OBTENÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS BIODEGRADÁVEIS A PARTIR DO POLI (ÁCIDO LÁTICO) (PLA) POR MEIO DA TÉCNICA DE ELETROFIAÇÃO EM SOLUÇÃO

Tiago Toloczko Ross[1], Elisângela Corradini[2], Raul Pirroli da Silva[3], Gabriela Brunosi Medeiros[4], Mônica Lopes Aguiar[5]

RESUMO: A crescente poluição por material particulado (MP) e epidemias de infecções transmissíveis por vias aéreas chamou a atenção de pesquisadores para a obtenção de soluções mais tecnológicas. Dentre essas soluções, a aplicação de eletrofiação, uma técnica simples, de baixo custo e versátil, para a produção de filtros de ar a partir de nano ou microfibras poliméricas, têm sido estudada para a otimização de parâmetros e exploração de novos materiais e métodos. Neste trabalho foram obtidas fibras da blenda de PLA/PBAT por eletrofiação em solução, utilizando como solvente uma mistura diclorometano/ácido fórmico (9/1, (v/v)). Os efeitos no diâmetro médio das fibras e a eficiência de filtração de material particulado com diâmetro médio de 300 nanômetros (ultrafino) foram avaliados em função dos parâmetros de solução (concentração polímero: solvente, percentagem de PLA na blenda) e de processo (taxa de fluxo), por meio de um planejamento fatorial 2^3. Previamente ao planejamento fatorial foi realizado medidas das massas molares do PLA e do PBAT por meio de viscosimetria, obtendo-se massas de, respectivamente, 102,9 kg/mol e 41,1 kg/mol. Após análise estatística, o parâmetro que apresentou maior influência no diâmetro médio das fibras foi o percentual de PLA, com 67% de correlação, seguido pela concentração, com 49%, sendo que a taxa apresentou pouca relevância. Para a eficiência de filtração, foi notada pouca influência, sendo a porcentagem de PLA inversamente proporcional, com correlação de -43%. De fato, esses resultados estão de acordo com a literatura, uma vez que a alta massa molecular do PLA resulta em solução mais viscosa e o aumento da razão PLA/PBAT foi seguido do aumento do diâmetro médio, e redução da eficiência de filtração. Essa pesquisa pode ser complementada com a utilização de polímeros de diferentes massas molares, e variações no coletor.

Palavras-chave: Eletrofiação, filtração, biopolímeros

[1] Graduando em Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, rosst@alunos.utfpr.com.br.
[2] Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, raulsilva@alunos.utfpr.edu.br.
[3] Doutora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, gabi.brunosi23@gmail.com.
[4] Doutora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, mlaguiar@ufscar.br.
[5] Doutora, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ecorradini@utfpr.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar é um tópico de discussão que vem ganhando cada vez mais urgência nos dois últimos séculos, uma vez que, no mundo globalizado, a respiração tem se tornado um risco de morte para muitos. A poluição do ar vem tomando proporções preocupantes, seja por poluentes gasosos ou material particulado (MP). No caso do MP, trata-se de uma classe de poluentes genéricos, consistindo em partículas suspensas no ar (KAMPA; CASTANAS, 2008), cuja classificação e efeitos fisiológicos são encontrados na Tabela 1. Sua relevância enquanto problema de saúde pública brasileiro é bem detalhada pela literatura, destacando a correlação do poluente com doenças respiratórias, bem como o aumento de concentração do poluente (CIRQUEIRA; *et al*, 2022; DAPPER; SPOHR; ZANINI, 2021; DE GODOY; DA SILVA, 2022). Como exemplo, no ano de 2024, o MP proveniente de queimadas na região da Floresta Amazônica chamou a atenção da população brasileira, chegando a níveis maiores do que cinco vezes o máximo recomendado pela OMS (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA, 2024).

Tabela 1 - Classificação de MP e seus respectivos efeitos na saúde humana

NOMECLATURA	TAMANHO	CLASSIFICAÇÃO	EFEITO OBSERVADO
$MP_{0.1}$	Menor que 0,1 μm	Ultrafino	Reações sistêmicas nos tecidos afetados
$MP_{2.5}$	Menor que 2,5 μm	Fino/Pequeno	Bronquíolos e alvéolos
MP_{10}	Menor que 10 μm	Grande	Membranas mucosas; Vias aéreas superiores

Fonte: Schraufnagel et al., 2019

Uma das principais medidas de profilaxia recomendada, tanto a nível pessoal, pelo uso de máscaras, quanto a nível industrial e habitacional. O uso de máscaras especialmente em ambiente com alta exposição ao MP é bem documentado na literatura e recomendado como fator de prevenção a doenças cardiovasculares (KYUNG; JEONG, 2020; LANGRISH; *et al*, 2009; CHERRIE; *et al*, 2018).

Explorando essa medida, o estudo técnico-científico vem procurando métodos de obter filtros cada vez mais eficientes. Dentre as tecnologias mais promissoras, a eletrofiação chama a atenção dos pesquisadores desde o final do século XX, sendo capaz de gerar fibras nanométricas com eficiência superior aos métodos convencionais (COSTA; *et al*. 2012a; DING; *et al*., 2019; ZHU; *et al*., 2017). Esse método tem um

princípio simples: a aplicação de um campo elétrico sobre uma gota de material fundido ou diluído, geralmente um polímero, na ponta de uma seringa, que rompe a tensão superficial do material e gera um jato que forma estruturas unidimensionais (1D), ou seja, fios (fibras), em um substrato (GIBSON; SCHREUDER-GIBSON; RIVIN, 2001; LI; XIA, 2004), exemplificado pela Figura 1a.

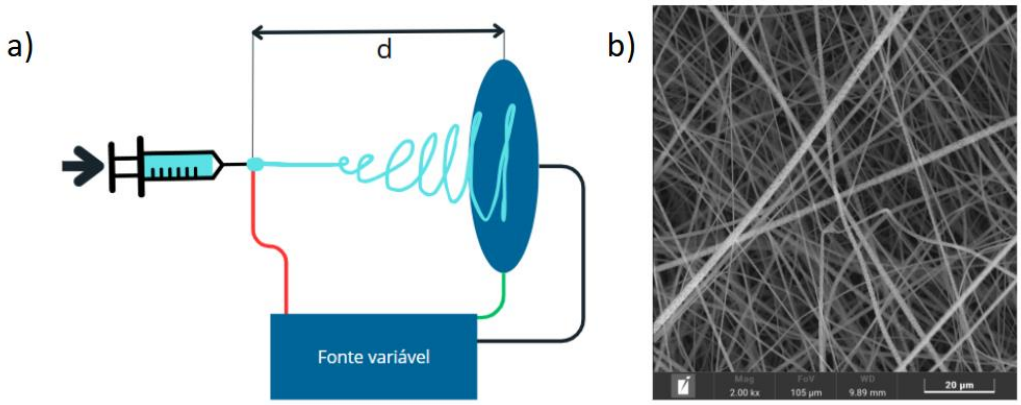


Figura 1 – a) Esquema do equipamento de eletrofiação e **b)** exemplo de micrografia de fibra obtida.

Fonte: o autor.

Além disso, recentemente vem se dando ênfase ao uso de biopolímeros e no processo de "eletrofiação verde", devido a preocupações de ordem ambiental, especialmente após a pandemia da COVID-19, foi questionada a sustentabilidade da produção e uso de máscaras e respiradores em larga escala, sendo o poli(ácido lático) (PLA) um dos principais polímeros verdes usados nessas pesquisas. O PLA pode ser obtido de fontes renováveis, é biodegradável e apresenta propriedades mecânicas similares as do polipropileno (BOGNITZKI; *et al*., 2001; WANG; ZHAO; PAN, 2015; WANG; PAN, 2015; PIERPAOLI; *et al.*, 2021). Para aumentar sua flexibilidade, o PLA é frequentemente estudado em blendas, especialmente com o poli(butirato-co-adipato-co-tereftalato) (PBAT) (MEIRA, *et al.*, 2023).

Pensando na urgência da problemática de doenças respiratórias devido à poluição, o presente trabalho teve como objetivo obter nanofibras de blendas de PLA/PBAT por meio da técnica de eletrofiação em solução. Foi estudado o efeito da variação de parâmetros de solução (concentração da solução, proporção PLA:PBAT) e do parâmetro de processo (taxa de fluxo da solução polimérica) sobre o diâmetro das fibras e a eficiência de filtração, por meio de um planejamento fatorial 2^3, com quadruplicata do ponto médio.

2 METODOLOGIA

Os polímeros utilizados foram PLA (Nature works) (104.000 g/mol) e PBAT (BASF) (41.100 g/mol). As massas molares foram aferidas por viscosimetria capilar em viscosímetro do tipo Ubbelohde, na qual foi usado clorofórmio (CF) (Alphatec). As medidas de tempo foram tomadas em aproximadamente 30ºC, em um banho térmico, e as constantes usadas para a Equação de Mark-Houwink (Equação 1) foram K = 2,21 x 10-6 cm³/g e α = 0,77 (LÜTTGERT; *et al.*, 2023). Para o PLA, foram feitos dois experimentos para determinação da massa molar, enquanto para o PBAT, apenas um.

$$[\eta] = K \cdot \bar{M}_v^{\alpha} \quad (1)$$

A eletrofiação foi conduzida no equipamento do Laboratório L008, da UTFPR campus Londrina (Figura 2a). Para o processo, os solventes escolhidos foram o diclorometano (DCM) (Alphatec) e ácido fórmico (AF), em proporção constante de 9 DCM/1 AF (cm³/cm³) em solução de aproximadamente 10 cm³. Os parâmetros de processos fixos foram a distância de trabalho (medida da ponta da seringa até o coletor) de 18 cm, tensão de 15 kV e volume total eletrofiado igual a 4 cm³. Todos esses parâmetros foram otimizados em trabalho anterior do grupo. Quanto aos parâmetros ambientais, a umidade foi monitorada, com variação entre 25% e 55%, assim como a temperatura, com variação de 20º a 30º C.

A proporção da blenda PLA/PBAT (g/g) foi variada, em 75/25 (+), 50/50 (0) e 25/75 (-). A concentração da solução da blenda, por sua vez, foi variada em 20% (+), 15% (0) e 10% (-), todos os valores em g/cm³. Por fim, a taxa de fluxo foi variada em 1,5 (+), 1,0 (0) e 0,5 (-), todos os valores em cm³/hora. Na Tabela 2 é mostrado níveis inferior, superior e ponto central, utilizados no planejamento fatorial para cada fator estudado.

As micrografias foram obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Tescan Vega) (Laboratório Multiusuário da UTFPR-Londrina), com magnificações de 500x, 2.000x, 5.000x e 10.000x, corrente 15 keV. Para análise do diâmetro das fibras, foi utilizado o software ImageJ® (v. 1.54h), com medição manual das imagens de magnificação de 5.000x. A eficiência de filtração foi medida por classificação eletrostática (TSI) (Laboratório de Desenvolvimento de Meios Filtrantes, da Universidade Federal de São Carlos). Para auxiliar a interpretação de resultados, foi também medido a constante de permeabilidade dos gases, com o conjunto experimental do Laboratório de Desenvolvimento de Meios Filtrantes, da Universidade Federal de São

Carlos, mostrado na Figura 2b. Por fim, os dados foram tratados com o auxílio do software MatLAB® (Mathworks, versão R2023a), e as análises estatísticas foram realizadas a partir do software Design Expert®.

Tabela 2 - Classificação de MP e seus respectivos efeitos na saúde humana.

ETIQUETA	PROPORÇÃO PLA/PBAT (g/g)	CONCENTRAÇÃO DA BLENDA (g/cm³)	TAXA DE FLUXO (cm³/hora)
S1	+	+	+
S2	-	+	+
S3	+	-	+
S4	-	-	+
S5	+	+	-
S6	-	+	-
S7	+	-	-
S8	-	-	-
S9	0	0	0
S10	0	0	0
S11	0	0	0
S12	0	0	0

Fonte: o autor.

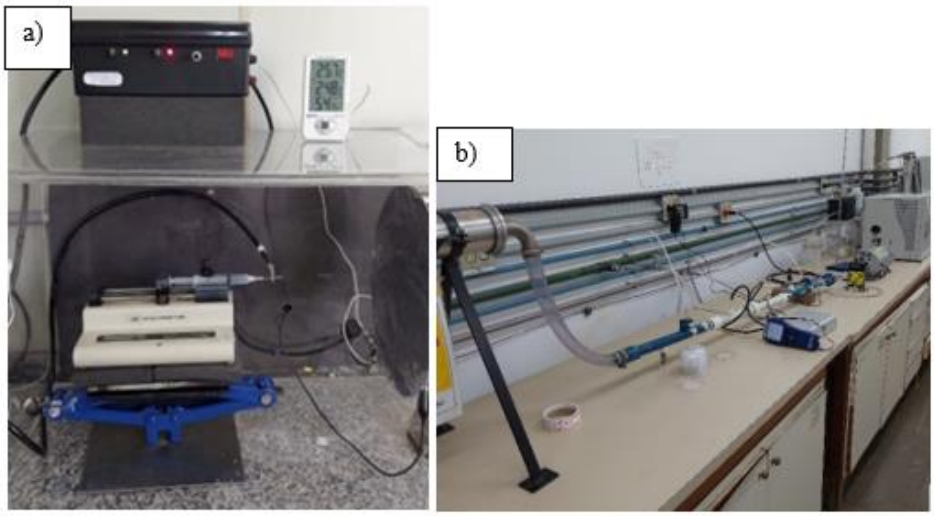


Figura 2 – a) Esquema do equipamento de eletrofiação e **b)** exemplo de micrografia de fibra obtida. Fonte: o autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das massas molares

A análise das massas molares foi feita por meio do software MatLAB. A partir dos cálculos de viscosidade inerente e viscosidade reduzida, foram feitos modelos lineares para concentrações menores que 1,0% (g/cm³). Em seguida, pela Equação de Mark-Howink, foram obtidos valores de massa molar para o PLA a partir dos valores de viscosidade intrínseca, os quais são mostrados na Tabela 3. O procedimento para o PBAT foi semelhante e os resultados da massa molar são mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 – Medidas da massa molar do PLA por viscosimetria capilar a partir da viscosidade inerente, viscosidade reduzida e a média entre ambas.

	Pela viscosidade inerente	**Pela viscosidade reduzida**	**Média**
PLA – 1	97305	101480	**99393**
PLA – 2	108530	108740	108635
MÉDIA	102916	105110	104014

Fonte: O autor

A importância da determinação de massa molar de ambos os polímeros especificados é justificar a variação de diâmetro da fibra e sua distribuição a partir dada a variação da proporção PLA/PBAT. A presença de maior quantidade de PLA (experimentos 75/25) em relação ao PBAT indica que o polímero de maior massa molar predomina, tornando a solução mais viscosa e espera-se então a geração de fibras mais espessas. Por outro lado, a quantidade reduzida de PLA em relação ao PBAT (experimentos 25/75) leva a menor viscosidade e, por sua vez, fibras mais delgadas.

Tabela 4 – Medidas da massa molar do PBAT por viscosimetria capilar a partir da viscosidade inerente, viscosidade reduzida e a média entre ambas.

	Pela viscosidade inerente	**Pela viscosidade reduzida**	**Média**
PBAT	40446	41765	41105

Fonte: o autor.

3.2 Morfologia das fibras

A Figura 5 apresenta uma imagem de cada fibra na ampliação de 2.000x, as quais foram usadas para medir os diâmetros das fibras, onde as imagens 5a-h são referentes aos experimentos com variação de parâmetros, e as imagens 5i-l são referentes ao ponto médio. A primeira discussão feita acerca das fibras foi a análise da morfologia. As imagens 5a-d apresentam grande diferença entre si, e são similares às suas correspondentes respectivas dentre as imagens 5e-h. Entre esses dois grupos de imagens,

o parâmetro variado foi a taxa de fluxo, demonstrando que esse parâmetro influencia na morfologia apenas acentuando características morfológicas (formação de fibras, porosidade em fibras, formação de "contas"), sendo que os parâmetros que determinam de fato as principais características morfológicas são a proporção PLA/PBAT e a concentração da solução.

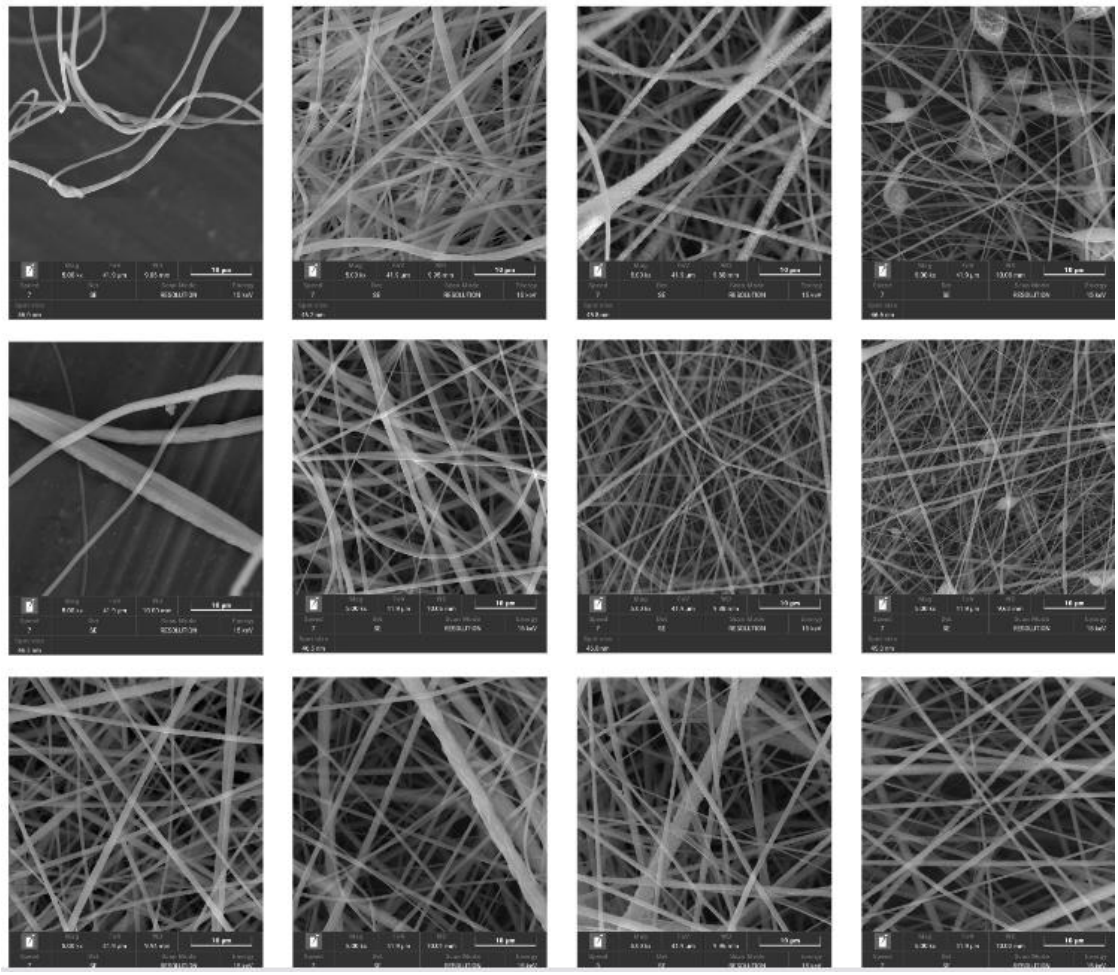


Figura 5 – Imagens das fibras correspondentes ao planejamento fatorial da Tabela 2, obtidas por microscopia eletrônica

Fonte: o autor.

Pode ser observado que, para as soluções de maior viscosidade, isto é, proporção PLA/PBAT e concentração da solução máximas, S1 e S5 (Figuras 5a e 5e, respectivamente), a formação de fibras foi escassa, confirmando as suspeitas levantadas, dificilmente aplicáveis. Reduzindo-se a proporção PLA/PBAT para 10% (g/cm³) (S2 e S6) houve aumento considerável da produção de fibras, sem porosidade, nas quais aparentemente o aumento da taxa de fluxo aumentou a concentração de fibras (Figuras 5b e 5f). A redução de concentração da solução, com a proporção máxima PLA/PBAT

(S3 e S7) levou à formação de fibras porosas, interessantes por possuírem aumento da área superficial em distribuição parecida com S2 e S6, sendo que com taxa de fluxo menor, foi observado geração de certas fibras de alta espessura, não observadas com taxa maior (Figuras 5c e 5g, respectivamente). Por fim, para as soluções de menor viscosidade, isto é, proporção PLA/PBAT e concentração da solução mínimas, S4 e S8 (Figuras 5d e 5h, respectivamente), foi observado a formação de "contas" (*beads*), defeitos relacionados à baixa evaporação de solvente. O aumento da taxa de fluxo levou a maior concentração de contas, porém com menor tamanho. Por fim, o ponto médio formou fibras uniformes e com boas características visuais, sem porosidade e sem contas.

3.3 Diâmetro das fibras e sua distribuição

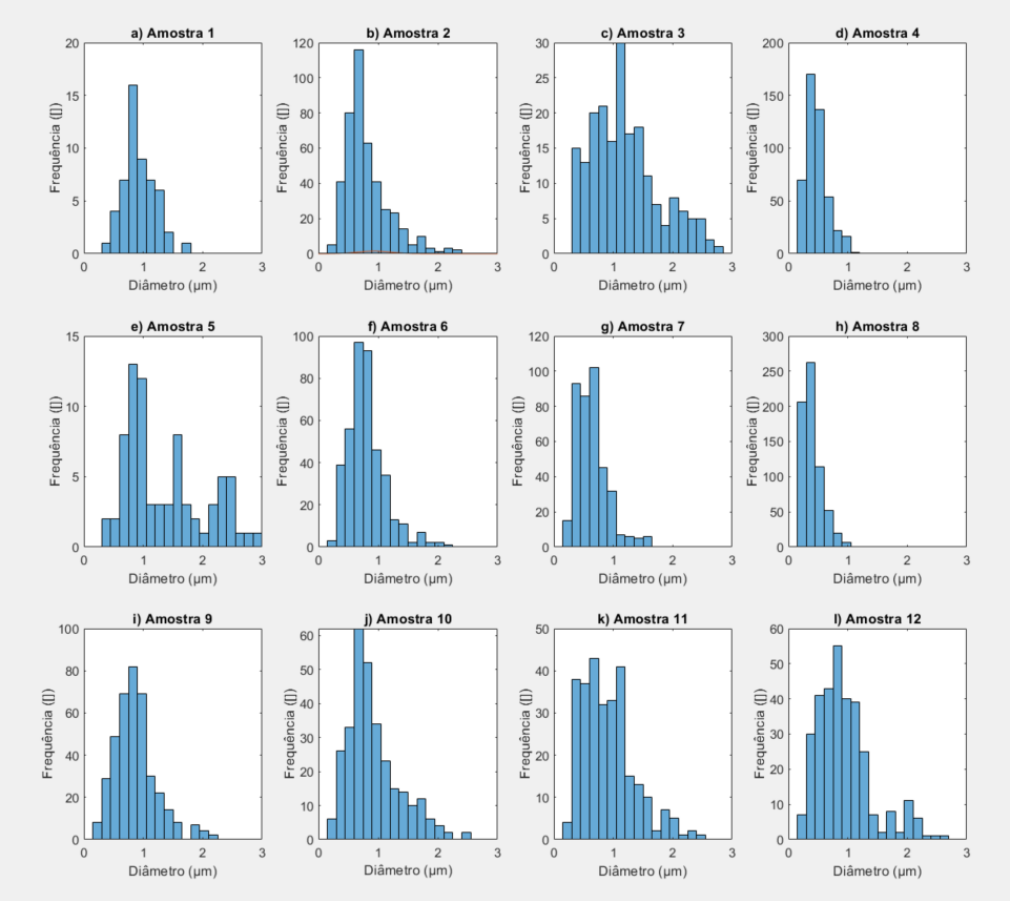


Figura 6 – Imagens das fibras correspondentes ao planejamento fatorial da Tabela 2, obtidas por microscopia eletrônica.

Fonte: o autor.

A Figura 6 apresenta as distribuições de tamanho medidos manualmente por meio do software ImageJ® e analisadas no software MatLAB®. Dentro da discussão de

tamanho de fibra, os parâmetros avaliados são o diâmetro médio e a distribuição de diâmetro, dado pelo desvio padrão, cujos valores são apresentados na Tabela 5.

Como será mostrado posteriormente, a taxa de fluxo não influenciou no diâmetro médio, tendo leve efeito na dispersão dos diâmetros. Como esperado, as soluções de maior viscosidade (S1 e S5), apresentaram grandes diâmetros médios de fibra, sendo que à menor taxa de fluxo, foi observada maior dispersão de tamanho. Por sua vez, as soluções de menor viscosidade (S4 e S8) geraram os menores valores de diâmetro médio e de variação, para ambas as taxas de fluxo. Os valores intermediários das soluções S2, S6 e S7 foram dentro do esperado entre as soluções de menor e maior viscosidade, porém, em S3 a presença de fibras de alta espessura tornou alta a variação e deslocou o tamanho médio para valores relativamente altos. Nesta solução pode-se pensar em uma distribuição bimodal, sugerida pela Figura 6c. O ponto médio não possuiu desvios significativamente discrepantes, explicados por simples variações ambientais.

Tabela 5 – Diâmetro médio e distribuição de diâmetro das fibras para cada experimento.

ETIQUETA	TAMANHO MÉDIO (nm)	VARIAÇÃO (nm)
S1	931	267
S2	807	363
S3	1199	560
S4	475	177
S5	1708	1112
S6	804	312
S7	637	262
S8	404	157
S9	868	354
S10	914	433
S11	911	437
S12	931	455

Fonte: o autor.

3.3 Eficiência de filtração

A Figura 7 apresenta as distribuições de tamanho de partículas filtrados medidos no analisador eletrostático (TSI) e analisadas por meio do software MatLAB®. Em azul, apresenta-se a quantidade de partículas que foram expelidas pelo sistema, e em vermelho, a quantidade de partículas que passaram pelo filtro. A discussão se baseia principalmente na eficiência de filtração, cujos valores são apresentados na Tabela 6.

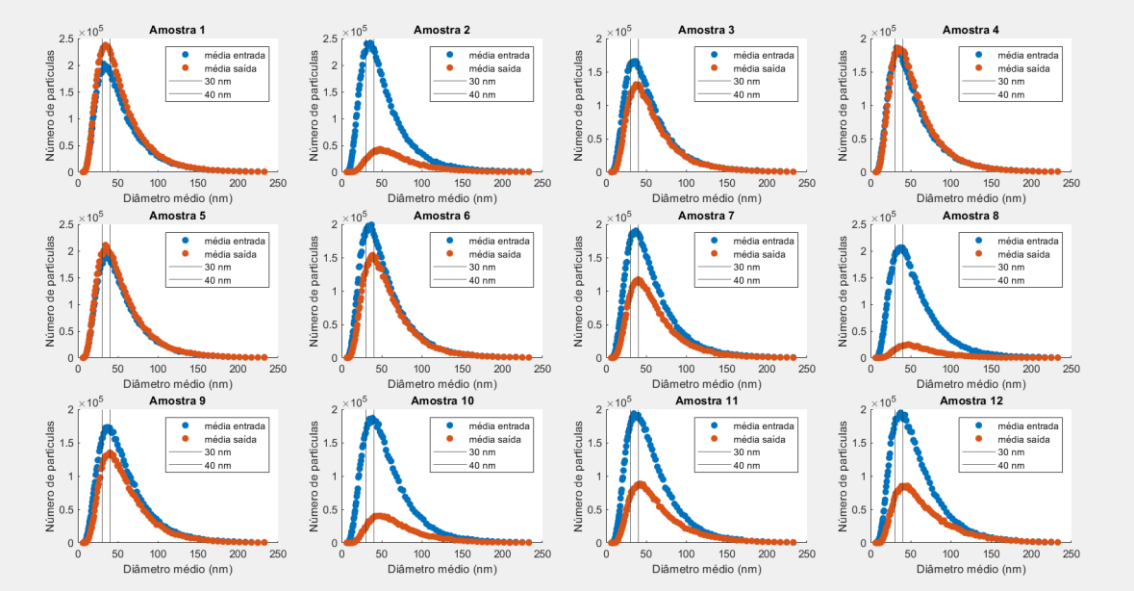


Figura 7 – Distribuições de tamanhos de partícula filtrados correspondentes ao planejamento fatorial da Tabela 2, obtidas a partir dos dados coletados no analisador eletrostático e analisadas pelo software MatLAB®.

Fonte: o autor.

Tabela 6 – Eficiência de filtração e constante de permeabilidade das fibras para cada experimento.

ETIQUETA	EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO (%)
S1	0,0
S2	87,6
S3	25,3
S4	0,0
S5	0,0
S6	26,6
S7	42,5
S8	90,8
S9	24,5
S10	83,2
S11	58,0
S12	59,2

Fonte: o autor.

De fato, o comportamento da eficiência de filtração apresentou maior discrepância em relação ao esperado, a saber, que a eficiência de filtração diminuísse com o aumento do diâmetro médio. De fato, nos experimentos com baixíssima formação de fibras, S1 e S5, não houve filtração, sendo verificados até indícios de degradação da fibra em S1. Em S2 e S8, houve a observação das menores eficiências de filtração, sendo que em S8, foi observado também o menor diâmetro médio de fibras. Para as soluções de maior

proporção PLA/PBAT (S1, S3, S5, S7, nas Figuras 7a, 7c, 7e e 7g, respectivamente), foi observado maior homogeneidade dos resultados. Para a menor proporção PLA/PBAT, em menores taxas de fluxo, a eficiência de filtração reduziu com a redução da concentração, porém, o comportamento de S4 pode ser devido a baixas propriedades mecânicas que poderiam ter levado ao vazamento durante o teste, uma vez que contas grandes são desfavoráveis às propriedades mecânicas. Em maiores taxas de fluxo, porém, houve o aumento da eficiência de filtração com a redução da concentração da solução. Análises estatísticas confirmaram, de fato, que há evidências para dizer que o aumento da proporção PLA/PBAT e o aumento da concentração reduz a eficiência de filtração.

3.4 Análises estatísticas

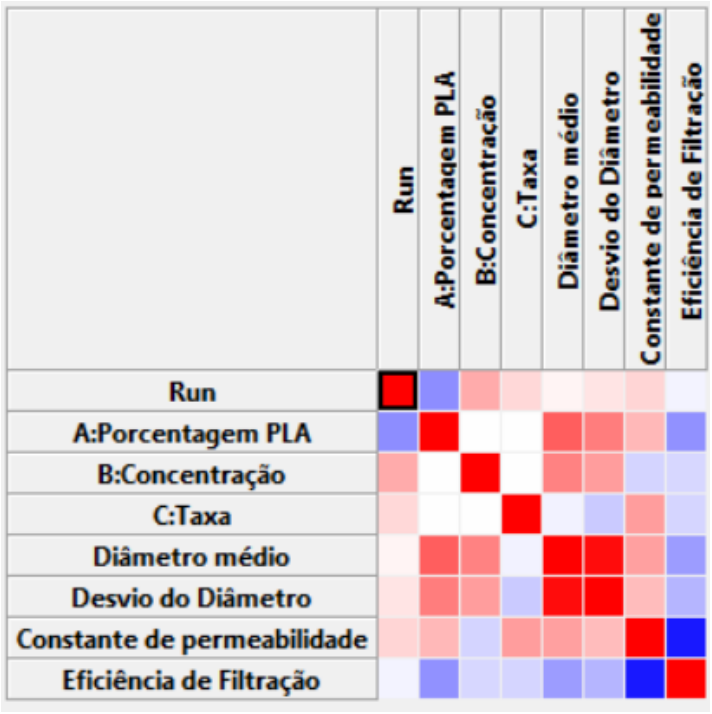


Figura 8 – Tabela visual de correlações gerada pelo software Design Expert®. As tonalidades de azul indicam correlação negativa, e as tonalidades vermelhas indicam correlação positiva. Quanto mais forte o tom, maior a correlação.

Fonte: o autor.

A Figura 8 mostra o resumo das análises estatísticas realizadas no software Design Expert®. Percebe-se que quanto ao diâmetro médio, a proporção PLA/PBAT e a concentração da solução foram os parâmetros que mais influenciaram, com correlação de, respectivamente, 62,7% e 48,5%, sendo que a taxa de fluxo apresentou baixíssima influência (-4,4%). Entretanto, a taxa possuiu leve influência sobre o diâmetro médio da

fibra (-20,2). Para a eficiência de filtração, os valores de correlação foram baixos, sendo o maior efeito isolado o da proporção PLA/PBAT (-42,8%). Por fim, foi encontrada a correlação negativa esperada entre o diâmetro médio e a eficiência de filtração (-38,4%)

Posteriores análises no software permitiram compreensão mais detalhada: o efeito combinado da concentração da solução e da proporção PLA/PBAT, relacionados à viscosidade da solução, se mostrou mais adequado para explicar a variação de desvio do diâmetro; A combinação de concentração da solução e da taxa de fluxo proporcionaram maior contribuição sobre a variação eficiência de filtração (27,8%), podendo indicar que a morfologia da fibra possui mais influência sobre essa característica.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, este trabalho relata a obtenção nanofibras de blendas PLA/PBAT a partir do processo de eletrofiação em solução, bem como a análise do efeito de parâmetros de sistema (proporção PLA/PBAT e concentração da solução) e de parâmetros de processo (taxa de fluxo) sobre o diâmetro médio das fibras e sua eficiência de filtração. O parâmetro mais relevante para a discussão foi o efeito combinado da proporção PLA/PBAT e da concentração da solução, e, portanto, infere-se que a viscosidade da solução apresenta maior influência nas características das fibras. A influência desse conjunto foi vista principalmente nos aspectos morfológicos das fibras (formação de fibras, porosidade em fibras, presença de “contas”) e no diâmetro médio, onde os menores diâmetros (404 e 475 nm) foram obtidos na minimização destes dois parâmetros. Para a eficiência de filtração, houve baixo efeito de todos os parâmetros, podendo-se inferir que a morfologia da fibra a distribuição de tamanhos foram as mais relevantes.

Para trabalhos futuros, sugere-se, em primeiro lugar, o aumento do espaço amostral a partir de maior quantidade de experimentos, para validação desses efeitos. Além disso, quanto à morfologia das fibras, posteriores estudos incluem o estudo do efeito das massas molares dos polímeros PLA e PBAT, e a utilização de coletor rotativo para orientação das fibras

AGRADECIMENTOS

À agência de fomento, Fundação Araucária, pelo financiamento do projeto.

À prof.ª dr.ª Elisângela Corradini e ao grupo do laboratório L008 da UTFPR-LD.

Ao laboratório multiusuário da UTFPR-Londrina, pelas micrografias.

Ao Laboratório de Desenvolvimento de Meios Filtrantes da UFSCAR, à prof.ª dr.ª Mônica L. Aguiar e a seu grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

BOGNITZKI, M.; *et al*. Nanostructured Fibers via Electrospinning. Advanced Materials, [*s.l.*], v. 13, n. 1, p. 70-72, 2001.

CHERRIE, John W. et al. Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air Pollution. Occupational & Environmental Medicine, [*S. l.*], v. 75, ed. 6, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1136/oemed-2017-104765.

CIRQUEIRA, S. S. R. et al. Heterogeneous impacts of mobility restrictions on air quality in the State of Sao Paulo during the COVID-19 pandemic. Environmental Pollution, [s. l.], v. 300, mai. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118984.

COSTA, R. G. F. *et al*. Eletrofiação de Polímeros em Solução. Parte I: Fundamentação Teórica. Polímeros, [*S. l.*], v. 22, n. 2, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000026.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. Estudos Avançados, [S. l.], v. 30, n. 86, p. 83-97, 2016.

DE GODOY, Â. R. L.; DA SILVA, A. E. A. Análise de material particulado fino no interior do Estado de São Paulo por agrupamento de dados. In: OLIVEIRA, Alisson S. et al (org.). Ações Antrópicas sobre o Meio Ambiente. Campina Grande: EPTEC, 2022. p. 59-68.

DING, X. *et al.* Electrospun polyvinylidene fluoride/SiO2 nanofibrous membranes with enhanced electret property for efficient air filtration. Composites Communications, [*s.l.*], v. 13, p. 57-62, 2019.

GIBSON, P.; SCHREUDER-GIBSON, H.; RIVIN, D. Transport properties of porous membranes based on Electrospun nanofibers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Angineering aspects, [*s.l.*], v. 187, p. 469-481, 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA (INPA). Queimadas aumentam em até 80 vezes a concentração de poluentes na atmosfera da Amazônia. [*s.l.*]. 10 set. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/inpa/pt-br/assuntos/noticias/queimadas-aumentam-em-ate-80-vezes-a-concentracao-de-poluentes-na-atmosfera-da-amazonia. Acesso em 18 set. 2024.

KAMPA, M.; CASTANAS; E. Humal health effects of air pollution. Environmental Pollution, n. 151, p. 362-367, 2008.

KYUNG; S. Y.; JEONG, S. H. Particulate-Matter Related Respiratory Diseases. Tuberculosis & Respiratory Diseases, [*s.l.*], v. 83, p. 116-121., 2020. DOI: https://doi.org/10.4046/trd.2019.0025.

LANGRISH, J. P. *et al.* Beneficial cardiovascular effects of reducing exposure to particulate air pollution with a simple facemask. Particle and Fibre Toxicology, [*s.l.*], v. 6, mar. 2009. DOI: https://doi.org/10.1186/1743-8977-6-8.

LI; D.; XIA, Y. Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?. Advanced Materials, [*s.l.*], v. 16, n. 14, p. 1151-1170, ago. 2004.

LÜTGERTT, N.; *et al*. Size exclusion chromatography of polylactic acid in three different solvents. Science Together (KNAUER Wissenschaftliche Geräte GmbH), v. 1, nov. 2021.

MEIRA, A. C. R.; *et al.* Modification of the physicochemical properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/polylactic acid (PLA)-based electrospun nanofibers using salts. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, [*s.l.*], v. 671, mai. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131604.

PIERPAOLI, M.; *et al.* Characterization and Filtration Efficiency of Sustainable PLA Fibers Obtained via a Hybrid 3D Printed/Electrospinning Technique. Materials, [*s.l.*], v. 14, nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14226766.

SCHRAUFNAGEL, D. E. et al. Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. Chest, [*s.l.*], v. 115, n. 2, p 409-416, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042.

WANG, Z.; PAN, Z. Preparation of hierarchical structured nano-sized/porous poly(lactic acid) composite fibrous membranes for air filtration. Applied Surface Science, [*s.l.*], n. 356, p. 1168-1179, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.211.

WANG, Z.; ZHAO, C.; PAN, Z. Porous bead-on-string poly(lactic acid) fibrous membranes for air filtration. Journal of Colloid and Interface Science, [*s.l.*], n. 441, p. 121-129, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2014.11.041.

ZHU, M. *et al.* Electrospun Nanofibers Membranes for Effective Air Filtration. Macromolecular Materials Engineering, v. 302, 2017. DOI: 10.1002/mame.201600353.