

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE VISCOSIDADE E CONDUTIVIDADE NA PRODUÇÃO DE FIBRAS DE ZEÍNA INCORPORADAS COM ÓLEO LARVAL DE BLACK SOLDIER FLY POR ELECTROSPINNING

TAMARA MENDES LEITE SILVA TRINDADE¹; CRISTINA JANSEN¹; MARIANA REICHOW RAMOS¹; RAYANE BRAGA MARTINS PINHEIRO¹; ELESSANDRA DA ROSA ZAVAREZE²; CLAUDIO MARTIN PEREIRA DE PEREIRA¹

¹Laboratório de Inovação e Soluções em Química INNOVASCHEM, UFPEL – tamaralstrindade2611@gmail.com, cris-jansen@hotmail.com, marih.reichow@gmail.com, rayanebragamartins@gmail.com, claudiochemistry@gmail.com

²Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial DCTA, UFPEL – elessandrad@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

O óleo extraído da biomassa larval de black soldier fly (BSFL) (*Hermetia illucens*), apresenta um perfil de ácidos graxos com altos teores de ácido láurico, palmítico e oleico, além de potencial aplicação do óleo devido a sua ação antioxidante e antimicrobiana (MUANGRAT & PANNASAI, 2024; QINGYAN et al. 2024). No entanto, a utilização do óleo possui limitações devido a degradação que esses ácidos graxos sofrem durante o seu processamento, transporte, armazenamento, e durante sua digestibilidade (ROJAS et al., 2024).

A tecnologia de encapsulação por eletrofiação (do inglês *electrospinning*) permite proteção das substâncias bioativas, preservando suas características e seu potencial de aplicação. A tecnologia de eletrofiação utiliza uma solução polimérica, injetada em uma seringa. A solução é submetida a uma estação com controle de temperatura e umidade, onde é aplicada uma fonte de alta tensão. Com o aumento da tensão elétrica, a solução polimérica é eletrofiada devido a ação do campo eletromagnético formado, proporcionando o alongamento da gota formado na ponta do capilar. O material sólido produzido é depositado no coletor. Durante a distância percorrida entre a ponta da agulha e o coletor, o solvente utilizado é evaporado (XUE et al., 2019).

Os nossos laboratórios tem se dedicado na biotecnologia e extração de óleos de fontes alternativas, como óleo de insetos (JANSEN-ALVES et al., 2025). Este trabalho teve como objetivo encapsular o óleo de biomassa larval de black soldier fly através da técnica de *electrospinning*, analisar os parâmetros de viscosidade e condutividade da solução polimérica de zeína e óleo, e avaliar a sua influência no diâmetro e morfologia das fibras geradas.

32. METODOLOGIA

A extração do óleo de BSFL foi realizada com extrator de Soxhlet, por 4 horas com hexano (AOAC 1997). Ao final da extração, o solvente foi evaporado em rotaevaporador (Buchi, Rotavapor RII) e centrifugado por 20 min a 400 rpm (KASVI K14–4000).

Para as formulações, primeiramente foi preparada a solução de zeína (25% e 20% p/v), e diluídas em etanol:água 70:30 (v/v), mantidas em agitação durante 3 h. Após, o óleo foi adicionado (15%, 30% e 45% p/p em relação ao peso da zeína) a solução. Para a produção da fibra controle (sem adição de óleo) foi preparada uma solução de zeína (20 e 25% p/v).

As soluções poliméricas foram caracterizadas quanto à viscosidade aparente e condutividade elétrica. A viscosidade aparente foi determinada em um viscosímetro digital Brookfield com spindle nº18 (Model DV-II, EUA). A condutividade elétrica foi avaliada através de um condutivímetro (Medidor EC150 de condutividade em $\mu\text{S}/\text{cm}$ & mS/cm). As análises foram realizadas em triplicata e com a solução polimérica mantida em temperatura ambiente ($20 \pm 3^\circ\text{C}$).

A produção das fibras por *electrospinning* utilizou taxa de alimentação de 0,6 mL/h, e diâmetro de agulha de 0,7 mm. As soluções poliméricas foram inseridas em seringas de 3 mL. A seringa foi adicionada a uma bomba de infusão (KD Scientific, Model 100, Holliston, Inglaterra) para controle da taxa de fluxo. O processo de eletrofiação foi realizado com um eletrodo positivo, conectado a uma fonte de alta tensão entre 20 a 22 Kv com corrente contínua (INSTOR, INSES-HV30, Brasil) (KRUMREICH et al., 2019).

A morfologia das fibras obtidas foi avaliada por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Jeol, JSM - 6610LV, EUA). O material eletrofiado foi adicionado em um stub e recoberta com ouro por meio de um metalizador (Sputtering, Denton Vacuum Desk V, EUA), com uma aceleração de tensão de 10 kV. O diâmetro médio e a distribuição do tamanho das fibras foram analisadas a partir da medição de 60 fibras por meio do software ImageJ (versão 2015, EUA), através das imagens obtidas do MEV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das formulações poliméricas, foram realizadas análises de condutividade e viscosidade, e os resultados estão descritos na Tabela 1:

Tabela 1. Resultados de condutividade e viscosidade das soluções poliméricas e do diâmetro médio das fibras de zeína encapsuladas com óleo larval de black soldier fly.

Zeína (%, m/v)	Óleo (m/m)	Condutividade ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Viscosidade (Mpa/s)	Diâmetro médio (nm)
20	0	903,67 \pm 1,53 ^b	5,75 \pm 0,57 ^f	209 \pm 83
20	15	884,33 \pm 0,58 ^c	10,78 \pm 0,56 ^e	139 \pm 42
20	30	834,67 \pm 3,51 ^e	15,75 \pm 0,58 ^b	134 \pm 37
20	45	746,33 \pm 1,53 ^f	11,88 \pm 0,55 ^d	124 \pm 27
25	0	933,33 \pm 2,08 ^a	12,73 \pm 0,47 ^d	284 \pm 129
25	15	911,67 \pm 5,86 ^b	15,47 \pm 0,26 ^{bc}	340 \pm 228
25	30	864,00 \pm 3,61 ^d	16,88 \pm 0,40 ^a	229 \pm 75
25	45	834,33 \pm 2,08 ^e	14,75 \pm 0,12 ^c	282 \pm 143

Os valores são expressos como média \pm desvio padrão ($n = 3$).* $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$: microsiemens por centímetro. Mpa/s: milipascal por segundo. Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes na coluna diferem pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

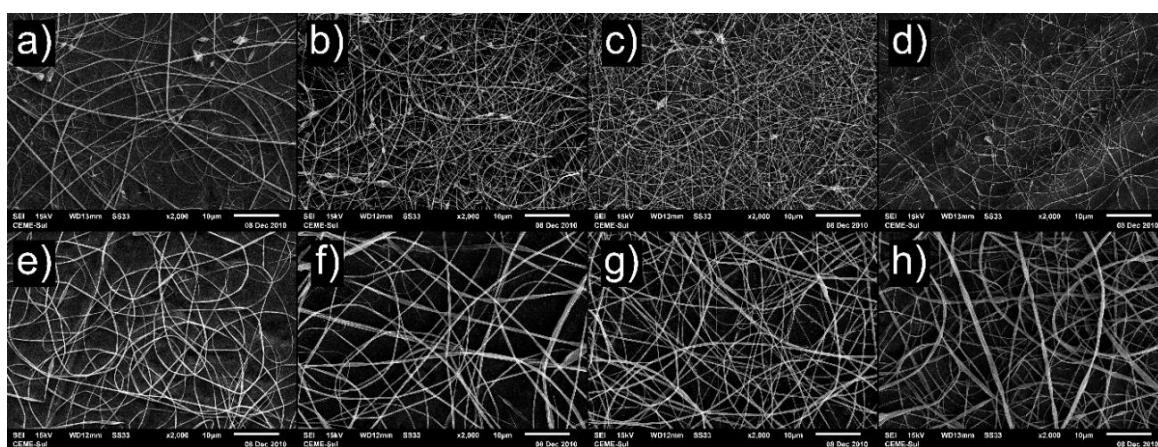
As duas soluções poliméricas controle obtiveram as maiores médias de condutividade, diferindo significativamente ($p \leq 0,05$) das soluções poliméricas com adição de óleo. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de que as proteínas da zeína, quando dissolvidas em uma solução, produzem íons que contribuem para a condutividade elétrica da solução proteica (KRUMREICH et al., 2019).

O processo de eletrofiação nas formulações de zeína com maior percentual de óleo apresentou gotejamento da solução, o que pode estar relacionado aos menores valores encontrados para condutividade elétrica (Tabela 1). Sabe-se que

durante o processo de eletrofiação, o aumento da condutividade causa aumento das cargas da solução polimérica. Para que isso ocorra são necessárias cargas suficientes para que a repulsão aplicada à solução polimérica consiga superar a superfície de tensão e assim, formar o cone de Taylor na ponta da agulha (SANTOS et al., 2024). O aumento na concentração de zeína influenciou significativamente a viscosidade das soluções poliméricas ($p<0,05$). Houve aumento da viscosidade quando a adição de BSFLO (óleo larval de black soldier fly) aumentou, de 15 % para a 30 % nas soluções com 20 e 25 % de zeína. Entretanto, o padrão não foi mantido para as soluções que receberam 45 % do óleo.

A morfologia e o diâmetro médio das fibras incorporadas com diferentes porcentagens de BSFLO (0%, 15%, 30% e 45%) são mostrados na Tabela 1 e figura 1. Todas as fibras contendo 25% de zeína exibiram uma forma semelhante a uma fita (Figuras 1e, 1f, 1g e 1h). Fibras produzidas a partir de soluções de zeína com etanol geralmente exibem morfologia em forma de fita. Contudo, as fibras ultrafinas com 20% de zeína (1a, 1b, 1c e 1d) apresentaram formação de beads, um fenômeno geralmente prejudicial à formação de fibras devido ao acúmulo de material e à distribuição não uniforme do composto encapsulado (SILVA et al., 2021).

Figura 1. Microscopia eletrônica de varredura das fibras de zeína encapsuladas com óleo larval de black soldier fly. Fibra controle 20% de zeína (a), 20% de zeína e 15% de BSFLO (b), 20% de zeína e 30% de BSFLO (c), 20% de zeína 45% de BSFLO (d), Fibra controle 25% de zeína (e), 25% de zeína e 15% de BSFLO (f), 25% de zeína e 30% de BSFLO (g), 25% de zeína e 45% de BSFLO (h). BSFLO: óleo larval de black soldier fly. Amplitude: 2000x.



Em termos de diâmetro médio, as fibras compostas por 20% de zeína (Tabela 1) variaram de 124 a 139 nm para concentrações de BSFLO de 45% e 15%, respectivamente. A alta condutividade elétrica das soluções poliméricas evidenciam que a solução de eletrofiação pode ser esticada no campo eletromagnético, resultando em fibras com diâmetros menores (ESMAEILI et al., 2024). Por outro lado, as fibras com 25% de zeína exibiram valores maiores de diâmetro médio em comparação com as fibras de 20% de zeína, independentemente da concentração de BSFLO. Especificamente, a distribuição do diâmetro para as fibras contendo 25% de zeína variou de 229 a 340 nm, com valores de 229 nm para fibras com 30% de BSFLO e 340 nm para fibras com 15% de BSFLO. O aumento da viscosidade promove entrelaçamentos moleculares, promovendo a formação de fibras sem gotas. No entanto, o aumento da

concentração de zeína também influencia o aumento do diâmetro das fibras produzidas. Os diâmetros médios encontrados em todas as tratamentos classificam as fibras como fibras ultrafinas (SILVA et al., 2021).

4. CONCLUSÕES

A partir do estudo, observou-se que os parâmetros de viscosidade e condutividade das soluções poliméricas influenciaram no diâmetro e morfologia das fibras obtidas, apresentando maior uniformidade e ausência de beads nos tratamentos com 25% de zeína. Em relação ao grupo com 20% de zeína, o aumento da concentração de BSFLO acarretou na diminuição do diâmetro das fibras. As fibras de zeína incorporadas com BSFLO a partir do método de *electrospinning*, demonstram potencial para sua aplicação em diversas indústrias, como farmacêutica, cosmética e alimentícia, dada a sua morfologia de fita, além de possuir uma alta relação entre área de superfície e volume, sendo assim, consideradas um excelente veículo para a entrega de óleos e compostos bioativos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. **Association of Official Analytical Chemists International Official Methods of Analysis**. 16th Edition, AOAC, Arlington. 1997.
- ESMAEILI, M. et al. Evaluating the osteogenic properties of polyhydroxybutyrate-zein/multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) electrospun composite scaffold for bone tissue engineering applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 276, p. 133829, 2024.
- JANSEN-ALVES, C. et al. Exploring housefly (Diptera: Muscidae) larvae as a sustainable source of oil: a potential non-edible feedstock high in unsaturated fatty acids. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 28, n. 3, p. 102429, 2025.
- KRUMREICH, F. D. et al. Avocado oil incorporated in ultrafine zein fibers by electrospinning. **Food Biophysics**, v. 14, n. 4, p. 383–392, 2019.
- MUANGRAT, R.; PANNASAI, S. Exploring the potential of black soldier fly larvae oil: Supercritical CO₂ extraction, physicochemical analysis, antioxidant properties, shelf life, and keratinocyte growth inhibition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 15, p. 101008, 2024.
- QINGYAN, L. et al. Antibacterial activity and mechanism of lauric acid against *Staphylococcus aureus* and its application in infectious cooked chicken. **Foodborne Pathogens and Disease**, v. 21, n. 12, p. 766–773, 2024.
- ROJAS, K.; VERDUGO-MOLINARES, M. G.; VALLEJO-CARDONA, A. A. Use of encapsulating polymers of active compounds in the pharmaceutical and food industry. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100619, 2024.
- SANTOS, F. N. dos et al. Antimicrobial activity of geranium (*Pelargonium graveolens*) essential oil and its encapsulation in carioca bean starch ultrafine fibers by electrospinning. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 265, p. 1–12, 2024.
- SILVA, P. M. et al. Electrohydrodynamic processing for the production of zein-based microstructures and nanostructures. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 56, p. 101504, 2021.
- XUE, J.; WU, T.; DAI, Y.; XIA, Y. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. **Chemical Reviews**, v. 119, n. 8, p. 5298–5415, 2019.