

Aplicação do método de solution blow spinning para a obtenção de nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM)

Karollyne G. C. Monsores^{*a}, Anderson O. da Silva^b, Ricardo P. Weber^c, Marcos L. Dias^d

^{a, b, c}Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Materiais – Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^dUniversidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Macromoléculas Professora Eloíza Mano Av. Horácio Macedo, 2030, 21941-598, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*karollyne@ime.eb.br

anderson.q.ao@gmail.com

rpweber@ime.eb.br

mldias@ima.ufrj.br

RESUMO: A técnica de fiação de solução por sopro (solution blow spinning – SBS) é conceitualmente similar à da eletrofiação (electrospinning), porém sem a aplicação de baixas correntes e de alta tensão, mas com resultados tão satisfatórios quanto para produção de micro e nano fibras. Este estudo objetivou, por meio da técnica SBS, produzir nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM). As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram nanofibras, apresentando diâmetro médio de 200-325 nm. Os resultados obtidos indicam que a distância de trabalho, a pressão de injeção e a concentração são variáveis que influenciam diretamente no diâmetro médio das fibras, resultando em fibras com menores diâmetros para concentrações mais baixas.

PALAVRAS-CHAVE: Polietileno de ultra alto peso molecular. Nanofibras. Fiação de solução por sopro.

ABSTRACT: The solution blow spinning (SBS) technique is conceptually similar to electrospinning, but without the application of low currents and high voltage, however with results as satisfactory as for the production of micro and nanofibers. This study aimed to produce ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) nanofibers from the SBS technique. SEM images show nanofibers with an average diameter of 200 – 325 nm. The results obtained indicate that the working distance, injection pressure and concentration are variables that directly influence the average fiber diameter, resulting in fibers with smaller diameters for lower concentrations.

KEYWORDS: Ultra-high molecular weight polyethylene. Nanofibers. Solution blow spinning.

1. Introdução

O polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) é um polímero de engenharia de crescente produção industrial e elevado desempenho e valor econômico. Produzido similarmente a outros polietilenos, a partir do gás eteno, o tamanho da cadeia macromolecular pode ser 30 vezes maior que os demais. O PEUAPM possui massa molar na faixa de 3×10^6 g/mol, conferindo a esse polímero melhor resposta mecânica quando comparado a outros polímeros da mesma classe: elevada resistência ao impacto, à abrasão e a produtos químicos; baixo coeficiente de atrito e alta relação resistência/peso [1,2].

Essas características fazem com que atenda principalmente aplicações em ambientes agressivos ou corrosivos sujeitos a temperaturas moderadas [2].

Todavia, o PEUAPM apresenta elevada viscosidade no estado fundido, dificultando o escoamento em temperaturas acima da fusão ($\sim 135^\circ\text{C}$) e, conseqüentemente, seu processamento através dos métodos convencionais adotados para os polímeros termoplásticos [3]. Técnicas especiais de processamento como moldagem por compressão (a quente ou frio), extrusão RAM, calandragem e fiação em gel tem sido alternativa de processamento para o PEUAPM [4,5].

Mesmo com recursos de processamento limitados, há uma diversidade de áreas de atuação, como

em revestimentos, na indústria de construção civil, agrícola e mineradora; em artefatos inertes na indústria alimentícia; em peças estruturais, na indústria de bebidas, naval e automobilística; e, principalmente, na fabricação de fibras de alto desempenho para aplicações de alta resistência e em blindagens balísticas [4,6].

A conformação do PEUAPM em fibras e/ou fios permite não somente obter melhor resposta mecânica, atribuída principalmente à relação comprimento/diâmetro (L/D) da fibra, mas também o estudo de novos meios de processamento para esse e outros polímeros que apresentam elevada viscosidade e, conseqüentemente, difícil processamento por vias convencionais. No caso do PEUAPM, já existem fibras/membranas comerciais, como o Dyneema®, o Tensylon® e a Spectra®, produzidas por meio de fiação em gel do polímero [7,8], por extrusão de estado sólido [9,10] e processo de giro [11,12], respectivamente.

Com o advento da nanotecnologia, a produção de fibras poliméricas em escala nano tem despertado interesse para a ciência devido à potencialidade de aplicações de alto desempenho, atribuídas à elevada área superficial específica (área/unidade de massa) e à razão de aspecto, como já evidenciado para as fibras em dimensões macroscópicas. Sua produção em escala comercial tem como desafio a alta produtividade e o custo efetivo, por serem produzidas atualmente via *electrospinning* [13-15]. A saber, a técnica de fiação por *electrospinning* consiste na aplicação de um campo elétrico de alta voltagem em uma seringa contendo a solução polimérica. Quando superada a tensão superficial, um jato fino é direcionado para o coletor onde são depositadas as nanofibras. As fibras obtidas por tal método sofrem grande influência das variáveis físico-químicas que atuam sob as soluções empregadas, tais como: viscosidade, potencial dielétrico, distância da agulha em relação ao coletor, fatores ambientais etc. Sua morfologia e espessura estão sujeitas a essas variáveis. Outros fatores, como composição química, tanto do polímero quanto do solvente; peso molecular e distribuição do peso molecular; concentração das soluções, entre outros, podem atuar de forma variável

sobre as fibras que serão geradas [16-18]. Todavia, sua escalabilidade comercial ainda é baixa e novas rotas de processamento foram investigadas, como é o caso do sistema de *Solution Blow Spinning* (SBS) [19].

O método SBS é considerado eficiente para a produção de fibras finas em larga escala, pois, diferentemente do *electrospinning*, o SBS não necessita de um campo elétrico para direcionamento das fibras ao coletor. No SBS, o sistema é constituído de uma fonte de gás/ar equipada com um regulador de pressão, uma bomba de seringa, um aparelho de pulverização e um coletor [19]. Nesse, as fibras são estiradas por um fluxo de alta pressão gerado a partir de uma injeção controlada de ar comprimido. A solução polimérica é soprada em direção ao alvo de coleta, e as fibras são geradas durante a evaporação do solvente dentro da distância de trabalho entre o bico de injeção e o coletor [19,20].

Na Fig. 1 são apresentados dois esquemas dos sistemas de *electrospinning* e *solution blow spinning*.

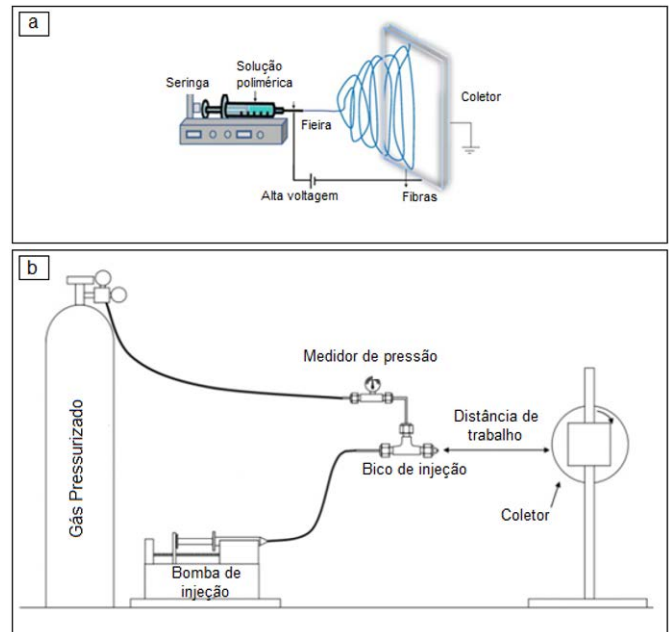


Fig. 1 – Representações esquemáticas dos sistemas de *electrospinning* (a) e *solution blow spinning* (b). **Fonte:** Adaptado de [19, 21].

O SBS também apresenta alguns parâmetros e variáveis de processo que influenciarão no formato do jato polimérico produzido, sendo eles o peso

molecular, a concentração e a viscosidade da solução polimérica, a pressão do gás e a taxa de fluxo da solução, afetando consequentemente o produto final [22]. De acordo com Silva *et al.* [23] no estudo para obtenção de nanofibras de PVC por SBS, o diâmetro médio das fibras é diretamente proporcional à concentração do polímero no solvente, corroborando outros estudos anteriores [24-26]. Paralelamente, o diâmetro médio das fibras tende a diminuir com uma menor viscosidade da solução polimérica [27]. De acordo com o estudo, esse comportamento está associado a uma maior mobilidade das cadeias.

Esses parâmetros e tendências ainda são pouco discutidos e relatados na literatura para materiais poliméricos de elevado peso molecular e consequentemente elevada viscosidade, como é o caso do PEUAPM.

Dentre as variáveis de processamento no SBS, destaca-se a temperatura de processamento, que é comumente realizado em temperatura ambiente (~31°C). No caso do PEUAPM, esse mantém forma de gel em temperaturas a partir de 120°C. Dessa maneira, não somente para o PEUAPM, ajustar essa variável mediante ao polímero empregado possibilita o controle da sua viscosidade e solubilidade.

Assim, devido à alta taxa de produção do sistema SBS e pela dificuldade de processamento do PEUAPM por vias convencionais, este estudo objetivou produzir nanofibras de polietileno de ultra alto peso molecular por meio do sistema de *Solution Blow Spinning*, avaliando o efeito das condições de fiação na morfologia e no diâmetro da fibra. A validação do processamento foi feita por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV-FEG).

2. Materiais e métodos

Para o delineamento desta pesquisa, foram utilizadas amostras em forma de pó de 10 µm a 30 µm de diâmetro de PEUAPM comercial, MIPELON® PM-200 da Mitsui Chemicals. Na Tabela 1 estão apresentados os valores das propriedades do PEUAPM fornecidos pela empresa.

Tabela 1 – Propriedades do PEUAPM comercial MIPELON®.

MIPELON®			
Propriedades	Método	Unidade	Valor
Massa Molar Média	Interno	10 ⁶ g/mol	1,8
Densidade	ASTM D-1505	g/cm ³	0,940
Resistência à tração na ruptura	ASTM D-638	Mpa	≥ 44
Alongamento na ruptura	ASTM D-638	%	> 350
Temperatura de fusão	ASTM D-2117	°C	136

Fonte: [28].

A Fig. 2 apresenta um desenho esquemático do sistema adaptado de SBS empregado para a obtenção de nanofibras de PEUAPM. Diferentemente da Fig. 1b, o sistema montado para a obtenção de nanofibras neste trabalho conta com um sistema de aquecimento no reservatório que contém a solução polímero/solvente, assim como no bico de injeção.

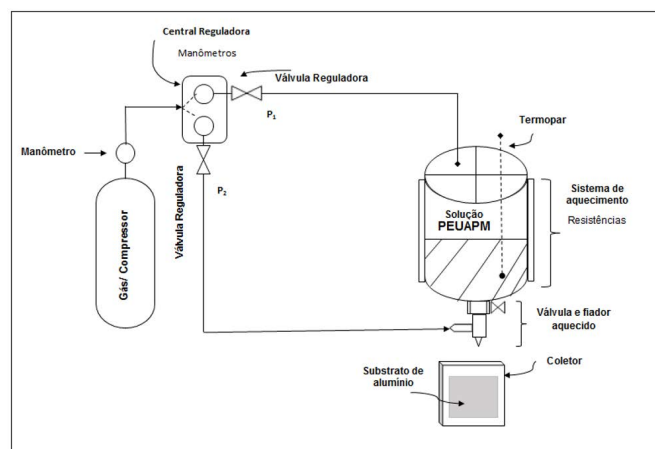


Fig. 2 – Representação esquemática do sistema SBS empregado para a obtenção de nanofibras de PEUAPM.

Para a solubilização do PEUAPM MIPELON®, utilizou-se o solvente Xileno P. A. Para verificar a influência da concentração e viscosidade da solução na obtenção das nanofibras, variou-se a concentração da solução no intervalo de 0,01-0,04% em peso de polímero. O conjunto PEUAPM/Xileno foi pré-misturado em uma chapa de aquecimento com agitação magnética sob a temperatura de 130°C. Adicionou-se essa solução de gel no reservatório do dispositivo experimental, aquecido à temperatura controlada (120-135°C). Para obtenção das nanofibras, o bico de injeção empregado consistiu em agulhas

metálicas concêntricas de cerca de 0,03 e 0,05 mm. Um sistema de aquecimento nas agulhas, com temperatura variando entre 90 e 150°C, foi adotado para evitar o entupimento do bico de injeção e auxiliar na evaporação do solvente contido na solução, assim que essa fosse soprada contra o coletor. Uma pressão de injeção foi aplicada ao bico, variando no intervalo de 40-60 Psi. A distância entre a agulha e o coletor fixo variou na faixa de 15 e 30 cm. O processo foi conduzido em condições ambientais, temperatura de ~25°C e umidade relativa de cerca de 55%. As nanofibras foram depositadas em um substrato de alumínio com dimensões 30 × 30 cm, formando membranas de tecido não tecido (TNT) (Fig. 3).

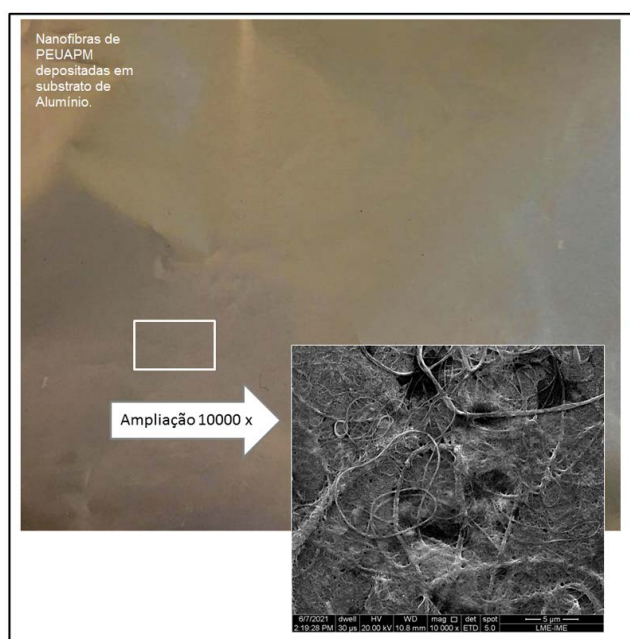


Fig. 3 – Fotografia de uma membrana de fibras não tecidas, fiadas por sopro de solução e coletadas em um coletor fixo 30 × 30cm.

Diante das variáveis adotadas (concentração, pressão e distância de trabalho) para ajustar melhores condições de processamento via SBS do PEUAPM, a Tabela 2 mostra os diferentes grupos de avaliação estudados.

A morfologia das nanofibras de PEUAPM foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura FEG, MEV-FEG, operado a uma tensão de 10 kv. Com o auxílio do software Image J foi possível determinar

o diâmetro médio das nanofibras. Para cada grupo de avaliação estudado, foram feitas 50 medições diametrais.

Para verificar se o diâmetro médio para cada grupo avaliado apresentou diferenças significativas entre si, foram realizadas as análises estatísticas de Kruskal-Wallis e o teste de Dunn de comparações de médias. Assim, foi possível identificar a significância estatística dessas para um dado nível de confiança, pois valores-*p* iguais ou superiores a α (nível de significância do teste 0,05%) indicam que as variáveis de estudo não são estatisticamente significativas.

Tabela 2 – Grupos de avaliação.

GRUPOS	CONDIÇÕES
A	0,01 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 30 cm do coletor.
B	0,03 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 30 cm do coletor.
C	0,04 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 30 cm do coletor.
D	0,01 m/v% PEUAPM, 50 Psi e 30 cm do coletor.
E	0,01 m/v% PEUAPM, 40 Psi e 15 cm do coletor.
F	0,01 m/v% PEUAPM, 50 Psi e 15 cm do coletor.

3. Resultados e discussões

3.1 Influência da concentração

Nanofibras de PEUAPM foram obtidas por SBS utilizando três concentrações diferentes, 0,01%, 0,03% e 0,04% m/v. Objetivando avaliar a morfologia e o diâmetro médio das fibras obtidas pelo método de fiação em função das concentrações utilizadas, fixou-se uma distância do coletor de 30 cm e pressão de injeção em 40 Psi. As Fig. 4, 5 e 6 apresentam as fotomicrografias e suas respectivas curvas de distribuição de diâmetro médio para as concentrações de 0,01%, 0,03% e 0,04%.

Observa-se que, para as três concentrações estudadas, foram obtidas fibras sem a presença de poros ou grânulos (*beads*), apresentando diâmetro constante ao longo do comprimento da fibra. Todavia, nota-se uma estrutura complexa formada por fibras com dois níveis dimensionais: micro e nano.

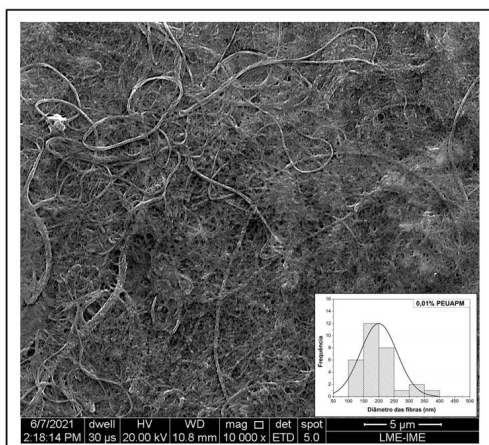


Fig. 4 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição A. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

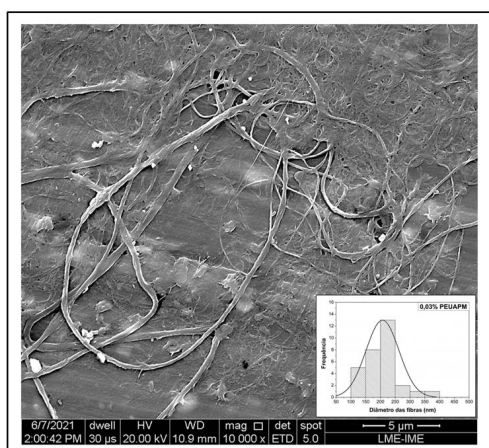


Fig. 5 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição B. Concentração de 0,03% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

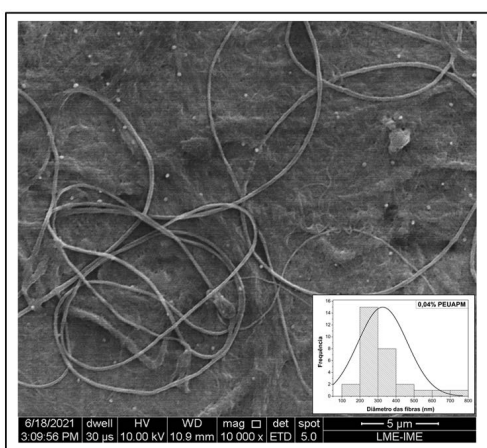


Fig. 6 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição A. Concentração de 0,04% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

Esse comportamento foi reportado na literatura por vários pesquisadores [19,29,30], e foi observado que a distribuição das fibras para a técnica de SBS é menos uniforme quando comparada à técnica de *electrospinning*. Isso sugere que os feixes de fibras são mais suscetíveis de se formarem a partir do fornecimento de uma quantidade de solução mínima, como visto para a concentração de 0,01% m/v, em que a distribuição dos diâmetros é maior. Outra indicação para esse comportamento pode ser a turbulência produzida pelo jato de ar em torno da solução de gel fiada, resultando na formação de vários feixes de solução de gel que saem de um único bico e se cruzam no ar, produzindo feixes de fibras antes da completa evaporação do solvente [22]. As morfologias obtidas são similares ao padrão visual de nanofibras de PEUAPM obtidas via *electrospinning* [31-33].

O diâmetro médio encontrado para cada uma das condições é apresentado na Tabela 3. Nota-se um aumento progressivo simultâneo com a concentração, sendo de 5% para a concentração de 0,03% m/v (valor-*p* $6,65 \times 10^{-01}$) e de 64% para a concentração de 0,04% m/v (valor-*p* $3,96 \times 10^{-7}$) quando comparadas à concentração de 0,01%. Esse comportamento pode estar associado ao aumento da viscosidade das soluções empregadas, uma vez que o aumento da viscosidade das misturas polímero/solvente contribui para uniformidade e consequente aumento de diâmetro das fibras [34,35].

Contudo, é evidenciado que a partir da concentração de 0,03% m/v o aumento da concentração de polímero/solvente influencia muito o diâmetro das fibras fiadas de PEUAPM, quase dobrando o valor obtido na condição A.

Tabela 3 – Diâmetros médios obtidos a partir das condições A, B, C. Pressão de injeção 40 Psi e distância do coletor 30 cm.

Grupo	Concentração (%m/v)	Diâmetro médio (nm)
A	0,01	199,66 ± 60,13
B	0,03	207,86 ± 55,82
C	0,04	325,90 ± 136,27

3.2 Influência da pressão de injeção

Como apontado anteriormente, a literatura propõe que a pressão de injeção é uma das variáveis do processamento que monitora o diâmetro médio das fibras e sua distribuição, em razão da orientação imposta à trajetória do jato, a estabilidade do cone de Taylor formado e, principalmente, pela área de deposição das fibras [36,37]. O efeito da pressão de injeção na morfologia e na distribuição dos diâmetros médios foi investigado a partir da concentração anterior, que reportou os menores valores de diâmetro, 0,01% m/v de PEUAPM. Para avaliar a influência desse parâmetro de processamento, fixou-se uma distância do coletor em 30 cm e variou-se a pressão em 40 Psi e 50 Psi. A Fig. 7 apresenta as fotomicrografias e suas respectivas curvas de distribuição de diâmetro médio para a pressão de injeção de 50 Psi, e na Tab. 4 são reportados os valores de diâmetro aferidos para cada uma das condições.

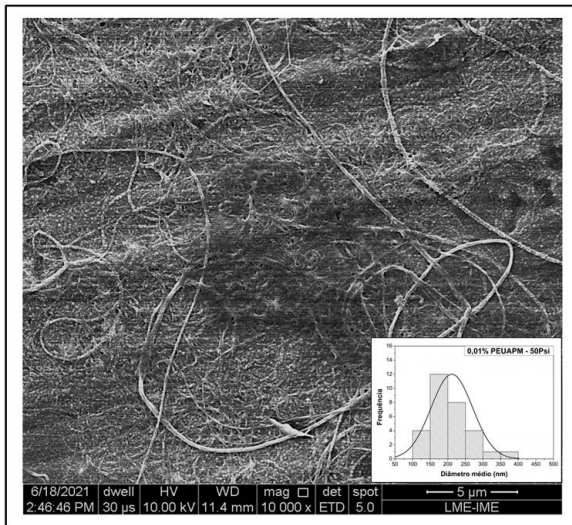


Fig. 7 – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição D. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 50 Psi e distância do coletor fixo de 30 cm.

Tabela 4 – Diâmetros médios obtidos a partir das condições A e D. Concentração 0,01% wt e distância do coletor 30 cm.

Grupo	Concentração (%m/v)	Pressão (Psi)	Diâmetro médio (nm)
A	0,01	40	199,66 ± 60,13
D	0,01	50	211,51 ± 58,77

Para a técnica de SBS, a pressão de injeção de ar deve exceder a tensão superficial da solução polimérica, alongando-a em fibras ultrafinas [38–40]. As fibras obtidas com pressão de injeção de 50 Psi apresentaram aumento de diâmetro médio em 6% quando comparado ao valor de 40 Psi (valor-*p* $3,86 \times 10^{-01}$). Isso se deve ao fato de altos fluxos de ar gerarem fibras com diâmetros maiores, uma vez que os feixes de fibras são entregues em alta velocidade ao coletor, dificultando a volatilização completa do solvente. Por outro lado, baixos fluxos de ar não produzem fibras ou as produzem com diâmetros menores, visto que a força necessária para romper a tensão superficial da solução precisa ser alcançada. Esse fenômeno foi observado para o PLA, PTFE, PEO, PCLA, Nylon 6, entre outros [38,41-44]. Sendo assim, para pressões de injeção maiores, faz-se necessário o uso de distâncias de deposição maiores entre a ponta da agulha e o coletor, a fim de evitar esse fenômeno.

3.3 Influência da distância do coletor

O efeito da distância do coletor na morfologia e distribuição dos diâmetros médios foi investigado, fixando-se a concentração de 0,01% m/v e a distância do coletor em 15 cm. Confrontaram-se os resultados obtidos com os apresentados na seção anterior. As Fig. 8a e 8b apresentam as fotomicrografias e suas respectivas curvas de distribuição para as pressões de injeção de (a) 40 Psi e (b) 50 Psi, e na Tab. 5 são apresentados os valores de diâmetro aferidos para cada uma das condições.

A distância ótima de trabalho é compreendida no equilíbrio entre a mínima distância necessária para que as fibras sejam coletadas completamente secas, até uma distância máxima na qual não haja uma perda excessiva do material, aumentando assim a produção e formação de fibras com diâmetros menores [45]. A distância de trabalho não evidenciou alteração significativa no diâmetro médio e nem na morfologia obtida para a pressão de injeção de 50 Psi (valor-*p* $5,87 \times 10^{-01}$), provavelmente devido à velocidade de deposição ser muito alta. Em contrapartida, para a pressão de 40 Psi o diâmetro

médio aumentou em 44%, e consecutivamente a distribuição de tamanho, juntamente com a dispersão das fibras, foram modificadas (valor- p $8,33 \times 10^{-05}$).

Quando a distância de trabalho é muito curta, as fibras não têm a oportunidade adequada para serem alongadas suficientemente e para que ocorra a completa evaporação do solvente, produzindo assim maiores diâmetros e reduzindo a área de deposição e dispersão das fibras [19,46].

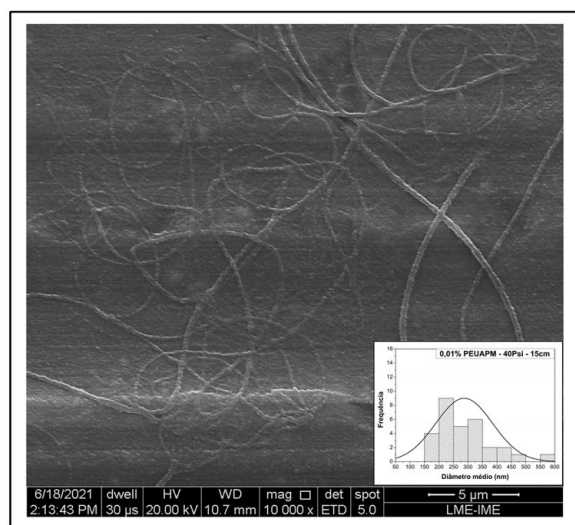


Fig. 8a – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição E. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 40 Psi e distância do coletor fixo 15 cm.

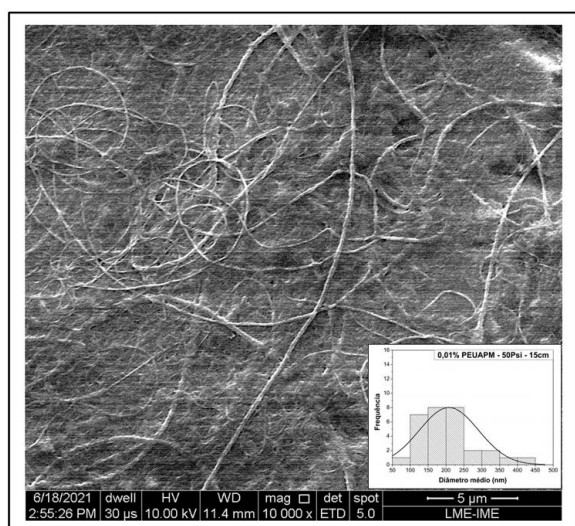


Fig. 8b – Morfologia e curva de distribuição das fibras obtidas a partir da condição E. Concentração de 0,01% m/v, pressão de injeção de 50 Psi e distância do coletor fixo 15 cm.

Tabela 5 – Diâmetros médios obtidos a partir das condições E F. Concentração 0,01% m/v e distância do coletor 15 cm.

Grupo	Concentração (%m/v)	Pressão (Psi)	Distância do coletor (cm)	Diâmetro médio (nm)
E	0,01	40	15	287,01 ± 97,74
F	0,01	50	15	208,24 ± 82,46

3.5 Avaliação estatística

A análise estatística não paramétrica de Kruskal Wallis revelou que, para todas as variáveis estudadas (concentração, pressão de ar e distância do coletor) no processamento das nanofibras de PEUAPM, a variável resposta (diâmetro médio) apresenta diferença estatística indicada pelo valor $p = 6,20 \times 10^{-9}$, para o nível de significância de 0,05%. A fim de identificar especificamente quais condições apresentaram diferença, foi empregado o teste de comparações múltiplas de Dunn. Os valores calculados são apresentados na Tabela 6, e as combinações que diferem estatisticamente foram destacadas em cinza.

Tabela 6 – Resultado das comparações múltiplas obtidas pelo teste de Dunn.

Comparações	Valor- p
a-b	6,65 × 10 ⁻⁰¹
a-c	3,96 × 10 ⁻⁰⁷
a-d	3,86 × 10 ⁻⁰¹
a-e	8,33 × 10 ⁻⁰⁵
a-f	7,46 × 10 ⁻⁰¹
b-c	3,53 × 10 ⁻⁰⁶
b-d	6,65 × 10 ⁻⁰¹
b-e	4,64 × 10 ⁻⁰⁴
b-f	9,12 × 10 ⁻⁰¹
c-d	2,63 × 10 ⁻⁰⁵
c-e	2,56 × 10 ⁻⁰¹
c-f	2,06 × 10 ⁻⁰⁶
d-e	2,16 × 10 ⁻⁰³
d-f	5,87 × 10 ⁻⁰¹
e-f	3,05 × 10 ⁻⁰⁴

4. Conclusão

As avaliações dos resultados experimentais obtidos junto às informações contidas na literatura indicam que PEUAPM, quando processado por fiação de solução por sopro, é influenciado pela concentração

da solução, pressão de injeção e distância de trabalho, ocasionando modificação na morfologia e na distribuição de diâmetro médio.

- Para as três concentrações estudadas, a que ofereceu menor diâmetro médio das fibras foi a de 0,01% m/v.
- Quanto à pressão de injeção, os fluxos de ar menores produziram fibras com menores diâmetros, dependendo da distância entre a ponta da agulha e do coletor fixo.
- A distância de trabalho afetou principalmente a dispersão das fibras processadas, não evidenciando alteração para a pressão de 50 Psi.
- A condição de processamento que apresentou o menor diâmetro médio das fibras foi a condição A, com diâmetro médio de $199,66 \pm 60,13$ nm.

As condições de formação de fibras por meio desse método de fiação se dão por agentes físicos, como o tipo

de polímero, a concentração, a pressão de injeção e, portanto, a morfologia e o diâmetro médio das fibras. Por meio de análises estatísticas e experimentais, assim como foram realizadas, é possível se aproximar de uma condição ideal para o sistema PEUAPM/Xileno, certo de que limites de capacidade de fiação serão alcançados, possibilitando assim aumentar a produção e reduzir os efeitos indesejáveis – analisando sempre o efeito dos parâmetros de modo combinado, uma vez que existem interações entre as variáveis experimentais.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem às agências brasileiras de apoio Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj) pelo financiamento.

Referências

- [1] SOBIERAJ, M. C.; RIMNAC, C. M. Ultra high molecular weight polyethylene: Mechanics, morphology, and clinical behavior. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 2, n. 5, p. 433–443, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.12.006>.
- [2] COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. *Polímeros*, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>.
- [3] KURTZ, S. M. *The UHMWPE Handbook*. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [4] BRASKEM. Polietileno de Ultra-Alto Peso Molecular (PEUAPM). Catálogo Prod UTEC 2015.
- [5] AGUIAR, V. O.; PITA, V. J. R. R.; MARQUES, M. F. V. Nanocomposites of ultrahigh molar mass polyethylene and modified carbon nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 136, n. 19, p. 47459, 2019. <https://doi.org/10.1002/app.47459>.
- [6] ALVES, A. L. S.; NASCIMENTO, L. F. C.; MIGUEZ SUAREZ, J. C. Comportamento balístico de compósito de polietileno de altíssimo peso molecular: efeito da radiação gama. *Polímeros*, v. 14, n. 2, p. 105–111, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000200014>.
- [7] MARISSSEN, R. Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers. *Materials Sciences and Applications*, v. 2, n. 5, p. 319–330, 2011. <https://doi.org/10.4236/msa.2011.25042>.
- [8] PEIJS, T.; JACOBS, M. J. N.; LEMSTRA, P. J. High Performance Polyethylene Fibers. In CHOU, T. W.; KELLY, A.; ZWEBEN, C. *Comprehensive composite materials*, 1. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 263–301.
- [9] DUPONT. Polyethylene sheet and articles made therefrom 2021.
- [10] DUPONT. Materiais de alta performance. [2014]. Disponível em: <https://www.dupont.com.br/products/tensylon.html>. Acesso em: 8 set. 2021.
- [11] BHATNAGAR, A.; BRIAN, D. A.; TAN, C. B. C.; WAGNER, L. L. Enhanced ballistic Performance of Polymer Fibers, 2011.
- [12] HONEYWELL. SPECTRA FIBER. Products. 2020. Disponível em: <https://industrial.honeywell.com/us/en/applications/cut-resistant-fibers-and-materials/rope/spectra-fiber>. Acesso em: 8 set. 2021.

- [13] MERCANTE, L. A.; ANDRE, R. S.; MACEDO, J. B.; PAVINATTO, A.; CORREA, D. S. Nanofibras Eletrofiadas e suas Aplicações: Avanços na Última Década. *Química Nova*, v. 44, n. 6, p. 717–36, 2021. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170721>.
- [14] JAYARAMAN, K.; KOTAKI, M.; ZHANG, Y.; MO, X.; RAMAKRISHNA, S. Avanços recentes em nanofibras de polímero. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 12, n. 1-2, p. 52–65, 2004. <https://doi.org/doi:10.1166/jnn.2004.078>.
- [15] STOJANOVSKA, E.; CANBAY, E.; PAMPAL, E. S.; CALISIR, M. D.; AGMA, O.; POLAT, Y. et al. A review on non-electro nanofibre spinning techniques. *RSC Advances*, v. 6, n. 87, p. 83783–83801, 2016. <https://doi.org/10.1039/c6ra16986d>.
- [16] BEACHLEY, V.; WEN, X. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. *Materials Science and Engineering: C*, v. 29, n. 3, p. 663–668, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.10.037>.
- [17] BUTTAFOCO, L.; KOLKMAN, N. G.; ENGBERS-BUIJTENHUIJS, P.; POOT, A. A.; DIJKSTRA, P. J.; VERMES, I. et al. Electrospinning of collagen and elastin for tissue engineering applications. *Biomaterials*, v. 27, n. 5, p. 724–734, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.06.024>.
- [18] MIRJALILI, M.; ZOHOORI, S. Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, v. 6, p. 207–213, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0189-y>.
- [19] MEDEIROS, E. S.; GLENN, G. M.; KLAMCZYNSKI, A. P.; ORTS, W. J.; MATTOSO, L. H. C. Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 113, p. 2322–2330, 2009. <https://doi.org/10.1002/app.30275>.
- [20] WENDORFF, J.; AGARWAL, S.; GREINER, A. *Electrospinning. Materials, Processing, and Applications*. Hoboken: Wiley, 2012.
- [21] BHARDWAJ, N.; KUNDU, S. C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 3, p. 325–347, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>.
- [22] DARISTOTLE, J. L.; BEHRENS, A. M.; SANDLER, A. D.; KOFINAS, P. A Review of the Fundamental Principles and Applications of Solution Blow Spinning. *ACS applied materials & interfaces*, v. 8, n. 51, p. 34951–34963, 2016. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12994>.
- [23] SILVA, T. H.; OLIVEIRA, J. E.; MEDEIROS, E. S.; SILVA, T. H.; OLIVEIRA, J. E.; MEDEIROS, E. S. Obtenção de micro e nanofibras de PVC pela técnica de Fiação por Sopros em Solução. *Polímeros*, v. 25, n. 2, p. 229–235, 2015. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1694>.
- [24] COSTA, R. G. F.; OLIVEIRA, J. E.; PAULA, G. F.; PICCIANI, P. H. S.; MEDEIROS, E. S.; RIBEIRO, C. et al. Eletrofição de Polímeros em Solução: parte I: fundamentação Teórica. *Polímeros*, v. 22, n. 2, p. 170–177, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000026>.
- [25] OLIVEIRA, J. E.; MEDEIROS, E. S.; CARDOZO, L.; VOLL, F.; MADUREIRA, E. H.; MATTOSO, L. H. C et al. Development of poly(lactic acid) nanostructured membranes for the controlled delivery of progesterone to livestock animals. *Materials Science and Engineering: C*, v. 33, n. 2, p. 844–849, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.10.032>.
- [26] OLIVEIRA, J. E.; MORAES, E. A.; MARCONCINI, J. M.; C. Mattoso LH, Glenn GM, Medeiros ES. Properties of poly(lactic acid) and poly(ethylene oxide) solvent polymer mixtures and nanofibers made by solution blow spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 129, n. 6, p. 3672–3681. <https://doi.org/10.1002/app.39061>.
- [27] CARRIZALES, C.; PELFREY, S.; RINCON, R.; EUBANKS, T. M.; KUANG, A.; MCCLURE, M. J. et al. Thermal and mechanical properties of electrospun PMMA, PVC, Nylon 6, and Nylon 6,6. *Polym Adv Technol* v. 19, n. 2, p. 124–130, 2008. <https://doi.org/10.1002/pat.981>.
- [28] MITSUI CHEMICALS. Partícula fina de polietileno de ultra alto peso molecular MIPELON™ 2016. Disponível em: https://www.mitsuichemicalsbrasil.com/mipelon_prop.htm. Acesso em: 5 nov. 2018.
- [29] TUTAK, W.; SARKAR, S.; LIN-GIBSON, S.; FAROOQUE, T. M.; JYOTSNENDU, G.; WANG, D. et al. The support of bone marrow stromal cell differentiation by airbrushed nanofiber scaffolds. *Biomaterials*, v. 34, n. 10, p. 2389–2398. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.12.020>.
- [30] LI, J.; LUO, K.; YU, J.; WANG, Y.; ZHU, J.; HU, Z. Promising Free-Standing Polyimide Membrane via Solution Blow Spinning for High Performance Lithium-Ion Batteries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 57, n. 36, p. 12296–12305, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b02755>.

- [31] REIN, D. M.; COHEN, Y.; LIPP, J.; ZUSSMAN, E. Elaboration of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/Carbon Nanotubes Electrospun Composite Fibers. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 295, n. 11, p. 1003–1008, 2010. <https://doi.org/10.1002/mame.201000157>.
- [32] REIN, D. M.; SHAVIT-HADAR, L.; KHALFIN, R. L.; COHEN, Y.; SHUSTER, K.; ZUSSMAN, E. Electrospinning of ultrahigh-molecular-weight polyethylene nanofibers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 45, n. 7, p. 766–773, 2007. <https://doi.org/10.1002/polb.21122>.
- [33] REIN, D. M.; COHEN, Y.; RONEN, A.; SHUSTER, K.; ZUSSMAN, E. Application of gentle annular gas veil for electrospinning of polymer solutions and melts. *Polymer Engineering & Science*, v. 49, n. 4, p. 774–782, 2009. <https://doi.org/10.1002/pen.21273>.
- [34] CUI, W.; LI, X.; ZHOU, S.; WENG, J. Investigation on process parameters of electrospinning system through orthogonal experimental design. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 103, n. 5, p. 3105–3112, 2007. <https://doi.org/10.1002/app.25464>.
- [35] PATRA, S. N.; EASTEAL, A. J.; BHATTACHARYYA, D. Parametric study of manufacturing poly(lactic) acid nanofibrous mat by electrospinning. *Journal of Materials Science*, v. 44, p. 647–654, 2009. <https://doi.org/10.1007/S10853-008-3050-Y>.
- [36] ZONG, X.; KIM, K.; FANG, D.; RAN, S.; HSIAO, B. S.; CHU, B. Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes. *Polymer (Guildf)*, v. 43, n. 16, p. 4403–4412, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00275-6).
- [37] DALTON, P. D.; KLINKHAMMER, K.; SALBER, J.; KLEE, D.; MÖLLER, M. Direct in Vitro Electrospinning with Polymer Melts. *Biomacromolecules*, v. 7, n. 3, p. 686–690, 2006. <https://doi.org/10.1021/BM050777Q>.
- [38] BOLBASOV, E. N.; ANISSIMOV, Y. G.; PUSTOVOYTOV, A. V.; KHLUSOV, I. A.; ZAITSEV, A. A.; ZAITSEV, K. V. et al. Ferroelectric polymer scaffolds based on a copolymer of tetrafluoroethylene with vinylidene fluoride: fabrication and properties. *Materials Science and Engineering: C*, v. 40, p. 32–41, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2014.03.038>.
- [39] ZHUANG, X.; YANG, X.; SHI, L.; CHENG, B.; GUAN, K.; KANG, W. Solution blowing of submicron-scale cellulose fibers. *Carbohydrate polymers*, v. 90, n. 2, p. 982–987, 2012. <https://doi.org/10.1016/J.CARB-POL.2012.06.031>.
- [40] SHI L.; ZHUANG, X. P.; CHENG, B. W.; TAO, X. X.; KANG, W. M. Solution blowing of poly(dimethylsiloxane)/nylon 6 nanofiber mats for protective applications. *Chinese Journal of Polymer Science*, v. 32, p. 786–792. <https://doi.org/10.1007/s10118-014-1452-7>.
- [41] ABDAL-HAY, A.; SHEIKH, F. A.; LIM, J. K. Air jet spinning of hydroxyapatite/poly(lactic acid) hybrid nanocomposite membrane mats for bone tissue engineering. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 102, p. 635–643, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFB.2012.09.017>.
- [42] THOMPSON, C. J.; CHASE, G. G.; YARIN, A. L.; RENEKER, D. H. Effects of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, v. 48, n. 23, p. 6913–6922, 2007. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2007.09.017>.
- [43] LOU, H.; LI, W.; LI, C.; WANG, X. Systematic investigation on parameters of solution blown micro/nanofibers using response surface methodology based on box-Behnken design. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 130, n. 2, p. 1383–1391, 2013. <https://doi.org/10.1002/app.39317>.
- [44] ZARGHAM, S.; BAZGIR, S.; TAVAKOLI, A.; RASHIDI, A. S.; DAMERCHELY, R. The Effect of Flow Rate on Morphology and Deposition Area of Electrospun Nylon 6 Nanofiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, v. 7, n. 4, p. 42–49, 2012. <https://doi.org/10.1177/155892501200700414>.
- [45] LI, J.; SONG, G.; YU, J.; WANG, Y.; ZHU, J.; HU, Z. Preparation of Solution Blown Polyamic Acid Nanofibers and Their Imidization into Polyimide Nanofiber Mats. *Nanomaterials*, v. 7, n. 11, p. 395, 2017. <https://doi.org/10.3390/NANO7110395>.
- [46] OLIVEIRA, J. E.; MATTOSO, L. H. C.; ORTS, W. J.; MEDEIROS, E. S. Structural and Morphological Characterization of Micro and Nanofibers Produced by Electrospinning and Solution Blow Spinning: A Comparative Study. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2013, p. 1–14, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/409572>.