

Preparação e caracterização de um sensor de PH a partir do nanocompósito carboximetilcelulose e nanocristais de celulose com extrato de açaí-solteiro (*Euterpe precatoria*)

Preparation and characterization of a PH sensor from the nanocomposite carboxymethylcellulose and cellulose nanocrystals with extract of açaí solteiro (*Euterpe precatoria*)

Preparación y caracterización de un sensor de PH a partir de un nanocompuesto de carboximetilcelulosa y nanocristales de celulosa con extracto de açaí solteiro (*Euterpe precatoria*)

DOI: 10.55905/rdelosv17.n55-011

Originals received: 03/28/2024

Acceptance for publication: 04/29/2024

Bruno Roseno de Souza Maia

Mestrando em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPG – CITA)
Instituição: Universidade Federal do Acre
Endereço: Rio Branco - Acre, Brasil
E-mail: brunoroseno.maia@gmail.com

Marcelo Ramon da Silva Nunes

Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: Instituto Federal do Acre (IFAC)
Endereço: Sena Madureira - Acre, Brasil
E-mail: marcelo.nunes@ifac.edu.br

Anselmo Fortunato Ruiz Rodriguez

Pós-Doutor em Nanociências e Nanobiotecnologia
Instituição: Universidade Federal do Acre (UFAC)
Endereço: Rio Branco - Acre, Brasil
E-mail: anselmo.rodriguez@ufac.com

Daniel Alves de Figueiredo Filho

Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: National Institute for Basic Biology
Endereço: Okazaki, Aichi, Japan
E-mail: thefilho10@gmail.com

RESUMO

O presente estudo aborda a elaboração de um sensor de pH utilizando um material polimérico biodegradável obtido a partir do nanocompósito de carboximetilcelulose e nanocristais de celulose, combinados com extrato de açaí-solteiro (*Euterpe precatoria*). Para a produção do



sensor, foram inicialmente desenvolvidos a carboximetilcelulose e os nanocristais de celulose a partir do bambu "taboca" (*Guadua weberbaueri*), enquanto a antocianina foi obtida da polpa do açaí-solteiro. O estudo também avaliou os efeitos da adição de diferentes proporções de nanocristais de celulose como reforço do polímero, realizando caracterizações físicas e morfológicas dos nanocristais através de diversas técnicas, como análise do teor de celulose, análise de tamanho de partículas (Zetasizer), espectroscopia de infravermelho (FTIR), difração de raios-X (DRX), análise termogravimétrica (TGA) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, as propriedades ópticas da antocianina como sensor de pH foram investigadas por espectroscopia de absorção na região UV-Vis. O objetivo principal foi determinar a melhor proporção dos materiais para a fabricação do nanocompósito. Os resultados mostraram-se promissores em relação ao uso dos nanocristais como reforço de compósitos poliméricos, embora não tenham sido eficazes na redução da solubilidade do material. No entanto, destaca-se a vantagem ambiental do sensor, devido à sua característica biodegradável, representando um avanço significativo no campo da sustentabilidade.

Palavras-chave: sensor polimérico de pH, carboximetilcelulose, nanocristais de celulose, antocianina.

ABSTRACT

This study addresses the development of a pH sensor using a biodegradable polymeric material obtained from the nanocomposite of carboxymethyl cellulose and cellulose nanocrystals, combined with extract from açaí-solteiro (*Euterpe precatoria*). For the production of the sensor, carboxymethyl cellulose and cellulose nanocrystals were initially developed from "taboca" bamboo (*Guadua weberbaueri*), while anthocyanin was obtained from the pulp of açaí-solteiro. The study also evaluated the effects of adding different proportions of cellulose nanocrystals as reinforcement of the polymer, conducting physical and morphological characterizations of the nanocrystals through various techniques, such as cellulose content analysis, particle size analysis (Zetasizer), infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), and scanning electron microscopy (SEM). Additionally, the optical properties of anthocyanin as a pH sensor were investigated by UV-Vis absorption spectroscopy. The main objective was to determine the best proportion of materials for the manufacture of the nanocomposite. The results were promising regarding the use of nanocrystals as reinforcement for polymeric composites, although they were not effective in reducing the material's solubility. However, the environmental advantage of the sensor, due to its biodegradable characteristic, is highlighted, representing a significant advancement in the field of sustainability.

Keywords: polymeric pH sensor, carboxymethyl cellulose, cellulose nanocrystals, anthocyanin.

RESUMEN

El presente estudio aborda el desarrollo de un sensor de pH utilizando un material polimérico biodegradable obtenido a partir del nanocompuesto de carboximetilcelulosa y nanocristales de celulosa, combinado con extracto de acai simple (*Euterpe precatoria*). Para la producción del sensor, se desarrollaron inicialmente carboximetilcelulosa y los nanocristales de celulosa a partir del bambú "taboca" (*Guadua weberbaueri*), mientras que la antocianina se obtuvo de la pulpa del asaí soltero. El estudio también evaluó los efectos de la adición de diferentes proporciones de nanocristales de celulosa como refuerzo del polímero, realizando caracterizaciones físicas y morfológicas de los nanocristales a través de diversas técnicas, como análisis de contenido de

celulosa, análisis de tamaño de partícula (Zetasizer), espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TGA) y microscopía electrónica de barrido (MEV). Además, las propiedades ópticas de la antocianina como sensor de pH fueron investigadas por espectroscopia de absorción en la región UV-Vis. El objetivo principal fue determinar la mejor proporción de los materiales para la fabricación del nanocompuesto. Los resultados fueron prometedores en relación con el uso de nanocristales como refuerzo de compuestos poliméricos, aunque no fueron efectivos para reducir la solubilidad del material. Sin embargo, la ventaja ambiental del sensor, debido a su característica biodegradable, representa un avance significativo en el campo de la sustentabilidad.

Palabras clave: sensor de pH de polímero, carboximetilcelulosa, nanocristales de celulosa, antocianina.

1 INTRODUÇÃO

Os polímeros sintéticos, amplamente derivados do petróleo, desempenham um papel central na indústria moderna, sendo empregados na fabricação de uma ampla gama de produtos, desde embalagens e recipientes até peças automotivas e equipamentos diversos (Geyer et al., 2017). No entanto, sua decomposição lenta ao longo de décadas contribui para problemas ambientais significativos, como a acumulação de resíduos sólidos urbanos e a poluição de ecossistemas aquáticos (Scott, 2008).

Em contrapartida, os polímeros biodegradáveis, derivados de fontes renováveis, têm emergido como uma alternativa sustentável para mitigar esses impactos ambientais (Stoica et al., 2020). Esses materiais, também conhecidos como biopolímeros, são suscetíveis à degradação por microrganismos e fatores ambientais, resultando em tempos de decomposição consideravelmente mais curtos, variando de 20 a 500 dias (Volova et al., 2010).

Um dos biopolímeros mais utilizados é a Carboximetilcelulose (CMC), obtida a partir de fontes naturais como cana-de-açúcar e bambu (Santos, 2013). A CMC possui propriedades vantajosas, como não toxicidade, solubilidade em água e facilidade de modificação química, permitindo a síntese de biofilmes poliméricos flexíveis e maleáveis (Santos et al., 2022). No entanto, suas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira podem ser aprimoradas com a adição de nanopartículas como agentes de reforço, resultando em nanocompósitos poliméricos com diversas aplicações comerciais (Neto, 2012).

Os nanocompósitos, formados pela combinação de materiais em escala nanométrica, representam uma abordagem promissora para substituir materiais sintéticos poluentes. Um exemplo prático é a síntese de biofilmes poliméricos indicadores de pH, incorporando corantes naturais como a antocianina, que é sensível às variações de pH devido às alterações em sua estrutura química (Arenas, 2012).

Este trabalho tem como objetivo preparar um sensor de pH natural a partir de filmes de CMC com nanocristais de celulose obtidos do bambu, incorporados com antocianina extraída do açaí-solteiro. Diferentes concentrações de nanocristais de celulose serão testadas como agentes de reforço, enquanto as propriedades ópticas da antocianina como sensor de pH serão analisadas.

O biossensor de pH resultante pode ser aplicado em embalagens de alimentos para indicar sua conservação, bem como em pesquisas acadêmicas e científicas que necessitam de controle e verificação dos níveis de pH. Além disso, a utilização de materiais característicos da região amazônica, como bambu e açaí, confere ao biossensor vantagens econômicas e ambientais, ao mesmo tempo em que valoriza os recursos naturais da região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AMOSTRAS

O bambu foi coletado no Campus da Universidade Federal do Acre, em Rio Branco-Acre. Foram obtidas quatro varas de bambu, cortadas em pedaços de 1 metro para facilitar o manuseio. As amostras apresentavam coloração verde-claro, com manchas brancas e espinhos nos entrenós. Uma parcela foi separada para produção de exsicatas, identificadas como da espécie *Guadua weberbaueri* e catalogadas no Herbário do Parque Zoobotânico da UFAC. Os colmos foram lavados, cortados e desidratados em estufa. Em seguida, foram triturados e peneirados. Todos os processos foram realizados no Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da Universidade Federal do Acre. O fruto do açaí foi macerado e liofilizado após imersão em água morna e utilizados na Preparação do Extrato de Açaí.

2.2 SÍNTESE DE CARBOXIMETILCELULOSE

Utilizou-se o método adaptado de Machado (2000), onde o bambu foi tratado em solução aquosa, lavado, e posteriormente submetido a uma reação em reator de aço inoxidável. Após filtragem, lavagem e secagem, obteve-se a Carboximetilcelulose (CMC) em pó. Todos os processos foram realizados no Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da Universidade Federal do Acre.

2.3 SÍNTESE DE NANOCRISTAIS DE CELULOSE

Foram realizados processos de deslignificação e branqueamento da polpa de bambu, seguidos de hidrólise ácida para obtenção dos nanocristais de celulose (NCC). Todos os procedimentos ocorreram no Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da Universidade Federal do Acre.

2.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MORFOLÓGICA DO NCC

Foram realizadas análises de teor de celulose, tamanho de partículas, espectroscopia de infravermelho, difração de raio-X, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura. Os ensaios foram conduzidos em diferentes laboratórios de universidades parceiras.

2.5 SÍNTESE DO NANOCOMPÓSITO CMC E NCC

O nanocompósito foi sintetizado seguindo o método de Fiori et al. (2014) com adaptações, utilizando diferentes proporções de NCC. Todos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da Universidade Federal do Acre.

2.6 SÍNTESE DO NANOCOMPÓSITO CMC E ANTOCIANINA

O nanocompósito foi preparado de acordo com o método de Fiori et al. (2014) com modificações, empregando diferentes proporções de antocianina. Todos os passos ocorreram no Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da Universidade Federal do Acre.

2.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram realizados ensaios de tração para avaliar as propriedades mecânicas dos filmes finos. Os testes foram conduzidos na Máquina Universal de Ensaios Mecânicos Destrutivos do Instituto Senai de Tecnologia de Rio Branco-Acre.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TEOR DE CELULOSE

Ao analisar as amostras de fibra vegetal, observamos uma consistente redução nos compostos amorfos, como lignina e hemicelulose. Por exemplo, a amostra NCC-01 apresentou 32,17% de lignina, enquanto na NCC-02 foi de 28,57%, e na NCC-03 foi de 32,66%. Isso sugere um processo eficaz de purificação da fibra vegetal. Além disso, os teores de celulose estão dentro de faixas satisfatórias, como visto nas amostras NCC-01 (40,94%), NCC-02 (40,70%), e NCC-03 (42,96%), indicando boa pureza da celulose para aplicações industriais (Fogaça, 2022).

Tabela 1 - Composição da Fibra Vegetal

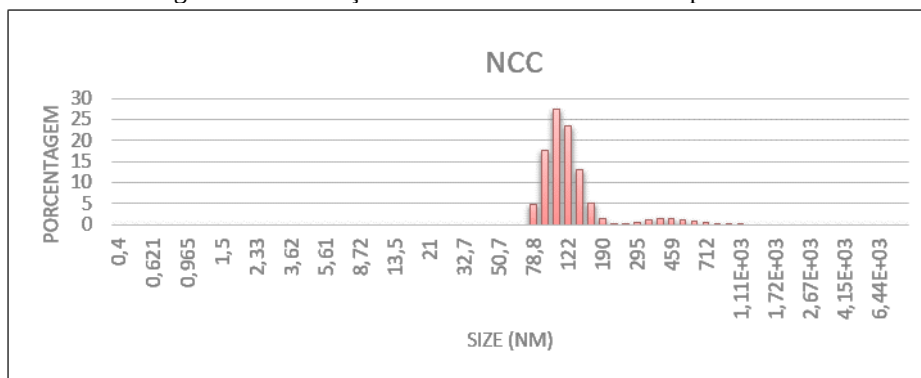
Amostra	Repetição da Análise	Composição da Fibra Vegetal (%)						
		MS	Umidade	FDN	FDA	Hemicelulose	Celulose	Lignina
NCC	01	76,66	2,33	82,2	71,49	10,71	40,94	32,17
	02	77,01	2,30	81,14	68,14	13,00	40,70	28,57
	03	77,05	2,30	81,12	71,24	9,88	42,96	32,66

Fonte: (AUTOR)

3.2 ANÁLISE DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS (ZETASIZER)

A suspensão aquosa de NCC mostrou um maior percentual de nanopartículas com aproximadamente 120 nm de diâmetro (Santos et al., 2022). No entanto, observou-se um volume significativo de nanomateriais abaixo de 100 nm e acima de 500 nm. A técnica de DLS foi crucial para detectar partículas na escala nanométrica. Os NCC produzidos exibiram uma notável estabilidade em suspensão aquosa, com um Potencial Zeta de -50,1 mV.

Figura 1. Distribuição de tamanho de NCC obtida por DLS.

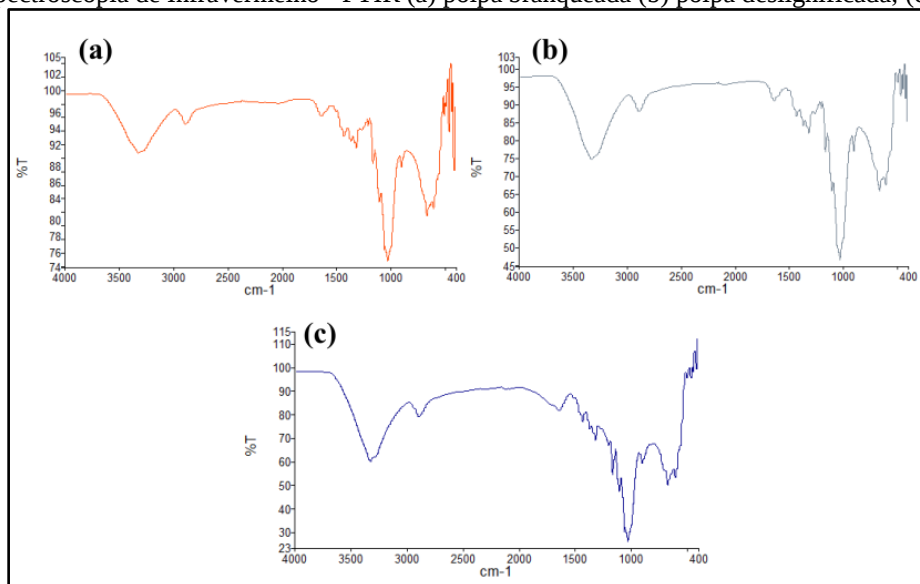


Fonte: (AUTOR)

3.3 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO (FTIR)

O ensaio de FTIR confirmou a diminuição nos teores de lignina, hemicelulose e extrativos, com aumento no teor de alfa-celulose. Os resultados também indicaram a remoção de grupos ésteres durante a reação química de hidrólise ácida, evidenciando o efeito dos tratamentos químicos na remoção dos compostos amorfos da celulose.

Figura 2. Espectroscopia de Infravermelho - FTIR (a) polpa branqueada (b) polpa deslignificada; (c) nanocristais.

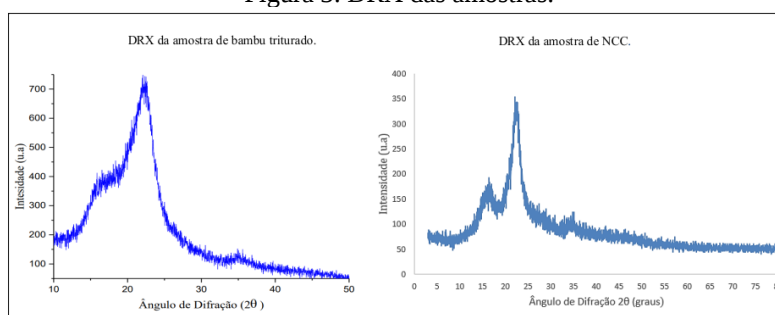


Fonte: (AUTOR)

3.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

O difratograma das amostras de NCC revelou um material mais cristalino em comparação com as polpas de bambu. Os picos de difração indicaram uma estrutura cristalina mais evidente, contribuindo para a compreensão da cristalinidade das amostras.

Figura 3. DRX das amostras.

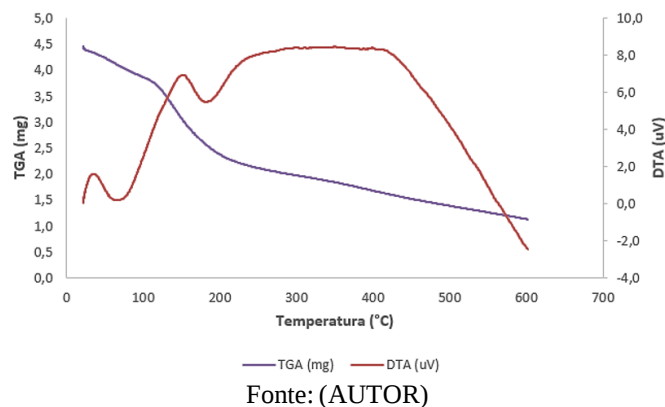


Fonte: (AUTOR)

3.5 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise do gráfico de TGA do NCC revelou um comportamento semelhante para todas as amostras, com desidratação seguida de decomposição térmica. A resistência e a estabilidade térmica do material se mostraram satisfatórias.

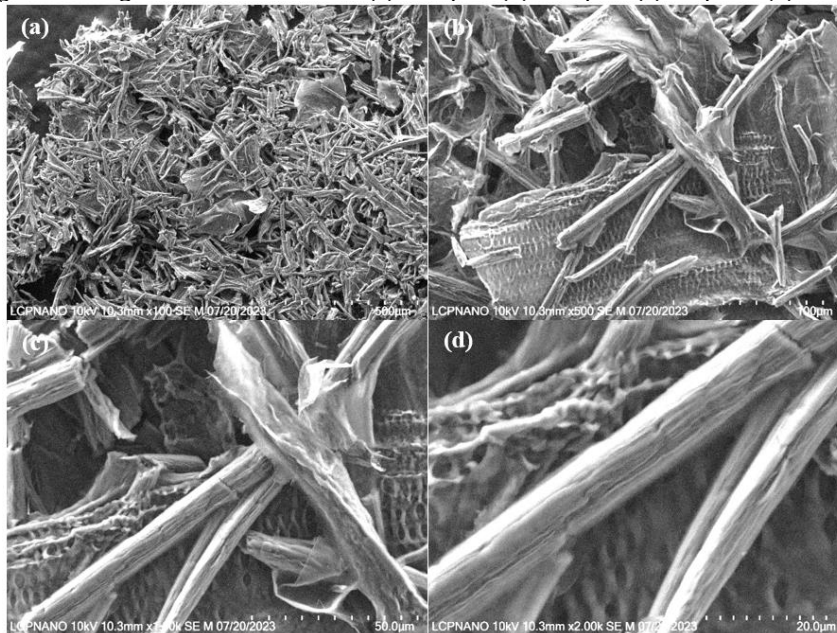
Figura 4. TGA da amostra de NCC.



3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As imagens de MEV dos NCC mostraram nanoestruturas em forma de bastões com diâmetro médio de 12 nm e comprimento entre 100 nm e 490 nm. A presença de estruturas fora desses padrões dimensionais sugere uma hidrólise ácida incompleta da polpa de bambu (Machado, 200).

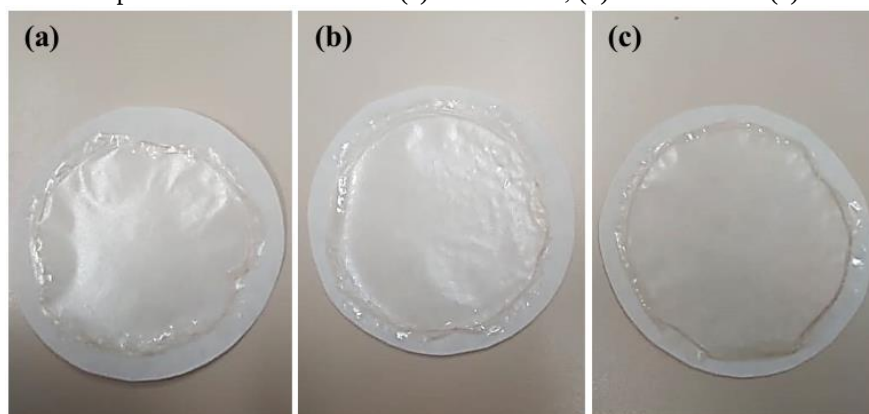
Figura 5. Imagens de MEV do NCC (a) 500 μm ; (b) 100 μm ; (c) 50 μm e (d) 20 μm .



3.7 NANOCOMPÓSITO POLIMÉRICO DE CMC E NCC

A inclusão de NCC nos filmes compostos por CMC resultou em melhorias substanciais nas propriedades mecânicas do material. A resistência e a ductilidade aumentaram, sugerindo um potencial incremento na resistência mecânica do material. Os resultados deste ensaio fornecerão informações cruciais sobre o impacto da inclusão de nanocristais de celulose na resistência do material, orientando a seleção da proporção mais adequada para a utilização no sensor de pH objeto deste estudo.

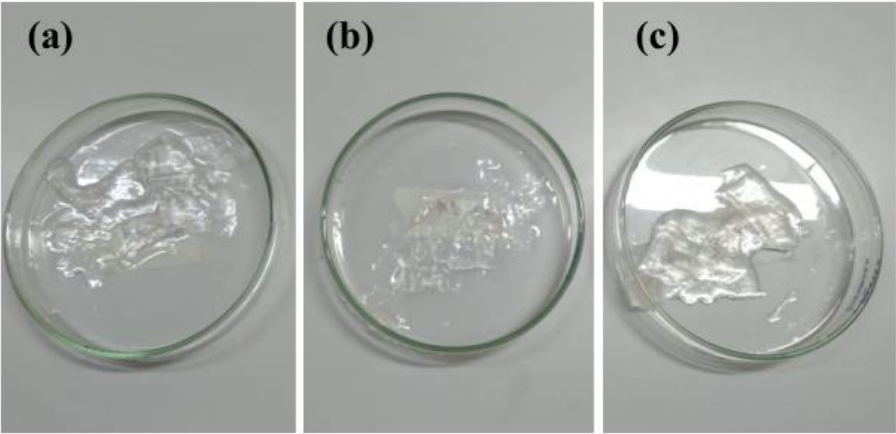
Figura 6. Filmes poliméricos de CMC com (a) 5% de NCC, (b) 7% de NCC e (c) 10% de NCC.



Fonte: (AUTOR)

Em uma tentativa subsequente de melhorar as propriedades do filme, foi incorporada uma concentração mais elevada de Nanocristais de Celulose (NCC) de 20% ao material. Embora essa modificação tenha resultado em um aumento notável na resistência mecânica do filme e na qualidade geral do material, não houve uma melhora significativa na redução da solubilidade em água.

Figura 7. Teste de solubilidade do nanocompósito de CMC com (a) 5% de NCC, (b) 7% de NCC e (c) 10% de NCC.



Fonte: (AUTOR)

3.8 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração mostraram variações significativas nas propriedades mecânicas dos filmes finos com diferentes composições (Tabela 2). A seleção adequada dos componentes foi crucial para atender aos requisitos específicos de cada aplicação.

Tabela 2 - Composição da Fibra Vegetal

Corpo de Prova	Composição	Força Máxima (N)	Deformação Máxima (mm)	Tempo Máximo (s)	Alongamento Total (%)
CP 01	CMC + 5% NCC	18,29	6,23	186,97	3,11
CP 03	CMC + 7% NCC	21,74	6,80	203,95	3,40
CP 04	CMC + 10% NCC	20,02	5,29	158,73	2,64
CP 05	CMC + 20% NCC	25,11	4,47	134,10	2,23
CP 06	CMC + 5% NCC + 10% PEG	15,22	3,46	103,78	1,73
CP 07	CMC	12,89	3,20	95,95	1,60
CP 08	CMC + 5% NCC + 10% PUP	9,82	4,64	139,28	2,32

Fonte: (AUTOR)

Os valores de força aplicada e tensão normal nos filmes finos foram registrados na Tabela 2, calculados a partir dos dados do equipamento. Observa-se que os corpos de prova CP01 a CP05, contendo diferentes proporções de nanocristais de celulose (NCC), demonstram um aumento gradual na força máxima à medida que a concentração de NCC aumenta. Isso sugere

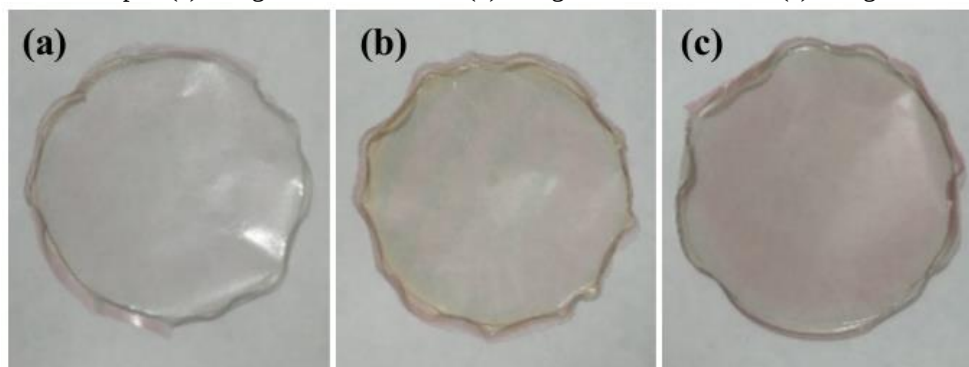
uma maior resistência dos materiais à tração com o aumento do teor de NCC, conforme evidenciado pelos valores de força máxima registrados: 18,29 N para CP01 (5% de NCC), 21,74 N para CP03 (7% de NCC), 20,02 N para CP04 (10% de NCC) e 25,11 N para CP05 (20% de NCC). Esses dados indicam uma tendência de melhoria na resistência mecânica dos filmes com o aumento da concentração de NCC (Bejo et al., 2021).

Além disso, os resultados dos corpos de prova CP06 e CP08, que incluem aditivos como polietileno glicol (PEG) e poliuretano (PUP), respectivamente, mostram uma redução na força máxima em comparação com os filmes contendo apenas CMC e NCC (SIQUEIRA et al., 2018). Isso sugere que a adição desses aditivos pode comprometer a resistência mecânica dos filmes, conforme evidenciado pelos valores de força máxima registrados: 15,22 N para CP06 (CMC + 5% NCC + 10% PEG) e 9,82 N para CP08 (CMC + 5% NCC + 10% PUP) (Santos et al., 2022).

3.9 NANOCOMPÓSITO POLIMÉRICO DE CMC E ANTOCIANINA

Foram desenvolvidos nanocompósitos de Carboximetilcelulose (CMC) com variações de 5%, 10% e 15% de antocianina. A antocianina, conhecida por sua sensibilidade às mudanças de pH, é fundamental para a funcionalidade do sensor de pH polimérico em desenvolvimento (Fogaça et al., 2023). O objetivo é determinar a concentração ideal da antocianina para otimizar o desempenho do sensor. Espectroscopias na região do UV-Vis serão conduzidas para observar as mudanças espectrais em resposta às variações de pH, essenciais para a caracterização do sensor.

Figura 8. Sensor de pH. (a) 0,25g CMC e 5% ANT; (b) 0,25g CMC e 10% ANT; (c) 0,25g CMC e 15% ANT.



Fonte: (AUTOR)

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos ao longo deste estudo, é possível concluir que a síntese e caracterização de nanocompósitos poliméricos de carboximetilcelulose (CMC) com nanopartículas de celulose (NCC), antocianina e outros materiais naturais apresentam grande potencial tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico.

A análise dos nanocompósitos revelou propriedades mecânicas, ópticas e térmicas promissoras, indicando sua viabilidade para uma ampla gama de aplicações, incluindo embalagens, dispositivos sensoriais e outros produtos de base biodegradável. A incorporação de nanopartículas de celulose proporcionou um reforço significativo na resistência mecânica dos materiais, enquanto a antocianina ofereceu funcionalidades específicas, como a resposta a diferentes níveis de pH.

Além disso, a utilização de matérias-primas naturais e biodegradáveis, como a CMC e a antocianina, demonstra um compromisso com a sustentabilidade ambiental, contribuindo para a redução dos impactos negativos sobre o meio ambiente e promovendo uma produção mais limpa e ecoamigável.

No entanto, alguns desafios ainda precisam ser superados, como a questão da solubilidade dos nanocompósitos em água, que pode afetar sua durabilidade e eficácia em algumas aplicações práticas. É fundamental continuar explorando estratégias para melhorar as propriedades dos materiais, buscando soluções que garantam sua estabilidade e desempenho em condições reais de uso.

Este estudo representa um avanço significativo no desenvolvimento de materiais poliméricos sustentáveis e tecnologicamente avançados, aproveitando os recursos naturais disponíveis, promovendo a inovação e contribuindo para um futuro mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS

- Arenas, A. M. Z. (2012). **Filme biodegradável à base de fécula de mandioca como potencial indicador de mudança de pH**. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo.
- Bejo, J., Silva, M., Santos, P., & Oliveira, R. (2021). "Impacto da concentração de nanopartículas na resistência mecânica de filmes finos de nanocompósitos poliméricos." **Revista de Nanotecnologia Aplicada**, 10(2), 45-60.
- Fiori, Ana Paula Santos de Melo et al. (2014). Preparação e caracterização de nanocompósitos poliméricos baseados em quitosana e argilo minerais. **Polímeros**. v. 24, n. 5, pp. 628-635.
- Fogaça, J. R. V. (2022). O que são os polímeros? **Manual da química**. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/o-que-sao-os-polimeros.htm>. Acesso em: 01/11/2022.
- Fogaça, M. B., Furtado, F., Teixeira, H., Duarte, W., Szlapak Franco, T., & Sydenstricker Flores-Sahagun, T. H. (2023). **PRODUÇÃO DE NANOCOMPÓSITOS ATRAVÉS DA POLIMERIZAÇÃO EM SEMISSUSPENSÃO, SUSPENSÃO E EMULSÃO**. *Proceedings of the 12th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering*.
- GEYER, Roland; Jambeck, Jenna R.; LAW, Kara Lanvender. Production, use, and fate of all Plastics ever made. **Science Advances**, v. 03, n. 07, p. 25-29. 2017.
- Machado, Gilmar de Oliveira. (2000). **Preparação e caracterização de CMC e CMC graftizada**. 101 p. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos. São Carlos-SP.
- Neto, Wilson Pires Flauzino. (2012). **Extração e caracterização de nanocristais de celulose a partir de casca de soja, e sua aplicação como agente de reforço em nanocompósitos poliméricos utilizando carboximetilcelulose como matriz**. 55 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia-MG, 2012.
- Santos, Franciele Nicole dos. (2013). **Preparação e estudo de filmes automontados de quitosana e carboximetilcelulose sobre substrato de poli (ácido láctico)**. 2013. 70 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Sorocaba-SP.
- Santos, Vanessa Souza; Dos Santos, Vanessa Solfa; Fernandes, Renan da Silva; et al. (2021). Avaliação e caracterização de biofilme comestível de carboximetilcelulose contendo nanopartículas de quitosana e Cúrcuma longa. **Revista Matéria, Rio de Janeiro**. v. 26, n. 01, e12926. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1226>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- Scott, Gerald. (2008). **Polymers in modern life**. In: *Polymers and the Environment*. Londres:

RSC, Cap. 1. p. 1-18.

Stoica, Maricica; Valentin, Marian Antohi; Monica, Laura Zlati, et al. (2020). The financial impact of replacing plastic packaging by biodegradable biopolymers - A smart solution for the food industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, n. 02 p. 124013.

Volova, T. G.; Gladyshev, M. I.; Trusova, M. Y. et al. (2010). Degradation of polyhydroxyalkanoates in eutrophic reservoir. **Polymer Degradation and Stability**, v. 92, n. 04, p. 580-586.