

COMPÓSITOS À BASE DE ALGINATO E ÓXIDO DE GRAFENO EM TÊXTEIS MÉDICOS: APLICAÇÕES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

ALGINATE AND GRAPHENE OXIDE COMPOSITES IN MEDICAL TEXTILES: APPLICATIONS, CHALLENGES, AND FUTURE PROSPECTS

COMPUESTOS A BASE DE ALGINATO Y ÓXIDO DE GRAFENO EN TEXTILES MÉDICOS: APLICACIONES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS
TÍTULO EM ESPANHOL

Joyce Rezende dos Santos¹, Sirlene Maria da Costa², Larissa Midori Yamaguti³, Ana Champi⁴,
Silgia Aparecida da Costa⁵

DOI: 10.54899/dcs.v23i86.4310

Recibido: 19/12/2025 | Aceptado: 16/01/2026 | Publicación en línea: 21/01/2026.

RESUMO

Têxteis médicos são materiais projetados para uso em aplicações na área da saúde, podendo ser fabricados a partir de diversas matérias-primas. O alginato é um biopolímero bastante estudado e utilizado na produção de fibras, filmes, hidrogéis, *scaffolds* e curativos para o desenvolvimento de têxteis médicos. Materiais derivados de biopolímeros podem apresentar baixa resistência à tração e à compressão, mas a adição de outros materiais, como o óxido de grafeno, pode melhorar essas propriedades, bem como conferir atributos adicionais. O óxido de grafeno vem sendo estudado para aplicações em têxteis médicos devido às suas múltiplas propriedades, como alta resistência mecânica, boa biocompatibilidade e propriedades antimicrobianas, podendo ser ainda associado a outros materiais com o objetivo de funcionalizá-los. Este trabalho teve como objetivo reunir as principais informações sobre as aplicações atuais, os desafios e as perspectivas futuras do uso de alginato e óxido de grafeno na produção de compósitos para têxteis médicos.

Palavras-chave: Alginato. Óxido de Grafeno. Compósitos. Têxteis Médicos. Biopolímeros.

ABSTRACT

Medical textiles are materials designed for use in healthcare applications and can be manufactured from a variety of raw materials. Alginate is a widely studied biopolymer used in the production

¹ Mestre em Têxtil e Moda, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil.

E-mail: joycerezendee@alumni.usp.br

² Doutora em Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil.

E-mail: sirlene@usp.br

³ Mestre em Têxtil e Moda, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil.

E-mail: larissa.yamaguti@alumni.usp.br

⁴ Doutora em Física, Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, São Paulo, Brasil.

E-mail: ana.champi@ufabc.edu.br

⁵ Doutora em Engenharia Têxtil, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil.

E-mail: silgia@usp.br

of fibers, films, hydrogels, scaffolds, and dressings for the development of medical textiles. Materials derived from biopolymers may have low tensile and compressive strength, but the addition of other materials, such as graphene oxide, can improve these properties and confer additional attributes. Graphene oxide has been studied for applications in medical textiles due to its multiple properties, such as high mechanical strength, good biocompatibility, and antimicrobial properties, and can also be combined with other materials to functionalize them. This study aimed to gather key information on current applications, challenges, and future prospects for the use of alginate and graphene oxide in the production of composites for medical textiles.

Keywords: Alginate. Graphene Oxide. Composites. Medical Textiles. Biopolymers.

ABSTRACT

Los textiles médicos son materiales diseñados para su uso en aplicaciones en el ámbito de la salud y pueden fabricarse a partir de diversas materias primas. El alginato es un biopolímero ampliamente estudiado y utilizado en la producción de fibras, hidrogeles, andamios para ingeniería tisular y apósitos para el desarrollo de textiles médicos. Los materiales derivados de biopolímeros pueden presentar baja resistencia a la tracción y a la compresión, pero la adición de otros materiales, como el óxido de grafeno, puede mejorar estas propiedades, además de conferir atributos adicionales. El óxido de grafeno ha sido ampliamente estudiado para aplicaciones en textiles médicos debido a sus múltiples propiedades, como su alta resistencia mecánica, buena biocompatibilidad y propiedades antimicrobianas, y puede asociarse con otros materiales con el fin de funcionalizarlos. El objetivo de este trabajo fue reunir las principales informaciones sobre las aplicaciones actuales, los desafíos y las perspectivas futuras del uso del alginato y el óxido de grafeno en la producción de compuestos para textiles médicos.

Keywords: Alginato. Óxido de Grafeno. Compuestos. Textiles Médicos. Biopolímeros.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

Os têxteis médicos têm despertado grande interesse por combinar tecnologia têxtil e ciências médicas, de forma a possibilitar diversas aplicações funcionais, podendo ser utilizados dentro ou sobre o corpo (Shirvan; Nouri, 2020). De acordo com o Grand View Research (2023), o mercado global de têxteis médicos foi avaliado em US\$ 32,20 bilhões em 2022 e projeta-se que apresente uma taxa de crescimento anual composta de 4,3% no período de 2023 a 2030, tendo essa demanda associada à busca por tratamentos e materiais médicos mais eficientes e maior utilização de produtos implantáveis.

Estes materiais podem ser confeccionados a partir de matérias-primas naturais ou sintéticas, mas o uso de biopolímeros para tal aplicação tem aumentado devido às propriedades como versatilidade, biocompatibilidade, absorção e não toxicidade (Shirvan; Nouri, 2020). Biopolímeros são definidos como polímeros compostos ou obtidos de monômeros produzidos por organismos vivos e são utilizados na indústria têxtil como alternativas sustentáveis às fibras sintéticas (Jahandideh; Ashkani; Moini, 2021).

O alginato é um biopolímero encontrado como componente estrutural das paredes celulares de algas marinhas marrons e em algumas bactérias (Islam; Islam; Mondal, 2025). É um material hidrofílico, biocompatível, biodegradável, com alta capacidade de absorção de líquidos, baixa toxicidade e capacidade de gelificação, o que permite seu uso em diversas áreas (Ege *et al.*, 2021). Em têxteis médicos, é muito utilizado na produção de fibras, nanofibras, esponjas e filmes para curativos, pois o alginato promove a absorção de exsudato, mantendo o ambiente da ferida úmido, e libera íons de cálcio em troca de íons de sódio quando em contato com o sangue, estimulando maior ativação plaquetária e coagulação sanguínea do que a obtida com a gaze de algodão (Varaprasad *et al.*, 2020).

De acordo com Ren *et al.* (2024), as propriedades do alginato o tornam um material de destaque na área médica, mas sua baixa resistência à tração e à compressão pode restringir suas aplicações. Liu *et al.* (2019) relatam que a tenacidade das fibras de alginato fabricadas pela metodologia de fiação a úmido é de cerca de 1,5–2,5 cN/dtex, o que as torna fracas e quebradiças. Dessa forma, sua combinação com outros materiais, como o óxido de grafeno, pode conferir características adicionais e ampliar suas possibilidades de uso.

O grafeno e seus derivados têm sido amplamente estudados na forma de grafeno, óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO). Este material consiste em folhas bidimensionais compostas de átomos de carbono ligados com hibridização sp^2 em formato hexagonal (Shariati *et al.*, 2023). O grafeno possui excelentes propriedades, tais como a alta condutividade elétrica e térmica, alta resistência à tração, biocompatibilidade e grande área superficial, que o torna alvo de diversas pesquisas na área eletrônica, aeroespacial, militar, biomedicina, entre outras, sendo frequentemente combinado a outros materiais (Sundar; Ashraf, 2025).

O grafeno também dá origem ao óxido de grafeno (GO) e ao óxido de grafeno reduzido (rGO), cada um com propriedades distintas. De acordo com, Shankar *et al.* (2023), o GO pode atuar como um excelente reforço para polímeros devido às suas grandes áreas de superfície, alta

resistência mecânica, boa estabilidade química e propriedades antimicrobianas, além de ser dispersível em água e em outros solventes. Por isso, o GO vêm sendo estudado e utilizado para administração de medicamentos, terapia genética, biossensores, biodispositivos, nanomedicina, sensoriamento eletroquímico, biotecnologia e bioengenharia (Sundar; Ashraf, 2025).

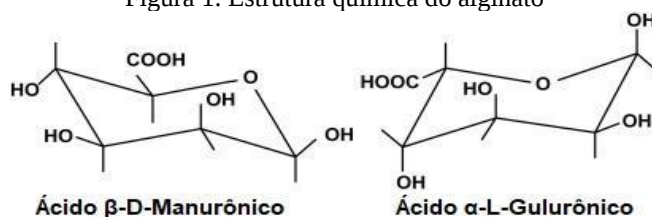
As pesquisas envolvendo compósitos de alginato com GO para têxteis médicos têm se concentrado principalmente no desenvolvimento de fibras, filmes, espumas, hidrogéis e *scaffolds* para serem utilizados em curativos, em sistemas de liberação de fármacos e na engenharia tecidual. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar as principais informações sobre as aplicações atuais, os desafios e as perspectivas futuras do uso de alginato e óxido de grafeno na produção de compósitos para têxteis médicos.

ALGINATO

O alginato é um polissacarídeo aniônico, componente encontrado e extraído principalmente de algas marinhas marrons como *Laminaria hyperborean*, *Macrocystis pyrifera*, *Laminaria digitate*, *Eclonia maxima*, *Lesonia negrescens*, e *Sargassum* ou de bactérias como *Pseudomonas* e *Azotobacter* (Islam; Islam; Mondal, 2025). É um biopolímero abundante, cujo mercado global foi avaliado em US\$ 728,4 milhões em 2020, com previsão de crescimento a uma taxa anual composta de 5% de 2021 a 2028, impulsionada pela expansão de seu uso na indústria alimentícia e pela crescente demanda por ingredientes naturais (Grand View Research, 2021).

Estruturalmente, o alginato consiste em monômeros de ácido β -D-manurônico (M) e ácido α -L-gulurônico (G) unidos por ligações tipo (1 $\rightarrow$ 4), dispostos em blocos consecutivos homogêneos (G ou M) e heterogêneos (GM) (Lekhavadhani *et al.*, 2025). A composição, sequência e massa molar do alginato dependem da fonte de extração, pois as proporções de blocos M e G têm efeito sobre suas propriedades físicas. De acordo com Del Gaudio *et al.*, (2020), os alginatos com altos teores de blocos M são úteis para aplicações na cicatrização de feridas crônicas, devido à sua capacidade de produzir citocinas por meio de monócitos humanos. Na Figura 1 pode-se observar a estrutura química do alginato.

Figura 1. Estrutura química do alginato



Fonte: Adaptado de Umoren; Solomon; Saji (2022).

Para a obtenção do alginato, tanto derivado de algas marinhas como de bactérias, são necessários diversos processos de várias etapas. O processo de extração derivado de algas marinhas normalmente envolve cinco etapas: acidificação das algas, extração alcalina usando carbonato de sódio (Na_2CO_3), separação de sólidos e líquidos, precipitação e secagem (Islam; Mondal, 2025). Essa é a principal fonte de suprimento comercial de alginato. Já na biossíntese bacteriana, o alginato é obtido principalmente de *Pseudomonas* e *Azotobacter* e difere do alginato de algas marinhas em propriedades físicas e químicas. A biossíntese do alginato envolvem as seguintes etapas: síntese do substrato precursor; transferência para a membrana citoplasmática e polimerização; transferência e modificação no periplasma; e transferência através da membrana externa (Sahoo; Biswal, 2021).

De acordo com Zhang e Zhao (2020), o alginato possui múltiplas propriedades que viabilizam seu uso e são particularmente importantes para sua aplicação, tais como hidrofiliabilidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade, alta capacidade de absorção de líquidos, baixa toxicidade, baixo custo, capacidade de gelificação, entre outros, o que permite seu uso em materiais como hidrogéis, filmes, cápsulas, *scaffolds*, fibras, nanofibras e membranas em diversas áreas.

O alginato pode ser aplicado em vários setores, como as indústrias de alimentos, bebidas, têxtil, impressão, biomédica e de produtos farmacêuticos. Na indústria têxtil, é utilizado principalmente na fabricação de fibras, nanofibras, esponjas e filmes para têxteis médicos. De acordo com Ren *et al.* (2024), fibras de alginato são produzidas por meio da extrusão do gel em um banho de coagulação contendo íons de cálcio que atuam como agentes de reticulação. Estes materiais são amplamente utilizados em curativos, uma vez que a fibra de alginato gera um ambiente úmido e em condições mais adequadas para a cicatrização de feridas (Varaprasad *et al.*, 2020; Islam; Islam; Mondal, 2025). Quando o alginato absorve o exsudato de um ferimento, um material gelatinoso é formado e, simultaneamente, ocorre a troca entre íons de cálcio do alginato e íons de sódio do sangue, o que estimula a ativação plaquetária e a coagulação sanguínea em

maior quantidade do que quando se utiliza a gaze tradicional (Varaprasad *et al.*, 2020). Segundo Islam, Islam e Mondal (2025), o alginato possui muitas características que são necessárias em um curativo, como boa absorção e uma taxa satisfatória de transferência de vapor de água, além de ser atóxico e biodegradável.

As pesquisas sobre tratamento de feridas e curativos à base de alginato tem se concentrado cada vez mais na incorporação de compostos bioativos, incluindo medicamentos, enzimas e células, visando administrar esses componentes de maneira controlada para aumentar o processo de cicatrização (Xie; Gao; Avérous, 2024). Nos estudos de Zhang *et al.* (2025) produziram fibras de alginato e poliacrilato com liberação controlada direcional de fármacos e perceberam um aumento na resistência à tração, respirabilidade e biocompatibilidade, sendo um material potencialmente eficaz para o tratamento de feridas.

Na engenharia tecidual, estudos com alginato e compostos baseados em alginato para a produção de *scaffolds*, tem apresentado bons resultados, pois esses materiais se degradam com a formação de novos tecidos e não causam reações inflamatórias ou degradação tóxica (Kumar; Singh; Kumar, 2024). Entretanto, de acordo com Raus, Nawawi e Nasaruddin, (2021), devido às limitações na resistência à tração e à compressão do alginato, as pesquisas geralmente são focadas em combinações com outros materiais para fazer compósitos com características melhoradas para a engenharia de tecido ósseo, cartilaginoso, cardíaco, neural, de pele, entre outros.

Na engenharia de tecido ósseo, o alginato atua como matriz primária reforçada com aditivos capazes de melhorar a resistência mecânica. Yousefiasl *et al.* (2023) produziram *scaffolds* de alginato e quitosana com nanopartículas de sílica mesoporosa que apresentaram resistência à compressão entre 0,3 e 1,3 Mpa (valores adequados para a engenharia de tecido ósseo trabecular), porosidade entre 60,3% e 60,4% (ideal para a adesão de células-tronco e crescimento celular), capacidade de biomineralização e ausência de efeitos citotóxicos.

Pesquisas focadas na engenharia de tecido cartilaginoso, como a realizada por Jahani *et al.* (2025), por exemplo, demonstraram que *scaffolds* de alginato e quitosana carregados com insulina e produzidos por impressão 3D apresentaram porosidade interconectada bem estruturada, boas propriedades mecânicas, hidrofiliabilidade adequada, adesão eficaz de células NIH/3T3 e biocompatibilidade, sem reações adversas observadas ao longo de 30 dias. Em um outro estudo, realizado por Li *et al.* (2025), foram produzidos *scaffolds* de alginato e quitosana reforçados com nanofibras de Poli(ácido-lático-co-glicólico) (PLGA), policaprolactona e gelatina que apresentaram estabilidade térmica, resistência à compressão e biocompatibilidade melhoradas e

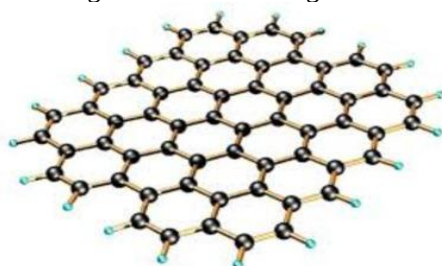
capacidade de aumento da proliferação e adesão celular.

De modo geral, apesar das restrições quanto à resistência à tração e à compressão, o alginato se destaca como um material adequado para aplicações em têxteis médicos. A incorporação de outros materiais, como o óxido de grafeno, tem se mostrado uma abordagem eficaz para superar essas limitações e agregar novas funcionalidades, expandindo as possibilidades de aplicação.

GRAFENO

O grafeno vem sendo estudado desde o século passado, porém apenas em 2004 dois pesquisadores da Universidade de Manchester, professores Andre Geim e Kostya Novoselov, conseguiram extraí-lo de uma amostra de grafite por meio de esfoliação mecânica, trabalho que lhes rendeu o Prêmio Nobel de Física em 2010 (Shen; Oyadiji, 2020). Esse nanomaterial consiste em folhas bidimensionais, com menos de 10 nanômetros de espessura, compostas de átomos de carbono ligados com hibridização sp^2 em formato hexagonal, conforme representado na Figura 2 (Shariati *et al.*, 2023).

Figura 2. Estrutura do grafeno



Fonte: Sundar; Ashraf (2025).

A produção do grafeno pode ser realizada pelas abordagens *top-down* (de cima para baixo) ou *bottom-up* (de baixo para cima). No método *top-down*, o grafeno é principalmente sintetizado por esfoliação mecânica e química do grafite, enquanto no método *bottom-up* são mais utilizadas deposição química de vapor e crescimento epitaxial (Gautam; Verma, 2019; Shankar *et al.*, 2023). Na abordagem *top-down*, as camadas de grafite são separadas para obter grafeno, o que exige a quebra das interações de Van der Waals entre elas. Já na abordagem *bottom-up*, moléculas de carbono provenientes de diferentes fontes servem como blocos de construção para formar o grafeno (Shariati *et al.*, 2023).

O grafeno possui diversas propriedades, tais como alta resistência mecânica, excelente condutividade térmica e elétrica, biocompatibilidade e grande área de superfície, sendo ainda flexível e transparente (Shen; Oyadiji, 2020; Sundar; Ashraf, 2025). Devido às excelentes propriedades, este material vêm sendo fonte de pesquisas em diversas áreas, incluindo eletrônica, aeroespacial, militar, biomedicina e outras (Shariati *et al.*, 2023).

Atualmente são conhecidos alguns derivados do grafeno, tais óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO), que possuem diferentes propriedades (Valorosi *et al.*, 2020). De acordo com Al-Ahmed *et al.* (2021), o GO pode atuar como um reforço para polímeros devido às suas propriedades únicas, que incluem grande área de superfície, excelentes propriedades mecânicas, características ópticas excepcionais e boa estabilidade química. O GO contém vários grupos funcionais importantes, como grupos epóxi, hidroxila, carbonila e carboxila, é dispersível em água e em outros solventes, pode ser facilmente modificado para ser compatível com matrizes poliméricas e possui custo menos elevado (Gautam; Verma, 2019). Além disso, o GO apresenta propriedades antimicrobianas devido à combinação de suas bordas afiadas, que podem danificar mecanicamente as membranas, e levar ao estresse oxidativo induzido pelos grupos contendo oxigênio que auxiliam na liberação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Shankar *et al.*, 2023). Entretanto, conforme Shankar *et al.* (2023) e Sindi (2024), o número de camadas, a morfologia, o tamanho das laterais, a concentração de GO e o tipo de bactéria são conhecidos por desempenhar um papel importante na atividade antimicrobiana.

Em têxteis médicos, o GO é amplamente pesquisado na forma de *scaffolds* e de curativos. De acordo com Sundar e Ashraf (2025), o GO oferece vários benefícios para usos biológicos, podendo ser usado para administração de medicamentos, biossensores, biodispositivos, nanomedicina, sensoriamento eletroquímico, biotecnologia e bioengenharia. No tratamento de feridas, o GO vem sendo utilizado em conjunto com outros materiais na produção de curativos devido sua biocompatibilidade e efeitos antimicrobianos. Quando utilizado na engenharia tecidual, os *scaffolds* baseados em GO têm demonstrado forte impacto na proliferação e diferenciação das células-tronco usadas para o desenvolvimento de novos tecidos, como osso, coração e neurônios (Raslan *et al.*, 2020). Segundo Raslan *et al.* (2020), devido às suas propriedades e características, a incorporação de GO em *scaffolds* pode melhorar a hidrofiliabilidade, fornecer a resistência mecânica necessária, melhorar a adsorção e a estabilidade das proteínas, melhorar a adesão e a proliferação celular ou melhorar as propriedades elétricas dos *scaffolds*.

Devido às suas excelentes propriedades, à variedade de aplicações e à capacidade de ser combinado com outros materiais como biopolímeros, por exemplo, o GO se destaca como um material promissor para o desenvolvimento de têxteis médicos. Sua versatilidade permite a criação de materiais funcionais com propriedades antimicrobianas e bioativas, ampliando as possibilidades de inovação.

EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO EM COMPÓSITOS DE ALGINATO

Os materiais de alginato se destacam na fabricação de têxteis médicos, mas sua baixa resistência à tração e à compressão compromete seu uso em algumas aplicações. Com o objetivo de melhorar essa limitação, conferir propriedades adicionais e ampliar seu potencial de aplicação, a incorporação de GO tem sido amplamente estudada.

Em relação à resistência mecânica, He *et al.* (2012) observaram que a adição de 4% (m/m) de GO em fibras de alginato causou um aumento de 94% na resistência à tração, o que foi atribuído à boa compatibilidade entre a matriz de alginato e as cargas de GO devido à presença de fortes interações entre as macromoléculas de alginato e as nanofolhas de GO. Da mesma forma, Nie *et al.* (2015) notaram um aumento de cerca de 44% na resistência à tração quando a concentração de GO adicionada em filmes de alginato foi de 1% (m/m). Já Ma *et al.* (2023) verificaram que, ao aumentar a concentração de GO para 15% (m/m), a tenacidade das fibras de alginato melhorou 84% em relação às fibras sem GO.

A absorção é uma propriedade fundamental para a fabricação de curativos. Materiais com alta capacidade de absorção e retenção de água ajudam a prevenir o acúmulo de exsudato e a manter o ferimento úmido, promovendo a cicatrização (Xie *et al.*, 2022). Além disso, a retenção de água por longos períodos pode reduzir a frequência de troca dos curativos. De acordo com Ma *et al.* (2019) e Iqbal, Amin e Gilani (2023), a adição de GO em materiais compósitos contendo alginato causa aumento na hidrofiliabilidade devido à presença de grupos hidrofílicos do GO.

No que se refere à estabilidade térmica, estudos conduzidos por Nie *et al.* (2015), Li *et al.* (2018) demonstraram que a incorporação de diferentes proporções de GO em filmes, esferas e membranas de alginato aumenta a resistência à degradação térmica destes compósitos. Conforme Li *et al.* (2018), as camadas de GO atrapalham o movimento das cadeias de moléculas do alginato, aumentando a energia necessária para a decomposição dessas fibras.

A incorporação de GO também pode auxiliar nas propriedades antimicrobianas. O alginato isolado não possui ação antimicrobiana, sendo necessário funcionalizá-lo com substâncias como metais, medicamentos e antibióticos para que seu uso seja viável em aplicações que necessitem dessas propriedades (Tirkey *et al.*, 2023). Dessa forma, Shankar *et al.* (2023) apontam que o GO pode atuar como agente antimicrobiano quando incorporado a materiais como o alginato, em razão dos danos mecânicos promovidos às membranas celulares das bactérias por suas bordas afiadas e do estresse oxidativo induzido por grupos oxigenados, que auxiliam na liberação de espécies reativas de oxigênio (EROs).

APLICAÇÕES BIOMÉDICAS DE COMPÓSITOS DE ALGINATO E ÓXIDO DE GRAFENO

As pesquisas envolvendo fibras de alginato com GO para têxteis médicos têm se concentrado principalmente no desenvolvimento de *scaffolds* e curativos, utilizando materiais na forma de fibras, filmes, hidrogéis e espumas. No Quadro 1 encontram-se alguns exemplos de estudos envolvendo o desenvolvimento de compósitos de alginato e GO para aplicações biomédicas, destacando os materiais utilizados, a forma do produto e a aplicação sugerida, que vão desde curativos e materiais com propriedades antimicrobianas, até sistemas de liberação de fármacos e materiais para engenharia tecidual.

Quadro 1. Aplicações biomédicas dos compósitos de alginato e óxido de grafeno

MATERIAIS	FORMA FINAL	APLICAÇÃO	FONTE
Alginato/GO	Fibras	Curativos	He <i>et al.</i> (2012)
Alginato/GO	Hidrogel	Engenharia de tecido articular	Marrella <i>et al.</i> (2017)
Alginato/GO/Ca ²⁺ /Metotrexato	Hidrogel liofilizado	Administração de fármacos	Yun <i>et al.</i> (2020)
Alginato/GO	Filmes	Atividade antibacteriana	Martí <i>et al.</i> (2019)
Alginato/GO/rGO	<i>Scaffolds</i>	Engenharia de tecido neural	Mansouri <i>et al.</i> (2019)
Alginato/GO/Nanopartículas de prata	Filmes	Atividade antibacteriana	Zin <i>et al.</i> (2020)
Alginato de cálcio/GO/quito-oligossacarídeo	Espuma	Curativos	Xie <i>et al.</i> (2022)
Seda/alginato/GO/Levofloxacino	Fibras	Curativo responsivo ao pH	Punnoy <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Em relação aos estudos para desenvolvimentos de curativos, Punnoy *et al.* (2024)

trabalharam em um curativo responsivo ao pH composto de fibras de seda revestidas com alginato e GO e carregadas com levofloxacino. Os resultados indicaram que a incorporação de GO nas fibras aumentou a carga de levofloxacino, prolongou a liberação do medicamento e demonstrou propriedades antimicrobianas, sem causar irritação ou alergias na pele humana. Xie *et al.* (2022) produziram um curativo composto de nanocompósitos de óxido de grafeno modificado com quito-oligossacarídeo e espuma de alginato de cálcio que demonstrou que, além de melhorar a resistência à tração e as propriedades antibacterianas e hemostáticas, a adição de GO também resultou em melhores propriedades de cicatrização, reduzindo a resposta inflamatória e promovendo a remodelação vascular.

Na administração de fármacos, Yun *et al.*, (2020) desenvolveram hidrogéis liofilizados de alginato, cálcio e GO para serem utilizados como sistemas carreadores de metotrexato. Segundo os autores, os hidrogéis apresentaram liberação controlada responsiva tanto ao pH, quanto a estímulos elétricos, devido à capacidade condutiva do GO e à sensibilidade ao pH do alginato.

Com o objetivo de aproveitar as propriedades antibacterianas do GO, Martí *et al.* (2019) produziram filmes compósitos de alginato e GO. Os ensaios demonstraram que a incorporação de 0,5% (m/m) de GO conferiu atividade antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* e *Staphylococcus epidermidis* sem causar citotoxicidade em células HaCaT de queratinócitos humanos. Zin *et al.* (2020) sintetizaram filmes de alginato e GO funcionalizados com nanopartículas de prata, que apresentaram boa atividade antibacteriana contra *E. coli* e *Staphylococcus aureus*.

Por fim, para a engenharia tecidual, hidrogéis de alginato e GO produzidos por Marrella *et al.* (2017) apresentaram melhora de 6 vezes no módulo de compressão, atividade celular *in vitro* e não citotoxicidade, demonstrando potencial para engenharia de tecido articular. Já Mansouri *et al.* (2019) desenvolveram *scaffolds* porosos de alginato e GO ou rGO, que apresentaram melhora na hidrofiliabilidade e no módulo de compressão e condutividade elétrica, sendo uma alternativa promissora para a engenharia de tecido neural.

A variedade de formas finais dos compósitos de alginato e GO evidencia a versatilidade dos materiais utilizados, possibilitando aplicações em curativos, em materiais com propriedades antimicrobianas, na administração de fármacos e na engenharia tecidual. Além disso, a funcionalização com outros materiais, como nanopartículas de prata, quito-oligossacarídeos e medicamentos, potencializa as propriedades desejadas e amplia as áreas de aplicação.

DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

O desenvolvimento dos materiais contendo GO e suas aplicações biomédicas ainda exigem a superação de desafios para consolidar sua implementação clínica. A escalabilidade é um grande desafio devido ao elevado custo de fabricação de materiais de grafeno de alta qualidade. Embora a produção de grafeno tenha avançado significativamente, a fabricação destes materiais em níveis industriais ainda enfrenta dificuldades associadas ao alto custo e às técnicas intensivas em mão de obra, o que dificulta a competição com outros materiais mais acessíveis (Ahmad *et al.*, 2024). Assim, de acordo com Singh *et al.* (2025), a busca por técnicas de produção inovadoras e a melhora das técnicas atuais é essencial para aumentar a viabilidade comercial destes produtos sem comprometer a qualidade.

Outro desafio central refere-se à toxicidade e à segurança a longo prazo dos biomateriais à base de GO. Os dados experimentais sobre a toxicidade a longo prazo destes materiais são limitados, sendo necessários mais estudos para examinar como eles afetam os seres humanos (Chauhan *et al.*, 2026). Além disso, segundo Ahmad *et al.* (2024), a persistência de concentrações de GO no organismo, principalmente nos pulmões, fígado, intestinos e rins, pode apresentar riscos à saúde, sendo necessária a realização de mais pesquisas para avaliar de que maneira o método de síntese, as funcionalizações e o tamanho das folhas afetam sua distribuição e permanência no corpo. Conforme Chauhan *et al.* (2026), uma maneira de viabilizar o uso clínico e contornar possíveis problemas de toxicidade é desenvolver parâmetros padronizados para o uso de biomateriais à base de GO, já que suas características biológicas e sua toxicidade estão ligadas a parâmetros físico-químicos.

Apesar dessas limitações, as perspectivas futuras para o uso de compósitos biopoliméricos contendo GO na área biomédica são promissoras. As pesquisas ainda estão em estágios iniciais, mas, devido às suas inúmeras aplicações potenciais, terão um impacto significativo na ciência dos biomateriais e na medicina regenerativa. De acordo com Ahmad *et al.* (2024), a aplicação de GO na fabricação de biossensores pode facilitar diagnósticos rápidos e altamente sensíveis, possibilitando a detecção de várias biomoléculas e o monitoramento e diagnóstico precoce de doenças. Na liberação de fármacos, podem atuar como agentes devido à capacidade de transportar um número significativo de fármacos e facilitar sua liberação gradual (Ahmad *et al.*, 2024). Já na engenharia de tecidos e medicina regenerativa, conforme Chauhan *et al.* (2026), o GO e seus derivados funcionalizados demonstram grande potencial devido à sua excepcional capacidade

de promover adesão, proliferação, diferenciação e biofuncionalização celular direcionada, o que permite sua integração em uma ampla gama de estruturas e sistemas. Em síntese, os biomateriais à base de GO possuem enorme potencial para aplicações biomédicas e pesquisas futuras continuarão a explorar as interações com o corpo humano de maneira a viabilizar o uso clínico destes materiais.

CONCLUSÃO

O alginato apresenta grande potencial para a fabricação de têxteis médicos devido às suas propriedades intrínsecas, como hidrofiliabilidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade, alta capacidade de absorção e baixa toxicidade. Entretanto, sua baixa resistência à tração e à compressão restringe suas possibilidades de aplicação. Dessa forma, a incorporação de óxido de grafeno pode diminuir essas limitações, conferir propriedades adicionais e ampliar as aplicações potenciais desses materiais.

As pesquisas envolvendo compósitos à base de alginato e GO têm se concentrado principalmente no desenvolvimento de materiais voltados à cicatrização de feridas, à administração controlada de fármacos e à engenharia tecidual. A literatura demonstra que a incorporação de GO em materiais de alginato pode melhorar a resistência mecânica e a estabilidade térmica, conferir propriedades antimicrobianas e melhorar a capacidade de absorção, características importantes na fabricação de têxteis médicos. Além disso, funcionalizações com outros componentes, como partículas metálicas e medicamentos, podem potencializar ainda mais essas propriedades.

Apesar dos avanços, desafios relacionados à escalabilidade de produção e à toxicidade do GO ainda existem. Para concretizar o potencial desses materiais em aplicações biomédicas, é necessário compreender ainda mais as interações do GO com o corpo humano. A realização de mais pesquisas voltadas à otimização das técnicas de produção e à caracterização destes materiais são fundamentais para viabilizar sua aplicação clínica e produção em larga escala.

Por fim, os materiais à base alginato com GO apresentam grande potencial para aplicações em têxteis médicos e pesquisas futuras deverão continuar explorando suas propriedades e possibilidades de uso na área.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ana Champi agradece o apoio financeiro ao CNPq, Processos: 302584/2023-4 e 404412/2024-6

REFERÊNCIAS

AHMAD, Farooq *et al.* **Graphene and its derivatives in medical applications: A comprehensive review.** Synthetic Metals, v. 304, p. 117594, 2024.

CHAUHAN, Narendra Pal Singh *et al.* **Functionalization of graphene oxide and its applications in tissue engineering and regenerative medicine.** Biomaterials Advances, v. 178, p. 214421, 2026.

DEL GAUDIO, Pasquale *et al.* **In situ gelling alginate-pectin blend particles loaded with Ac2-26: A new weapon to improve wound care armamentarium.** Carbohydrate Polymers, v. 227, p. 115305, 2020.

GRAND VIEW RESEARCH. **Alginate Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type, By Product, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028.** Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/alginate-market>. Acesso em: 09 de outubro de 2025.

GRAND VIEW RESEARCH. **Medical Textiles Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030, 2023.** Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/medical-textiles-market>. Acesso em: 09 de outubro de 2025.

IQBAL, Yasir; AMIN, Faheem; GILANI, Noor ul Hudda. **Freeze-gelated sodium alginate incorporated GO hydrogel membrane fabrication, thermal and mechanical studies.** Materials Letters, v. 351, p. 135060, 2023.

ISLAM, Md Monirul; ISLAM, Md Hasibul; MONDAL, Md Ibrahim H. **Alginate fibres—synthesis, structure, and applications.** Technical Organic and Inorganic Fibres from Natural Resources, p. 121–144, 2025.

JAHANDIDEH, Arash; ASHKANI, Mojdeh; MOINI, Nasrin. **Biopolymers in textile industries.** In: Biopolymers and their Industrial Applications. Elsevier, p. 193–218, 2021.

JAHANI, Afsaneh *et al.* **Incorporating insulin into alginate-chitosan 3D-printed scaffolds: A comprehensive study on structure, mechanics, and biocompatibility for cartilage tissue engineering.** Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, v. 9, p. 100696, 2025.

KHAN, Safia; KHAN, Mariam. **Applications of Sodium Alginate in Science.** Sodium

Alginate-Based Nanomaterials for Wastewater Treatment, p. 161–182, 2023.

KUMAR, Brijesh; SINGH, Narendra; KUMAR, Pramendra. **A review on sources, modification techniques, properties and potential applications of alginate-based modified polymers.** European Polymer Journal, v. 213, p. 113078, 2024.

LEKHAVADHANI, Sundaravadhanan *et al.* **Recent progress in alginate-based nanocomposites for bone tissue engineering applications.** Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, v. 250, p. 114570, 2025.

LI, Chenxi *et al.* **Sodium alginate/chitosan composite scaffold reinforced with biodegradable polyesters/gelatin nanofibers for cartilage tissue engineering.** International Journal of Biological Macromolecules, v. 285, p. 138054, 2025.

LI, Jiwei *et al.* **Adsorption of lysozyme by alginate/graphene oxide composite beads with enhanced stability and mechanical property.** Materials Science and Engineering: C, v. 89, p. 25–32, 2018.

LIU, Jie *et al.* **Sodium alginate/cellulose nanocrystal fibers with enhanced mechanical strength prepared by wet spinning.** Journal of Engineered Fibers and Fabrics, v. 14, 2019.

MA, Jianhua *et al.* **Ca²⁺ crosslinking sodium alginate/graphene oxide composite fiber with enhanced mechanical strength and fire retardancy.** The Journal of The Textile Institute, v. 114, n. 7, p. 1070–1077, 2023.

MA, Rongxiu *et al.* **Nanocomposite sponges of sodium alginate/graphene oxide/polyvinyl alcohol as potential wound dressing: In vitro and in vivo evaluation.** Composites Part B: Engineering, v. 167, p. 396–405, 2019.

MANSOURI, Negar *et al.* **Advancing fabrication and properties of three-dimensional graphene–alginate scaffolds for application in neural tissue engineering.** RSC Advances, v. 9, n. 63, p. 36838–36848, 2019.

MARRELLA, A. *et al.* **Enhanced mechanical performances and bioactivity of cell laden-graphene oxide/alginate hydrogels open new scenario for articular tissue engineering applications.** Carbon, v. 115, p. 608–616, 2017.

MARTÍ, Miguel *et al.* **Calcium alginate/graphene oxide films: Reinforced composites able to prevent Staphylococcus aureus and methicillin-resistant Staphylococcus epidermidis infections with no cytotoxicity for human keratinocyte HaCaT cells.** European Polymer Journal, v. 110, p. 14–21, 2019.

MUHAMMAD, Marinah *et al.* **Synthesis of Sodium Alginate Graphene Oxide-Silver Film for Antibacterial Activity.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 596, n. 1, p. 012041, 2020.

NIE, Ling *et al.* **Effects of surface functionalized graphene oxide on the behavior of sodium alginate.** Carbohydrate Polymers, v. 117, p. 616–623, 2015.

- PRIYADARSINI, Subhashree *et al.* **Graphene and graphene oxide as nanomaterials for medicine and biology application.** Journal of Nanostructure in Chemistry Springer Medizin, 2018.
- PUNNOY, Pornchanok *et al.* **Novel theranostic wounds dressing based on pH responsive alginate hydrogel/graphene oxide/levofloxacin modified silk.** International Journal of Pharmaceutics, v. 661, p. 124406, 2024.
- RASLAN, Ahmed *et al.* **Graphene oxide and reduced graphene oxide-based scaffolds in regenerative medicine.** International Journal of Pharmaceutics, v. 580, p. 119226, 2020.
- RAUS, Raha Ahmad; NAWAWI, Wan Mohd Fazli Wan; NASARUDDIN, Ricca Rahman. **Alginate and alginate composites for biomedical applications.** Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 16, n. 3, p. 280-306, 2021.
- SAHOO, Deepti Rekha; BISWAL, Trinath. **Alginate and its application to tissue engineering.** SN Applied Sciences, v. 3, n. 1, p. 1–19, 2021.
- SHANKAR, Krishna *et al.* **A review on antimicrobial mechanism and applications of graphene-based materials.** Biomaterials Advances, v. 150, p. 213440, 2023.
- SHARIATI, Aref *et al.* **Graphene-Based Materials for Inhibition of Wound Infection and Accelerating Wound Healing.** Biomedicine & Pharmacotherapy, v. 158, p. 114184, 2023.
- SHEN, C.; OYADIJI, S. Olutunde. **The processing and analysis of graphene and the strength enhancement effect of graphene-based filler materials: A review.** Materials Today Physics, v. 15, p. 100257, 2020.
- SHIRVAN, Anahita Rohani; NOURI, Alireza. **Medical textiles.** In: Advances in Functional and Protective Textiles. Elsevier, p. 291–333, 2020.
- SINDI, Amal M. **Applications of graphene oxide and reduced graphene oxide in advanced dental materials and therapies.** Journal of Taibah University Medical Sciences, v. 19, n. 2, p. 403–421, 2024.
- SINGH, Harvinder *et al.* **Graphene for next-generation technologies: Advances in properties, applications, and industrial integration.** Results in Engineering, v. 27, p. 106865, 2025.
- SUNDAR, L. Syam; ASHRAF, Muhammad Waqar. **Synthesis and characterization methods of graphene oxide nanomaterial for biomedical and toxicity applications: A comprehensive review.** Inorganic Chemistry Communications, v. 174, p. 113936, 2025.
- TIRKEY, Akriti *et al.* **Alginate-based nanocomposite hydrogels for antimicrobial and antibiofilm applications.** In: Functional Nanocomposite Hydrogels. Elsevier, p. 363–385, 2023.
- UMOREN, Saviour A.; SOLOMON, Moses M.; SAJI, Viswanathan S. **Alginate and its derivatives.** In: Polymeric Materials in Corrosion Inhibition. Elsevier, p. 271–286, 2022.

VALOROSI, Filippo *et al.* **Graphene and related materials in hierarchical fiber composites: Production techniques and key industrial benefits.** Composites Science and Technology, v. 185, p. 107848, 2020.

VARAPRASAD, Kokkarachedu *et al.* **Alginate-based composite materials for wound dressing application: A mini review.** Carbohydrate Polymers, v. 236, p. 116025, 2020.

XIE, Feng *et al.* **Alginate foam gel modified by graphene oxide for wound dressing.** International Journal of Biological Macromolecules, v. 223, p. 391–403, 2022.

XIE, Fengwei; GAO, Chengcheng; AVÉROUS, Luc. **Alginate-based materials: Enhancing properties through multiphase formulation design and processing innovation.** Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 159, p. 100799, 2024.

YOUSEFIASL, Satar *et al.* **Chitosan/alginate bionanocomposites adorned with mesoporous silica nanoparticles for bone tissue engineering.** Journal of Nanostructure in Chemistry, v. 13, n. 3, p. 389–403, 2023.

YUN, Yajing *et al.* **Facile synthesis of Ca²⁺-crosslinked sodium alginate/graphene oxide hybrids as electro- and pH-responsive drug carrier.** Materials Science and Engineering C, v. 108, 2020.

ZHANG, Miao; ZHAO, Xia. **Alginate hydrogel dressings for advanced wound management.** International Journal of Biological Macromolecules, v. 162, p. 1414–1428, 2020.

ZHANG, Qianyu *et al.* **“Bamboo-like” strong and tough sodium alginate/polyacrylate hydrogel fiber with directional controlled release for wound healing promotion.** Carbohydrate Polymers, v. 347, p. 122761, 2025.

Zin, Farah Amanina Mohd *et al.* **Synthesis of Sodium Alginate Graphene Oxide-Silver Film for Antibacterial Activity.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 596, n. 1, p. 012041, 2020.