



OBTENÇÃO DE NANOFIBRAS DE POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET) RECICLÁVEL PARA FILTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO

GABRIELA B. MEDEIROS^{1*}, DANIELA S. de ALMEIDA², MÔNICA L. AGUIAR¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

*e-mail: gabi.brunosi23@gmail.com

RESUMO - O desenvolvimento de novos materiais na produção de meios filtrantes, visando melhorar o desempenho de equipamentos utilizados na filtração de ar e na remoção de poluentes gasosos, tem atraído grande interesse da indústria de diversos setores, devido principalmente aos comprovados efeitos adversos da poluição do ar sobre a saúde humana, além do endurecimento de leis ambientais no controle de material particulado ultrafino. Assim, o objetivo desse trabalho foi produzir meios filtrantes (MF) com alto desempenho para filtração de partículas ultrafinas e de baixo consumo energético. Para isso, o polímero poli(tereftalato de etileno) (PET) reciclável foi utilizado como matéria-prima para a produção dos MF, através da técnica de eletrofiiação. Planejamento fatorial foi utilizado para análise estatística e otimização dos parâmetros de processo e da solução do polímero utilizado na eletrofiiação para a produção dos MF, da qual a variável resposta o diâmetro médio das nanofibras. Como resultado, os meios filtrantes com concentração de 8 e 12% de PET reciclado em solução apresentaram diâmetros médios na faixa de 68 nm a 225nm. A eficiência de coleta dos MF foi 99,95% e 99,99% para nanopartículas (6,38 a 232,9 nm de diâmetro). Porém, os MF apresentaram baixos valores de permeabilidade ($1,05 \times 10^{-13}$ e $1,91 \times 10^{-13} \text{ m}^2$).

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um dos problemas ambientais que está atraindo a atenção da sociedade é a poluição do ar, devido ao aumento da urbanização e da industrialização em todo o planeta. Os poluentes atmosféricos podem apresentar em sua composição material particulado respirável, gases tóxicos e microrganismos. Por este motivo, são de alto risco à saúde humana, causando doenças como as respiratórias, cardiovasculares graves e até mesmo neurológicas (Ali; Khoja, 2019; Petrowski *et al.*, 2021; Shang *et al.*, 2019), além de causarem danos ambientais, como é o caso do efeito estufa e o aquecimento global (Li *et al.*, 2019; Robert; Nallathambi, 2020).

Entre as principais fontes de poluição externa estão os veículos, a

agricultura/incineração de resíduos e as indústrias (Baby *et al.*, 2020). Além do controle da poluição em ambientes externos, o controle de poluentes em ambientes internos tem chamada a atenção, principalmente devido a pandemia de Covid-19, uma vez que as pessoas passam a maior parte do tempo em ambientes fechados, como escritórios, escolas, residências, etc. (Zhang *et al.*, 2019a).

O material particulado (MP) consiste em uma mistura de sólidos e gotículas líquidas presentes no ar. Esse material é o poluente que mais afeta as pessoas em seu dia a dia. É composto principalmente por sulfatos, nitratos, amônia, cloreto de sódio, carbono negro, poeira mineral e água, formando uma suspensão líquida ou sólida no ar, vírus, fungos, bactérias e materiais orgânicos (Seinfeld; Pandis, 2016; Zhang *et al.*, 2019b).

Uma forma de controlar a poluição do ar é através da filtração, que nos últimos anos tem aumentado o número de pesquisas devido aos avanços da indústria têxtil na fabricação de MF com fibras sintéticas mais resistentes a altas temperaturas e pressões. Mesmo assim, ainda existem poucos estudos de filtração de ar e gases que controlem juntamente a emissão de gases tóxicos. Isso acontece, pois, a adsorção desses gases nos meios filtrantes ou sua conversão em uma forma menos prejudicial é tecnicamente difícil de ser alcançada (Manisalidis *et al.*, 2020).

Neste sentido, o desenvolvimento de MF pela técnica de eletrofiação tem se mostrado uma alternativa interessante para retenção de nanopartículas, uma vez que os meios filtrantes produzidos por micro ou nanofibras eletrofiadas aumentam a eficiência de coleta para partículas nanométricas, devido a sua elevada área superficial para uma pequena massa de material e elevada porosidade (Wang *et al.*, 2021).

A técnica de eletrofiação tem se mostrado eficaz na produção de nanofibras para uso em filtração gasosa, além de ser uma técnica simples e de baixo custo. No processo de eletrofiação, a solução é mantida numa seringa, acoplada a uma bomba, para que a taxa de alimentação seja constante e controlável. Sob a ação de um campo eletrostático elevado na superfície da gota na ponta da seringa, a mesma se alonga e torna-se cônica num formato conhecido como cone de Taylor (Mercante *et al.*, 2017). Quando o campo elétrico atinge um valor crítico em que a força repulsiva elétrica supera a força de tensão superficial, o jato de solução carregado é ejetado sobre o coletor (Casper *et al.*, 2004; Li; Xia, 2004). Uma vez que este jato é carregado, a sua trajetória pode ser controlada pelo campo elétrico. À medida que o jato se desloca no ar, o solvente evapora e a fibra de polímero carregada se estabelece aleatoriamente sobre o coletor (Kadam; Wang; Padhye, 2018; Robert; Nallathambi, 2020).

Apesar da relativa facilidade de uso da eletrofiação, existe uma série de parâmetros que podem afetar significativamente a formação e a estrutura da fibra sendo estes relacionados com o tipo de solução, processamento e condições ambientais (Huang *et al.*, 2020; Neto *et al.*, 2012). Assim, o controle e otimização desses

parâmetros se faz importante para a eficiência na aplicação dessas nanofibras.

A produção de fibras utilizando polímeros biodegradáveis ou recicláveis, como é o caso do poli(tereftalato de etileno) (PET), reduz o custo de produção do meio filtrante e contribui com a preservação do meio ambiente.

Bonfim *et al.* (2021a) desenvolveram meios filtrantes de PET reciclável através da técnica de eletrofiação. Foram testadas concentrações das soluções entre 12 a 20% de PET utilizando um coletor rotativo. Os meios filtrantes (diâmetros de fibra variando entre 3,25 μm para 1,27 μm) se mostraram eficientes na coleta de MP (cerca de 100%) com permeabilidade de $4,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2$. Dentre as aplicabilidades dos meios filtrantes estão: filtros hospitalares, zonas limpas da indústria farmacêutica e alimentícia, aeronaves, entre outros. Em um outro estudo Bonfim *et al.* (2021b) testaram os meios filtrantes eletrofiados a partir de solução de PET com relação as propriedades mecânicas e concluíram que a resistência mecânica aumentava à medida que o diâmetro da fibra diminuía. Encontraram valores de resistência variando entre 3,2 a 4,5 MPa para nanofibras com diâmetros entre 3,25 μm a 0,65 μm , respectivamente.

Buscando encontrar os parâmetros ótimos de produção das nanofibras de PET reciclável, o presente trabalho apresenta o estudo de meios filtrantes compostos por nanofibras obtidas pela técnica de eletrofiação, relacionando o diâmetro das nanofibras e sua eficiência na filtração gasosa. Desta forma, espera-se produzir nanofibras de alta eficiência de filtração para nanopartículas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O polímero utilizado foi o poli(etileno tereftalato) (PET) reciclado a partir de garrafas transparentes de 600 mL conhecidas como “garrafas PET”. Os solventes utilizados para o preparo das soluções foram o ácido trifluoroacético (TFA) (Neon Comercial Ltda) e diclorometano (DCM) (Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda). Para o processo de eletrofiação foram usadas seringas plásticas de 5 e 10 mL, agulhas de diâmetros de 0,7 mm.

Métodos

Preparo das soluções e eletrofiiação:

Preparou-se a solução polimérica solubilizando o PET reciclado triturado em pequenos pedaços de 1cm², em uma mistura contendo os solventes TFA e DCM em proporção de (30/70 v/v). A solução foi agitada em temperatura ambiente, em uma capela, até completa solubilização do polímero. Foram preparadas as seguintes concentrações de PET em solução: 8, 10, 12% (m/v) (Bonfim *et al.*, 2021a).

As soluções poliméricas foram fiadas em um equipamento de eletrofiiação que consiste basicamente em três componentes, como pode ser observado na Figura 1: uma fonte de alta tensão, um coletor metálico (placa-plana) e um tubo capilar (uma agulha), além de uma bomba injetora para controle de vazão da solução polimérica. A solução foi adicionada em uma seringa e então acoplada ao sistema.

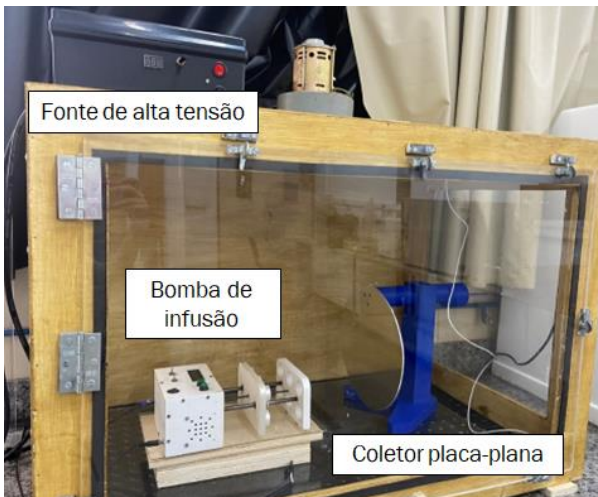


Figura 1: Esquema do equipamento de eletrofiiação utilizado para produção dos meios filtrantes.

Realizou-se um planejamento fatorial, a fim de avaliar como os parâmetros (concentração da solução, tensão aplicada e vazão de injeção) influenciariam no diâmetro médio das fibras formadas. Utilizou-se o planejamento fatorial fracionário 2³, no qual tem-se 3 variáveis com nível superior, inferior e ponto central, conforme apresentado na Tabela 1.

A distância entre a ponta da agulha e o coletor, chama de distância de trabalho, foi fixada em 8 cm (Du *et al.*, 2020). Os parâmetros ambientais, temperatura e umidade foram medidos durante a realização dos experimentos.

Tabela 1: Planejamento fatorial 2³ para o estudo das variáveis de solução e de processo.

Variáveis	Níveis		
	Inferior	Ponto médio	Superior
Concentração PET (%)	8	10	12
Tensão (kV)	16	19	22
Vazão (mL/h)	0,6	0,9	1,2

Análise morfológica dos meios filtrantes:

A morfologia das fibras produzidas foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de constatar a forma de entrelaçamento, diâmetro médio das fibras formadas e presença/ausência de *beads*. As imagens de MEV foram obtidas no equipamento Modelo Philips XL-30 FEG.

A partir das imagens de MEV foram feitas as medições de diâmetro das fibras, com auxílio do *software ImageJ*, seguindo a metodologia apresentada em Bortolassi, Guerra e Aguiar (2017). Foram realizadas 100 medidas por amostra, obtendo-se assim o diâmetro médio e desvio padrão para cada amostra.

Tendo como resposta o diâmetro médio da fibra, foi realizada a análise estatística utilizando o *software Design-Expert® 7.0.0*.

Permeabilidade e eficiência de filtração dos meios filtrantes: Os experimentos de permeabilidade dos meios filtrantes e testes de eficiência de filtração do ar foram realizados em um módulo que consiste em um compressor de ar (Shulz), filtros de purificação de ar (TSI, Modelo 3074B), gerador de partículas (TSI, Modelo 3079A), secador por difusão (TSI, Modelo 3062), fonte de neutralização de Kriptônio e Amerício (TSI, Modelo 3054), suporte para filtro e um rotâmetro digital (TSI, Modelo 41403). Também foi usado um espectrômetro por mobilidade elétrica de partícula (SMPS) formado por classificador eletrostático (TSI, Modelo 3080) e analisador de mobilidade diferencial e contador de partículas ultrafinas (TSI, Modelo 3776) conforme mostrado na Figura 2 (de Barros; Cirqueira; Aguiar, 2014).

Os experimentos de permeabilidade dos meios filtrantes foram analisados com a passagem de ar limpo no mesmo módulo

mostrado na Figura 2, usando o gerador de partículas, o secador por difusão e o sistema SMPS. A velocidade superficial foi variada e a queda de pressão medida com o auxílio de um manômetro digital (TSI, modelo VelociCalc 9555-P) conectado à linha de filtração. Com isso, foi possível obter a constante de permeabilidade (k_1) a partir da Equação 1, conhecida como Equação de Darcy, uma vez que a espessura do MF (L) é constante.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot v_s \quad (1)$$

em que ΔP é a queda de pressão; L é espessura do meio filtrante; μ é viscosidade do fluido; e v_s é velocidade superficial do gás.

A eficiência de coleta (η) de nanopartículas foi determinada pela técnica de mobilidade elétrica, que consiste na determinação da concentração de partículas na entrada e na saída do meio filtrante, utilizando a Equação 2. Neste estudo foram utilizadas nanopartículas de NaCl, a partir de uma solução com concentração de $0,1 \text{ g.L}^{-1}$, para simular a contaminação de nanopartículas no ar.

$$\eta = \frac{C_o - C_e}{C_o} \quad (2)$$

em que C_o é concentração de material particulado na entrada do meio filtrante; e C_e é concentração de partículas na saída do meio filtrante.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Eletrofiliação e Planejamento Fatorial

Com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros concentração do PET, tensão elétrica aplicada e vazão da solução sobre o diâmetro médio das fibras eletrofiadas, foi realizado o planejamento fatorial fracionário 2^3 , no qual se avaliou simultaneamente 3 variáveis (cada uma em dois níveis) resultando em 8 experimentos, acrescidos dos experimentos do ponto central (triplicata). Os valores experimentais de cada variável gerada pelo planejamento estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos parâmetros utilizados nos experimentos gerados pelo planejamento fracionário 2^3 .

Exp.	Concentração (%)	Vazão (mL/h)	Tensão (kV)
1	8	0,6	16
2	12	0,6	16
3	8	1,2	16
4	12	1,2	16
5	8	0,6	22
6	12	0,6	22
7	8	1,2	22
8	12	1,2	22
9	10	0,9	19
10	10	0,9	19
11	10	0,9	19

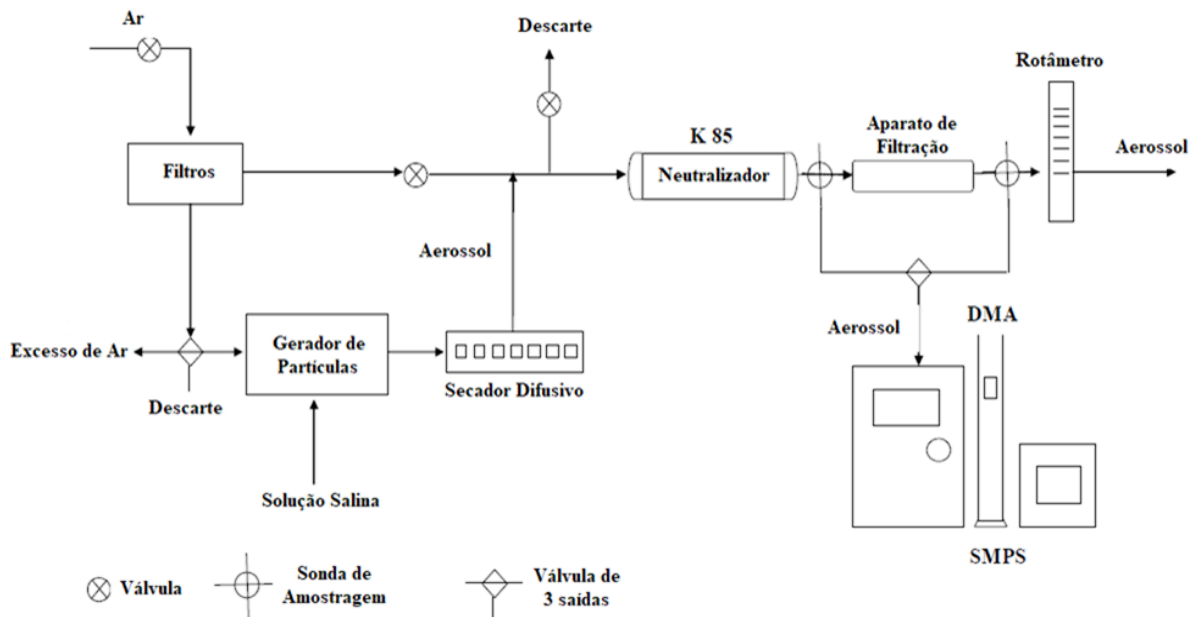


Figura 2: Esquema do módulo utilizado para determinar a permeabilidade e a eficiência do meio.

A Figura 3 apresenta as imagens de MEV dos meios filtrantes obtidos nos experimentos realizados baseados nas condições da Tabela 2.

Durante o processo de eletrofiação não é desejável a formação dos *beads* nas nanofibras, uma vez que podem provocar inviabilidade das aplicações das nanofibras. Um exemplo disso é a redução das resistências térmica e mecânica das nanofibras devido à presença de *beads*, uma vez que a descontinuidade das fibras as enfraquece (Kendouli *et al.*, 2014).

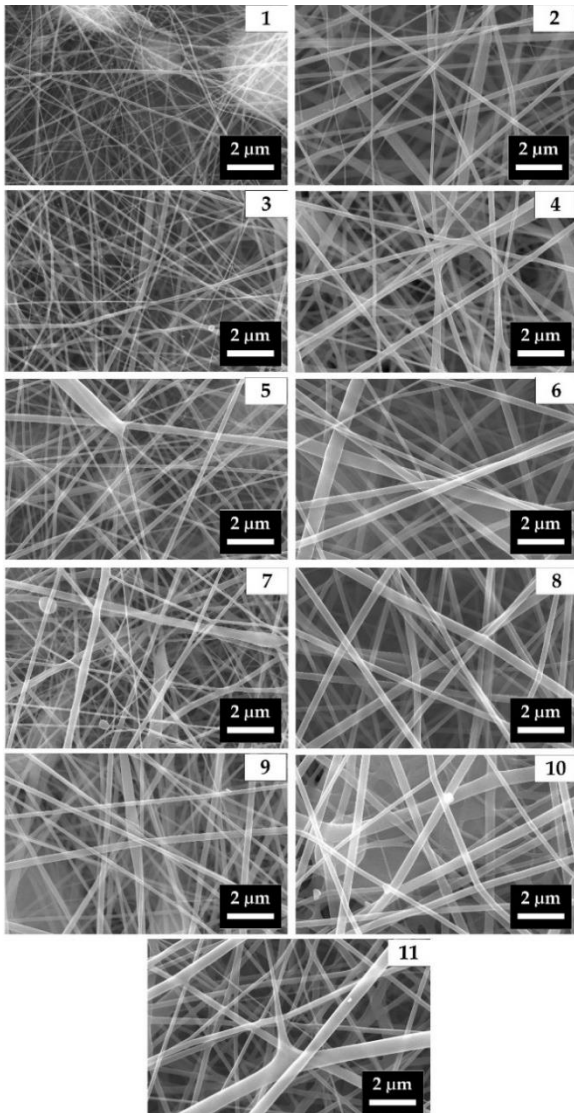


Figura 3: Imagens obtidas por MEV dos meios filtrantes de PET coletadas na eletrofiação nas condições dos experimentos de 1 a 11, apresentadas na Tabela 2.

Analisando as imagens obtidas pelo MEV das fibras produzidas a partir das condições propostas pelo planejamento fatorial, apresentadas na Figura 3, nota-se a formação de bolsas/contas esbranquiçadas, as quais são os

chamados *beads*. Conforme aumenta-se a concentração da solução de 8% para 12% de PET, observa-se a diminuição das quantidades de *beads* nas fibras. A partir dessa observação, concluiu-se que a variável mais influente na formação de *beads* é a concentração da solução polimérica (Pham; Sharma; Mikos, 2006). Assim, uma forma de reduzir a formação de *beads* é aumentar a concentração polimérica da solução a ser eletrofiada.

A Figura 4 apresenta a distribuição de diâmetros das fibras, através de histogramas, para cada um dos experimentos realizados.

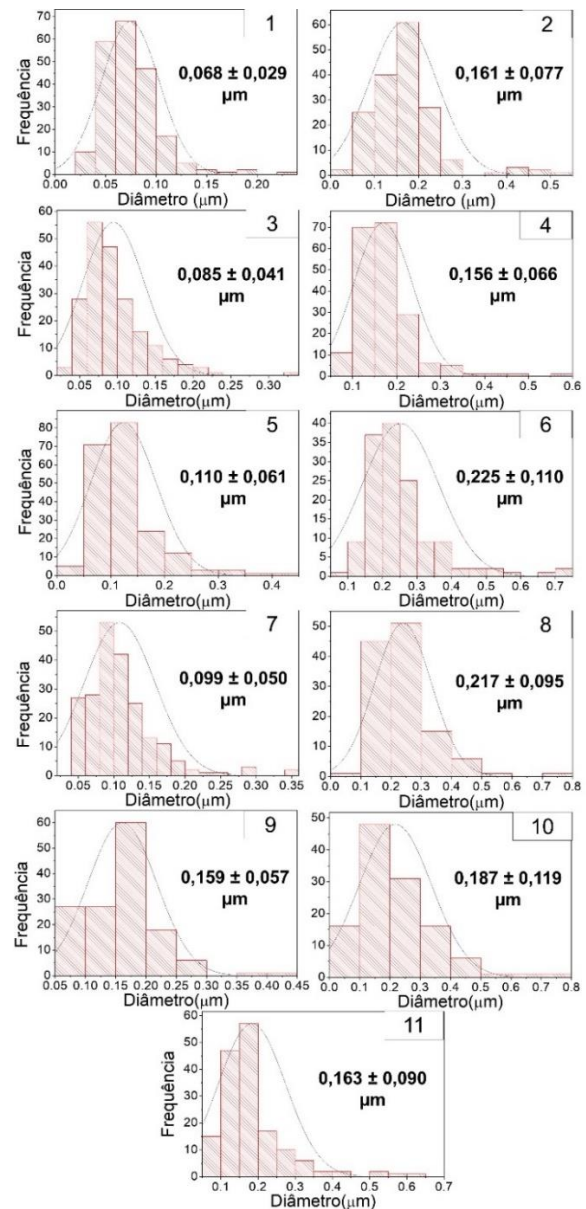


Figura 4: Histogramas de distribuição de diâmetro médio das fibras de PET dos meios filtrantes coletados na eletrofiação nas condições dos experimentos de 1 a 11, da Tabela 2; a frente da curva sua média e desvio padrão.

Para cada fibra produzida foram feitas 100 medidas de diâmetro em duas regiões diferentes, totalizando 200 medidas. Calculou-se então, o diâmetro médio e seu desvio padrão, apresentados na Figura 4.

Analisando as fibras produzidas, todas apresentam diâmetros médios menores que 0,3 μm (300 nm). A fibra com menor diâmetro médio foi obtida no experimento 1, e apresentou 68 nm nas condições de níveis inferiores (8% PET; 0,6 mL/h; e 16 kV). Já a fibra de maior valor de diâmetro médio foi obtida no experimento 6, com 225 nm, eletrofiada nas condições de concentração da solução de 12% de PET, voltagem de 22 kV e vazão de 0,6 mL/h. Resultados semelhantes aos apresentados na literatura (Bonfim *et al.*, 2021a; Bonfim *et al.*, 2021b; Šišková; Frajová; Nosko, 2020; Strain *et al.*, 2015).

Como prevista na literatura, o aumento da concentração da solução provocou o aumento do diâmetro médio da fibra formada (Greiner; Wendorff, 2007). A fim de analisar de forma qualitativa os efeitos de cada parâmetro sobre o diâmetro das fibras, foi feita a análise estatística. A contribuição de cada parâmetro sobre a variável resposta (diâmetro médio) foi estimada através do diagrama de Pareto. A variável de maior influência sobre o diâmetro médio foi a concentração do PET (72,89%), seguida da tensão aplicada (15,32%). Já a vazão de injeção não apresentou contribuição significativa (0,023%) sobre a resposta. Para melhor avaliar os dados foi feita a análise de variância (ANOVA), apresentados na Tabela 3.

Analisando os resultados da Tabela 3 foi possível observar que o modelo proposto, apresentado na Equação 3, é significativo (p-valor < 0,05) e o coeficiente de correlação de Pearson (R^2) foi de 0,9716.

$$\text{Diâmetro médio } (\mu\text{m}) = 0,14 + 0,049625 A + 0,022750 C + 0,008625 \quad (3)$$

Segundo os resultados apresentados na ANOVA, os parâmetros significativos são concentração de PET (A) e tensão aplicada (C), uma vez que os seus p-valores para estes fatores são menores que 0,05. A interação entre concentração de PET e tensão aplicada (AC) não é significativa, pois o p-valor é maior que 0,05. A falta de ajuste (relação funcional inadequada entre os valores experimentais e os valores dados pelo modelo) apresentou valores baixos do valor de F, mostrando que não foi significativa e o modelo validando está apresentado na Equação 3.

Os sinais positivos e negativos da Equação 3 estão relacionados com o tipo de efeito sobre o diâmetro médio, ou seja, como cada variável influencia no diâmetro médio. Portanto, tanto a concentração do PET quanto a tensão aplicada apresentaram efeitos positivos, o que significa que o aumento das variáveis provocou aumento no diâmetro médio.

A Figura 5 apresenta a superfície de resposta do planejamento fatorial relacionando o diâmetro médio dos meios filtrantes produzidos de acordo com as variáveis: concentração de PET e tensão aplicada.

Tabela 3: ANOVA obtida para a resposta diâmetro médio.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p-Valor
Modelo	0,024	3	$8,146 \times 10^{-3}$	68,36	<0,0001
A – Concentração PET	0,020	1	0,020	165,34	<0,0001
C - Tensão	$4,141 \times 10^{-3}$	1	$4,141 \times 10^{-3}$	34,75	0,0011
AC	$5,951 \times 10^{-4}$	1	$5,951 \times 10^{-4}$	4,99	0,0668
Curvatura	$1,877 \times 10^{-3}$	1	$1,877 \times 10^{-3}$	15,76	0,0074
Residual	$7,149 \times 10^{-4}$	6	$1,192 \times 10^{-4}$		
Falta de ajuste	$2,387 \times 10^{-4}$	4	$5,969 \times 10^{-5}$	0,25	0,8885
Erro Puro	$4,762 \times 10^{-4}$	2	$2,381 \times 10^{-4}$		
Total	0,027	10			

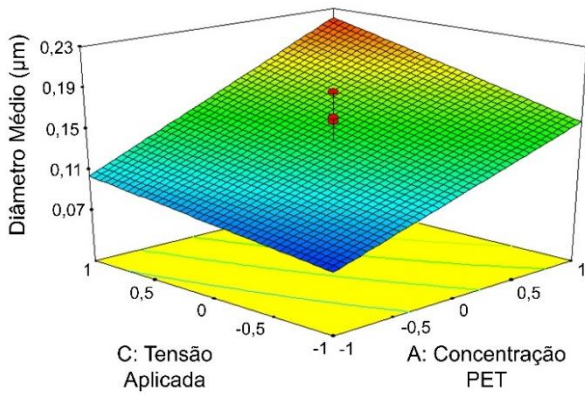


Figura 5: Superfície de resposta para o diâmetro médio em função da concentração de PET e tensão aplicada.

Como discutido anteriormente, o aumento da concentração de PET na solução e o aumento da tensão aplicada provocaram o aumento do diâmetro médio da fibra formada.

Permeabilidade dos Meios Filtrantes

A constante de permeabilidade (k_1) foi obtido pela equação de Darcy (Equação 1), uma vez que as velocidades superficiais de filtração utilizadas foram baixas.

Para obter a curva de permeabilidade, apresentadas na Figura 6, variou-se a vazão de ar de 100 a 2000 cm^3/min (0,003 a 0,064 m/s de velocidade superficial). Mediu-se a queda de pressão para cada velocidade, conforme apresentado na Tabela 4, para as concentrações de 8% e 12% de PET. A partir da curva, calculou-se os valores das constantes de permeabilidade para os meios filtrantes, apresentados na Tabela 4.

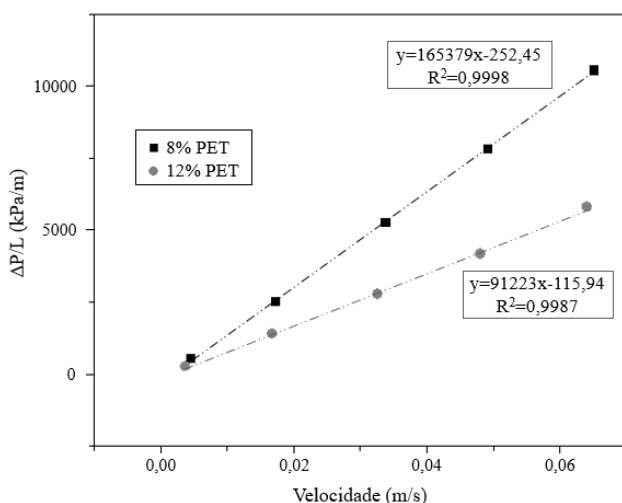


Figura 6: Curva de permeabilidade para os meios filtrantes com 8 e 12% de PET.

Tabela 4: Constante de permeabilidade (k_1) dos meios filtrantes com 8 e 12% de PET.

8% PET		12% PET	
vazão (cm^3/min)	ΔP (Pa)	vazão (cm^3/min)	ΔP (Pa)
100	170,6	100	81,5
500	766,0	500	412,5
1000	1593,5	1000	813,1
1500	2365,0	1500	1219,4
2000	3188,4	2000	1698,4
k_1 (m^2)	$1,05 \times 10^{-13}$	k_1 (m^2)	$1,91 \times 10^{-13}$

Nota-se que a constante de permeabilidade foi maior para o filtro de 12%, o que significa que o meio filtrante de maior concentração de PET é mais permeável a passagem de ar que o filtro com menor concentração de PET (8%). A ordem de grandeza da constante de permeabilidade dos meios filtrantes está de acordo com trabalhos apresentados na literatura (Bonfim *et al.*, 2021; Bortolassi *et al.*, 2019). Bortolassi *et al.* (2017) obteve valores de k_1 para filtros HEPA, na faixa de $7,28$ a $9,62 \times 10^{-13}$.

Por fim, comparando-se os filtros quanto a queda de pressão em relação as diferentes concentrações de polímero verificam-se que o aumento da concentração provocou a diminuição da queda de pressão. Isso também pode ser explicado pelo alto números de *beads* presentes nas fibras de menor concentração, que provocam uma obstrução maior da fibra, aumentando a queda de pressão.

Eficiência de Filtração dos Meios Filtrantes

A eficiência de coleta (η) foi feita a partir de nanopartículas de NaCl com diâmetros variando entre 6,38 a 232,9 nm. Para o filtro com concentração de 8% de PET, o valor de η foi de 99,99% para coleta de nanopartículas na faixa descrita. Já para o filtro com concentração de 12% de PET, o valor de η foi de 99,95%. Apesar de apresentarem uma eficiência de filtração muito elevada, próxima a 100%, os meios filtrantes apresentaram valores de queda de pressão, para a vazão de 1500 cm^3/min , com 8 e 12% de PET de 2365,0 Pa e 1219,4 Pa, respectivamente. Estes valores ficaram acima do valor de queda de pressão do filtro HEPA (que fica em torno de 269 a 418 Pa na vazão de 1500 cm^3/min ; Bortolassi *et al.*, 2017). No

entanto, é um resultado bastante promissor, porque o MF com 12% de PET em solução apresentou uma eficiência alta com menor queda de pressão do que o MF com 8% de PET em solução, o que mostra que é possível obter menor queda de pressão e maior eficiência, modificando alguns parâmetros da eletrofição.

Fazendo uma comparação quanto a permeabilidade dos meios filtrantes, nota-se que o MF produzido com maior concentração apresentou praticamente a mesma eficiência de coleta do MF com menor concentração, porém a permeabilidade foi maior, assim como a queda de pressão menor. Desta forma, o MF com maior concentração apresenta um menor consumo de energia quando em uso por um equipamento. Ensaio de caracterizações adicionais serão realizados e apresentados em trabalhos futuros. No entanto, os resultados encontrados até o presente momento se mostram semelhante ao que está apresentado em estudos na literatura (Xia; Chen, 2021).

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que na produção de MF compostos por PET reciclável pela técnica de eletrofição as variáveis de processo que mais interferem no diâmetro médio das fibras são a concentração da solução polimérica e a tensão elétrica.

Ainda, de forma geral, conclui-se que os meios filtrantes produzidos apresentaram ótimo desempenho na filtração de ar, sendo promissora a sua fabricação para várias aplicações, dentre elas, a separação de nanopartículas por filtros, EPI's, respiradores mecânicos, ventilação de ambientes internos (hospitais, indústrias farmacêutica, alimentícia, entre outros).

É importante destacar o papel deste material na sustentabilidade, devido ao uso de energia renovável e proteção ambiental, na remoção de material particulado e na reciclagem de material sólido. Entretanto, novos estudos devem ser realizados, explorando e ampliando todo o potencial de aplicação destas nanofibras, que são resistentes, alterando algumas variáveis de processo de eletrofição para melhorar ainda mais a eficiência de coleta para nanopartículas com a mínima queda de pressão, com a adição de nanopartículas para aumentar a funcionalidades destes filtros, tais como: efeito biocida e na

adsorção de gases tóxicos presentes nos ambientes internos.

REFERÊNCIAS

- ALI, N. A.; KROJA, A. (2019), Growing evidence for the impact of air pollution on depression, *Ochsner Journal*, Vol 19, p.4.
- BABY, T.; JOSE, T. E.; ARAVINDKUMAR, C. T.; THOMAS, J. R. (2020), A facile approach for the preparation of polycarbonate nanofiber mat with filtration capability, *Polymer Bulletin*, Vol 78, p. 3363-3381.
- BONFIM, D. P. F.; CRUZ, F. G. S.; BRETAS, R. E. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. (2021a), A sustainable recycling alternative: Electrospun pet-membranes for air nanofiltration, *Polymers*, Vol 13, p. 1-14.
- BONFIM, D. P. F.; CRUZ, F. G. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. (2021b), Development of filter media by electrospinning for air filtration of nanoparticles from pet bottles, *Membranes*, Vol 11, p. 293.
- BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. (2017), Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles, *Separation and Purification Technology*, Vol 175, p. 79-86.
- BORTOLASSI, A. C. C.; NAGARAJAN, S.; DE ARAÚJO, B. L.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L.; HUON, V.; SOUSSAN, L.; CORNU, D.; MIELE, P.; BECHELANY, M. (2019), Efficient nanoparticles removal and bactericidal action of electrospun nanofibers membranes for air filtration, *Separation and Purification Technology*, Vol 102, p. 718-729.
- CASPER, C. L.; STEPHENS J. S.; TASSI N. G.; CHASE D. B.; RABOLT J. F. (2004), Controlling Surface Morphology of Electrospun Polystyrene Fibers: Effect of Humidity and Molecular Weight in the Electrospinning Process, *Macromolecules*, Vol 37, p. 573-578.
- DE BARROS, P. M.; CIRQUEIRA, S. S. R.; AGUIAR, M. L. (2014), Evaluation of the deposition of nanoparticles in fibrous

- filter, *Materials Science Forum*, Vol 802, p. 174–179.
- DU, L.; ZHANG, Y.; LI, X.; WANG, J.; CHEN, M.; ZUO, X.; YANG, W.; YOUSEFZADEH, M.; RAMAKRISHANA, S.; LI, H. (2020), High performance anti-smog window screens via electrospun nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 137, p. 48657.
- GREINER, A.; WENDORFF, J. H. (2007), Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers, *Angewandte Chemie*, Vol 46, p. 5670–5703.
- HUANG, J. J.; TIAN, Y.; WANG, R.; TIAN, M.; LIAO, Y. (2020), Fabrication of bead-on-string polyacrylonitrile nanofibrous air filters with superior filtration efficiency and ultralow pressure drop, *Separation and Purification Technology*, Vol 237, p. 116377.
- KADAM, V. V.; WANG, L.; PADHYE, R. (2018), Electrospun nanofibre materials to filter air pollutants – A review, *Journal of Industrial Textiles*, Vol 47, p. 2253–2280.
- KENDOULI, S.; KHALFALLAH, O.; SOBTI, N.; BENSOUISSI, A.; AVCI, A.; ESKIZEYBEK, V.; ACHOUR, S. (2014), Modification of cellulose acetate nanofibers with PVP/Ag addition, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol 28, p. 13–19.
- LI, B. D.; XIA, Y. (2004), Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?, *Advanced Materials*, Vol 16, p. 1151–1170.
- LI, Y.; YIN, X.; YU, J.; DING, B. (2019), Electrospun nanofibers for high-performance air filtration, *Composites Communications*, Vol 15, p. 6–19.
- MANISALIDIS, I.; STAVROPOULOU, E.; STAVROPOULOS, A.; BEZIRTZOGLU, E. (2020), Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review, *Frontiers in Public Health*, Vol 8, p. 1–13.
- MERCANTE, L. A.; SCAGION, V. P.; MIGLIORINI F. L.; MATTOSO L. H. C.; CORREA D. S. (2017), Trends in Analytical Chemistry Electrospinning-based (bio) sensors for food and agricultural applications: A review, *Trends in Analytical Chemistry*, Vol 91, p. 91–103.
- NETO, W. A. R.; PEREIRA, I. H. L.; AYRES, E.; DE PAULA, A. C. C.; AVEROUS, L.; GÓES, A. M.; ORÉFICE, R. L.; BRETAS, R. E. S. (2012), Influence of the microstructure and mechanical strength of nanofibers of biodegradable polymers with hydroxyapatite in stem cells growth. Electrospinning, characterization and cell viability, *Polymer Degradation and Stability*, Vol 97, p. 2037–2051.
- PETROWSKI, K.; BÜHRER, S.; STRAUSS, B.; DECKER, O.; BRÄHLER, E. (2021), Examining air pollution (PM10), mental health and well-being in a representative German sample, *Scientific Reports*, Vol 11, p. 1–9.
- PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. (2006), Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review, *Tissue Engineering*, Vol 5, p. 1197–1211.
- ROBERT, B.; NALLATHAMBI, G. (2020), A concise review on electrospun nanofibres/nanonets for filtration of gaseous and solid constituents (PM2.5) from polluted air, *Colloids and Interface Science Communications*, Vol 37, p. 100275.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. (2016), *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- SHANG, Y.; LIU, M.; WANG, T.; WANG, L.; HE, H.; ZHONG, Y.; QIAN, G.; AN, J.; ZHU, T.; QIU, X.; SHANG, J.; CHEN, Y. (2019), Modifications of autophagy influenced the Alzheimer-like changes in SH-SY5Y cells promoted by ultrafine black carbon, *Environmental Pollution*, Vol 246, p. 763–771.
- ŠIŠKOVÁ, A. O.; FRAJOVÁ, J.; NOSKO, M. (2020), Recycling of poly(ethylene terephthalate) by electrospinning to enhanced the filtration efficiency, *Materials Letters*, Vol 278, p. 128426.

- STRAIN, I. N.; WU, Q.; POURRAHIMI, A. M.; HEDENQVIST, M. S.; OLSSON, R. T.; ANDERSSON, R. L. (2015), Electrospinning of recycled PET to generate tough mesomorphic fibre membranes for smoke filtration, *Journal of Materials Chemistry A*, Vol 3, p. 1632–1640.
- WANG, X. X.; YU, G. F.; ZHANG, J.; YU, M.; RAMAKRISHNA, S.; LONG, Y. Z. (2021), Conductive polymer ultrafine fibers via electrospinning: Preparation, physical properties and applications, *Progress in Materials Science*, Vol 115, p. 100704.
- XIA, T.; CHEN, C. (2021), Evolution of pressure drop across electrospun nanofiber filters clogged by solid particles and its influence on indoor particulate air pollution control, *Journal of Hazardous Materials*, Vol 402, p. 123479.
- ZHANG, Q.; LI, Q.; YOUNG, T. M.; HARPER, D. P.; WANG, S. (2019a), A Novel Method for Fabricating an Electrospun Poly(Vinyl Alcohol)/Cellulose Nanocrystals Composite Nanofibrous Filter with Low Air Resistance for High-Efficiency Filtration of Particulate Matter, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, Vol 7, p. 8706–8714.
- ZHANG, S.; RIND, N. A.; TANG, N.; LIU, H.; YIN, X.; YU, J.; DING, B. (2019b), Electrospun nanofibers for air filtration, *Electrospinning: Nanofabrication and Applications*, Elsevier Inc., p. 365–389.