

MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO DE LIGNINA EM NANOCELULOSE BACTERIANA: EFEITOS NAS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS, FUNCIONAIS E ELETROQUÍMICAS

Natalia Ribeiro, Kamila Trainotti, Claudimir Carminatti, Derce Recouvreux

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Joinville, Brasil
(naty.rod.ribeiro@gmail.com)

Resumo: A nanocelulose bacteriana (NCB) funcionalizada com lignina possibilita a obtenção de compósitos sustentáveis com propriedades aprimoradas. Este estudo compara métodos de incorporação de lignina em NCB, por rotas *in situ* e *ex situ*, e avalia seus efeitos na dispersão da lignina, nas propriedades mecânicas, antioxidantes, de proteção UV e condutividade protônica. Os resultados evidenciam diferenças significativas entre as rotas de incorporação, com impacto direto no desempenho final dos materiais.

Palavras-chave: Nanocelulose bacteriana; lignina; compósitos sustentáveis; incorporação de lignina; condutividade protônica.

INTRODUÇÃO

Materiais funcionais à base de NCB têm atraído crescente atenção devido às suas excelentes propriedades físico-químicas e renovabilidade (Campano et al., 2016).

A NCB é um biopolímero produzido por bactérias do gênero *Komagataeibacter*, caracterizado por elevada pureza, alta cristalinidade e estrutura tridimensional formada por uma rede interconectada de nanofibras de celulose (Wang et al., 2026; Samyn et al., 2023).

Em comparação com a celulose de origem vegetal, a NCB não apresenta lignina, hemiceluloses ou outros contaminantes estruturais, o que resulta em propriedades superiores, como baixo custo, alta flexibilidade, adaptabilidade, transparência, elevada resistência mecânica, alta capacidade de retenção de água, biocompatibilidade e biodegradabilidade (Reshmy et al., 2021; Sharma; Bhardwaj, 2019). Essas características tornam a NCB um material promissor para aplicações em áreas como biomateriais, sistemas de liberação controlada, membranas, dispositivos eletrônicos flexíveis e compósitos avançados (Vasconcelos et al., 2015). Entretanto, sua funcionalização ainda é um desafio relevante para ampliar seu desempenho em aplicações específicas, motivando o desenvolvimento de estratégias de modificação química e física, incluindo a incorporação de aditivos como a lignina (Abdelaziz; Hultberg, 2017).

A Figura 1 apresenta o hidrogel de nanocelulose bacteriana obtido por cultivo estático. Após a síntese (Figura 1a), a película apresenta coloração amarelada decorrente da presença de células bacterianas,

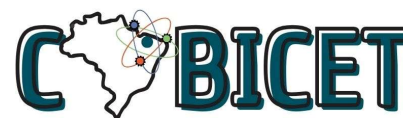
metabólitos e resíduos do meio de cultivo. Posteriormente, o material foi submetido ao processo de purificação, resultando em um hidrogel com aspecto translúcido e homogêneo (Figura 1b), característica associada à remoção eficiente das impurezas e à preservação da rede tridimensional de nanofibras de celulose.



Figura 1. Produção e purificação do hidrogel de NCB. (a) Película de NCB recém-sintetizada após o cultivo estático em meio de cultura, apresentando coloração amarelada devido à presença de resíduos metabólicos e componentes do meio. (b) Hidrogel de NCB após o processo de purificação, exibindo aspecto translúcido e homogêneo em decorrência da remoção de células bacterianas e impurezas.

Contudo, as limitações da NCB, em sua forma pura, podem ser mitigadas pela incorporação de lignina. A incorporação de lignina ou seus derivados em nanocompósitos de NCB para simular as estruturas naturais de celulose-lignina (Tian et al., 2021).

A lignina é o polímero fenólico renovável mais abundante na Terra, destacando-se como uma



alternativa sustentável aos aditivos de origem petroquímica (Abdelaziz e Hultberg, 2017). Além disso, sua estrutura macromolecular, rica em anéis aromáticos conjugados e unidades funcionais do tipo guaiacila (G), confere elevada estabilidade térmica e capacidade de absorção na região do ultravioleta (UV). Essas características contribuem para a introdução de propriedades de fotoproteção e atividade antioxidante no compósito final (Lizundia et al., 2021; Wang; Zhang; Chu, 2021).

Além das propriedades mecânicas, antioxidantes e de proteção UV, estudos recentes indicam que a incorporação de lignina pode contribuir para o aumento da condutividade protônica da NCB (Souza et al., 2023). A elevada densidade de grupos fenólicos, hidroxilas e carboxílicos presentes na lignina contribui para a formação de extensas redes de ligações de hidrogênio e para a retenção de moléculas de água, criando caminhos favoráveis à migração de prótons na matriz polimérica (Xu et al., 2020; Wang; Zhang; Chu, 2021).

Adicionalmente, modificações químicas da lignina, como sulfonação e oxidação, podem aumentar a densidade de sítios protonáveis e melhorar o desempenho iônico desses materiais (Oun et al., 2022; Gadim et al., 2017). Dessa forma, compósitos NCB/lignina apresentam potencial para aplicações em membranas eletrolíticas, sensores e dispositivos eletroquímicos sustentáveis (Lizundia et al., 2021; Li et al., 2016).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo comparar os principais métodos de incorporação de lignina em NCB, os métodos *in situ* por incorporação e *ex situ* por impregnação enfatizando efeitos do processamento sobre a distribuição da lignina, as propriedades estruturais e o desempenho funcional dos compósitos obtidos.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sobre métodos de incorporação de lignina em NCB. Foram consultadas publicações científicas indexadas nas bases ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Google Scholar, utilizando combinações das palavras-chave “*bacterial nanocellulose*”, “*lignin*”, “*in situ incorporation*” e “*ex situ impregnation*”.

Foram selecionados artigos publicados principalmente entre 2015 e 2026, priorizando estudos relacionados aos métodos de incorporação, propriedades estruturais, desempenho mecânico, atividade antioxidante e aplicações eletroquímica e tecnológicas dos compósitos NCB/lignina.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Métodos de incorporação de lignina em NCB

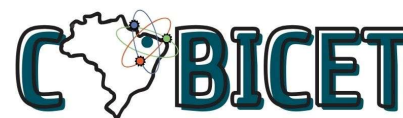
A incorporação de lignina em matrizes de NCB tem sido muito estudada atualmente como uma estratégia para ampliar as funcionalidades do material e mitigar limitações intrínsecas associadas a este biopolímero (Huang et al., 2020). A combinação desses componentes permite a obtenção de biocompósitos renováveis com propriedades mecânicas, térmicas, de barreira e eletroquímicas aprimoradas (Souza et al., 2023; Trovagunta et al., 2021). Nesse contexto, diferentes rotas de incorporação têm sido propostas, sendo determinantes para a distribuição da lignina na matriz, o tipo de interação intermolecular estabelecida e o desempenho final do compósito. De maneira geral, essas estratégias incluem abordagens *in situ*, *ex situ* e métodos assistidos por técnicas físico-físicas ou físico-químicas; entretanto, neste trabalho foram abordados apenas os métodos incorporação *in situ* e *ex situ* (impregnação).

Incorporação in situ

A incorporação *in situ* consiste na adição de lignina ou de seus derivados diretamente ao meio de cultivo durante a biossíntese da NCB, permitindo que esses compostos interajam com as fibrilas de celulose à medida que são produzidas pelas bactérias (Gao et al., 2019). Nessa abordagem, classificada como *bottom-up*, os agentes modificadores são introduzidos antes ou durante a formação da película, possibilitando sua integração simultânea ao desenvolvimento da matriz polimérica (Stumpf et al., 2018).

Uma das principais vantagens desse método é a elevada integração estrutural entre os componentes, uma vez que as moléculas adicionadas são progressivamente incorporadas à rede tridimensional de nanofibrilas em crescimento. Durante a biossíntese, estabelecem-se ligações de hidrogênio intermoleculares e emaranhamentos físicos entre a lignina e as cadeias de nanocelulose, favorecendo uma forte interação interfacial e a retenção permanente do aditivo na estrutura do material, mesmo após etapas intensivas de lavagem e purificação (Stumpf et al., 2018; Dhuga et al., 2021).

Apesar dessas vantagens, a incorporação *in situ* apresenta limitações relacionadas à elevada sensibilidade do sistema fermentativo. Concentrações excessivas de lignina ou de outros aditivos podem comprometer o crescimento microbiano e reduzir a produtividade da NCB, devido a alterações na disponibilidade de oxigênio e nutrientes e ao aumento do estresse metabólico durante a fermentação (Dhar et al., 2019). Além disso, o método pode oferecer menor controle sobre a quantidade efetivamente incorporada, uma vez que os aditivos interferem diretamente na cinética de biossíntese, na automontagem e no



empacotamento natural das nanofibrilas de celulose, podendo afetar a organização estrutural da matriz formada (Stumpf et al., 2018).

Incorporação ex situ por impregnação

A incorporação *ex situ* caracteriza-se pela produção prévia da nanocelulose bacteriana (NCB), seguida da introdução da lignina por meio de diferentes estratégias físicas ou físico-químicas. Entre os métodos disponíveis, esta revisão aborda especificamente a incorporação por impregnação em solução, uma das abordagens mais empregadas para a obtenção de biocompósitos de NCB/lignina.

Nesse método, a NCB previamente sintetizada é imersa em soluções ou dispersões contendo lignina, permitindo que suas moléculas difundam pela estrutura porosa da rede nanofibrilar e sejam adsorvidas por meio de ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas e outras forças intermoleculares (Vilela et al., 2019). Como a incorporação ocorre após a biossíntese da celulose, essa estratégia oferece maior controle sobre a composição final do material, permitindo ajustar a quantidade de lignina incorporada por meio da concentração da solução de impregnação e direcionar a funcionalização para regiões específicas da matriz, seja na superfície ou em todo o volume do material (Nair; Yan, 2017).

A eficiência do processo depende diretamente das características estruturais da NCB, especialmente da porosidade, da espessura e da área superficial específica da rede nanofibrilar, que influenciam a difusão e a distribuição homogênea da lignina ao longo da matriz tridimensional (Gorgieva; Trček, 2019; Portela et al., 2019). O transporte da lignina para o interior da estrutura ocorre predominantemente por difusão passiva (Stumpf et al., 2018). Entretanto, a elevada densidade e o reduzido tamanho dos poros da rede nanofibrilar podem limitar a velocidade de penetração e a eficiência da infiltração, especialmente em membranas mais espessas. Para minimizar essas restrições, diferentes estratégias têm sido empregadas, incluindo impregnação assistida por vácuo, tratamentos térmicos e ciclos de pressão, que favorecem a entrada da solução nos poros da matriz e promovem uma distribuição mais uniforme do aditivo (Wang et al., 2024).

Entre as principais vantagens da incorporação *ex situ* destacam-se a simplicidade operacional, o baixo custo e a elevada versatilidade do processo, uma vez que a modificação da NCB é realizada independentemente das etapas de cultivo microbiológico (Stumpf et al.,

2018). Além disso, a técnica apresenta boa reprodutibilidade e permite ajustar as propriedades finais do compósito de forma relativamente simples por meio da variação das condições de impregnação.

Apesar dessas vantagens, algumas limitações devem ser consideradas. A principal delas refere-se à distribuição heterogênea da lignina na matriz, decorrente da anisotropia estrutural característica da NCB. Durante a biossíntese, a face exposta ao ar tende a apresentar uma estrutura mais compacta e menos porosa que a face voltada para o meio de cultivo. Como consequência, a difusão do aditivo ocorre de forma desigual, favorecendo sua concentração nas regiões superficiais e dificultando a penetração homogênea até o núcleo do material (Farooq et al., 2019; Stumpf et al., 2018).

Outra limitação está relacionada à natureza das interações estabelecidas entre a lignina e a NCB. Em geral, a impregnação promove predominantemente interações físicas, como ligações de hidrogênio e forças de van der Waals, sem resultar em uma integração estrutural tão íntima quanto aquela observada em materiais obtidos por incorporação *in situ* ou por métodos que envolvem modificações químicas da matriz ou do aditivo. Consequentemente, a estabilidade da lignina incorporada pode ser reduzida, favorecendo sua lixiviação ou redistribuição durante o uso do material em determinadas condições de operação (Długa et al., 2021).

A incorporação de lignina na nanocelulose bacteriana (NCB) pode ser realizada por diferentes rotas de processamento, as quais influenciam diretamente a distribuição do aditivo, o grau de controle da composição, a escalabilidade do processo e a integridade estrutural da matriz. Entre os métodos mais empregados destacam-se a incorporação *in situ* e a impregnação pós-síntese. A Tabela 1 resume comparativamente essas abordagens, evidenciando que o método *in situ* favorece elevada homogeneidade de distribuição devido à incorporação durante a formação da rede fibrilar, porém apresenta menor controle do teor de lignina e maior impacto na estrutura da NCB. Em contraste, a impregnação permite maior preservação da morfologia original e maior escalabilidade, embora possa resultar em distribuição menos uniforme e controle apenas moderado da fração incorporada. Essa comparação evidencia que a seleção do método deve considerar o balanço entre eficiência de incorporação, preservação estrutural e viabilidade de aplicação em maior escala.

Tabela 1. Comparação entre métodos de incorporação de lignina em NCB.

Método	Homogeneidade de distribuição	Controle do teor de lignina	Escalabilidade	Impacto na estrutura da NCB	Evidência na literatura
<i>In situ</i>	Elevada	Baixo	Média	Elevado	Długa et al., 2021 ; Gao et al., 2019; Stumpf et al., 2018
<i>Ex situ</i> (impregnação)	Moderada	Médio	Alta	Baixo a moderado	Długa et al., 2021 ; Lizundia et al., 2021 ; Li et al., 2016

Impacto da incorporação de lignina nas propriedades da NCB

A incorporação de lignina à nanocelulose bacteriana (NCB) promove alterações significativas em suas propriedades mecânicas, ópticas, antioxidantes e morfológicas, cujos efeitos dependem da quantidade incorporada, da distribuição do aditivo na matriz e das interações estabelecidas entre os componentes.

No que se refere às propriedades mecânicas, a adição moderada de lignina pode contribuir para o reforço estrutural da matriz por meio do estabelecimento de interações intermoleculares com as nanofibrilas de celulose (Li et al., 2016). Entretanto, concentrações elevadas de lignina tendem a comprometer o empacotamento ordenado da rede nanofibrilar. Como a lignina é um polímero predominantemente amorfo e relativamente hidrofóbico, seu excesso pode reduzir a densidade de ligações de hidrogênio entre as fibrilas de celulose, gerando descontinuidades estruturais que resultam em diminuição da resistência à tração, do módulo elástico e da integridade mecânica dos filmes produzidos (Milano et al., 2021).

Entre os efeitos mais relevantes da incorporação de lignina destaca-se o aumento da capacidade de bloqueio da radiação ultravioleta. Devido à elevada concentração de estruturas aromáticas conjugadas e de grupos cromóforos, como carbonilas (C=O) e ligações duplas carbono-carbono (C=C), a lignina apresenta forte capacidade de absorção nas regiões ultravioleta (UV)-A e ultravioleta (UV)-B. A energia absorvida é posteriormente dissipada por mecanismos não radiativos, principalmente na forma de calor, reduzindo a degradação fotoquímica da matriz celulósica e ampliando o potencial de aplicação desses materiais em embalagens e revestimentos funcionais (Lizundia et al., 2021).

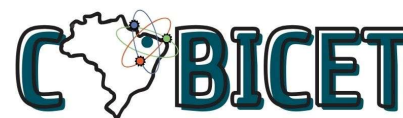
A lignina também confere propriedades antioxidantes aos biocompósitos devido à presença de grupos hidroxila fenólicos capazes de atuar como doadores de hidrogênio ou elétrons para neutralizar espécies reativas de oxigênio. Como consequência, observa-se

um aumento da atividade sequestradora de radicais livres, frequentemente avaliada pelos ensaios DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil) e ABTS (2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)), cuja eficiência tende a crescer com o teor de lignina incorporado à matriz. Essa característica é particularmente relevante para aplicações em embalagens ativas, sistemas biomédicos e materiais funcionais destinados à proteção contra processos oxidativos (Li et al., 2022).

Do ponto de vista morfológico, a incorporação de lignina é frequentemente associada a tratamentos mecânicos e físico-químicos que promovem a desagregação das fibras celulósicas e a reorganização da rede nanofibrilar. Durante a secagem, ocorre um rearranjo estrutural das nanofibrilas, resultando na formação de matrizes mais compactas, com organização lamelar e redução da porosidade. Essas modificações podem alterar significativamente a rugosidade superficial, a densidade aparente e as propriedades de transporte de massa dos materiais, influenciando diretamente seu desempenho em aplicações que exigem propriedades de barreira, resistência mecânica ou condução iônica (Berglund et al., 2017; Suopajarvi et al., 2020).

Adicionalmente, em sistemas voltados a aplicações eletroquímicas, a incorporação de lignina pode influenciar positivamente a condutividade protônica da NCB. A presença de grupos funcionais oxigenados, como hidroxilas fenólicas e carbonílicas, pode favorecer a formação de redes de ligação de hidrogênio e a retenção de moléculas de água, criando caminhos facilitados para o transporte de prótons (Li et al., 2023; Souza et al., 2023). Esse efeito, associado à modificação da microestrutura e da porosidade da matriz, pode contribuir para o aumento da mobilidade protônica, sendo particularmente relevante em membranas para células a combustível e dispositivos eletroquímicos baseados em biopolímeros (Souza et al., 2023).

De modo geral, a incorporação de lignina representa uma estratégia promissora para ampliar as



funcionalidades da NCB, permitindo o desenvolvimento de biocompósitos sustentáveis com propriedades ajustáveis para aplicações em embalagens, membranas, dispositivos eletroquímicos e materiais biomédicos.

Principais desafios

Entre os principais desafios associados ao desenvolvimento de compósitos celulose–lignina, destaca-se, inicialmente, a limitação relacionada à compatibilidade química entre os componentes. A natureza altamente hidrofílica da celulose contrasta com o caráter predominantemente hidrofóbico e amorfo da lignina, o que resulta em baixa afinidade interfacial. Na ausência de uma dispersão eficiente em escala nanométrica, ocorre segregação de fases durante processos de formação de filmes, especialmente na etapa de secagem. Esse fenômeno origina descontinuidades estruturais e vazios internos que atuam como concentradores de tensão, comprometendo significativamente a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dos materiais (Oun et al., 2022).

Outro desafio relevante refere-se à quantificação precisa da lignina incorporada em matrizes de nanocelulose. Técnicas espectroscópicas e ópticas, como espectroscopia ultravioleta-visível (UV-Vis) e Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), frequentemente apresentam limitações devido ao intenso espalhamento de luz (light scattering) promovido pela rede densa e altamente compactada de nanofibrilas. Esse efeito gera interferências no sinal óptico, dificultando a detecção e a quantificação de cromóforos aromáticos. Como consequência, métodos destrutivos, como a hidrólise ácida baseada no método de Klason, ainda são amplamente utilizados, embora provoquem alterações químicas na estrutura original da amostra (Lu et al., 2021).

A reprodutibilidade dos processos de obtenção dos compósitos também constitui um fator crítico. Métodos assistidos por ultrassom e técnicas de extração com solventes considerados “verdes” são altamente sensíveis a pequenas variações nos parâmetros operacionais, como intensidade de cavitação, gradientes locais de temperatura e taxas de cisalhamento. Essas variações afetam diretamente o grau de desfibrilação da biomassa, resultando em diferenças significativas entre lotes, com heterogeneidade no diâmetro das fibras e instabilidade nas propriedades mecânicas do material final (Peleteiro et al., 2021).

Adicionalmente, o escalonamento industrial representa um desafio relevante, especialmente devido ao comportamento reológico complexo das suspensões de nanocelulose. Esses sistemas apresentam forte caráter pseudoplástico e tixotrópico,

com aumento acentuado da viscosidade à medida que a escala nanométrica das fibras é alcançada. Esse comportamento implica elevadas perdas de carga em sistemas de transporte, maior demanda energética para bombeamento e frequentes problemas de entupimento (clogging) em tubulações, bicos injetores e equipamentos de processamento contínuo, limitando a viabilidade de processos em escala industrial (Hubbe et al., 2017).

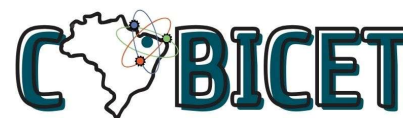
No contexto de aplicações em membranas de troca de prótons, surgem desafios adicionais relacionados ao equilíbrio entre condutividade protônica, estabilidade estrutural e controle de hidratação. Embora a incorporação de lignina possa contribuir para a formação de redes de ligação de hidrogênio e para a retenção de água, essenciais ao transporte de prótons, o excesso de lignina pode reduzir a continuidade das vias hidrofílicas na matriz, prejudicando a eficiência de condução iônica (Shin et al., 2020). Além disso, a estabilidade química em meios ácidos e sob condições eletroquímicas operacionais, bem como a durabilidade mecânica em estado hidratado, constituem limitações importantes para a aplicação desses biocompósitos em dispositivos como células a combustível. Assim, a otimização simultânea da microestrutura, da distribuição da lignina e do grau de hidratação torna-se um ponto crítico para viabilizar o desempenho funcional dessas membranas (Karimi et al., 2017).

CONCLUSÃO

A análise dos diferentes métodos de incorporação de lignina na NCB evidencia que cada rota apresenta vantagens e limitações específicas, diretamente relacionadas ao mecanismo de interação entre os componentes e às condições de processamento.

No método *in situ*, observa-se uma melhor integração estrutural da lignina à matriz celulósica, uma vez que sua incorporação ocorre simultaneamente à biossíntese da NCB. Esse processo favorece o aprisionamento da lignina na rede nanofibrilar e a formação de estruturas mais interconectadas. Contudo, essa abordagem apresenta limitações relevantes, como a possível inibição do metabolismo bacteriano e a restrição do teor máximo de lignina incorporável, o que pode comprometer a produtividade do sistema.

Em contraste, o método *ex situ* destaca-se pela simplicidade operacional e pela elevada eficiência de incorporação em termos de massa polimérica. Entretanto, a difusão passiva da lignina para dentro da matriz já formada tende a ser limitada, especialmente em função da porosidade não uniforme da NCB. Como consequência, pode ocorrer distribuição heterogênea do aditivo, com concentração preferencial em regiões superficiais e menor penetração no interior do material.



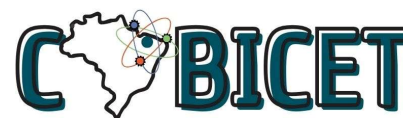
Apesar dos avanços alcançados, a aplicação em escala industrial desses biocompósitos ainda depende de melhorias significativas, especialmente no que se refere à padronização dos métodos de incorporação, ao controle reológico dos sistemas dispersos e à otimização das interações interfaciais entre lignina e nanocelulose bacteriana, de modo a garantir reprodutibilidade, desempenho funcional e viabilidade tecnológica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, O. Y.; HULTEBERG, C. P. Physicochemical Characterisation of Technical Lignins for Their Potential Valorisation. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 3, p. 859–869, 2017.
- BERGLUND, L. et al. Switchable ionic liquids enable efficient nanofibrillation of wood pulp. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 4, p. 3265–3275, 2017.
- CAMPANO, C.; BALEA, A.; BLANCO, A.; NEGRO, C. Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. **Cellulose**, v. 23, n. 1, p. 57–91, 2016.
- DHAR, P.; ETULA, J.; BANKAR, S. B. *In Situ* Bioprocessing of Bacterial Cellulose with Graphene: Percolation Network Formation, Kinetic Analysis with Physicochemical and Structural Properties Assessment. **ACS Applied Polymer Materials**, v. 1, n. 5, p. 1010–1022, 2019.
- DŁUGA, A.; KOWALONEK, J.; KACZMAREK, H. Bionanocellulose/poly(vinyl alcohol) composites produced by in-situ method and ex-situ/impregnation or sterilization methods. **Materials**, v. 14, n. 21, p. 6340, 2021.
- FAROOQ, M. et al. Strong, ductile, and waterproof cellulose nanofibril composite films with colloidal lignin particles. **Biomacromolecules**, v. 20, n. 2, p. 693–704, 2019.
- GADIM, T. D. O. et al. Protonic conductivity and fuel cell tests of nanocomposite membranes based on bacterial cellulose. **Electrochimica Acta**, v. 233, p. 52–61, 2017.
- GAO, M.; LI, J.; BAO, Z. et al. A natural in situ fabrication method of functional bacterial cellulose using a microorganism. **Nature Communications**, v. 10, art. 437, 2019.
- GORGIEVA, S.; TRČEK, J. Bacterial cellulose: production, modification and perspectives in biomedical applications. **Nanomaterials**, v. 9, n. 10, p. 1352, 2019.
- HUANG, Y.; ZHU, C.; YANG, J.; NIE, Y.; CHEN, C.; SUN, D. The nanofication and functionalization of bacterial cellulose and its applications. **Nanomaterials**, Basel, v. 10, n. 3, p. 1–31, 2020.
- HUBBE, M. A. et al. Rheology of nanocellulose-rich aqueous suspensions: A Review. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 9556–9661, 2017.
- KARIMI, M. B.; RAHIMI, M.; ARZANI, K. A review of proton exchange membranes: materials, performance and durability in fuel cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 654–677, 2017.
- LI, J. et al. Lignin-based functional materials. **Industrial Crops and Products**, 2016.
- LI, W.; SHI, J. Lignin-derived carbon material for electrochemical energy storage applications: Insight into the process-structure-properties-performance correlations. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 11, p. 1121027, 2023.
- LIZUNDIA, E. et al. Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids. **Green Chemistry**, v. 23, n. 16, p. 5345–5370, 2021.
- LU, F.; WANG, C.; CHEN, M.; YUE, F.; RALPH, J. A facile spectroscopic method for measuring lignin content in lignocellulosic biomass. **Green Chemistry**, v. 23, p. 5106–5112, 2021.
- NAIR, S. S.; YAN, N. Effect of high residual lignin on the thermal stability of nanofibrillated cellulose prepared from spruce bark. **Cellulose**, v. 24, n. 2, p. 675–689, 2017.
- OUN, A. A.; RHIM, J. W. Preparation and characterization of lignin-based nanocomposite materials for advanced applications. **Carbohydrate Polymers**, 2022.
- PELETEIRO, S.; RABELO, S. C.; VARANDA, M.; GÍRIO, F. M. Optimization of lignocellulosic biomass pretreatment using green solvents and process intensification strategies. **Bioresource Technology**, v. 326, 124743, 2021.
- PORTELA, R.; LEAL, C. R.; ALMEIDA, P. L.; SOBRAL, R. G. Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications. **Microbial Biotechnology**, v. 12, n. 4, p. 586–610, 2019.
- RESHMY, R. et al. Bacterial nanocellulose: engineering, production, and applications. **Bioengineered**, v. 12, n. 2, p. 11463–11483, 2021.



SAMYN, P. et al. Opportunities for bacterial nanocellulose in biomedical applications: Review on biosynthesis, modification and challenges. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 234, p. 123610, 2023.

SHARMA, C.; BHARDWAJ, N. K. Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives. **Industrial Crops and Products**, v. 138, p. 111442, 2019.

SHIN, J.; LIU, Y.; YU, S.; LEE, S. B. Recent advances in proton exchange membranes for fuel cells: design principles and performance optimization. **Journal of Membrane Science**, v. 595, 117516, 2020.

SOUZA, L. et al. Lignin-incorporated bacterial nanocellulose for proton exchange membranes in microbial fuel cells. **Materials Chemistry and Physics**, 2023.

STUMPF, T. R. et al. In situ and ex situ modifications of bacterial cellulose for applications in tissue engineering. **Materials Science and Engineering: C**, v. 93, p. 1024–1041, 2018.

TIAN, D. et al. Bacterial cellulose/lignin nanoparticles composite films with retarded biodegradability. **Carbohydrate Polymers**, v. 274, 2021.

TROVAGUNTA, R.; ZOU, T.; ÖSTERBERG, M.; KELLEY, S. S.; LAVOINE, N. Design strategies, properties and applications of cellulose nanomaterials-enhanced products with residual, technical or nanoscale lignin—A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 254, e117480, 2021.

VASCONCELOS, N. F. et al. Bacterial cellulose: characteristics and applications. **Polymer Reviews**, v. 55, n. 4, p. 615–644, 2015.

VILELA, Carla *et al.* Nanocellulose-based materials as components of polymer electrolyte fuel cells. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 7, n. 35, p. 20045–20074, 2019.

WANG, J.; LI, C.; TANG, Y. Constructing bacterial cellulose and its composites: regulating treatments towards applications. **Cellulose**, v. 31, p. 7793–7817, 2024.

WANG, J.; ZHANG, D.; CHU, F. Wood-derived functional polymeric materials. **Advanced Materials**, Weinheim, v. 33, n. 28, e2001135, 2021.

WANG, X. et al. Towards efficient production and application of bacterial cellulose: the progress from conventional to advanced production. **Materials Today Sustainability**, v. 33, p. 101299, 2026.

XU, D.; LI, B.; TATEYAMA, S.; ESAKI, O.; KUMAR, M.; KOBAYASHI, S. Lignin-based proton-conducting membranes for sustainable energy

applications. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 40, p. 15099–15108, 2020.