

## DESENVOLVIMENTO DE HIDROGÉIS DE CNF/PVA A PARTIR DAS FIBRAS *PHORMIUM TENAX* PARA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS DE COLHEITA E GERAÇÃO DE ENERGIA

Leandro Lemos Silveira<sup>1</sup>; Nicholas Fernandes de Souza<sup>2</sup>; Frantchescole Borges Cardoso<sup>2</sup>; Marcelle Davet de Barros<sup>2</sup>; Alice Gonçalves Osorio<sup>3</sup>  
Marie-Joo Le Guen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – leandrolemos.silveira@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – nicholasfs97@gmail.comFRA

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – frantchescole.cardoso@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – marcelledavet.ufpel@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas – osorio.alice@gmail.com

<sup>3</sup>Instituto de Pesquisa Scion – Nova Zelândia – MarieJoo.LeGuen@scionresearch.com

### 1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda por dispositivos portáteis e autossustentáveis, torna-se cada vez mais relevante o desenvolvimento de métodos eficientes de armazenamento de energia (NAYAK et al., 2025). Esse cenário impulsionou o desenvolvimento de componentes alimentados por fontes renováveis, especialmente voltados a dispositivos portáteis autossustentáveis. Entre as diferentes abordagens, destacam-se os dispositivos que convertem a energia mecânica proveniente de vibrações e movimentos, tanto de atividades humanas como de fontes naturais como o vento e o movimento das ondas, conhecidos como dispositivos de colheita de energia mecânica (do inglês – *mechanical energy harvesters* – MEHs). Esses dispositivos despontam como alternativas promissoras para sanar essa lacuna de dispositivos portáteis e autossustentáveis (Bairagi et al., 2023; Dowarah; et al., 2024).

Os fios de nanotubos de carbono torcidos (do inglês – *Carbon nanotubes yarns* – CNTYs), conhecidos como *twistrons*, convertem energia mecânica proveniente de deformações tracionais ou torcionais em energia elétrica (KIM et al., 2017; KIM, et al., 2020). Entretanto, sua dependência de eletrólitos líquidos limita sua aplicação prática, visto que esses eletrólitos frequentemente contêm solventes tóxicos ou inflamáveis, gerando preocupações ambientais. Nesse contexto, eletrólitos em gel à base de biopolímeros surgem como alternativa mais segura e ecológica (DAS et al., 2024).

A celulose, biopolímero renovável, destaca-se por sua abundância e propriedades versáteis, com diversas possibilidades de aplicação. Entre suas fontes naturais, o *Phormium tenax*, planta nativa da Nova Zelândia conhecida como Harakeke pelos Māori, apresenta grande potencial. Além de sua ampla

adaptabilidade de cultivo, representa uma fonte sustentável para a produção de nanocelulose (ZHAI et al., 2023). Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo principal extrair celulose das fibras de *P. tenax* para a obtenção de nanofibrilas de celulose (NFC) e avaliar seu potencial como eletrólitos em gel aplicados a MEHs do tipo *twistron*. Foram analisadas as propriedades morfológicas, térmicas, de intumescimento, mecânicas e de resistividade elétrica dos hidrogéis produzidos.

## 2. METODOLOGIA

As fibras de *P. tenax* foram fornecidas pelo Instituto de Pesquisa SCION (Nova Zelândia), e a extração da celulose seguiu o método descrito por PANIZ et al. (2020), aplicando uma hidrólise alcalina seguida de uma etapa de branqueamento. As NFCs foram obtidas por hidrólise ácida conforme descrito por ANTUNES et al. (2024).

Inicialmente, a solução de NFCs foi dissolvida em uma solução de NaOH/ureia conforme WU et al. (2021); esta solução foi submetida a uma etapa de congelamento a  $-30 \pm 2$  °C por 12 h. Posteriormente, foi descongelada a  $20 \pm 2$  °C por 2 h, sob agitação mecânica. A solução de PVA foi preparada a 90 °C por 1 h, após a dissolução do PVA, foi adicionado NaOH/ureia. As soluções de CNF e PVA foram misturadas nas proporções de 25%, 50% e 75% em peso de NFCs. Os hidrogéis foram obtidos pelo método de reticulação física (Adelnia et al., 2022). As soluções NFC/PVA foram congeladas a  $-30 \pm 2$  °C por 12 h e descongeladas à temperatura ambiente ( $23 \pm 2$  °C) por 2 h. Esses ciclos de congelamento e descongelamento foram repetidos sete vezes.

Para a caracterização das fibras de *P. tenax*, utilizou-se a análise termogravimétrica (TGA). Já a celulose foi avaliada quanto à sua decomposição térmica por TGA e quanto às suas características químicas por espectroscopia de FTIR. As NFCs foram, então, caracterizadas via microscopia eletrônica de transmissão (MET). Os hidrogéis CNF/PVA foram caracterizados por ensaios de condutividade elétrica por aparelho desenvolvido no laboratório, e de intumescimento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise termogravimétrica (TGA) das fibras de *P. tenax* mostrou um pico de decomposição próximo a 350 °C. A celulose extraída apresentou pico de degradação semelhante, confirmando sua estabilidade térmica. Os espectros de FTIR das fibras revelaram uma banda larga de vibração O–H em 3340 cm<sup>-1</sup>, típica da presença de celulose, lignina e hemicelulose. A celulose extraída exibiu menor intensidade em 1245 cm<sup>-1</sup>, indicando a remoção de hemicelulose, além do desaparecimento de bandas relacionadas à lignina. Ao analisar as NFCs no MET foi possível verificar uma média de 94 nm de diâmetro nas fibras com um comprimento aproximado de 3,4 µm, confirmando a eficiência do processo de extração.

Análises do inchaço dos hidrogéis mostraram que eles apresentaram intumescimento progressivo nos primeiros 50 minutos, estabilizando após cerca de 8 horas, independentemente do teor de CNFs. A análise da condutividade do hidrogel de CNF/PVA em diferentes meios salinos evidenciou sua capacidade de adaptação. Em água destilada, a condutividade foi de  $1,82 \times 10^{-5}$  S/m, um valor baixo devido à ausência de íons no meio. Em solução de NaCl 1 M, o valor registrado foi de  $1,25 \times 10^{-5}$  S/m, enquanto na solução de KCl 3 M a condutividade alcançou  $2,21 \times 10^{-3}$  S/m. Esses resultados confirmam que a elevada concentração de íons desempenha um papel determinante na condutividade do hidrogel, destacando-o como um material promissor para aplicações como condutor iônico.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que os hidrogéis CNF/PVA produzidos a partir de fibras de *P. tenax* apresentam grande potencial como eletrólitos em gel sustentáveis para sistemas MEH. Além de suas propriedades estruturais e elétricas promissoras, oferecem maior segurança e menor impacto ambiental, configurando-se como candidatos relevantes para integração em dispositivos de colheita de energia renovável.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, B. da F. et al. Cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose acetate from *Butia* fruits (*Butia odorata*): Chemical, morphological, structural, and thermal

properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, [s. l.], v. 281, p. 136151, 2024.

BAIRAGI, S. et al. Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review. *Nano Energy*, [s. l.], v. 111, p. 108414, 2023.

BI, S. et al. The toughness chitosan-PVA double network hydrogel based on alkali solution system and hydrogen bonding for tissue engineering applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, [s. l.], v. 146, p. 99–109, 2020.

DAS, M. et al. Cellulose acetate-based gel electrolytes grafted with surface-functionalized  $\text{SiO}_2$  nanofiber for green energy storing applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [s. l.], v. 686, p. 133268, 2024.

DOWARAH, S.; KALITA, P.; KUMAR, S. Progress in mechanical energy harvesting via piezoelectric polymers and biomaterials. *Polymer*, [s. l.], v. 312, p. 127640, 2024.

H. Adelnia, R. Ensandoost, S. Shebbrin Moonshi, J.N. Gavgani, E.I. Vasafi, H.T. Ta, Freeze/thawed polyvinyl alcohol hydrogels: Present, past and future, Eur Polym J 164 (2022) 110974. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110974>.

K. Wu, H. Han, L. Xu, Y. Gao, Z. Yang, Z. Jiang, G. De Schutter, The improvement of freezing–thawing resistance of concrete by cellulose/polyvinyl alcohol hydrogel, Constr Build Mater 291 (2021) 123274.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123274>.

KIM, H. et al. Electrical energy harvesting from ferritin biskrolled carbon nanotube yarn. *Biosensors and Bioelectronics*, [s. l.], v. 164, p. 112318, 2020.

KIM, S. H. et al. Harvesting electrical energy from carbon nanotube yarn twist. *Science*, [s. l.], v. 357, n. 6353, p. 773–778, 2017.

NAYAK, P.; ISMAYIL; SUDHAKAR, Y. N. Magnesium chloride-infused chitosan-poly(vinyl alcohol) electrolyte films: A versatile solution for energy storage devices. *International Journal of Biological Macromolecules*, [s. l.], v. 297, p. 139797, 2025.

PANIZ, O. G. et al. Cellulosic material obtained from Antarctic algae biomass. *Cellulose*, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 113–126, 2020.

ZHAI, Y. et al. Superhydrophobic cellulose-based aerogel derived from *Phormium tenax* (harakeke) for efficient oil sorption. *Industrial Crops and Products*, [s. l.], v. 202, p. 116981, 2023.