



CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE FILTROS DE PAN INCORPORADOS COM NANOPARTICULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

EDILTON N. SILVA¹, MÔNICA L. AGUIAR¹, VÁDILA G.G. BÉTTEGA¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Departamento de Engenharia Química
*e-mail: Edilton@estudante.ufscar.br

RESUMO – O material particulado suspenso no ar é um perigo para a saúde e pode gerar diversas doenças respiratórias graves. Para reter materiais particulados os filtros eletrofiados são usados devido à sua alta área de superfície e boa capacidade de captura de partículas aéreas. Além disso, este material permite a incorporação de nanopartículas em suas fibras que melhoram o desempenho de filtração, sendo que algumas apresentam efeito biocida. Neste trabalho foi produzido fibras de poliacrilonitrila (PAN) com diferentes concentrações de nanopartículas de óxido de Zinco (0%, 5%, 10%, 15%). As imagens MEV mostraram que as nanopartículas ficaram distribuídas uniformemente nas fibras. Além disso, foi possível determinar o diâmetro médio das fibras que variou de 417 a 604 nm. Os filtros também tiveram uma baixa queda de pressão (48 a 88,35 Pa). Para o desempenho de filtração foram utilizadas nanopartículas de cloreto de sódio (NaCl) com diâmetros na faixa de 6,38-232,9 nm e velocidade superficial de 4,8 cm/s. Para quantificar o número de partículas antes e após o filtro foi utilizado uma unidade SMPS. O filtro que obteve a melhor eficiência de coleta foi a amostra contendo 15% de ZnO (99,56) e queda de pressão de 81 Pa. Valores próximos dos encontrados para filtros HEPA.

INTRODUÇÃO

A exposição a poluentes do ar está em um alto patamar entre as causas de mortalidade humana, segundo a Organização mundial de saúde (OMS). Estima-se que a poluição do ar causa cerca de 7 milhões de mortes prematuras por ano (SCHRAUFNAGEL et al., 2019). Este grande número de mortes é atribuído a inalação de partículas finas, que estão associadas a diversas doenças pulmonares e cardíacas (SU et al., 2017). Além disso, os microrganismos como vírus, bactérias e fungos também são classificados como material particulados, mais especificamente, bioaerossóis, que podem ser transportados pelo ar e inalados por humanos causando diversas doenças respiratórias e infecciosas como: Influenza, tuberculose e o SARS-CoV-2 (COVID-19) (CHOI et al., 2018; PHAN; CHING, 2020).

Diante desta situação, existe a necessidade de se produzir meios filtrantes altamente eficientes que possam ajudar a combater a pandemia atual e prevenir casos de outras doenças no futuro. Nesse contexto a eletrofiação (electrospinning) tem sido muito utilizada na produção de fibras ultrafinas, de alta área superficial e com diâmetro na ordem de nanômetros a partir de vários polímeros (KADAM et al., 2019). Devido a essas propriedades, essas nanofibras apresentam uma alta eficiência de filtração para gramaturas baixas, e com uma estrutura simples que permite a funcionalização desta nanofibra (KADAM et al., 2019). As nanofibras eletrofiadas normalmente são depositadas em um substrato, após a escolha do substrato, a nanofibra pode ser projetada para que tenha um alta eficiência de filtração (AKDUMAN; AKCAKOCA KUMBASAR, 2018).

Entre os vários polímeros que podem ser utilizados na eletrofiliação, a poliacrilonitrila (PAN) se tornou um bom candidato devido às suas boas propriedades mecânicas e hidrofobicidade, bem como estabilidade térmica e química (VINH; KIM, 2016). As fibras de PAN sozinhas podem ser utilizadas como meio filtrante e podem ser funcionalizadas com diversas partículas, para aumentar a eficiência. Alguns componentes como prata (Ag) (CASTRO-MAYORGA; FABRA; LAGARON, 2016), dióxido de titânio (TiO₂) (LÓPEZ DE DICASTILLO et al., 2018), paládio (Pb) (CHERPINSKI et al., 2018), óxido de zinco (ZnO) (SHEKH; PATEL; PATEL, 2018), e cobre (Cu) (DITARANTO et al., 2018) demonstraram boas propriedades antimicrobianas contra uma variedade de microrganismos como bactérias, vírus e fungos. Estes materiais podem ser incorporados nas nanofibras na forma de nanocompósitos.

Assim o objetivo deste trabalho foi produzir, por eletrofiliação, meios filtrantes de PAN incorporado com nanopartículas de óxido de zinco (ZnO), para remoção de alta eficiência de nanopartículas presentes no ar. Além disso, foi investigado o efeito de diferentes concentrações de nanopartículas na morfologia dos meios filtrantes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Poliacrilonitrila (PAN, MM~150g/gmol), N, N-dimetilformamida (DMF; 99.8%), nanopartículas de óxido de zinco (ZnO, MM~81,39 g/gmol, diâmetros<100 nm) produzida pela Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA). O substrato utilizado foi a fibra de vidro revestida com PVC. Seringas de 10 ml com agulhas com 0,7 mm. NaCl (99%) produzido pela Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA), foi utilizado para produção de nanopartículas utilizada nos testes de eficiência de filtração.

Preparo da solução polimérica

As soluções poliméricas foram feitas utilizando 0,9472g de PAN (8%) em 10 mL de DMF. A solução foi agitada em um agitador magnético por 2h e temperatura ambiente até que o PAN fosse totalmente dissolvido. Após a

agitação, ZnO (0%, 5%,10% e 15% da massa de PAN) foi adicionado à solução e esta foi agitada por 20 h em temperatura ambiente. Na literatura os tempos de agitação de soluções com nanopartículas são de 6 a 48 h (AAMER; HEO; JO, 2021; BORTOLASSI et al., 2019a; HADDAD; ALHARBI, 2019; SHALABY et al., 2018), para que essas partículas fiquem distribuídas uniformemente na solução polimérica. As amostras utilizadas neste trabalho foram chamadas de Branco (0%), ZnO5%, ZnO10%, ZnO15%, de acordo com a quantidade de ZnO presente na amostra.

Produção de nanofibras

As nanofibras foram produzidas utilizando uma metodologia adaptada da literatura, para produção de fibras poliméricas utilizando eletrofiliação (AAMER; HEO; JO, 2021; BORTOLASSI et al., 2019b). As soluções foram transferidas para uma seringa de 10 mL com uma agulha de 0,7mm de diâmetro. A agulha foi acoplada a uma bomba de infusão, mantendo a vazão em 0,73 ml/h, o sistema também conta com uma fonte de alta tensão que gera um campo elétrico de 18kv e um coletor plano de metal. As nanofibras foram depositadas em um substrato que deve ser composto por fibras de material rígido que sustentem a deposição das fibras e não interfiram na filtração, neste trabalho foi utilizado a fibra de vidro revestido com PVC. A distância entre a agulha e o coletor é de 16 cm. Durante a eletrofiliação a alta tensão é obtida conectando o terminal positivo e terra, que é a agulha e o coletor, respectivamente. Quando o campo elétrico é suficientemente intenso para superar a tensão superficial de uma solução polimérica, se forma um jato de solução que vai na direção do eletrodo aterrado (coletor), durante o caminho até o coletor o solvente evapora e assim as fibras são depositadas no coletor. Esse processo foi realizado por 30 min, para cada uma das fibras. A temperatura e umidade do ambiente variou de 30-50% e 19-25 °C.

Caracterização estrutural e morfológica das nanofibras

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram utilizadas para determinar a presença de nanopartículas e a

distribuição do diâmetro das fibras e foram obtidas com o microscópio XL-30 FEG. Foram utilizadas 2 imagens de regiões diferentes de cada amostra com ampliação de 4000x, essas imagens foram utilizadas para determinar a distribuição do diâmetro da fibra, diâmetro médio e o mapa elemental utilizado para observar a distribuição de Zn na amostra. Para determinar a distribuição do diâmetro das fibras foi utilizado o software *ImageJ*, onde foram coletados 70 diâmetros de fibra de cada imagem (BORTOLASSI; GUERRA; AGUIAR, 2017).

Para determinar a espessura da fibra foi utilizado um microscópio óptico acoplado com uma câmera digital, as fibras foram fotografadas e as imagens analisadas utilizando o software *Image pro plus 7.0*.

Testes de filtração

Para determinar a eficiência de coleta das partículas, a perda de carga e a permeabilidade foi utilizado um aparato experimental que consiste de um gerador de aerossol (modelo 3079, TSI), um filtro de purificação de ar (modelo 3074B, TSI), um secador de difusão (Modelo 3062, TSI), uma fonte neutralizadora (Modelo 3054, TSI), um dispositivo de filtração, um rotâmetro digital (Modelo 41403, TSI), um manômetro digital (VelociCalc Model 3A-181WP09, TSI), um dispositivo SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) formado pelo classificador eletrostático (Modelo 3080, TSI), analisador de mobilidade diferencial e contador de partículas ultrafinas (Modelo 3776, TSI).

Eficiência de coleta

A eficiência de coleta foi avaliada utilizando partículas de 6,38-232,9 nm. As partículas foram geradas a partir de uma solução 0,1 g L⁻¹ de NaCl. E foram analisadas em uma velocidade de filtração de 4,8 cm/s, com vazão de 1500 mL/min, e uma área de filtração de 5,2 cm². A eficiência de coleta pode ser calculada pela Equação 1.

$$E = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} * 100 \quad (1)$$

Onde E (%) é a eficiência de coleta, C₀ a concentração de partículas antes do filtro, C₁ é

a concentração de partículas após o filtro, a unidade de ambos está em dW/dlogDp.

Para que um filtro seja considerado eficiente, além de ter uma alta eficiência de coleta é necessário que se tenha uma baixa queda de pressão e uma alta permeabilidade. A permeabilidade é uma medida macroscópica que indica a maior ou menor facilidade com que um fluido submetido a um gradiente de pressão percola os vazios em um meio poroso (FREITAS; MANEIRO; COURY, 2003). A permeabilidade é mensurada variando a velocidade do ar (0,3 a 3 cm/s), e a queda de pressão (ΔP), que é quantificada utilizando o manômetro digital já relatado. A permeabilidade pode ser determinada utilizando a Equação 2, conhecida como equação de Forchheimer para fluidos compressíveis, onde a queda de pressão descreve uma dependência não linear com a velocidade do fluido (INNOCENTINI, 1997).

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

Onde ΔP é a queda de pressão (Pa), μ é a viscosidade do ar (1.74×10^{-7} Pa s), L é a espessura do filtro (cm), v_s é a velocidade superficial de filtração (cm s⁻¹) e k_1 e k_2 são as constantes de permeabilidade darciana e não darciana (cm²). O primeiro termo da Equação 2 representa a contribuição das forças viscosas sobre a queda de pressão, causada pelo atrito entre as moléculas do fluido e pelo atrito entre o fluido e o meio poroso. O segundo termo representa as forças inerciais, causadas pela turbulência do fluido escoante (INNOCENTINI et al., 2009).

Como a velocidade do ar utilizada neste estudo é baixa, o segundo termo pode ser desprezado e a constante de permeabilidade pode ser calculada pela lei de Darcy, que analisa o fluxo do fluido pelo meio filtrante em relação a queda de pressão (INNOCENTINI, SEPULVEDA & ORTEGA, 2005). A lei de Darcy pode ser observada na Equação 3.

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A morfologias da superfície das nanofibras foram observadas usando MEV e apresentadas na Figura 1. As imagens do tipo BSE foram feitas por causa do contraste químico em partículas metálicas, facilitando assim a visualização das nanopartículas de ZnO, presentes na nanofibra.

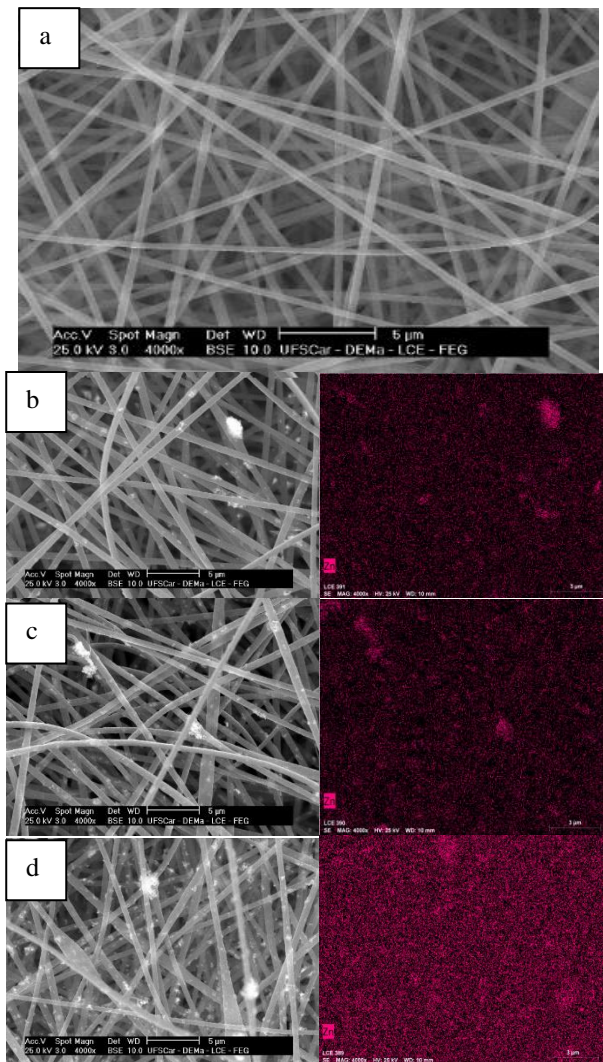


Figura 1: Imagens MEV (BSE) das microfibras de PAN (8%) e mapa elemental do elemento Zn: a) Branco b) ZnO5%, c) ZnO10% e d) ZnO15%.

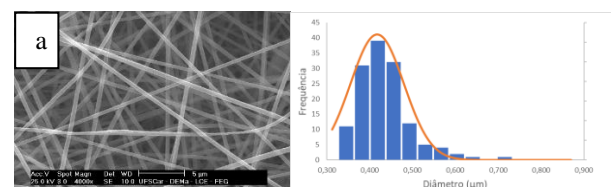
É possível notar que a superfície das fibras é lisa e livre de grânulos e deformações, exceto pela amostra de ZnO15% onde é possível notar a existência de algumas deformações nas nanofibras. A formação de grânulos geralmente depende da concentração do polímero (NATARAJ; YANG; AMINABHAVI, 2012), quanto menor a concentração é mais provável que ocorra a

deformação da fibra. Uma concentração de polímero de aproximadamente 10% é suficiente para prevenir este comportamento, como a amostra ZnO15% tem uma concentração menor (8%) e uma maior quantidade de nanopartículas, provocando esta deformação nas fibras. (ABDEL-MOTTALEB et al., 2019).

Os pontos mais claros na Figura 1 são as nanopartículas de ZnO distribuídas nas fibras. É possível notar que não existe um contraste químico na Figura 1a, devido a esta não ter nanopartículas incorporadas. Os óxidos têm a tendência a formar aglomerados devido ao seu tamanho. Neste trabalho podemos observar que as nanopartículas de ZnO ficaram bem distribuídas e com poucos aglomerados, mostrando que o tempo de agitação para o preparo da solução empregada na eletrofição foi ideal.

No mapa elemental da Figura 1 é possível observar que os íons Zn^{+} estão distribuídos de forma homogênea e por toda a fibra. É possível notar que a ZnO15% apresenta a maior quantidade de nanopartículas distribuída. Mas quando observamos as amostras com concentração de 5 e 10% de ZnO, quase não existe uma diferença, isto deve correr por causa da presença de aglomerados das nanopartículas e essas nanopartículas podem estar retidas no interior da fibra.

O diâmetro da fibra tem grande influência durante a filtração. A diminuição do diâmetro da fibra aumenta a eficiência, devido à formação de uma rede de fibras mais densa com poros menores que são capazes de reter uma grande quantidade de partículas (BASELGA-LAHOZ et al., 2022). Na Figura 2 se encontra os meios filtrantes obtidos do MEV e a distribuição do diâmetro das fibras referente a cada imagem. Onde as barras representam a distribuição das medidas, enquanto a linha é uma aproximação da função de distribuição gaussiana.



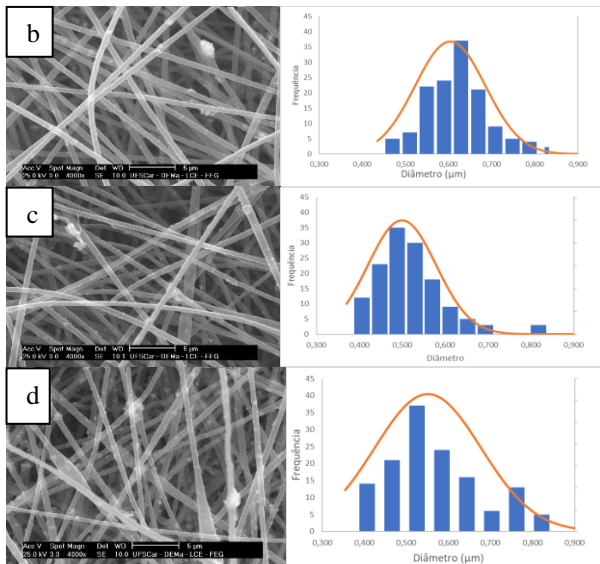


Figura 2: Imagens MEV de fibras de PAN incorporadas com nanofibras de ZnO e suas respectivas distribuições de diâmetro de fibra. a) Branco (0%), b) ZnO5%, c) ZnO10%, d) ZnO15%.

A morfologia das microfibras pode ser influenciada por diversos fatores como: concentração, voltagem aplicada, vazão da solução, distância entre a agulha e o coletor, propriedades das soluções (polaridade, tensão superficial, condutividade elétrica) e a concentração de nanopartículas, que será investigada neste trabalho (PHAM; SHARMA; MIKOS, 2006). A presença de nanopartículas de ZnO afetam a solução polimérica, pois as nanopartículas alteram as propriedades viscoelásticas e tensão superficial, tais fatores influenciam no diâmetro da fibra (TISSERA et al., 2018). Normalmente o diâmetro das fibras diminui com o aumento da concentração de nanopartículas (AAMER; HEO; JO, 2021), podemos observar claramente que isso ocorre nas Figuras 2b e 2c. Já na Figura 2d (ZnO15%), que tem a maior concentração de nanopartículas, o diâmetro médio é maior que a amostras ZnO10% (Figura 2b). Além disso, os diâmetros estão mais distribuídos que nas outras amostras, este fato pode ter ocorrido por causa das deformações presentes nas fibras, como é possível visualizar nas imagens de MEV. Os diâmetros médios podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Diâmetro médio das fibras

Amostra	Diâmetro de fibra médio (μm)
Branco	0,417
ZnO5%	0,604
ZnO10%	0,499
ZnO15%	0,551

A queda de pressão foi influenciada pela espessura das fibras, fibras mais espessas tem uma maior queda de pressão, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Queda de pressão, espessura e permeabilidade das microfibras de PAN.

Amostra	Queda de pressão (Pa)	Espessura (μm)
Branco	88,35	617,4
ZnO 5%	65,1	374,3
ZnO 10%	48	206,2
ZnO 15%	81	425,6

A amostra que teve a menor queda de pressão foi a ZnO10% que também foi a que teve a menor espessura. Pode-se observar na Figura 3, que a queda de pressão do Branco e da amostra ZnO 15% ficaram bem próximas, como já mencionado, o diâmetro das fibras afeta diretamente a queda de pressão, como a amostra ZnO 15% têm deformações que fazem seus diâmetros de fibra variarem bastante, isso pode ter ocasionado essa queda de pressão maior, mesmo a espessura das duas amostras sendo bem diferentes.

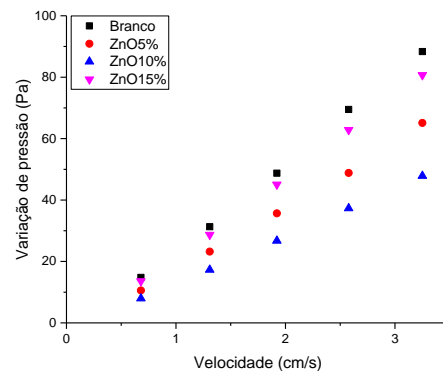


Figura 3: Queda de pressão em função da velocidade superficial de filtros eletrofiados

Eficiência de coleta

Para os testes de eficiência de coleta foram utilizadas partículas com diâmetro de 6,38 a 241,4 nm, a distribuição destas partículas pode ser observada na Figura 4.

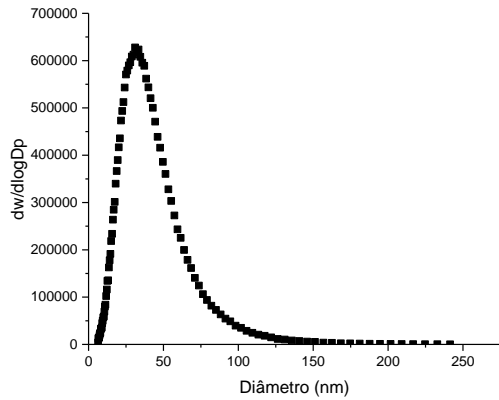


Figura 4: Distribuição tamanho de nanopartículas geradas a partir de uma solução 0,1 g/L de NaCl

As Figuras 5-8 mostram as eficiências de coleta de nanopartículas de NaCl com velocidade superficial de 4,8 cm/s. Esta velocidade foi empregada por ser a que normalmente é empregada para testes de filtração de ar (AAMER; HEO; JO, 2021; BONFIM et al., 2021)

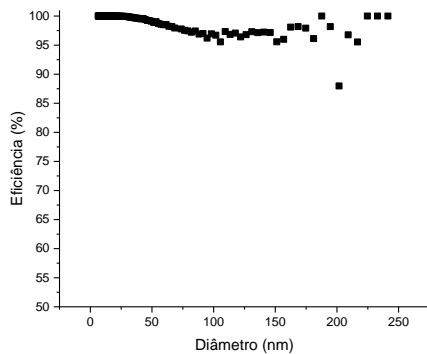


Figura 5: Eficiência de coleta utilizando a amostra Branco

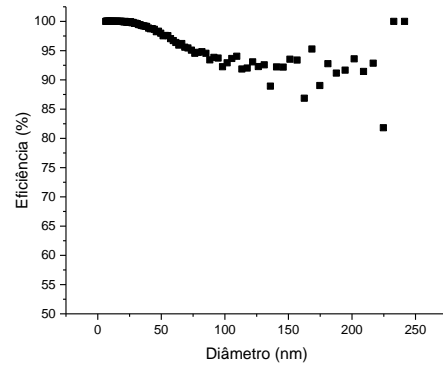


Figura 6: Eficiência de coleta utilizando a amostra ZnO5%

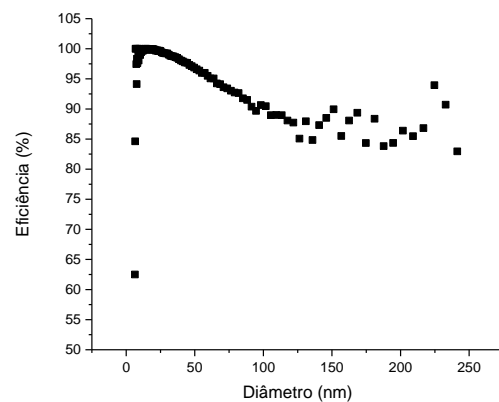


Figura 7: Eficiência de coleta utilizando a amostra ZnO10%

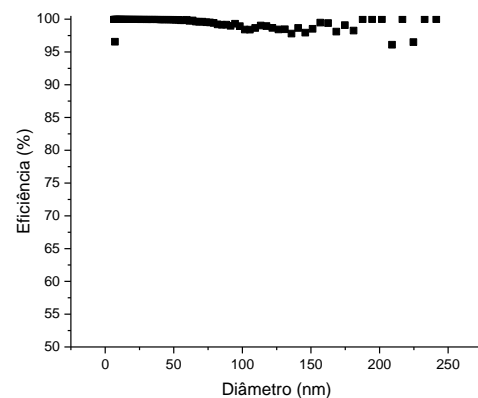


Figura 6: Eficiência de coleta utilizando a amostra ZnO15%

A amostra branca (Figura 5) teve uma alta eficiência de coleta (98,82%), essa amostra foi a que teve a maior espessura, maior queda de pressão e tem a distribuição do diâmetro de fibras menores que as outras amostras (Figura 2a), esses fatores influenciam para que ela tenha

alta eficiência de coleta (LEE; PARK; CHO, 2015). Apesar destes fatores, a amostra que obteve a maior eficiência de coleta foi a ZnO15%, com 99,56% de eficiência. A queda de pressão desta amostra foi semelhante ao branco (81 Pa), as outras características foram diferentes, como fibras maiores e a espessura menor, a diferença de eficiência pode estar relacionada as nanopartículas. Zang et. all (2017) relata que o carregamento ocasionado por nanopartículas de óxidos metálicos aumenta a remoção de partículas devido a carga superficial que melhora a atração seletiva das partículas. As eficiências médias de todas as amostras podem ser encontradas na Tabela 3.

Outro fator importante para avaliar a qualidade do filtro é a permeabilidade. A permeabilidade é um dos principais controles em aplicações envolvendo a filtração, pois esta propriedade é reduzida pelo depósito de pó residual. Isso leva a uma variação nos valores entre a permeabilidade do tecido limpo e depois de usados, que é refletida na forma de queda de pressão ao longo do meio poroso (FREITAS et al., 2002). Os valores de permeabilidade das amostras podem ser encontrados na Tabela 3.

Tabela3: Eficiência e permeabilidade das fibras de PAN

amostra	eficiência (%)	permeabilidade (cm ²)
Branco	98,82	4,03E-10
ZnO5%	97,11	3,10E-10
ZnO10%	94,71	2,07E-10
ZnO15%	99,56	2,82E-10

Quanto maior a permeabilidade mais fácil a passagem do ar por esse meio filtrante, sendo assim o branco teve a melhor permeabilidade enquanto a amostra com ZnO10% teve a pior.

Analisando as amostras com melhor desempenho, tanto o branco como a amostra ZnO15% tiveram perda de carga e eficiência de coleta semelhante as encontras em filtros HEPA (*High Efficiency Particulate Arrestance*), que são os mais utilizados comercialmente para remoção de material particulado do ar (BORTOLASSI; GUERRA; AGUIAR, 2017).

CONCLUSÃO

Neste estudo, foram produzidas fibras de PAN incorporadas com nanopartículas de ZnO, variando a concentração de 0, 5, 10 e 15% da massa de PAN em nanopartículas. As imagens MEV mostraram que as nanopartículas ficaram distribuídas nas fibras de forma uniforme, com poucas aglomerações. As caracterizações de espessura do filtro, queda de pressão e permeabilidade indicaram que todos os filtros deste estudo tiveram uma queda de pressão global baixa (de 45,1 a 88,35 Pa) em uma velocidade superficial de 3,25 cm/s. A melhor eficiência de coleta foi encontrada para a amostra ZnO15% (99,56%) e uma queda de pressão de 81 Pa, valores próximos dos encontrados para filtro HEPA de alta eficiência. Indicando assim que esse filtro pode ser aplicado na filtração de material particulado e bioaerossóis.

REFERÊNCIAS

- AAMER, H.; HEO, S.; JO, Y. M. Characterization of multifunctional PAN/ZnO nanofibrous composite filter for fine dust capture and photocatalytic activity. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 26, p. 1–10, 2021.
- ABDEL-MOTTALEB, M. M. et al. High performance of PAN/GO-ZnO composite nanofibers for photocatalytic degradation under visible irradiation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 96, n. December 2018, p. 118–124, 2019.
- AKDUMAN, C.; AKCAKOCA KUMBASAR, E. P. Nanofibers in face masks and respirators to provide better protection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 460, n. 1, 2018.
- BASELGA-LAHOZ, M. et al. Submicronic Filtering Media Based on Electrospun Recycled PET Nanofibers: Development , Characterization , and Method to Manufacture Surgical Masks. 2022.
- BONFIM, D. P. F. et al. A sustainable recycling alternative: Electrospun pet-membranes for air nanofiltration. *Polymers*, v. 13, n. 7, p. 1–14, 2021.

- BORTOLASSI, A. C. C. et al. Efficient nanoparticles removal and bactericidal action of electrospun nanofibers membranes for air filtration. *Materials Science and Engineering C*, v. 102, n. October 2018, p. 718–729, 2019a.
- BORTOLASSI, A. C. C. et al. Composites based on nanoparticle and pan electrospun nanofiber membranes for air filtration and bacterial removal. *Nanomaterials*, v. 9, n. 12, 2019b.
- BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, v. 175, p. 79–86, 2017.
- CASTRO-MAYORGA, J. L.; FABRA, M. J.; LAGARON, J. M. Stabilized nanosilver based antimicrobial poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) nanocomposites of interest in active food packaging. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, v. 33, p. 524–533, 2016.
- CHERPINSKI, A. et al. Electrospun oxygen scavenging films of poly(3-hydroxybutyrate) containing palladium nanoparticles for active packaging applications. *Nanomaterials*, v. 8, n. 7, 2018.
- CHOI, D. Y. et al. Washable antimicrobial polyester/aluminum air filter with a high capture efficiency and low pressure drop. *Journal of Hazardous Materials*, v. 351, p. 29–37, 5 jun. 2018.
- DITARANTO, N. et al. Electrospun nanomaterials implementing antibacterial inorganic nanophases. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 8, n. 9, 2018.
- FREITAS, N. L.; MANEIRO, M. G.; COURY, J. R. Estudo da permeabilidade de filtros cerâmicos de aerossol em altas temperaturas. *Projeções*, v. 21, p. 29-38, 2003.
- FREITAS, N. L.; SALVINI, V. R.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C.; COURY, J. R. Desenvolvimento de filtros cerâmicos para filtração de gases a altas temperaturas: Estudo da Permeabilidade. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2002, Natal. Anais... Natal, 2002.
- HADDAD, M. Y.; ALHARBI, H. F. Enhancement of heavy metal ion adsorption using electrospun polyacrylonitrile nanofibers loaded with ZnO nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 136, n. 11, p. 1–11, 2019.
- INNOCENTINI, M. D. M.; RODRIGUES, V. P.; ROMANO, R. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, G. M.; COURY J. R. Permeability optimization and performance evaluation of hot aerosol filters made using foam incorporated alumina suspension. *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, p. 212-221, 2009.
- INNOCENTINI, M. D. M. SEPULVEDA, F.; ORTEGA, F. Permeability. *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, [s. l.], p. 313–340, 2005.
- KADAM, V. et al. Electrospun bilayer nanomembrane with hierarchical placement of bead-on-string and fibers for low resistance respiratory air filtration. *Separation and Purification Technology*, v. 224, n. March, p. 247–254, 2019.
- LEE, W. S.; PARK, Y. S.; CHO, Y. K. Significantly enhanced antibacterial activity of TiO₂ nanofibers with hierarchical nanostructures and controlled crystallinity. *Analyst*, v. 140, n. 2, p. 616–622, 21 jan. 2015.
- LÓPEZ DE DICASTILLO, C. et al. Novel antimicrobial titanium dioxide nanotubes obtained through a combination of atomic layer deposition and electrospinning technologies. *Nanomaterials*, v. 8, n. 2, 2018.
- NATARAJ, S. K.; YANG, K. S.; AMINABHAVI, T. M. Polyacrylonitrile-based nanofibers - A state-of-the-art review. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, v. 37, n. 3, p. 487–513, 2012.
- PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for tissue engineering applications Review. *TISSUE ENGINEERING*, v. 12, p. 1197–1211, 2006.

- PHAN, T. L.; CHING, C. T. S. A Reusable Mask for Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Archives of Medical Research*, v. 51, n. 5, p. 455–457, 1 jul. 2020.
- SCHRAUFNAGEL, D. E. et al. Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air Pollution and Organ Systems. ChestElsevier Inc, , 1 fev. 2019.
- SHALABY, T. et al. Electrospun nanofibers hybrid composites membranes for highly efficient antibacterial activity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 162, n. April, p. 354–364, 2018.
- SHEKH, M. I.; PATEL, K. P.; PATEL, R. M. Electrospun ZnO Nanoparticles Doped Core–Sheath Nanofibers: Characterization and Antimicrobial Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 26, n. 12, p. 4376–4387, 2018.
- SU, J. et al. Hierarchically structured TiO₂/PAN nanofibrous membranes for high-efficiency air filtration and toluene degradation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 507, p. 386–396, 1 dez. 2017.
- TISSERA, N. D. et al. Photocatalytic activity of ZnO nanoparticle encapsulated poly(acrylonitrile) nanofibers. *Materials Chemistry and Physics*, v. 204, p. 195–206, 2018.
- VINH, N. D.; KIM, H. M. Electrospinning fabrication and performance evaluation of polyacrylonitrile nanofiber for air filter applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 6, n. 9, 2016.
- SPARROW, E. M. (1980), Fluid-to-Fluid Conjugate Heat Transfer for a Vertical Pipe, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol 102, p.402-407.
- zhang, Q., Liu, F., Yang, T.Y., Si, X.L., Hu, G.R. and Chang, C.T. (2017). Deciphering Effects of Surface Charge on Particle Removal by TiO₂ Polyacrylonitrile Nanofibers. *Aerosol Air Qual. Res.* 17: 1909-1916.