T.; De Matteis, S.; Jung, S.-H.; Mortimer, K.; Perez-Padilla, R.; Rice, M. B.; Riojas-Rodriguez, H.; Sood, A.; Thurston, G. D.; To, T.; Vanker, A.; Wuebbles, D. J. ;*Chest* **2019**, *155*, 409.
4. Offeddu, V.; Yung, C. F.; Low, M. S. F.; Tam, C. C. ;*Clin. Infect. Dis.* **2017**, *65*, 1934.
5. Dapper, S. N.; Spohr, C.; Zanini, R. R. ;*Estud. Avanzados* **2016**, *30*, 83.
6. Noël, C.; Vanroelen, C.; Gadeyne, S. ;*SSM - Popul. Heal.* **2021**, *15*, 100879.
7. Geng, L.; Wu, Z.; Zhang, S.; Zhou, K. ;*J. Environ. Manage.* **2019**, *232*, 413.
8. Chen, H.; Wu, J.; Wang, M.; Wang, S.; Wang, J.; Yu, H.; Hu, Y.; Shang, S. ;*Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 9644.
9. Daiber, A.; Kuntic, M.; Hahad, O.; Delogu, L. G.; Rohrbach, S.; Di Lisa, F.; Schulz, R.; Münzel, T. ;*Arch. Biochem. Biophys.* **2020**, *696*, 108662.
10. Karimi, B.; Shokrinezhad, B.; Samadi, S. ;*Atmos. Environ.* **2019**, *198*, 438.
11. Marcelino, R. B. P.; Amorim, C. C.; Ratova, M.; Delfour-Peyrethon, B.; Kelly, P. ;*Chem. Eng. J.* **2019**, *370*, 1251.
12. Münzel, T.; Hahad, O.; Daiber, A.; Lelieveld, J. ;*Herz* **2021**, *46*, 120.

13. Burnett, R.; Chen, H.; Szyszkowicz, M.; Fann, N.; Hubbell, B.; Pope, C. A.; Apte, J. S.; Brauer, M.; Cohen, A.; Weichenthal, S.; Coggins, J.; Di, Q.; Brunekreef, B.; Frostad, J.; Lim, S. S.; Kan, H.; Walker, K. D.; Thurston, G. D.; Hayes, R. B.; Lim, C. C.; Turner, M. C.; Jerrett, M.; Krewski, D.; Gapstur, S. M.; Diver, W. R.; Ostro, B.; Goldberg, D.; Crouse, D. L.; Martin, R. V.; Peters, P.; Pinault, L.; Tjepkema, M.; van Donkelaar, A.; Villeneuve, P. J.; Miller, A. B.; Yin, P.; Zhou, M.; Wang, L.; Janssen, N. A. H.; Marra, M.; Atkinson, R. W.; Tsang, H.; Quoc Thach, T.; Cannon, J. B.; Allen, R. T.; Hart, J. E.; Laden, F.; Cesaroni, G.; Forastiere, F.; Weinmayr, G.; Jaensch, A.; Nagel, G.; Concin, H.; Spadaro, J. V. ;*Proc. Natl. Acad. Sci.* **2018**, *115*, 9592.
14. Conticini, E.; Frediani, B.; Caro, D. ;*Environ. Pollut.* **2020**, *261*, 114465.
15. Zhu, Y.; Xie, J.; Huang, F.; Cao, L. ;*Sci. Total Environ.* **2020**, *727*, 138704.
16. Zoran, M. A.; Savastru, R. S.; Savastru, D. M.; Tautan, M. N.; Baschir, L. A.; Tenciu, D. V ;*Process Saf. Environ. Prot.* **2021**, *152*, 583.
17. Zhong, L.; Wang, T.; Liu, L.; Du, W.; Wang, S. ;*Sep. Purif. Technol.* **2018**, *202*, 357.
18. Chen, K.; Sari, F. N. I.; Ting, J. ;*Appl. Surf. Sci.* **2019**, *493*, 157.
19. Choi, D. Y.; Heo, K. J.; Kang, J.; An, E. J.; Jung, S.; Lee, B. U.; Lee, H. M.; Jung, J. H. ;*J. Hazard. Mater.* **2018**, *351*, 29.
20. Phan, T. L.; Ching, C. T. ;*Arch. Med. Res.* **2020**, *51*, 455.
21. Zhong, L.; Wang, T.; Liu, L.; Du, W.; Wang, S. ;*Sep. Purif. Technol.* **2018**, *202*, 357.
22. Wang, J.; Ge, Y.; He, Y.; Xu, M.; Cui, X. ;*J. Clean. Prod.* **2019**, *217*, 335.
23. Bian, Y.; Wang, S.; Zhang, L.; Chen, C. ;*Build. Environ.* **2020**, *170*, 106628.
24. Sepahvand, S.; Bahmani, M.; Ashori, A.; Pirayesh, H.; Yu, Q.; Nikkhah Dafchahi, M. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *182*, 1392.
25. Dubey, S.; Rohra, H.; Taneja, A. ;*Heliyon* **2021**, *7*, e07976.
26. Conselho Nacional do Meio Ambiente *Resolução CONAMA n° 491/2018*; Brazil, 2018; p. 2018.
27. Health Organization, W. ;*Clean Air J.* **2016**, *26*, 6.
28. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo *Decreto estadual n° 59.113/2013*; Brazil, 2013; pp. 1–22.
29. Hinds, W. C. *Aerosol Technology: properties, behavior and measurement of airborne particles.*; John Willey & Sons, Ed.; 2nd ed.; New York, 1999.
30. Matulevicius, J.; Kliucininkas, L.; Prasauskas, T.; Buivydiene, D.; Martuzevicius, D. ;*J. Aerosol Sci.* **2016**, *92*, 27.
31. Bortolassi, A. C. C.; Guerra, V. G.; Aguiar, M. L. ;*Sep. Purif. Technol.* **2017**, *175*, 79.

32. Bonfim, D. P. F.; Cruz, F. G. S.; Guerra, V. G.; Aguiar, M. L. ;*Membranes (Basel)*. **2021**, *11*, 293.
33. Al-Attabi, R.; Dumée, L. F.; Schütz, J. A.; Morsi, Y. ;*Sci. Total Environ*. **2018**, *625*, 706.
34. Donovan, R. P. *Fabric filtration for combustion sources. Fundamentals and basic technology*; 1st editio.; Marcel Dekker, Inc.: New York, 1985.
35. Tronville, P.; Rivers, R. ;*Ashrae J*. **2016**, *58*, 12.
36. Lista, A. E.; Oishi, M.; Aguiar, M. L. ;*Meio Filtrante* **2018**, *1*, 1.
37. Brincat, J.-P.; Sardella, D.; Muscat, A.; Decelis, S.; Grima, J. N.; Valdramidis, V.; Gatt, R. ;*Trends Food Sci. Technol*. **2016**, *50*, 175.
38. Kadam, V. V.; Wang, L.; Padhye, R. ;*J. Ind. Text*. **2018**, *47*, 2253.
39. Charvet, A.; Pacault, S.; Bourrous, S.; Thomas, D. ;*Sep. Purif. Technol*. **2018**, *207*, 420.
40. Chellamani, K. P.; Veerasubramanian, D.; Balaji, R. S. V. ;*J. Acad. Ind. Res*. **2013**, *2*, 320.
41. de Almeida, D. S.; Martins, L. D.; Muniz, E. C.; Rudke, A. P.; Squizzato, R.; Beal, A.; de Souza, P. R.; Bonfim, D. P. F.; Aguiar, M. L.; Gimenes, M. L. ;*Process Saf. Environ. Prot*. **2020**, *144*, 177.
42. Bonfim, D. P. F.; Cruz, F. G. S.; Bretas, R. E. S.; Guerra, V. G.; Aguiar, M. L. ;*Polymers (Basel)*. **2021**, *13*, 1166.
43. Barnett Group ;*Filtr. Sep*. **2000**, *37*, 28.
44. Pacheco, T. de A. ;*Meio Filtrante* **2013**, *63*.
45. Bortolassi, A. C. C.; Nagarajan, S.; de Araújo Lima, B.; Guerra, V. G.; Aguiar, M. L.; Huon, V.; Soussan, L.; Cornu, D.; Miele, P.; Bechelany, M. ;*Mater. Sci. Eng. C* **2019**, *102*, 718.
46. Matulevicius, J.; Kliucininkas, L.; Martuzevicius, D.; Krugly, E.; Tichonovas, M.; Baltrusaitis, J. ;*J. Nanomater*. **2014**, *2014*, 1.
47. Zhu, M.; Han, J.; Wang, F.; Shao, W.; Xiong, R.; Zhang, Q.; Pan, H.; Yang, Y.; Samal, S. K.; Zhang, F.; Huang, C. ;*Macromol. Mater. Eng*. **2017**, *302*, 1600353.
48. Sundarajan, S.; Tan, K. L.; Lim, S. H.; Ramakrishna, S. ;*Procedia Eng*. **2014**, *75*, 159.
49. Sambaer, W.; Zatloukal, M.; Kimmer, D. ;*Chem. Eng. Sci*. **2012**, *82*, 299.
50. Wang, J.; Kim, S. C.; Pui, D. Y. H. ;*J. Aerosol Sci*. **2008**, *39*, 323.
51. Thomas, D.; Pacault, S.; Charvet, A.; Bardin-Monnier, N.; Appert-Collin, J.-C. ;*Sep. Purif. Technol*. **2019**, *215*, 557.

52. Hinds, W. C. In *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*; John Wiley & Sons, 2012; pp. 147–156.
53. Lu, T.; Cui, J.; Qu, Q.; Wang, Y.; Zhang, J.; Xiong, R.; Ma, W.; Huang, C. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 23293.
54. Adanur, S.; Jayswal, A. ;*J. Ind. Text.* **2020**, *0*, 152808372098016.
55. Wang, C.; Otani, Y. ;*Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, *52*, 5.
56. Lv, D.; Zhu, M.; Jiang, Z.; Jiang, S.; Zhang, Q.; Xiong, R.; Huang, C. ;*Macromol. Mater. Eng.* **2018**, *303*, 1800336.
57. Barros, P. M.; Tanabe, E. H.; Aguiar, M. L. ;*Sep. Sci. Technol.* **2016**, *51*, 1042.
58. de Oliveira, A. E.; Aguiar, M. L.; Guerra, V. G. ;*Polym. Bull.* **2021**, *78*, 6387.
59. Balgis, R.; Kartikowati, C. W.; Ogi, T.; Gradon, L.; Bao, L.; Seki, K.; Okuyama, K. ;*Chem. Eng. Sci.* **2015**, *137*, 947.
60. Cao, M.; Gu, F.; Rao, C.; Fu, J.; Zhao, P. ;*Sci. Total Environ.* **2019**, *666*, 1011.
61. Aruchamy, K.; Mahto, A.; Nataraj, S. K. ;*Nano-Structures & Nano-Objects* **2018**, *16*, 45.
62. Canalli Bortolassi, A. C.; Guerra, V. G.; Aguiar, M. L.; Soussan, L.; Cornu, D.; Miele, P.; Bechelany, M. ;*Nanomaterials* **2019**, *9*, 1740.
63. Huang, Z.-X.; Liu, X.; Zhang, X.; Wong, S.-C.; Chase, G. G.; Qu, J.-P.; Baji, A. ;*Polymer (Guildf)*. **2017**, *131*, 143.
64. Xiao, B.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Jiang, G.; Liang, M.; Chen, X.; Long, G. ;*Fractals* **2019**, *27*, 1950116.
65. Oliveira, A. E.; Aguiar, M. L.; Guerra, V. G. ;*Aerosol Sci. Eng.* **2021**, *5*, 81.
66. Balamurugan, R.; Sundarrajan, S.; Ramakrishna, S. ;*Membranes (Basel)*. **2011**, *1*, 232.
67. Huang, Z.; Zhang, Y.-Z.; Kotaki, M.; Ramakrishna, S. ;*Compos. Sci. Technol.* **2003**, *63*, 2223.
68. Salussoglia, A. I. P.; Tanabe, E. H.; Aguiar, M. L. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2020**, *137*, 49334.
69. Bechelany, M.; Drobek, M.; Vallicari, C.; Abou Chaaya, A.; Julbe, A.; Miele, P. ;*Nanoscale* **2015**, *7*, 5794.
70. Palmstrom, A. F.; Santra, P. K.; Bent, S. F. ;*Nanoscale* **2015**, *7*, 12266.
71. Wang, J.; Kim, S. C.; Pui, D. Y. H. ;*Aerosol Sci. Technol.* **2008**, *42*, 722.
72. Guibo, Y.; Qing, Z.; Yahong, Z.; Yin, Y.; Yumin, Y. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2013**, *128*, 1061.

73. Xiao, B.; Wang, W.; Zhang, X.; Long, G.; Fan, J.; Chen, H.; Deng, L. ;*Powder Technol.* **2019**, *349*, 92.
74. Xiao, B.; Zhang, X.; Jiang, G.; Long, G.; Wang, W.; Zhang, Y.; Liu, G. ;*Fractals* **2019**, *27*, 1950062.
75. Lv, M.; Liu, Y.; Geng, J.; Kou, X.; Xin, Z.; Yang, D. ;*Biosens. Bioelectron.* **2018**, *106*, 122.
76. Cho, C.; Chang, Y.; Lin, Y.-Z.; Jiang, D.; Chen, W.-H.; Lin, W.; Chen, C.; Rwei, S.; Kuo, C. ;*J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **2020**, *106*, 206.
77. Qin, X.; Wang, S. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2006**, *102*, 1285.
78. Barhate, R.; Ramakrishna, S. ;*J. Memb. Sci.* **2007**, *296*, 1.
79. Mercante, L. A.; Scagion, V. P.; Migliorini, F. L.; Mattoso, L. H. C.; Correa, D. S. ;*TrAC Trends Anal. Chem.* **2017**, *91*, 91.
80. Huang, J. J.; Tian, Y.; Wang, R.; Tian, M.; Liao, Y. ;*Sep. Purif. Technol.* **2020**, *237*, 116377.
81. Leung, W. W. F.; Sun, Q. ;*Sep. Purif. Technol.* **2020**, *250*, 116886.
82. Ahn, Y. C.; Park, S. K.; Kim, G. T.; Hwang, Y. J.; Lee, C. G.; Shin, H. S.; Lee, J. K. ;*Curr. Appl. Phys.* **2006**, *6*, 1030.
83. Salussoglia, A. I. P.; de Souza, C. W. O.; Tanabe, E. H.; Lopes Aguiar, M. ;*Environ. Technol.* **2022**, *43*, 301.
84. Sun, Z.; Yue, Y.; He, W.; Jiang, F.; Lin, C.; Pui, D. Y. H.; Liang, Y.; Wang, J. ;*Build. Environ.* **2020**, *180*, 107020.
85. Song, J.; Zhao, Q.; Meng, C.; Meng, J.; Chen, Z.; Li, J. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 49380.
86. Wang, N.; Raza, A.; Si, Y.; Yu, J.; Sun, G.; Ding, B. ;*J. Colloid Interface Sci.* **2013**, *398*, 240.
87. Zhu, M.; Xiong, R.; Huang, C. ;*Carbohydr. Polym.* **2019**, *205*, 55.
88. Hu, M.; Yin, L.; Low, N.; Ji, D.; Liu, Y.; Yao, J.; Zhong, Z.; Xing, W. ;*J. Memb. Sci.* **2020**, *594*, 117467.
89. Li, M.; Feng, Y.; Wang, K.; Yong, W. F.; Yu, L.; Chung, T. ;*Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 10041.
90. Liu, B.; Zhang, S.; Wang, X.; Yu, J.; Ding, B. ;*J. Colloid Interface Sci.* **2015**, *457*, 203.
91. Pham, Q. P.; Sharma, U.; Mikos, A. G. Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: A review. *Tissue Eng.* **2006**, *12*, 1197–1211.
92. de Almeida, D. S.; Duarte, E. H.; Hashimoto, E. M.; Turbiani, F. R. B.; Muniz, E. C.; de Souza, P. R.; Gimenes, M. L.; Martins, L. D. ;*Polym. Test.* **2020**, *81*, 106206.

93. Liu, F.; Li, M.; Shao, W.; Yue, W.; Hu, B.; Weng, K.; Chen, Y.; Liao, X.; He, J. ;*J. Colloid Interface Sci.* **2019**, *557*, 318.
94. Mao, X.; Si, Y.; Chen, Y.; Yang, L.; Zhao, F.; Ding, B.; Yu, J. ;*RSC Adv.* **2012**, *2*, 12216.
95. de Almeida, D. S.; Scacchetti, F. A. P.; Santos, R.; Aguiar, M. L.; Beal, A.; Rudke, A. P.; Santana, M. H. de S.; Lisboa, A. M. V.; Bezerra, F. M.; Martins, L. D. ;*Environ. Technol.* **2021**, *0*, 1.
96. Akduman, C. ;*J. Ind. Text.* **2021**, *50*, 1239.
97. Liu, Z.; Shang, S.; Chiu, K.; Jiang, S.; Dai, F. ;*Mater. Sci. Eng. C* **2020**, *107*, 110308.
98. Zander, N.; Gillan, M.; Sweetser, D. ;*Materials (Basel).* **2016**, *9*, 247.
99. Daels, N.; De Vrieze, S.; Sampers, I.; Decostere, B.; Westbroek, P.; Dumoulin, A.; Dejans, P.; De Clerck, K.; Van Hulle, S. W. H. ;*Desalination* **2011**, *275*, 285.
100. Souzandeh, H.; Wang, Y.; Netravali, A. N.; Zhong, W. ;*Polym. Rev.* **2019**, *59*, 651.

SOBRE OS AUTORES



DANIELA PATRÍCIA FREIRE BONFIM: Atua como professora assistente no Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG). Possui doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos e mestrado e graduação também em Engenharia Química pela Universidade Federal de São João del-Rei. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Operações de Separação e Mistura, atuando principalmente em temas relacionados à Gestão Ambiental e da Qualidade do ar. Atua no desenvolvimento de membranas poliméricas fibrosas através da técnica de Eletrofiação (em escala micro e nanométrica) para aplicações em filtração de ar/ controle da poluição do ar assim como a caracterização desses meios filtrantes.

<http://lattes.cnpq.br/6489214115244937>



VÁDILA GIOVANA GUERRA BÉTTEGA: É docente do departamento de engenharia química da Universidade Federal de São Carlos desde 2009, sendo atualmente professora associada. Possui graduação e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Operações Industriais e Equipamentos para Engenharia Química, atuando principalmente nos seguintes temas: Poluição do ar, limpeza de gases, equipamentos para controle de materiais particulados, filtração de partículas micrométricas e nanométricas, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos, caracterização de partículas, atomização de líquido e medida de tamanho de gotas.

<http://lattes.cnpq.br/0752059622240208>



MÔNICA LOPES AGUIAR: Professora Titular do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Possui doutorado e mestrado em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos e graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Operações de Separação e Mistura, atuando principalmente nos seguintes temas: filtração de ar e gases, filtros de tecido, filtros de mangas, nanofiltração, meios filtrantes, caracterização de partículas, monitoramento do ar atmosférico e indoor.

<http://lattes.cnpq.br/0431688649128529>