

## **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 TRINDADE<sup>1</sup>; CRISTINA JANSEN<sup>1</sup>; MARIANA REICHOW RAMOS<sup>1</sup>; RAYANE BRAGA MARTINS PINHEIRO<sup>1</sup>; ELESSANDRA DA ROSA ZAVAREZE<sup>2</sup>; CLAUDIO MARTIN PEREIRA DE PEREIRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Inovação e Soluções em Química INNOVASCHEM, UFPel –  
[tamaramlstrindade2611@gmail.com](mailto:tamaramlstrindade2611@gmail.com), [cris-jansen@hotmail.com](mailto:cris-jansen@hotmail.com), [marih.reichow@gmail.com](mailto:marih.reichow@gmail.com),  
[rayanebragamartins@gmail.com](mailto:rayanebragamartins@gmail.com), [claudiochemistry@gmail.com](mailto:claudiochemistry@gmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial DCTA, UFPel –  
[elessandrad@yahoo.com.br](mailto: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 n°18 (Model DV-II, EUA). A condutividade elétrica foi avaliada através de um condutivímetro (Medidor EC150 de condutividade em  $\mu\text{S/cm}$  &  $\text{mS/cm}$ ). 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 recoberto 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 ( $\mu\text{S/cm}$ )	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 ( $p \leq 0,05$ ).

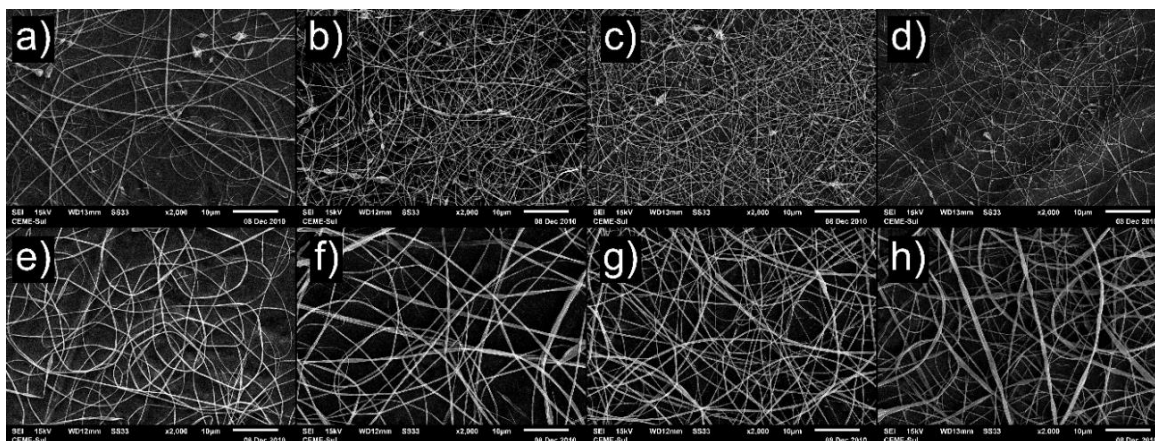
As duas soluções poliméricas controle obtiveram as maiores médias de condutividade, diferindo significativamente ( $p \leq 0,05$ ) das soluções poliméricas com adição de óleo. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de que as proteínas da zeína, quando dissolvidas em uma solução, produzem íons que contribuem 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 de zeína 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 os 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 CO<sub>2</sub> 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.