



**AVALIAÇÃO DE MEIOS FILTRANTES DE POLIESTIRENO EXPANDIDO  
RECICLADO OBTIDOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE *ELECTROSPINNING* NA  
FILTRAÇÃO DE NANOPARTICULAS DISPERSAS EM AR**

FELIPE A. LIMA<sup>1</sup>, VÁDILA G. GUERRA<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Química  
\*e-mail: vadila@ufscar.br

**RESUMO** – A eletrofiação é um método promissor para produção de meios filtrantes para o tratamento de ar. Alinhar isso com a possibilidade de reciclagem de resíduos, como o poliestireno expandido (EPS), aumenta o potencial de contribuição para o meio ambiente e sociedade. Uma das aplicações é na remoção de nanopartículas do ar, devido aos potenciais efeitos negativos que elas apresentam a saúde pública. No entanto, isso é dificultado pelo seu tamanho extremamente pequeno e ao mecanismo de coleta ser predominantemente por difusão. Dessa forma, o presente trabalho avaliou três voltagens de fiação (15, 20 e 25 kV) e quatro tempos de fiação (5, 10, 15 e 20 min) na eletrofiação de EPS reciclado para produção de meios filtrantes. Eles foram avaliados quanto a permeabilidade do ar e eficiência de coleta de nanopartículas. As fibras obtidas apresentaram diâmetros maiores que 0,7  $\mu\text{m}$ . Foi possível coletar nanopartículas do ar com eficiências maiores que 99% quando se utilizou tempos de fiação maiores que 15 min. No entanto, a constante de permeabilidade apresentou valores na ordem de  $10^{-14}$  m para esses testes. Mesmo com uma queda de pressão alta, esse processo apresenta grande potencial no controle de poluição por material nanoparticulado.

## INTRODUÇÃO

O crescimento populacional juntamente com o desenvolvimento industrial aumenta cada vez mais a demanda por insumos, enquanto proporciona uma maior geração de resíduos. Dentre eles, há uma preocupação com os resíduos de polímeros e materiais plásticos e seus efeitos no meio ambiente. Por mais que eles tenham tido um papel crucial no desenvolvimento da sociedade humana, o aumento regular na necessidade de plástico levou ao aumento de resíduos plásticos a cada ano (Geyer *et al.*, 2017; Maafa, 2021).

O termo plástico generaliza uma série de diferentes polímeros como o tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), poliuretanos (PURs), poli cloreto de vinila (PVC), polietileno de alta densidade (PE), polipropileno (PP), resinas, fibras de poliéster,

poliamida e acrílica (PP&A), entre diversos outros (Geyer *et al.*, 2017). Um dos plásticos mais importantes e amplamente utilizados é o poliestireno (PS) por ser barato, duro, com baixa densidade, isolante e com boa durabilidade. De toda a produção mundial de plástico, pelo menos 6,2% corresponde ao PS (Facts Pept, 2020). Grande parte do EPS usado é descartado em aterros sanitários ou por incineração em países desenvolvidos; por meio de queima a céu aberto e lixões em países em desenvolvimento; e quase nunca são reciclados. Isso ocorre porque os métodos convencionais de reciclagem os transformam em materiais de menor valor, como óleo combustível ou resina reciclada (Chaukura *et al.*, 2016). Outra forma de realizar a sua reciclagem é pela remoção do ar contido no EPS a fim de transformá-lo em uma placa sólida ou grânulos para isolamento em construção civil (Maafa, 2021). Alguns estudos buscam agregar valor a esse resíduo

e/ou tornar o processo de reciclagem mais economicamente viável (Bekri-Abbes *et al.*, 2006; García *et al.*, 2009; Gil-Jasso *et al.*, 2022; Mumbach *et al.*, 2020; Rajak *et al.*, 2020). Contudo, ainda existe uma necessidade em encontrar uma técnica eficiente para reciclar resíduos de poliestireno.

Uma alternativa que se mostra promissora é transformar esse resíduo em nanofibras com o uso de processos nanotecnológicos. Para Quina (2004), os nanomateriais tem potencial para aumentar a eficiência dos processos e, conseqüentemente, um aproveitamento mais eficiente de matérias-primas, com menor consumo energético e menor geração de resíduos. Atualmente, várias tecnologias têm sido desenvolvidas para fabricar nanofibras de polímeros, como método de estiramento, fiação de “ilha”, fiação de fusão, fiação de solução, fiação de emulsão, e eletrofiação (Li *et al.*, 2019; Lou *et al.*, 2020).

A técnica de eletrofiação é amplamente utilizada na produção de nanofibras, uma vez que as fibras produzidas apresentam aspecto uniforme, além de permitir o uso de diversas soluções poliméricas, com uma gama muito grande de aplicações, como nas áreas de processos de separação; sensores; catálise; ambiental; e médica (Anitha *et al.*, 2012; Greiner; Wendorff, 2007; Huang *et al.*, 2003). O poliestireno expandido em si apresenta uma baixa resistência mecânica (Chaukura *et al.*, 2016) e suas fibras tendem a ter essa mesma propriedade. Porém, alguns estudos demonstrem resistências que permitam sua aplicação (Cécile; Hsieh, 2009; Rajak *et al.*, 2020; Uyar; Besenbacher, 2008).

Uma aplicação interessante é na produção de meios filtrantes para remoção de nanopartículas. A poluição do ar é um problema mundial que se acentuou com o aumento da industrialização e urbanização. A introdução de substâncias à atmosfera afeta a qualidade do ar e causa grandes problemas ao meio ambiente e saúde pública. Dentre os contaminantes, como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>, o material particulado (MP) se destaca por apresentar composições e características variadas, muitas das quais contribuem com sua periculosidade. Uma atenção especial deve ser dada as ultrafinas (menores que 100 nm) que, mesmo com menor massa, se apresentam mais numerosas, com alta

superfície, facilidade de penetração pulmonar e capazes de acessar órgãos, células e estruturas subcelulares (Brunekreef; Holgate, 2002; Calderón-Garcidueñas *et al.*, 2019).

A crescente demanda de filtros de ar com elevada eficiência de filtragem e baixas quedas de pressão levaram a diversos autores buscarem formas de atingir tal objetivo de uma forma economicamente viável. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de fibras nanométricas de poliestireno expandido reciclado para remoção de nanopartículas de uma corrente de ar. Para isso foram avaliados diferentes tempos e voltagens de fiação e avaliados a influência desses parâmetros na coleta de partículas nessa faixa de tamanho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Aparato experimental para o *eletrospinning*

O aparato experimental utilizado no *eletrospinning* é dado pela Figura 1. Ele consiste basicamente em uma bomba de infusão que alimenta a solução polimérica a 0,6 mL/h por uma agulha fina colocada na ponta de uma seringa. Uma fonte de alta tensão foi usada para gerar um campo elétrico suficientemente forte para superar a tensão superficial e permitir que um jato fosse formado na direção de um eletrodo aterrado (placa plana), disposto a 10 cm da ponta da agulha.

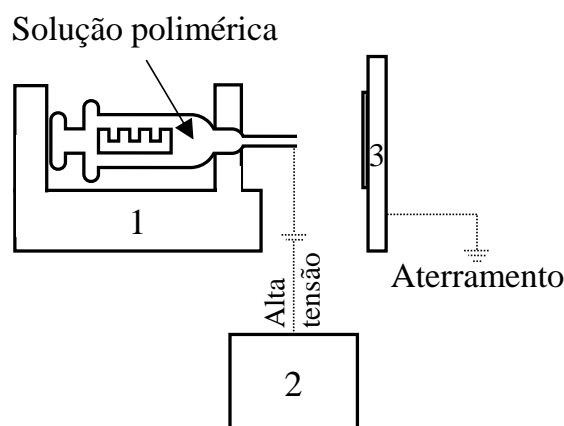


Figura 1: Esquema do processo de eletrofiação.

Uma tela de cobre (Figura 2) com abertura de 0,425 mm e espessura de 0,23 mm (Tegape) foi utilizada como substrato para deposição das fibras. Todo esse sistema estava envolto por uma caixa de madeira/acrílico

ligada a um exaustor, de forma a evitar contato e inalação de solventes possivelmente tóxicos. Durante os experimentos a temperatura e umidade foram controladas em valores abaixo de 30°C e 50% para não afetar a geração de fibras (Bortolassi, 2019).



Figura 2: Tela de cobre (espessura: 0,23; abertura: 0,425 mm) utilizada como substrato para deposição das fibras. Ampliação de 5x.

### Preparação das fibras

O poliestireno expandido (EPS) comprado em papelarias foi lavado com água para remoção de impurezas grosseiras e pulverizado álcool em sua superfície. Ele foi levado a uma estufa com recirculação de ar a 150°C. A umidade e ar foram removidas nessa etapa, fornecendo um material duro e quebradiço, que foi triturado até a forma de pó com auxílio de um almofariz e pistilo. Foi utilizada uma solução polimérica de 10% de EPS, utilizando como solventes o N,N-dimetilformamida (DMF) e D/L-Limoneno (L) na proporção de 70/30.

Os testes consistiram na avaliação de três valores de voltagem (15, 20 e 25 kV) e quatro tempos de fiação (5, 10, 15 e 20 min). Esses valores foram determinados com base em testes preliminares. Abaixo de 15 kV não ocorre fiação, enquanto acima de 25 kV o equipamento fica instável. Um microscópio óptico (Olympus, modelo BX60) foi utilizado para análise da formação das fibras e cálculo de seus diâmetros médios (100 medições). A umidade do ar foi mantida abaixo de 50% para todos os testes de eletrofiação.

### Testes de filtração de nanopartículas e permeabilidade

A Figura 3 apresenta uma representação gráfica da unidade experimental que foi utilizada nos testes de filtração desse projeto. O ar entrou no processo através de um compressor e foi levado a um sistema de purificação de ar para remoção de umidade, óleo e impurezas. Paralelamente, um gerador de nanopartículas produziu um aerossol concentrado a partir de uma solução de NaCl 0,1 g/L.

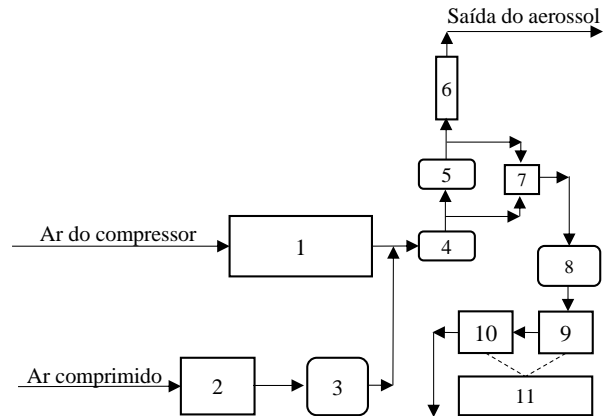


Figura 3: Representação da unidade experimental dos testes de filtração, onde: (1) Filtros de ar; (2) Gerador atomizador; (3) Secador de difusão; (4) Fonte de Kr-85; (5) Filtro; (6) Rotâmetro e Higrômetro; (7) Válvula de três vias; (8) Fonte de Am-241; (9) Classificador eletrostático; (10) Contador de partículas; (11) Microcomputador.

O aerossol (ar + nanopartículas) foi encaminhado para um secador por difusão para remoção do excesso de umidade. Essa corrente foi introduzida à linha principal onde, após a mistura, passou por uma fonte neutralizadora de Kr-85 e seguiu para o filtro de ar, contendo o meio filtrante de 5 cm de diâmetro. Uma válvula de três vias coletou amostras ora a montante e ora a jusante do filtro. O restante da corrente passou por um rotâmetro conectado no final da linha principal. A amostra seguiu para uma fonte neutralizadora de Am-241, na sequência foi para a aferição da concentração no SMPS, composto por um classificador eletrostático e um contador de partículas. Os valores de umidade relativa e temperatura foram coletados com um higrômetro. A vazão foi controlada no fim da linha e mantida em

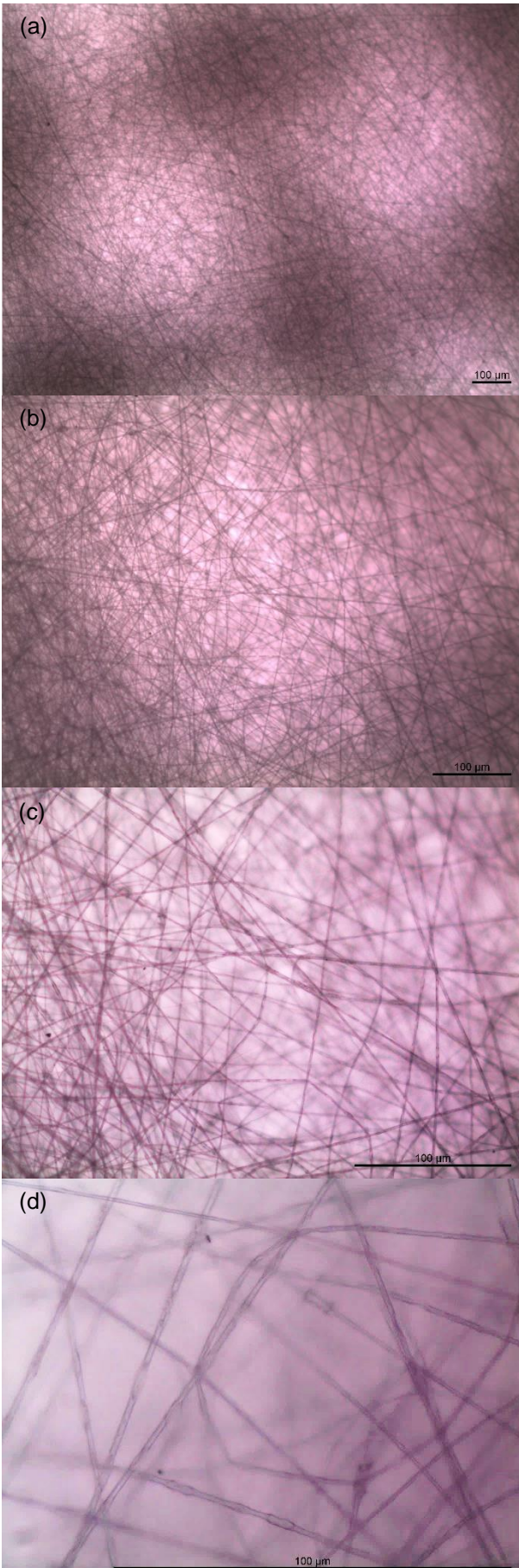


Figura 5: Microscopia óptica das fibras obtidas utilizando 15 kV e 5 min de fiação nas ampliações de: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x.

1,5 L/min. Esse procedimento foi realizado em triplicatas.

A eficiência de coleta ( $\eta$ ) pode ser calculada experimentalmente relacionando as concentrações de entrada ( $C_i$ ) e saída ( $C_f$ ) de acordo com a Equação 1.

$$\eta = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

A granulometria utilizada abrangeu diâmetros de partículas entre 6,15 a 241,4 nm, como se vê pela Figura 4 com a distribuição granulométrica das partículas na entrada do filtro de ar. A Tabela 1 evidencia as concentrações em massa e número de partículas, medianas e desvios padrões geométricos ( $\sigma$ ).

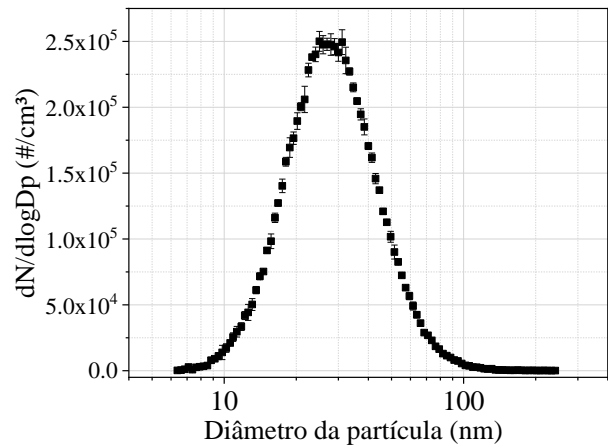


Figura 4: Distribuição granulométrica das nanopartículas na entrada do filtro de ar.

Tabela 1: Concentração em número de partículas, mediana e desvio padrão geométrico ( $\sigma$ ) da distribuição granulométrica de nanopartículas na entrada do filtro

<b>Concentração (partículas/cm<sup>3</sup>)</b>	117838± 469
<b>Concentração (μg/m<sup>3</sup>)</b>	9,95±0,21
<b>Mediana (nm)</b>	54,33±0,43
<b><math>\sigma</math> (nm)</b>	1,69±0,03

Uma linha semelhante foi utilizada para determinar a permeabilidade dos meios filtrantes, mas sem a geração de nanopartículas e sua contagem/classificação. Foi adicionado ao sistema um manômetro digital (TSI, VelociCalc, Model 3A-181WP09) conectado a

montante e a jusante do filtro. Os valores de vazão do ar foram variados entre 0 e 10 L/min.

A constante de permeabilidade ( $K_1$ ) foi obtida usando a Equação de Darcy (Equação 2), através da regressão do gráfico de  $\Delta P/L$  versus  $v_s$ .

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} v_s \quad (2)$$

Nessa equação,  $\Delta P$  é a queda de pressão (Pa),  $\mu$  é a viscosidade do gás (Pa.s),  $L$  é a espessura do meio filtrante (m) e  $v_s$  é a velocidade superficial de filtração (m/s).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a microscopia óptica das fibras em diferentes ampliações. Como se observa, as fibras apresentaram uma deposição homogênea, cobrindo totalmente as aberturas da tela do substrato de cobre. Não foram observados respingos de solvente, nem aglomerados de fibras. Isso se deve aos parâmetros terem sido adequadamente escolhidos para estabilização do processo. Na eletrofiação, uma solução polimérica contida em uma seringa é injetada, com fluxo controlado por uma bomba em uma região que apresenta um campo elétrico, de alta tensão, criado por uma fonte de alta tensão entre a ponta de uma agulha e um coletor metálico. Quando a gota de solução sai pela ponta da agulha, o campo elétrico provoca deformação e estiramento da gota, formando o cone de Taylor. No caminho até o coletor, ocorre a evaporação total do solvente e solidificação das fibras no coletor (Greiner; Wendorff, 2007).

As fibras formadas apresentam morfologia e diâmetros dependentes dos parâmetros de solução, processo e ambientais utilizados (Corradini *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2012; Greiner; Wendorff, 2007; Pham *et al.*, 2006). No entanto, não foram observadas diferenças na morfologia em diferentes voltagens e tempos de fiação. No entanto, maiores ampliações são necessárias para avaliações mais aprofundadas.

Devido ao uso de um coletor de placa plana, as fibras apresentaram uma disposição aleatória e sem alinhamento. Isso era esperado e é associado as instabilidades de flexão dos jatos (Bhardwaj; Kundu, 2010; Li; Xia, 2004). Alguns *beads* foram observados na Figura 5(d),

o que também foi observado em outros estudos com o PS e DMF (Gil-Jasso *et al.*, 2019, 2022; Jarusuwannapoom *et al.*, 2005; Stone *et al.*, 2007) e são associados as suas constantes dielétricas (alta para o DMF e baixa para o PS) e parâmetros do processo (Li *et al.*, 2020; Ramakrishna *et al.*, 2005).

Através da microscopia foi possível medir o diâmetro médio das fibras, dado na Tabela 2.

Tabela 2: Diâmetro médio das fibras obtidos por microscopia óptica

Voltagem de Fiação (kV)	Tempo de Fiação (min)	Diâmetro das fibras ( $\mu\text{m}$ )
15	5	0,736 $\pm$ 0,134
	10	0,861 $\pm$ 0,226
	15	0,945 $\pm$ 0,316
	20	1,025 $\pm$ 0,415
20	5	1,505 $\pm$ 0,574
	10	1,345 $\pm$ 0,485
	15	1,207 $\pm$ 0,357
	20	1,054 $\pm$ 0,443
25	5	0,787 $\pm$ 0,160
	10	0,910 $\pm$ 0,402
	15	0,951 $\pm$ 0,198
	20	1,036 $\pm$ 0,235

Verifica-se que há um aumento do diâmetro das fibras com o aumento do tempo de fiação para as voltagens de 15 kV e 25 kV. Ao se aplicar a voltagem de 20 kV, o comportamento foi o oposto, ou seja, as fibras com maiores diâmetros ocorrem quando se fiou por 5 min. Isso não era esperado, já que os parâmetros eram os mesmos e apenas se alterou o tempo que ocorria a eletrofiação. O tempo normalmente não é uma variável que afeta o

diâmetro das fibras (Huang *et al.*, 2003; Ramakrishna *et al.*, 2005) e essas diferenças foram associadas a parâmetros ambientais não controlados. Os diâmetros das fibras foram semelhantes nas voltagens de 15 e 25 kV e houve um grande aumento na voltagem de 20 kV. Esse comportamento não é típico da eletrofiação, onde uma voltagem mais alta causaria maior estiramento da solução devido às maiores forças coulombiana no jato, bem como a um campo elétrico mais forte, e esses efeitos levariam à redução do diâmetro da fibra (Bhardwaj; Kundu, 2010).

A fibra com menor diâmetro médio ( $0,736 \pm 0,134 \mu\text{m}$ ) foi obtida ao se utilizar uma voltagem de 15 kV e tempo de fiação de 5 min. Para uma fibra ser considerada em escala nanométrica ela precisa apresentar diâmetros médios menores que 300 nm (Bhardwaj; Kundu, 2010; Costa *et al.*, 2012; Neal *et al.*, 2009). No entanto, a microscopia óptica não é o ensaio ideal para esse tipo de análise. Devido as diferentes camadas de fibras e a precisão do equipamento, é possível que as fibras em escalas nanométricas não sejam observadas por esse método. Análises futuras por microscopia eletrônica de varredura são recomendadas. Mas para avaliação inicial e preliminar, os dados da Tabela 2 podem fornecer informações importantes sobre o comportamento e auxiliar no entendimento dos fenômenos e parâmetros relevantes na eletrofiação do EPS.

Uma das aplicações das fibras obtidas pela eletrofiação é como filtros de ar fibrosos que permitem capturar partículas de ar pelo efeito sinérgico de espessas barreiras físicas e adesão (Hinds, 1999). A crescente demanda de filtros de ar com elevada eficiência de filtragem e baixas quedas de pressão aumentam a necessidade de encontrar formas de atingir tal objetivo de uma forma economicamente viável. No entanto, uma estratégia para o aumento da eficiência é aumentar o tempo de fiação, aumentando o tamanho e espessura do filtro e sua capacidade de proteção. No entanto, simultaneamente, esta estratégia causa o aumento acentuado da queda de pressão (Li *et al.*, 2020), diminuindo a permeabilidade do filtro a passagem do ar (Figura 6). A permeabilidade de um filtro indica a habilidade de passar um fluxo de ar e está diretamente relacionado a seus parâmetros estruturais, como

diâmetro da fibra ou porosidade (Miguel, 2003; Xiao *et al.*, 2019). A diferença foi mais significativa para o tempo de 5 min em relação aos demais. Acima de 10 minutos a queda na permeabilidade foi sutil, indicando que o filtro atingiu um patamar de estabilidade e com alta queda de pressão.

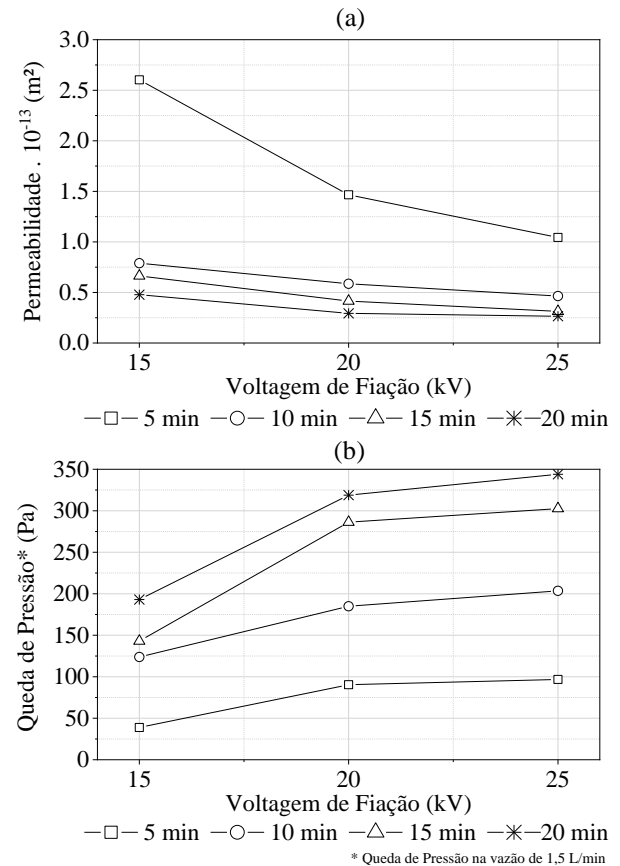


Figura 6: Permeabilidade (a) e queda de pressão na vazão de 1,5 L/min (b) para os meios filtrantes obtidos com diferentes tempos e voltagens de fiação.

O aumento da voltagem de fiação proporcionou uma diminuição na permeabilidade (Figura 6). Novamente essa diferença foi mais significativa para o tempo de fiação de 5 min. Esse tempo apresentou a menor espessura do filtro o que facilita a passagem do ar e diminui sua queda de pressão. As diferenças estruturais observadas pela microscopia óptica não permitem explicar essa tendência de queda. Esperava-se uma queda na permeabilidade apenas para a voltagem de 20 kV, que apresentou maiores diâmetros. Como os diâmetros dos testes de 15 kV e 25 kV foram semelhantes, eles poderiam apresentar uma área superficial semelhante (em um mesmo tempo de fiação) e consequentemente

uma perda de carga semelhante (Bonfim *et al.*, 2021; Lolla *et al.*, 2016). No entanto, outros parâmetros (como a porosidade) podem ter influenciado mais esse parâmetro do que o diâmetro das fibras.

Com o aumento da queda de pressão ou diminuição da permeabilidade (Figura 6), espera-se um aumento da eficiência de coleta de partículas (Lolla *et al.*, 2016; Wang; Otani, 2013). Como se vê pela Figura 7, esse comportamento não ocorreu e houve uma queda na eficiência para a voltagem de 20 kV em todos os tempos de fiação.

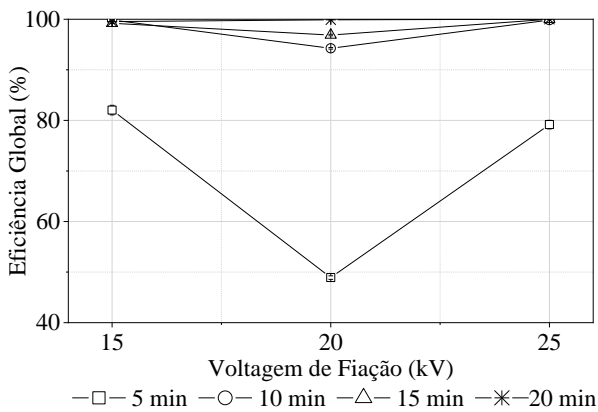


Figura 7: Eficiência global de coleta de nanopartículas para os meios filtrantes obtidos com diferentes tempos e voltagens de fiação.

É importante salientar que diversos parâmetros afetam a filtração de nanopartículas, o que torna esse processo complexo e dificulta o controle de todas as variáveis para se obter a melhor performance (Hinds, 1999; Wang *et al.*, 2019). Logo, fatores como a constante de permeabilidade, porosidade, queda de pressão, espessura, umidade e temperatura impactam os mecanismos de coleta (difusão, impação inercial, interceptação, o gravitacional, eletrostática) entre as fibras e as nanopartículas (Aruchamy *et al.*, 2018; Hinds, 1999). Mas como evidenciado anteriormente (Figura 4 e Tabela 1), a maioria das partículas apresentam diâmetros próximo a 30 nm e isso faz que o mecanismo de difusão o predominante para a faixa de diâmetro das partículas avaliados nesse estudo (Aruchamy *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2019).

Uma das causas da queda da eficiência global para os testes envolvendo a voltagem de fiação de 20 kV foi o maior diâmetro das fibras obtido, o que já foi evidenciado na literatura

como algo que diminui a eficiência de coleta de nanopartículas (Aruchamy *et al.*, 2018; Bonfim *et al.*, 2021).

Já o aumento do tempo de fiação afetou positivamente a eficiência de coleta, já que promoveu o aumento da espessura do filtro, bem como a diminuição da permeabilidade. Isso ocorre porque o aumento da espessura e da queda de pressão oferecem maior resistência ao fluxo de ar ao passar pelo meio filtrante, devido ao maior caminho percorrido e ao maior entrelaçamento das fibras (Aruchamy *et al.*, 2018; Matulevicius *et al.*, 2014).

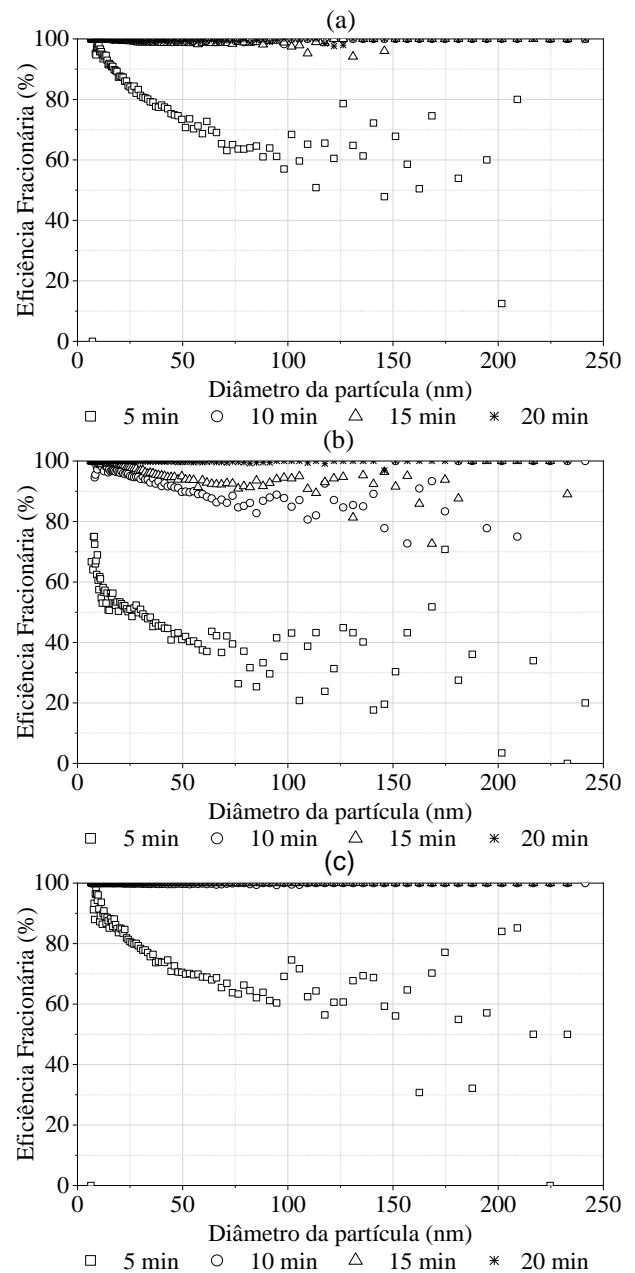


Figura 8: Eficiência fracionária para os meios filtrantes obtidos com diferentes tempos e voltagens de: (a) 15 kV; (b) 20 kV; (c) 25 kV.

Na Figura 8, que mostra a eficiência fracionária para toda a faixa de diâmetro avaliada, observa-se uma queda da eficiência com o aumento do diâmetro, principalmente nos testes com 5 min de fiação. A queda é mais expressiva até 100 nm e torna-se menor após esse diâmetro. O mecanismo de difusão é predominante para partículas menores que 100 nm (Hinds, 1999), com uma região subsequente de transição do mecanismo de difusão para o mecanismo de interceptação, de modo que a competição entre os mecanismos pode atuar reduzindo a eficiência de coleta para um ponto mínimo (Leung; Sun, 2020). Este ponto não foi alcançado no presente trabalho, pois foi avaliada a coleta de partículas de até 241,4 nm de diâmetro.

É interessante salientar que altas eficiências (<95%) foram obtidas com tempos de fiação acima de 10 min, indicando que é possível a coleta de nanopartículas com meios filtrantes de poliestireno expandido reciclado obtidos com a técnica de eletrofiação. Estudos de resistência precisam ser realizados, assim como avaliação da morfologia/diâmetro das fibras por microscopia eletrônica de varredura.

## CONCLUSÕES

Foi possível produzir fibras pela técnica de *electrospinning* utilizando poliestireno expandido reciclado. O diâmetro das fibras foi maior que 0,7  $\mu\text{m}$ . São necessárias avaliações mais precisas do diâmetro das fibras e da morfologia através de microscopia eletrônica de varredura.

Foi possível coletar nanopartículas do ar com eficiências maiores que 99,9% quando se utilizou tempos de fiação maiores que 15 min. No entanto a permeabilidade dos filtros foram altas e apresentaram os menores valores quando se fiou por apenas 5 minutos. Uma inesperada queda na eficiência ocorreu nos testes envolvendo a voltagem de fiação de 20 kV e foi associada aos maiores diâmetros das fibras fiadas nessa condição.

## AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## REFERÊNCIAS

- ANITHA, S.; Brabu, B.; THIRUVADIGAL, D. J.; GOPALAKRISHNAN, C.; NATARAJAN, T. S. (2012), Optical, bactericidal and water repellent properties of electrospun nano-composite membranes of cellulose acetate and ZnO. *Carbohydrate Polymers*, v. 87, n. 2, p. 1065–1072.
- ARUCHAMY, K.; MAHTO, A.; NATARAJ, S. K. (2018), Electrospun nanofibers, nanocomposites and characterization of art: Insight on establishing fibers as product. *Nano-Structures & Nano-Objects*, v. 16, p. 45–58.
- BEKRI-ABBES, I.; BAYOUDH, S.; BAKLOUTI, M. (2006), Converting waste polystyrene into adsorbent: Potential use in the removal of lead and cadmium ions from aqueous solution. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 14, n. 3, p. 249–256.
- BHARDWAJ, N.; KUNDU, S. C. (2010), Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 3, p. 325–347.
- BONFIM, D. P. F.; CRUZ, F. G. S.; BRETAS, R. E. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. (2021), A sustainable recycling alternative: Electrospun pet-membranes for air nanofiltration. *Polymers*, v. 13, n. 7, p. 1–14.
- BORTOLASSI, A. C. C. (2019), Desenvolvimento e avaliação de meios filtrantes com nanofibras eletrofiadas e agentes bactericidas aplicados na filtração de ar, Universidade Federal de São Carlos - São Carlos - SP. (Tese de Doutorado).
- BRUNEKREEF, B.; HOLGATE, S. T. (2002), Air pollution and health. *Lancet*, v. 360, n. 9341, p. 1233–1242.
- CALDERÓN-GARCIDUEÑAS, L.; GONZÁLEZ-MACIEL, A.; MUKHERJEE, P. S.; REYNOSO-ROBLES, R.; PÉREZ-GUILLÉ, B.; GAYOSSO-CHÁVEZ, C.; TORRES-JARDÓN, R.; CROSS, J. V.; AHMED, I. A. M. M.; KARLOUKOVSKI, V. V.; MAHER, B. A. (2019), Combustion- and friction-derived magnetic air pollution



- nanoparticles in human hearts. *Environmental Research*, v. 176, n. June, p. 108567.
- CAO, M.; GU, F.; RAO, C.; FU, J.; ZHAO, P. (2019), Improving the electrospinning process of fabricating nanofibrous membranes to filter PM2.5. *Science of The Total Environment*, v. 666, p. 1011–1021.
- CÉCILE, C.; HSIEH, Y.-L. (2009), Synthesis of ultrafine poly(styrene-maleic anhydride) and polystyrene fibers by electrospinning. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 113, n. 4, p. 2709–2718.
- CHAUKURA, N.; GWENZI, W.; BUNHU, T.; RUZIWA, D. T.; PUMURE, I. (2016), Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 107, p. 157–165.
- CORRADINI, E.; CURTI, P. S.; GONZALEZ, R. S.; PEREIRA, A. G. B.; DRAGUNSKI, D. C.; MARTINS, A. F.; MUNIZ, E. C. (2017), Preparation of Polymeric Mats Through Electrospinning for Technological Uses. In: LONGO, E.; LA PORTA, F. DE A. (Eds.). *Recent Advances in Complex Functional Materials*. 1 st ed. Germany: Springer International Publishing, 2017.
- COSTA, R. G. F.; OLIVEIRA, J. E.; PAULA, G. F.; Picianni, P. H. S.; Medeiros, E. S.; RIBEIRO, C. (2012), Eletrofição de Polímeros em Solução: parte I: Fundamentação Teórica. *Polímeros*, v. 22, n. 2, p. 170–177.
- FACTS PEPT (2020), An analysis of European plastics production, demand and waste data. [s.l.] *Plastics Europe*.
- GARCÍA, M. T.; GARCIA, I.; DUQUE, G.; LUCAS, A.; RODRÍGUEZ, J. F. (2009), Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste Management*, v. 29, n. 6, p. 1814–1818.
- GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. (2017), Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, p. 25–29.
- GIL-JASSO, N. D.; SEGURA-GONZÁLEZ, M. A.; SORIANO-GILES, G.; NERI-HIPOLITO, J.; LÓPEZ, N.; MASHERNÁNDEZ, E.; BARRERA-DÍAZ, C. E.; VARELA-GUERRERO, V.; BALLESTEROS-RIVAS, M. F. (2019), Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils. *Fuel*, v. 239, n. March 2018, p. 611–616.
- GIL-JASSO, N. D.; GILES-MAZÓN, E. A.; SORIANO-GILES, G.; REINHEIMER, E. W.; VARELA-GUERRERO, VÍCTOR; BALLESTEROS-RIVAS, M. (2022), A methodology for recycling waste expanded polystyrene using flower essential oils. *Fuel*, v. 307, n. April 2021.
- GREINER, A.; WENDORFF, J. H. (2007), Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie - International Edition*, v. 46, n. 30, p. 5670–5703.
- HINDS, W. C. (1999), *Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles*. 2. ed. John Wiley & Sons, New York.
- HUANG, Z. M.; ZHANG, Y. Z.; KOTAKI, M. RAMAKRISHNA, S. (2003), A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, v. 63, n. 15, p. 2223–2253.
- JARUSUWANNAPOOM, T.; HONGROJJANAWIWAT, W.; JITJAICHAM, S.; WANNATONG, L.; NITHITANAKUL, M.; PATTAMAPROM, C.; KOOMBHONGSE, P.; RANGKUPAN, R.; SUPAPHOL, P. (2005), Effect of solvents on electro-spinnability of polystyrene solutions and morphological appearance of resulting electrospun polystyrene fibers. *European Polymer Journal*, v. 41, n. 3, p. 409–421.
- LEUNG, W. W. F.; SUN, Q. (2020), Electrostatic charged nanofiber filter for filtering airborne novel coronavirus (COVID-19) and nano-aerosols. *Separation and Purification Technology*, v. 250, p. 116886.
- LI, D.; XIA, Y. (2004), Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel? *Advanced Materials*, v. 16, n. 14, p.

- 1151–1170.
- LI, Y.; YIN, X.; YU, J.; DING, B. (2019), Electrospun nanofibers for high-performance air filtration. *Composites Communications*, v. 15, p. 6–19.
- LI, Y.; YIN, X.; SI, Y.; YU, J.; DING, B. (2020), All-polymer hybrid electret fibers for high-efficiency and low-resistance filter media. *Chemical Engineering Journal*, v. 398, n. May, p. 125626.
- LOLLA, D.; LOLLA, D.; LOLLA, M.; ABUTALEB, A.; SHIN, H. U.; RENEKER, D. H.; CHASE, G. G. (2016), Fabrication, polarization of electrospun polyvinylidene fluoride electret fibers and effect on capturing nanoscale solid aerosols. *Materials*, v. 9, n. 8.
- LOU, L.; OSEMWEGIE, O.; RAMKUMAR, S. S. (2020), Functional Nanofibers and Their Applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 59, n. 13, p. 5439–5455.
- MAAFA, I. M. (2021), Pyrolysis of polystyrene waste: A review. *Polymers*, v. 13, n. 2, p. 1–30.
- MATULEVICIUS, J.; KLIUCININKAS, L.; MARTUZEVICIUS, D.; KRUGLY, E.; TICHONOVAS, M.; BALTRUSAITIS, J. (2014), Design and Characterization of Electrospun Polyamide Nanofiber Media for Air Filtration Applications. *Journal of Nanomaterials*, v. 2014, p. 1–13.
- MIGUEL, A. (2003), Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Journal of Aerosol Science*, v. 34, n. 6, p. 783–799.
- MUMBACH, G. D.; BOLZAN, A.; MACHADO, R. A. F. (2020), A closed-loop process design for recycling expanded polystyrene waste by dissolution and polymerization. *Polymer*, v. 209, n. March, p. 1–8.
- NEAL, R. A.; MCCLUGAGE, S. G.; LINK, M. C.; SEFCIK, L. S.; OGLE, R. C.; BOTCHWEY, E. A. (2009), Laminin Nanofiber Meshes That Mimic Morphological Properties and Bioactivity of Basement Membranes. *Tissue Engineering Part C: Methods*, v. 15, n. 1, p. 11–21.
- PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. (2006), Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review. *Tissue Engineering*, v. 5, n. 12, p. 1197–1211.
- QUINA, F. H. (2004), Nanotecnologia e o meio ambiente: Perspectivas e riscos. *Quimica Nova*, v. 27, n. 6, p. 1028–1029.
- RAJAK, A.; HAPIDIN, D. A.; ISKANDAR, F.; MUNIR, M. M.; KHAIRURRIJAL, K. (2020), Electrospun nanofiber from various source of expanded polystyrene (EPS) waste and their characterization as potential air filter media. *Waste Management*, v. 103, p. 76–86.
- RAMAKRISHNA, S.; FUJIHARA, K.; TEO, W. E.; LIM, T. C.; MA, Z. (2005), An Introduction to Electrospinning and Nanofibers. [s.l.] WORLD SCIENTIFIC.
- STONE, V.; JOHNSTON, H.; CLIFT, M. J. D. D. (2007), Air pollution, ultrafine and nanoparticle toxicology: Cellular and molecular interactions. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, v. 6, n. 4, p. 331–340.
- UYAR, T.; BESENBACHER, F. (2008), Electrospinning of uniform polystyrene fibers: The effect of solvent conductivity. *Polymer*, v. 49, n. 24, p. 5336–5343.
- WANG, C. SEN; OTANI, Y. (2013), Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 52, n. 1, p. 5–17.
- WANG, Z.; CHENG, Y.; QI, Y.; WANG, R.; WANG, L.; JIANG, J. (2019), Experimental study of pore structure and fractal characteristics of pulverized intact coal and tectonic coal by low temperature nitrogen adsorption. *Powder Technology*, v. 350, p. 15–25.
- XIAO, B.; WANG, W.; ZHANG, X.; LONG, G.; FAN, J.; CHEN, H.; DENG, L. (2019), A novel fractal solution for permeability and Kozeny-Carman constant of fibrous porous media made up of solid particles and porous fibers. *Powder Technology*, v. 349, p. 92–98.