

UTILIZAÇÃO DE POLISSACARÍDEO DE ALGA MARROM PARA OBTENÇÃO DE NANOFIBRAS POLIMÉRICAS NÃO TÓXICAS

RANIEL CAMPOS WREGE¹; BARBARA CAROLINA BILHALVA²; AMANDA FONSECA LEITZKE²; DANIELLE TAPIA BUENO²; NATHALIA STARK PEDRA²; CLAUDIO MARTIN PEREIRA DE PEREIRA³

¹Universidade Federal de Pelotas– ranielcw@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas– innovaschem@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas– claudiochemistry@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O mundo está num momento em que os recursos estão cada vez mais sobrecarregados, por isso, há uma crescente demanda por produtos que podem ser rapidamente reabastecidos. Com isso em vista, a indústria de algas marinhas tem sido caracterizada por um forte crescimento. O valor de mercado das algas marinhas mais do que triplicou de 2000 a 2021, passando de US\$ 5 bilhões para US\$ 17 bilhões (UNCTAD, 2024).

Nesse contexto, há três tipos de macroalgas: algas verdes (Chlorophyta), algas marrons (Phaeophyta) e algas vermelhas (Rhodophyta). As algas marrons, ricas em polissacarídeos com diversas atividades biológicas, têm ganhado cada vez mais atenção nas áreas farmacêutica e biomédica. Destacando-se principalmente o uso de polissacarídeos extraídos das algas marrons, como a fucoidana, um polissacarídeo sulfatado composto principalmente por fucose, com efeitos antibacterianos, antivirais, anti-inflamatórios, anticoagulantes e antitrombóticos (LOMARTIRE et al., 2021), para produção de nanofibras poliméricas, como no trabalho de LEITZKE et al. (2025).

As nanofibras poliméricas apresentam diversas características como baixa citotoxicidade, boa biocompatibilidade e capacidade de liberação de fármacos pouco solúveis, potencializando o uso destas nas áreas de engenharia de tecidos e medicina regenerativa (FATHI-ACHACHELOUEI et al., 2019). Em relação à produção de nanofibras, a eletrofiação tem sido uma técnica de ampla utilização pela sua versatilidade, simplicidade e baixo custo (MERCANTE et al., 2017). Estudos recentes demonstram o potencial da fucoidana na produção de nanofibras combinadas com outros polímeros, como álcool polivinílico/quitosana (PUIGMAL et al., 2024) e óxido de polietileno (CHEN et al., 2021), uma vez que a fucoidana, isoladamente, apresenta baixa viscoelasticidade e problemas de solubilidade, dificultando sua eletrofiação (CHEN et al., 2021).

Nesse sentido, outro biopolímero de destaque é a zeína, principal proteína de armazenamento do milho, amplamente utilizada na eletrofiação por ser renovável, biocompatível e não tóxica (KASAAI, 2018). Embora apresente limitações mecânicas em sua forma de filme, essas podem ser superadas por meio da eletrofiação, que gera fibras com melhores características estruturais e funcionais (JIANG et al., 2023).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo produzir nanofibras poliméricas não tóxicas à base de zeína incorporadas com fucoidana, buscando unir as propriedades bioativas da fucoidana com a formabilidade da zeína, a fim de desenvolver um material promissor para aplicações cutâneas e regenerativas.

2. METODOLOGIA

A eletrofiação é uma técnica em que soluções poliméricas são submetidas a um campo elétrico, gerando um jato que se estende e solidifica à medida que se move em direção a um coletor, formando fibras com diâmetros em escala nanométrica (MERCANTE et al., 2017). Sendo assim, os procedimentos foram realizados em uma estação horizontal contendo uma fonte de alta voltagem de corrente contínua, uma bomba de infusão e um coletor metálico revestido com alumínio. A solução polimérica foi preparada com 30% de zeína em solução de ácido fórmico:água (75:25), com diferentes concentrações de fucoidana (25%, 30% e 35%). Soluções controle foram preparadas com apenas 30% de zeína.

A viscosidade e a condutividade elétrica da solução polimérica são fatores cruciais na eletrofiação, pois afetam diretamente a formação, a morfologia e o diâmetro das fibras produzidas (LI et al., 2021). A condutividade elétrica das soluções contendo zeína e fucoidana foi determinada utilizando um condutivímetro EC150. Aproximadamente 10 mL de cada solução foi analisado à temperatura ambiente ($22 \pm 3^\circ\text{C}$). Para avaliação da viscosidade, 10 mL de cada amostra foi inserido em um viscosímetro digital Marte (Modelo MVD-174 5), com uso do eixo número 0 e agitação a 6 rpm.

A avaliação citotóxica das nanofibras é uma preocupação relevante antes da realização de estudos *in vivo*. Por isso, dois testes foram realizados com fibroblastos murinos L929: o ensaio colorimétrico de MTT, que mede a atividade mitocondrial como indicador da viabilidade celular por meio da formação de cristais de formazan (STOCKERT et al., 2018); e o ensaio colorimétrico de SRB, que avalia a proliferação celular por quantificação proteica, a partir da ligação das proteínas com a SRB (BAUER et al., 2025).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação a viscosidade, pode-se observar que a adição de fucoidana aumentou a viscosidade das soluções poliméricas (Tabela 1), com exceção da formulação com 35% de fucoidana, que apresentou menor viscosidade, embora ainda superior à controle. As concentrações de 25% e 30% de fucoidana mostraram viscosidades ideais para a eletrofiação. Quanto à condutividade elétrica, as formulações com 25% e 35% de fucoidana aumentaram esse parâmetro, enquanto a de 30% reduziu. No entanto, a formulação com 35% de fucoidana, apesar da alta condutividade e viscosidade, não pôde ser eletrofiada, provavelmente devido à interferência da alta condutividade na formação do cone de Taylor (BONAKDAR et al., 2024). Assim, apenas os dados das formulações viáveis (25% e 30% de fucoidana) foram considerados para análise posterior.

Tabela 1. Viscosidade e condutividade elétrica das soluções poliméricas.

Tratamento	Viscosidade (mPa·s)	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Zeína 30% (controle)	$4,65 \pm 0,28$	$8,31 \pm 0,14$
Zeína 30% + 25% Fucoidana	$15,34 \pm 0,44$	$8,57 \pm 0,07$
Zeína 30% + 30% Fucoidana	$15,16 \pm 0,56$	$7,82 \pm 0,02$
Zeína 30% + 35% Fucoidana	$11,93 \pm 0,07$	$8,99 \pm 0,12$

No que diz respeito à avaliação citotóxica, as nanofibras contendo apenas zeína não apresentaram toxicidade após 24 e 48h, assim como as nanofibras de 30% de zeína combinadas com 25% e 30% de fucoidana (Figuras 1 e 2). Além da ausência de efeitos citotóxicos, os resultados demonstraram manutenção da viabilidade e proliferação celular em todas as concentrações testadas (10-200 µg/mL). Esses achados apoiam o potencial cicatrizante das fibras, destacando um potencial uso das nanofibras em curativos para regeneração da pele.

Figura 1. Análise de MTT das fibras com 30% de zeína (controle), 30% de zeína + 25% de fucoidana e 30% de zeína + 30% de fucoidana em A) 24h e B) 48h.

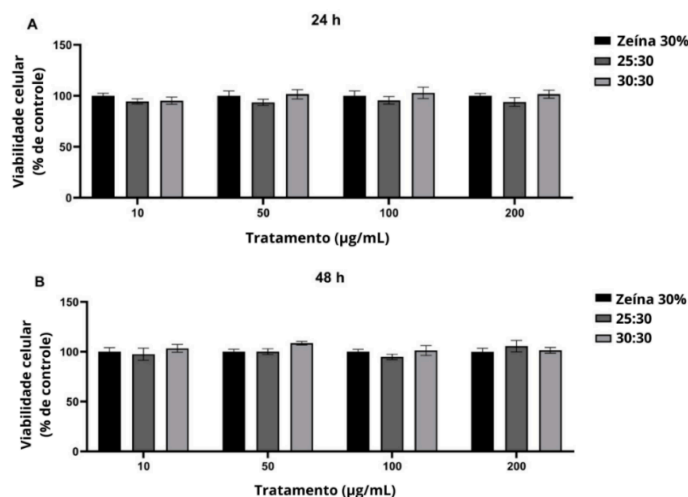
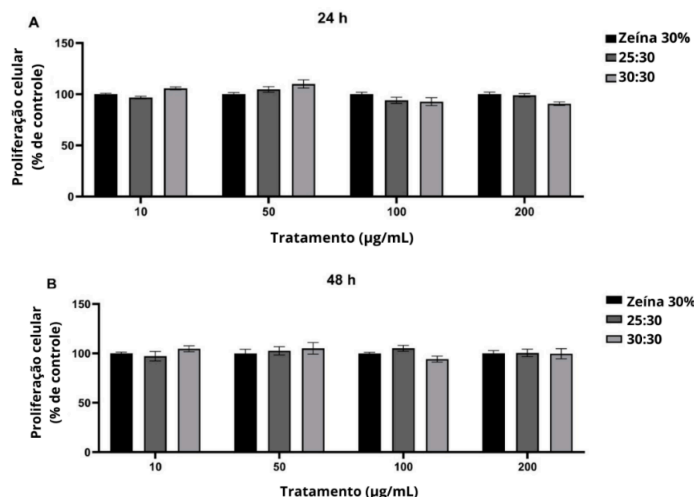


Figura 2. Análise de SRB das fibras com 30% de zeína (controle), 30% de zeína + 25 de fucoidana e 30% de zeína + 30% de fucoidana em A) 24h e B) 48h.



4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que a viscosidade elevada nas concentrações de 25% e 30% de fucoidana e a condutividade elétrica moderada contribuíram para formação de fibras estáveis e bem formadas. Nos ensaios biológicos, as fibras demonstraram ausência de toxicidade, com manutenção da viabilidade e proliferação celular, o que reforça sua potencialidade para aplicações regenerativas, como curativos cicatrizantes para pele humana.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BONAKDAR, M. A.; RODRIGUE, D. Electrospinning: processes, structures, and materials. **Macromol**, v. 4, n.1, p. 58-103, 2024.
- CHEN, C. Y.; WANG, S. H.; HUANG, C. Y.; DONG, C. D.; HUANG, C. Y.; CHANG, C. C.; CHANG, J. S. Effect of molecular mass and sulfate content of fucoidan from *Sargassum siliculosum* on antioxidant, anti-lipogenesis, and anti-inflammatory activity. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 132, n. 4, p. 359-364, 2021.
- CHEN, Y.; ZHU, H.; HAO, Y.; SUN, Z.; SHEN, P.; ZHOU, Q. Preparation of fucoidan-based electrospun nanofibers and their interaction with endothelial cells. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 739209, 2021.
- FATHI-ACHACHELOUEI, M.; KNOPF-MARQUES, H.; SILVA, C. E. R.; BARTHES J.; BAT, E.; TEZCANER, A.; VRANA, N. E. Use of nanoparticles in tissue engineering and regenerative medicine. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 7, p. 113, 2019.
- JIANG, W.; DU, Y.; HUANG, C.; JI, Y.; YU, D. G. Electrospun zein nanofibers: from food to food. **ES Food & Agroforestry**, v. 12, n. 6, p. 863, 2023.
- KASAAI, M. R. Zein and zein-based nano-materials for food and nutrition applications: a review. **Trends in Food Sci. & Technology**, v.79, n.184-197, 2018.
- LI, Y.; ZHU, J.; CHENG, H.; LI, G.; CHO, H.; JIANG, M.; GAO, Q.; ZHANG, X. Developments of advanced electrospinning techniques: a critical review. **Advanced Materials Technologies**, v. 6, n. 11, p. 2100410, 2021.
- LEITZKE, A. F.; BUENO, D. T.; JANSEN-ALVES, C.; TRINDADE, T. M. L. S.; PEDRA, N. S.; SANTANA, L. R.; STEFANELLO, F.; ZAVAREZE, E. R.; BORSUK, S.; CORREÑO, N. L. V.; PEREIRA, C. M. P. Incorporation of fucoidan into zein-based electrospun fibers: a promising material for biotechnological applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 306, p. 141788, 2025.
- LOMARTIRE, S.; MARQUES, J. C.; GONÇALVES A. M. M. An overview to the health benefits of seaweeds consumption. **Marine Drugs**, v. 19, n. 6, p. 341, 2021.
- MERCANTE, L. A.; SCAGION, V. P.; MIGLIORINI, F. L.; MATTOSO, L. H.; CORREA, D. S. Electrospinning-based (bio)sensors for food and agricultural applications: a review. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 91, n. 91-103, 2017.
- PUIGMAL, A. C.; AYRAN, M.; ULAG, S.; ALTAN, E.; GUNCU, M. M.; AKSU, B.; DURUKAN, B. K.; SASMAZEL, H. T.; PEREZ, R. A.; KOC, E.; O'CALLAGHAN, D.; GUNDUZ, O. Fucoidan-loaded electrospun polyvinyl-alcohol/chitosan nanofibers with enhanced antibacterial activity for skin tissue engineering. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 148, p. 106163, 2023.
- STOCKERT, J. C.; HOROBIN, R. W.; COLOMBO, L. L.; BLÁZQUEZ-CASTRO, A. Tetrazolium salts and formazan products in cell biology: viability assessment, fluorescence imaging, and labeling perspectives. **Acta Histochemica**, v. 120, n. 3, p. 159-167, 2018.
- UNCTAD. **An Ocean of Opportunities: The Potential of Seaweed to Advance Food, Environmental and Gender Dimensions of the SDGs**. United Nations, 2024.
- BAUER, J. A.; SYSEL, A. M.; HESTON, A. J.; DUNPHY, M. J. Standardized sulforhodamine b colorimetric cell proliferation assay for anticancer activity screening in educational and research laboratories. **MethodsX**, v. 15, p. 103469, 2025.