

MEMBRANA DE NANOCELULOSE BACTERIANA INCORPORADA COM ÓXIDO DE GRAFENO: UMA BREVE REVISÃO

Júlia da Silva Russi^{1,2}, Yasmin Franz Albano², Derce de Oliveira Souza Recouvreux^{1,2},
Claudimir Antonio Carminatti^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM),
Joinville, Brasil, (silva98julia@gmail.com)

²Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, Brasil

Resumo: A nanocelulose bacteriana (NCB) é um biomaterial renovável com propriedades promissoras para diversas aplicações. Esta revisão bibliográfica avaliou a incorporação do óxido de grafeno (GO) à NCB, destacando métodos de síntese, caracterização e aplicações. Os estudos demonstraram melhorias nas propriedades físico-químicas, térmicas e mecânicas do nanocompósito, evidenciando seu potencial em aplicações biomédicas, ambientais e tecnológicas.

Palavras-chave: Biomateriais; Compósitos, Nanocelulose bacteriana; Óxido de grafeno.

INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma crescente demanda por soluções rápidas e sustentáveis a partir de materiais renováveis. Nesse sentido, os biopolímeros aparecem como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de novos materiais (Kniep et al., 2025).

A nanocelulose bacteriana (NCB) é uma estrutura tridimensional composta por nanofibrilas de diâmetro entre 20 e 100 nm sintetizada por bactérias (Souza et al., 2023). É um material promissor por ser mais resistente do que o aço em escala nanométrica, além de apresentar uma estrutura altamente polimerizada e cristalina (Kniep et al., 2025).

Diversos estudos vêm sendo realizados para a aplicação de novos materiais à NCB, de modo a melhorar suas características (Nguyen et al., 2025). Nesse sentido, destaca-se o óxido de grafeno (GO) - um material bidimensional com espessura atômica - devido às suas excelentes propriedades térmicas, elétricas e mecânicas (Amaturrahim et al., 2018).

As propriedades físico-químicas do GO unidas à biodegradabilidade e baixo custo da NCB tornam esse nanocompósito aplicável em diversas áreas, desde agentes cicatrizantes (Khalid et al., 2026) até adsorventes de corantes em efluentes (Walling et al. 2023).

Entretanto, a grande área superficial dificulta sua incorporação na matriz compósita, levando a uma baixa dispersão e diminuição de suas propriedades físico-químicas (Qamar et al., 2024).

Este artigo tem como objetivo fornecer uma breve revisão sobre a produção da nanocelulose bacteriana funcionalizada com óxido de grafeno (NCB/GO) e suas aplicações em diferentes áreas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nanocelulose Bacteriana (NCB)

A nanocelulose bacteriana (NCB) (Figura 1) é um polissacarídeo randômico formado por uma rede de nanofibrilas interligadas em uma matriz polimérica (Melro et al., 2025), produzida por bactérias não patogênicas sob a forma de um hidrogel na superfície do meio de cultivo (Cesa, 2022).

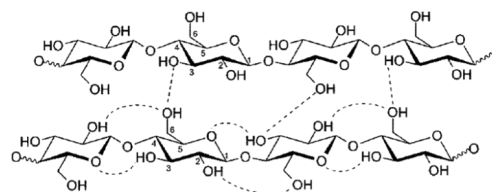


Figura 1. Ligações de hidrogênio intra e intermoleculares na celulose (Pinkert et al., 2009).

A NCB apresenta excelente retenção de água (cerca de 200 vezes sua massa seca), cristalinidade (entre 70 a 90%), flexibilidade e estabilidade térmica, além de ser biodegradável e de baixo custo. Tais características conferem ao material inúmeras aplicações, como nas áreas têxtil, cosmética e produtos comestíveis, e como membrana de troca de prótons (MTP) em células a combustível microbianas (CCM) (Figura 2) (Mishra, 2018; Souza et al., 2023).

A estrutura tridimensional característica da NCB aumenta a sua porosidade, tornando possível a incorporação entre suas nanofibrilas de diferentes partículas, permitindo assim sua aplicação nas áreas farmacêutica (liberação controlada de fármacos) e de tratamento de efluentes (adsorção de metais pesados e corantes de natureza carcinogênica em águas residuais) (Walling et al., 2023; Melro et al., 2025).

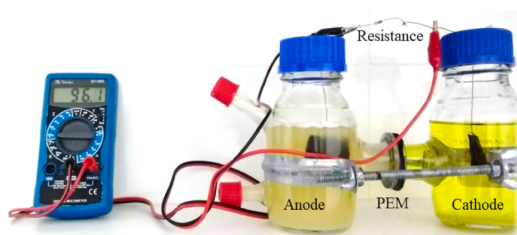


Figura 2. NCB aplicada como MTP em CCM (Souza et al., 2023).

Estudos demonstram que a NCB atua como uma malha filtrante, impedindo a entrada de agentes microbianos e reduzindo o risco de infecções. Entretanto, sua estrutura porosa permite a passagem de fluidos e trocas gasosas. Assim, torna-se passível de ser aplicada também na área médica para o desenvolvimento de curativos e tecidos funcionais (Khalid et al., 2026).

Método de Cultura

Cultura estática é a técnica mais comum para obtenção do hidrogel de celulose. Na metodologia mais tradicional, bactérias produtoras de celulose bacteriana, como a *Komagataeibacter hansenii*, são mantidas em temperatura controlada entre 25 e 30 °C por 2 a 20 dias utilizando meios sintéticos, como o meio *Hestrin-Schramm*, onde a glicose é utilizada como fonte de carbono, o extrato de levedura como fonte de nitrogênio e o pH é mantido entre 3 e 8 utilizando um tampão citrato-fosfato (Melro et al., 2025).

Na cultura estática, a síntese da NCB ocorre na interface ar-líquido, onde a disponibilidade de oxigênio é maximizada. Com o crescimento da membrana, a difusão de oxigênio e a disponibilidade de nutrientes para as bactérias torna-se progressivamente limitada, reduzindo a taxa de síntese do material. Assim, o tempo de incubação se configura como o principal parâmetro de controle da espessura final do material (Brandes et al., 2017).

Todavia, em razão do elevado custo dos meios de cultura e da dificuldade de manutenção da assepsia em larga escala, o método dinâmico consolidou-se como uma alternativa mais viável. Dessa maneira, resíduos agrícolas e industriais podem ser empregados como fontes de carbono, enquanto a agitação contínua do sistema promove o aumento do oxigênio dissolvido e melhora a disponibilidade de nutrientes, resultando em maiores taxas de biossíntese (Melro et al., 2025).

A morfologia e as propriedades físicas da NCB são diretamente influenciadas pelo método de cultivo. Na cultura estática ocorre a formação de membranas que reproduzem o formato do recipiente, enquanto na cultura dinâmica, o formato e o tamanho do material variam em função da rotação do sistema, resultando

em esferas, grânulos ou aglomerados irregulares. Ademais, no método dinâmico, a cristalinidade e as propriedades mecânicas são inferiores em decorrência de variações no grau de polimerização e na organização das nanofibrilas (Brandes et al., 2017).

Purificação

As bactérias e outras impurezas representam risco à segurança e saúde humana, além de impactarem na qualidade e características das fibras. Portanto, após a produção, deve-se submeter a NCB a diversos processos de purificação (Melro et al., 2025).

Para as bactérias do gênero *Komagataeibacter*, a NCB é submergida em solução alcalina para degradar as regiões amorfas da celulose e converter o polímero de celulose I em II. Por apresentar uma ligação de hidrogênio adicional, a NCB purificada é termodinamicamente mais estável e apresenta propriedades aprimoradas (Melro et al., 2025).

Em específico sobre a bactéria *Komagataeibacter hansenii*, após adição em banho de hidróxido de potássio (KOH) 1 M por 48 horas a temperatura ambiente, deve ser tratada com solução de ácido clorídrico (HCl) 0,5 M por 1 hora e, posteriormente, submetida a sucessivas lavagens com água destilada até pH neutro (Souza, 2021).

Funcionalização

Materiais podem ser incorporados às nanofibrilas de celulose bacteriana por duas metodologias: *in situ* ou *ex situ* (Wang et al., 2019).

Na metodologia *in situ*, a adição do material ocorre junto aos nutrientes e ao inóculo em um sistema com ou sem agitação. Dessa forma, é possível incorporar um aditivo ou reforço ao material para controlar sua estrutura, formato e propriedades (Wang et al., 2019).

Já na metodologia *ex situ*, a modificação é realizada após a produção da NCB em um sistema agitado (Figura 3), resultando na formação de biofilmes esféricos com estrutura hidrofílica, alta porosidade e ampla área superficial (Wang et al., 2019).



Figura 3. Incorporação da lignina por metodologia *ex situ* agitada (Souza, 2021).

Óxido de grafeno (GO)

O grafeno é um alótropo do carbono que consiste em uma única camada de átomos de carbono arranjados em uma estrutura hexagonal bidimensional (2D) e é um bloco básico para construção de materiais grafiticos de outras dimensões, como os nanotubos de carbono e os fulerenos. Esse arranjo atômico especial proporciona ao grafeno propriedades verdadeiramente únicas, sendo um extraordinário condutor de calor e eletricidade. Atualmente é o material mais fino e mais forte, sendo mais forte e leve que o aço. Como o grafeno é constituído de apenas um átomo de espessura, é transparente e flexível, possui grande potencial para aplicações eletrônicas e biomédicas justificado pela alta mobilidade de elétrons livres e pelas suas excelentes propriedades físicas e químicas. O grafeno é geralmente preparado pela redução do seu precursor, o grafite óxido (Ibrahim et al., 2021; Urade, A. R. et al., 2023).

As pesquisas sobre a funcionalização de NCB com grafeno têm aumentado significativamente ao longo dos anos, impulsionadas devido às suas propriedades e potenciais aplicações (Nguyen et al., 2025).

A forma oxidada do grafeno, denominada óxido de grafeno (GO), tem sido estudada como reforço em compósitos poliméricos, incluindo matrizes de poli(álcool vinílico), quitosana, poli(acrilamida), poli(acrilato de sódio), poli(hidroetilmacetato), epóxi e nanocelulose (Amaturrahim et al., 2018), ou compondo-se com outros nanomateriais (Ag, TiO_2) para análise das propriedades antimicrobianas (Khalid et al., 2026). Possui módulo de elasticidade igual a 207,06 GPa, resistência térmica de $10^{-12} \Omega/\text{m}^2$ e espessura de uma única camada de 1 nm (Amaturrahim et al., 2018).

Estruturalmente, o GO apresenta uma rede hexagonal composta por carbonos hibridizados sp^3 e sp^2 , contendo grupos funcionais oxigenados, como hidroxila, carboxila e epóxi, interligados em nanofolhas, conforme Figura 4. A presença desses grupos confere ao material elevada compatibilidade com a celulose, principalmente devido à formação de ligações de hidrogênio, favorecendo o desenvolvimento de nanocompósitos estáveis e o fortalecimento da matriz. Adicionalmente, tais características resultam em propriedades anfífilas, permitindo interações de empilhamento π com contaminantes orgânicos (Walling et al., 2023).

A principal dificuldade na utilização do grafeno reside na sua dispersão adequada na matriz, especialmente em razão do empilhamento de suas folhas, das forças de van der Waals e da insolubilidade na matriz, fatores que favorecem sua precipitação (Qamar et al., 2024).

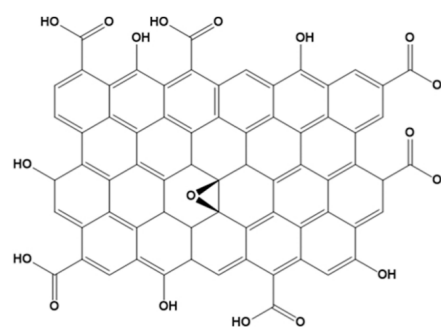


Figura 4. Estrutura do grafeno (Qamar et al., 2024).

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa bibliográfica de artigos publicados foi realizada na base de dados Scopus. Para isso, foram utilizados os termos “*bacterial nanocellulose*”, “*bacterial cellulose*” e “*graphene*”, adicionando o operador “AND”, com limitação de publicação entre 2016 a 2026 e foco em título, resumo e palavras-chave.

Nessa pesquisa foram encontradas 66 publicações, dentre elas 48 foram artigos, 13 foram artigos de revisão, 3 foram capítulos de livros e 2 foram trabalhos de conferência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca por artigos sobre nanocelulose bacteriana incorporada com grafeno permitiu a elaboração do gráfico presente na Figura 5, com um pico em 2021 com 12 publicações. Entretanto, a quantidade de trabalhos ainda é pequena quando comparada às importantes aplicações do material.



Figura 5. Publicações ao longo dos anos sobre nanocelulose bacteriana e grafeno a partir da base de dados Scopus (Autora, 2026).

Nesse contexto, Khalid et al. (2026) sintetizaram membranas de NCB/GO pelo método *ex situ* para o tratamento de feridas em pacientes diabéticos. Após o preparo, foram feitas as análises físico-químicas e antibacterianas, determinando a cicatrização em camundongos diabéticos. Conforme a Figura 6, após

21 dias de tratamento com NCB/GO, as feridas alcançaram um fechamento comparável à aplicação da pomada comercial Polyfax™. Já a NCB sem funcionalização não alcançou um resultado promissor devido à ausência do componente antibactericida.



Figura 6. Tratamento de feridas em pacientes diabéticos (Adaptada de Khalid et al., 2026).

Nguyen et al. (2025) sintetizaram membranas de NCB/GO com diferentes proporções volumétricas para garantir os melhores resultados de propriedades mecânicas com a quantidade ideal de cada material. Essas membranas foram aplicadas para a adsorção de íons do metal pesado Cr(VI), avaliadas sob condições como tempo, temperatura, pH, taxa de agitação e dosagem de adsorvente. As análises demonstraram que a proporção volumétrica de NCB para grafeno de 1:6 apresentou a maior resistência à tração: 96,79 GPa (um aumento de 21% comparado à NCB sem funcionalização). NCB/GO acima da proporção 1:6 tende a diminuir suas propriedades mecânicas devido à dispersão irregular e ao fenômeno de sobredosagem, em que a quantidade de GO ultrapassa a capacidade de interação com a NCB, criando zonas de fragilidade. A análise microscópica e morfológica revelou a integração efetiva entre fibras de nanocelulose e óxido de grafeno. Por fim, as análises de adsorção de Cr(VI) demonstraram que as melhores condições para a adsorção foram: tempo de adsorção de 160 min, temperatura de 313 K, taxa de agitação de 150 rpm, pH 3 e dosagem de adsorvente de 0,1 g, chegando a um melhor resultado na proporção NCB/GO de 1:6 com 18,69 mg.g⁻¹.

Amaturrahim et al. (2018) focaram sua pesquisa na preparação de nanocompósitos de NCB/GO por metodologia *in situ* em cultura agitada. Em comparação à NCB pura, as análises mecânicas da NCB/GO apresentaram melhoria na resistência à tração (aumento de 30%) e no módulo de Young

(aumento de 76%). Já a análise morfológica indicou que o material nanoparticulado apresentou uma dispersão adequada na rede de celulose bacteriana e que o método de agitação aumentou significativamente os poros entre as fibrilas.

Walling et al. (2023) aplicaram a metodologia *in situ* para sintetizar membranas de NCB/GO, com adição do nanoparticulado em três diferentes momentos: no primeiro dia junto ao inóculo, no terceiro dia após a formação da película e a cada três dias após a formação da película durante 14 dias de inoculação (Figura 7). As membranas obtidas foram aplicadas no tratamento de efluentes como adsorventes dos corantes Laranja de Acridina e Rodamina B. A análise morfológica e microestrutural indicou que, na primeira abordagem, a superfície do compósito tornou-se lisa e com características fibrilares reduzidas. Já na segunda abordagem, houve o empilhamento de nanocelulose alternada com GO, característico de um processo camada por camada. Na terceira abordagem, houve a formação de uma superfície granular. Os ensaios físico-químicos, mecânicos e de adsorção dos corantes indicaram que a adição do grafeno no primeiro dia junto ao inóculo resultou em características superiores, visto que permitiu uma integração mais adequada entre as fibras da celulose e o grafeno. Em contrapartida, a segunda abordagem levou a dispersão apenas na superfície da matriz - sem a permeação nas fibras - e a terceira levou a superdosagem de material nanoparticulado.



Figura 7. NCB/GO produzidas a partir da primeira, segunda e terceira abordagem, respectivamente (Walling et al., 2023).

Nguyen et al. (2023) produziram NCB/GO por metodologia *ex situ* (Figura 8) com diferentes concentrações para a remoção de íons As(III) em amostras de água. Nos testes de resistência à tração, módulo de Young e alongamento até a ruptura foi perceptível uma melhora ao aumentar o teor de GO. Os melhores resultados foram alcançados na proporção 1:7 de NCB/GO (aumento de 18% para resistência à tração, 220% para módulo e 72% para alongamento). Essa melhoria é atribuída à distribuição uniforme das nanofibras de celulose bacteriana nas folhas de GO - fator comprovado

pelos autores pela análise microscópica e morfológica. No entanto, ao aumentar a proporção para 1:9, as propriedades mecânicas diminuíram, indicando um limiar na quantidade de GO. As amostras de NCB/GO 1:7 alcançaram também a maior eficiência de absorção de íons As(III) em pH 6 durante 160 minutos.

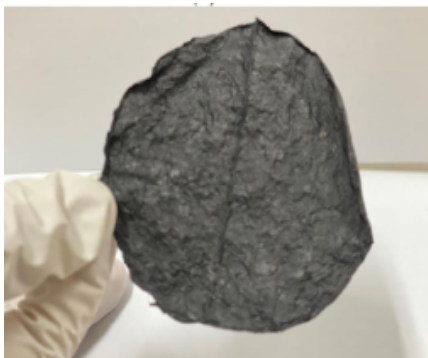


Figura 8. NCB/GO produzida por metodologia *ex situ* em proporção 1:7 (Nguyen et al., 2023).

Challa et al. (2025) sintetizaram biocompósitos de NCB, GO e hidroxiapatita (HAp) por metodologia *in situ* e *ex situ* para aplicação na engenharia de tecido ósseo. A HAp foi escolhida como parte do compósito devido às suas propriedades osteocondutoras. Os autores utilizaram fontes alternativas sustentáveis para a produção de NCB, GO e HAp: suco de maçã, resíduos de borra de café e cascas de ovos, respectivamente. Os testes experimentais indicaram que a metodologia *ex situ* com ultrasonicação apresentou resultados mais favoráveis na incorporação das nanopartículas na matriz da NCB. A incorporação de GO aumentou a resistência à tração e o módulo de Young em cerca de 25% e 35%, respectivamente. Já a adição de HAp aumentou a bioatividade e favoreceu a proliferação de células osteoblásticas.

CONCLUSÃO

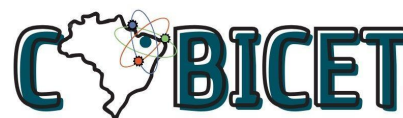
A incorporação de óxido de grafeno as nanofibrilas de celulose bacteriana constituem uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais com propriedades físico-químicas, térmicas e mecânicas aprimoradas.

Foi possível observar que fatores como metodologia de incorporação, ponto de adição do nanoparticulado e a proporção entre os componentes influenciam diretamente nas propriedades do compósito.

Embora o número de publicações sobre NCB/GO tenha aumentado nos últimos anos, a área ainda apresenta oportunidades para novas investigações, podendo assim expandir para demais aplicações biomédicas, ambientais e tecnológicas como uma alternativa sustentável.

REFERÊNCIAS

- AMATURRAHIM, S. A. et al. Preparation of graphene oxide/bacterial cellulose nanocomposite via *in situ* process in agitated culture. *Asian Journal of Chemistry*, Chemical Publishing Co., v. 30, p. 1564–1568, 2018.
- BRANDES, R. et al. A mini-review on the progress of spherical bacterial cellulose production. *Journal of Nano Research*, v. 45, p. 142–154, 2017.
- CESA, M. Membrana de Nanocelulose Bacteriana/Grafite para Aplicação como Membrana de Troca de Prótons em Células a Combustível Microbianas. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- CHALLA, A. A. et al. Bacterial Cellulose/Graphene Oxide/Hydroxyapatite Biocomposite: A Scaffold from Sustainable Sources for Bone Tissue Engineering. *ACS Applied Materials and Interfaces*, v. 17, p. 572–582, 2025.
- KHALID, A. et al. *In vivo* and molecular analysis of bacterial cellulose incorporated graphene oxide for diabetic wound healing. *Materials Today Communications*, Elsevier BV, p. 114693, 2026.
- KNIEP, J. et al. Biofabricating Three-Dimensional Bacterial Cellulose Composites Using Waste-Derived Scaffolds. *Applied Sciences*, 2025.
- IBRAHIM, A. et al. Graphene-Based Nanocomposites: Synthesis, Mechanical Properties, and Characterizations. *Polymers*, v. 13, p. 2869, 2021.
- MELRO, L. et al. Bacterial nanocellulose as a versatile scaffold for biomedical applications: Synthesis, functionalization, and future prospects. Elsevier Ltd, 2025.
- MISHRA, R. K.; SABU, A.; TIWARI, S. K. Materials chemistry and the futurist eco-friendly applications of nanocellulose: Status and prospect. Elsevier B.V. p. 949–978, 2018.
- NGUYEN, T. A. et al. Research to develop the ability to remove As(III) ions in water of an environmentally friendly hybrid material based on bacterial cellulose and graphene oxide. *Vietnam Academy of Science and Technology and Wiley-VCH GmbH*, v. 62, p. 600–614, 2024.
- NGUYEN, T. A. et al. Exploring graphene oxide and bacterial cellulose for Cr(VI) removal from water. *Vietnam Journal of Chemistry*, John Wiley and Sons Inc, 2025.



PINKERT, A. et al. Ionic liquids and their interaction with cellulose. *Chemical Reviews*, v. 109, n. 12, p. 6712–6728, 2009.

QAMAR, S. Graphene dispersion, functionalization techniques and applications: a review. *Synthetic Metals*, 2024.

RÜCKL, K. et al. Nanocelulose bacteriana aplicada como membrana de troca de prótons em célula a combustível microbiana: uma breve revisão. *Anais do IV CoBICET*, 2023.

RÜCKL, K. Membrana de Nanocelulose Bacteriana Funcionalizada com Sulfato de Condroitina para Aplicações em Células a Combustível Microbianas. *Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.*

SOUZA, L. Membrana de Troca de Prótons com base em Nanocelulose/Lignina para aplicações em Células Combustíveis. *Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.*

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

URADE, A. R.; LAHIRI, I.; SURESH, K.S. Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review. *The Minerals, Metals & Materials Society*, v. 75, 2023.

WALLING, B. et al. In-situ biofabrication of bacterial nanocellulose (BNC)/graphene oxide (GO) nano-biocomposite and study of its cationic dyes adsorption properties. *International Journal of Biological Macromolecules, Elsevier B.V.*, v. 251, 2023.

WANG, J. et al. Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. *Carbohydrate*, p. 63-76, 2019.