

# Nanomateriais à base de carbono: Oportunidades e desafios na Medicina

## Carbon-based nanomaterials: Opportunities and challenges in Medicine

## Nanomateriales basados en carbono: Oportunidades y desafíos en Medicina

Recebido: 17/09/2024 | Revisado: 24/09/2024 | Aceitado: 24/09/2024 | Publicado: 26/09/2024

### **Lara Cruvinel Fonseca**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2590-7034>  
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil  
E-mail: [laracruvinelf@gmail.com](mailto:laracruvinelf@gmail.com)

### **Bárbara Queiroz de Figueiredo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1630-4597>  
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil  
E-mail: [barbarafigueiredo@unipam.edu.br](mailto:barbarafigueiredo@unipam.edu.br)

### **Bruna Silveira Caixeta**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6395-4176>  
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil  
E-mail: [brunasilveiracaixeta@gmail.com](mailto:brunasilveiracaixeta@gmail.com)

### **Ana Paula Gonçalves Faria**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1755-2017>  
Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil  
E-mail: [anapaulagoncalvesfaria@gmail.com](mailto:anapaulagoncalvesfaria@gmail.com)

### **Marcelo Eduardo Caixeta**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5086-1234>  
Centro Universitário Imepac, Brasil  
E-mail: [dr.marceloecaixeta@gmail.com](mailto:dr.marceloecaixeta@gmail.com)

### **Resumo**

O carbono era um dos elementos mais importantes para a Terra e os humanos. Havia muitos alótropos diferentes do elemento carbono. O grafeno, que era bidimensional e tinha um átomo de espessura do elemento carbono, era um nanoporo natural e o material mais pesquisado do século XXI. O grafeno era um dos materiais mais importantes usados no campo dos nanomateriais. Ele tinha propriedades térmicas, ópticas, elétricas e mecânicas superiores. Era um material extraordinariamente leve e forte entre todos os materiais conhecidos, e também era um material que poderia ser facilmente modificado para a área desejada. Neste artigo, foi visto que o nanoporo de grafeno e o material de grafeno estariam entre os materiais mais importantes no campo da saúde no futuro. No campo da saúde, esse grafeno à base de carbono e a descoberta de nanoporos de grafeno foram pesquisados e usados por muitas disciplinas, como o tratamento de muitas doenças, aplicações de administração de medicamentos, biotecnologia, tratamento de doenças hereditárias e até mesmo para criar biossensores a serem usados para detectar doenças. O grafeno e seus derivados eram materiais significativos que podiam ser usados no campo da saúde e se tornou o material mais essencial dos últimos tempos, pois sua estrutura mostrou estabilidade ao entrar no corpo. Era compatível com células e podia se mover rapidamente nas células com sua natureza pequena e porosa. Devido à sua estrutura, esse material era a única substância que poderia substituir todos os materiais usados no campo da saúde.

**Palavras-chave:** Carbono; Grafeno, Medicina; Nanoporos.

### **Abstract**

Carbon was one of the two most important elements for Earth and humans. Graphene was or was not given to a single layer of graphite, a two allotropes of carbon. Graphene, which was two-dimensional and had an atom thick of the element carbon, was a natural nanopore and the most researched material of the 21st century. Graphene is one of the two most important materials used in the field of nanomaterials. It has superior thermal, optical, electrical and mechanical properties. It was an extraordinarily light and strong material among all the materials made, and it was also a material that could be easily modified for a desired area. In this article, it was seen that the graphene nanopore and the graphene material would be among the most important materials in the health field of the future. In the field of health, this carbon-based graphene and the discovery of graphene nanopores have been researched and used by many disciplines, such as the treatment of many diseases, drug administration applications, biotechnology, treatment of hereditary diseases and also for breeding biosensors They will be used to detect crimes. Graphene and its derivatives were significant materials that could be used in the health field and became the most essential material in recent times, because its structure showed stability when entering the body. It was compatible with cells and could move quickly in cells with its small and porous nature. Due to its structure, this material was the only substance that could replace all the materials used in the health field.

**Keywords:** Carbon; Graphene, Medicine; Nanopores.

## Resumen

El carbono era uno de los dos elementos más importantes para la Tierra y los humanos. Grafeno era el nombre dado a una única camada de grafito, um dos alótropos del carbono. El grafeno, que era bidimensional y tinha um átomo de densidad del elemento carbono, era um nanoporo natural y o material mais pesquisado do século XXI. El grafeno era um dos materiales más importantes usados en el campo dos nanomateriais. Ele tinha propriedades térmicas, ópticas, eléctricas y mecánicas superiores. Era un material extraordinariamente leve y fuerte entre todos los materiales conhecidos, y también era un material que podía ser fácilmente modificado para un área desejada. Neste artigo, foi visto que el nanoporo de grafeno y el material de grafeno estánriam entre los materiales más importantes en el campo de la salud en el futuro. No campo da saúde, esse grafeno à base de carbono e a descoberta de nanoporos de grafeno foram pesquisados y usados por muitas disciplinas, como o tratamento de muitas doenças, aplicações de administração de medicamentos, biotecnología, tratamento de doenças hereditárias e até mesmo para criar biossensores un serem usado para detectar doenças. El grafeno y sus derivados eran materiales significativos que podrían ser usados en el campo de la salud y se tornou o material mais esencial dos últimos tiempos, pois su estructura mostrou estabilidade ao entrar no corpo. Era compatible con las células y podía moverse rápidamente entre las células con su naturaleza pequeña y porosa. Debido a su estructura, ese material era una única sustancia que podía sustituir todos los materiales usados en el campo de la salud.

**Palabras clave:** Carbono; Grafeno; Medicina; Nanoporos.

## 1. Introdução

A nanotecnologia consiste em uma área crescente na prática médica. Por causa de sua estrutura, o grafeno era um nanomaterial natural. Debido à presença óbvia de poros e dos chamados nanoporos, o grafeno, um dos materiais mais duros já conhecidos, foi um material pioneiro no campo da nanotecnologia. O grafeno era um material bidimensional tão fino quanto um único átomo e uma forma de elemento de carbono. Ele tinha uma aparência de favo de mel com componentes de carbono em sua estrutura unidos por ligações covalentes e dependendo dos tipos de ligação. Era um material que tinha muitos nanoporos que podiam ser ampliados ou contraídos dependendo da região a ser usada com seu design perfeito. O grafeno era uma substância tremendamente forte e ultrafina. Debido à sua espessura, era o material mais leve. Em comparação com a maioria dos materiais, ele tinha excelente condutividade elétrica, características ópticas e qualidades térmicas. Por esta razão, o material de grafeno e os nanoporos de grafeno foram usados e pesquisados em muitas áreas (Depan et al., 2021).

Os nanomateriais à base de carbono recentemente cresceram em aplicações de biomateriais. O grafeno, em específico, é uma nova adição importante a esses materiais da família do carbono devido às suas propriedades únicas. Pesquisadores em engenharia de tecidos já investigaram extensivamente estruturas contendo grafeno, especificamente para regeneração de tecidos ósseos, neuronais, cardíacos, de pele e cartilagens (Kumar et al., 2022). Sob essa perspectiva, o objetivo deste estudo foi elucidar acerca das oportunidades e desafios do uso dos nanomateriais à base de carbono na medicina.

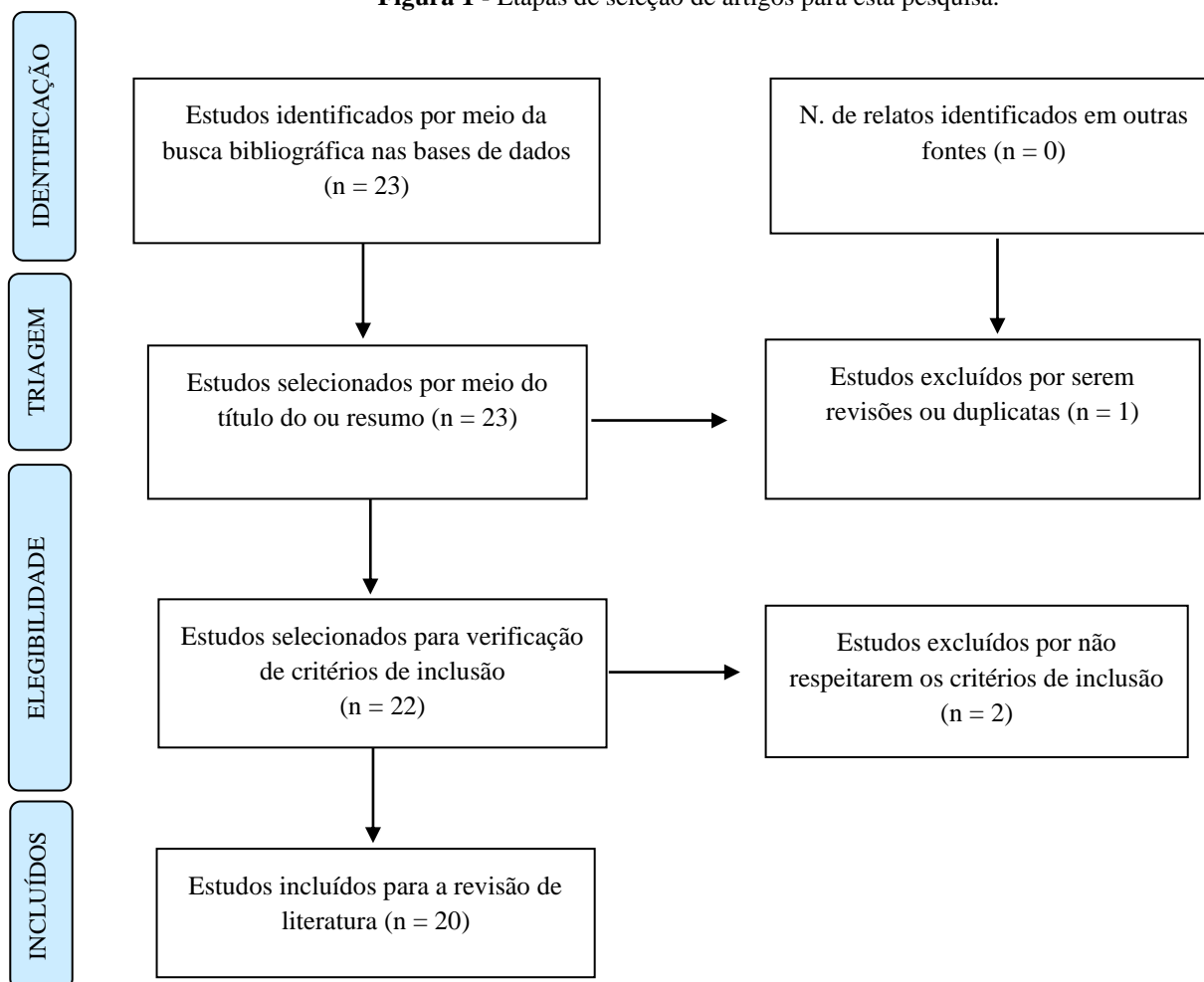
## 2. Metodologia

Trata-se de uma pesquisa descritiva do tipo revisão narrativa da literatura, que buscou evidenciar as oportunidades e desafios do uso dos nanomateriais à base de carbono na medicina. A pesquisa foi realizada através do acesso online nas bases de dados National Library of Medicine (PubMed MEDLINE), Scientific Electronic Library Online (SciELO), Cochrane Database of Systematic Reviews (CDSR), Google Scholar, Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e EBSCO Information Services, no mês de novembro de 2021. Para a busca das obras foram utilizadas as palavras-chaves presentes nos descritores em Ciências da Saúde (DeCS): em inglês: "*nanomaterials*", "*medicine*", "*graphene*", "*nanotubes*", "*applications*" e em português: "*nanomateriais*", "*medicina*", "*grafeno*", "*nanotubos*", "*aplicações*".

Como critérios de inclusão, foram considerados artigos originais, que abordassem o tema pesquisado e permitissem acesso integral ao conteúdo do estudo, publicados no período de 2014 a 2024, em inglês e português. O critério de exclusão foi imposto naqueles trabalhos que não estavam em inglês ou português, que não tinham passado por processo de Peer-View e que não abordassem o tema da pesquisa. A estratégia de seleção dos artigos seguiu as seguintes etapas: busca nas bases de dados

selecionadas; leitura dos títulos de todos os artigos encontrados e exclusão daqueles que não abordavam o assunto; leitura crítica dos resumos dos artigos e leitura na íntegra dos artigos selecionados nas etapas anteriores. Assim, totalizaram-se 20 artigos científicos para a revisão narrativa da literatura, com os descritores apresentados acima, conforme elucidado pelo diagrama da Figura 1.

**Figura 1** - Etapas de seleção de artigos para esta pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Grafeno e suas propriedades físico-químicas

As propriedades distintas do grafeno são derivadas de sua estrutura de rede cristalina particular. Dentro disto, a ligação entre cada átomo de carbono é hibridizada  $sp^2$  com a adição de orbitais  $\pi$ . Em cada célula unitária do grafeno, existem dois orbitais  $\pi$  que são dispersos para formar duas ligações  $\pi$ , ambas as quais podem ser conhecidas como ligação e antiligação (Chen et al., 2023). Esta rede organizada é um bloco de construção fundamental para todos os materiais gráficos em várias dimensões, nomeadamente (1) zero-dimensional (0D), por exemplo, ponto de carbono, fulerenos e nanodiamantes; (2) laminado unidimensional (1D), por exemplo, nanotubos de carbono; (3) bidimensional (2D), por exemplo, grafeno e óxido de carbono (GO); e (4) empilhado tridimensional (3D), por exemplo, grafite. A estrutura da família do grafeno também resulta em uma relação superfície-volume excepcional, alta mobilidade intrínseca, condutividade térmica incomparável e excelentes propriedades elétricas, optoeletrônicas e mecânicas que abriram caminho por serem ferramentas tecnológicas atraentes (Randviir et al., 2014).

O grafeno é conhecido como um dos materiais mais robustos conhecidos pelos humanos e é considerado 200 vezes mais forte que o aço. No GO, a ligação de hidrogênio se forma entre grupos hidroxila e epóxi e interações fracas com outros grupos. A existência do grupo ácido carboxílico oferece uma carga superficial negativa (seção hidrofílica); portanto, o GO tem estabilidade em diferentes soluções polares (particularmente água), enquanto o grafeno é inclinado à agregação. Além disso, devido aos elétrons  $\pi$  de superfície livre do grafeno não modificado (seção hidrofóbica), o GO tem uma estrutura anfifílica que pode atuar como um surfactante. O grafeno é hidrofóbico, e o GO, em comparação com o grafeno, pode ser hidrofílico ou hidrofóbico dependendo da química e funcionalização da química da superfície. Essas características fazem do GO o derivado mais importante do grafeno, que possui um processo fácil e uma alta afinidade para acomodar biomoléculas (Kim et al., 2023).

O aumento da reatividade química e da estabilidade do grafeno em solução está interligado com a presença de grupos funcionais de oxigênio reativos. O  $sp^2$  interrompido reduz suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. Embora o rGO tenha menos conteúdo de oxigênio, grupos funcionais hidrofílicos ou carga de superfície, por meio da modificação de interações não covalentes (por exemplo, interações de van der Waals e empilhamento  $\pi$ - $\pi$ ), a adsorção física de polímeros e pequenas biomoléculas em seu plano basal é aumentada notavelmente (Kim et al., 2023).

### 3.2 Óxido de grafeno e suas propriedades biológicas

Foi comprovado que a maioria dos GO e derivados são citocompatíveis *in vitro* e *in vivo*. No entanto, as propriedades físico-químicas dos materiais 2D, como estrutura, forma, tamanho, funcionalidade da superfície, concentração e estado de agregação, têm um impacto essencial no comportamento celular. O grafeno, com suas propriedades de borda afiada, tem o potencial de causar danos celulares durante a penetração das membranas celulares. Sua agregação também pode levar à citotoxicidade. O grafeno na nanoescala, quando  $<100$  nm, resulta em citotoxicidade, inflamação e até genotoxicidade (devido a enfrentar menos impedimento estérico). Em contraste, o grafeno com grupos funcionalizados (ou seja, GO, FGO, como o grupo amina e rGO) é facilmente internalizado pelas células (especialmente em tamanhos nano), além de causar perturbação mais irregular da membrana celular. Foi verificado que o GO e seus derivados têm propriedades antibacterianas específicas, que também são enfatizadas em aplicações de engenharia de tecidos (Lomas et al., 2023).

A atividade antibacteriana do GO está relacionada a vários mecanismos, incluindo estresse de membrana, estresse oxidativo, aprisionamento, plano basal e efeito fototérmico. O GO tem bordas afiadas que danificam a membrana celular, o que significa que pode, por sua vez, levar à mortalidade de células bacterianas por meio do mecanismo de estresse de membrana. A estrutura do GO permite que ele atue como um aceitador de elétrons; assim, na vizinhança de bactérias, ocorre a abstração de elétrons dentro da membrana, comprometendo a integridade da membrana e matando células bacterianas (particularmente *P. aeruginosa* e *S. aureus*). GO e rGO, devido à existência de grupos funcionalizados, podem alterar a pressão parcial de oxigênio intracelular, o que resulta em dano oxidativo que destrói a composição interna da célula bacteriana, particularmente *E. coli*, por meio da desativação de suas proteínas e lipídios, o que eventualmente leva à morte celular. O GO ilustrou efeitos sinérgicos com energia laser; portanto, tem sido usado para terapia fototérmica, aumentando diretamente sua atividade antibacteriana (Chang et al., 2023).

Outra propriedade fascinante que os GOBMs possuem é a atividade antioxidante, e os carbonos  $sp^2$  desempenham um papel essencial na eliminação de radicais pela formação de adutos radicais e transferência de elétrons. Devido a essa característica, esses biomateriais podem eliminar radicais de forma eficaz e proteger as células de altos níveis de estresse oxidativo. O grafeno, sendo não biodegradável (exceto FGO), apresenta sérias preocupações quanto à toxicidade potencial, resposta imunológica e riscos ambientais. É relatado que o GO é suscetível à biodegradação por ataque oxidativo através de peróxido de hidrogênio e peroxidase de raiz-forte. Portanto, muitas tentativas, como a fabricação de nanocompósitos, foram

realizadas para acelerar a biodegradação do GO, pois a taxa de degradação de biomateriais (ou seja, andaime) deve ser compatível com a taxa de tecidos e órgãos (Ju et al., 2023).

### 3.3 Engenharia do tecido nervoso, muscular e cardíaco

Sinais elétricos e estímulos externos aumentam a regeneração do tecido para tecido excitável, especificamente nervo, músculo e tecido cardíaco. A despolarização e a repolarização ocorrem entre os dois lados das membranas das células nervosas e musculares sob um potencial de ação, o que leva à sua atividade de contração e resposta a sinais elétricos. Materiais condutores, como GOBMs, com condutividade elétrica semelhante ao tecido nativo, são considerados andaimes promissores que estimulam a proliferação e diferenciação celular na terapia baseada em células-tronco, com citotoxicidade reduzida e propriedades mecânicas aprimoradas. Eles são melhores transmissores de elétrons em comparação com outros materiais eletrônicos, como nanotubos de carbono (Zhang et al., 2023).

Muito esforço foi feito para reparar lesões neuronais, auxiliado por GOBMs para fornecer as vias de sinalização entre as células. Apesar do resultado celular aceitável do filme GO na regeneração do tecido neural, o pré-revestimento do GO por polímeros (por exemplo, colágeno, laminina, poli-L-lisina (PLL) ou PDL) pode melhorar a adesão celular. Também não há preferência entre utilizar grafeno ou filme de GO porque a diferenciação neural é afetada por diferentes abordagens de fabricação e diferentes tipos de células. Além disso, estudos demonstraram a diferenciação neural aprimorada de uma esteira de GO em comparação com uma esteira de rGO imergindo o vidro modificado em 1,5 mg/mL de solução aquosa de GO e, em seguida, reduziram os grupos contendo oxigênio para obter uma esteira de rGO. As propriedades excepcionais das estruturas 3D de GO, como esteiras eletrofiadas, espuma, hidrogéis e fundição camada por camada (LBLC), além de seu papel de suporte na viabilidade celular e diferenciação de células neurais, são sua porosidade suficiente, que facilita a troca de nutrientes e uma alta relação superfície/volume, que fornece caminhos altamente condutores para transporte de carga em redes neurais (Zhang et al., 2023).

Ademais, materiais biodegradáveis, incluindo policaprolactona (PCL) e poli (ácido láctico-co-glicólico) (PLGA), são os polímeros mais populares junto com GOBMs propostos na engenharia de tecido nervoso por eletrofição nos últimos anos. No projeto de eletrofição, atingir uma concentração ótima de GO é substancial, pois a concentração de GO afeta a estrutura físico-química, as propriedades mecânicas e, eventualmente, as propriedades biológicas do material. Assim, é necessário fabricar um andaime com uma concentração variada de GO. A concentração de GO pode afetar o diâmetro da fibra em esteiras eletrofiadas. Posteriormente, a concentração de GO pode afetar a colonização celular no andaime, que é outro parâmetro importante na engenharia de tecido nervoso. Além do efeito importante da concentração de GO, o estado de secura ou umidade do andaime também afeta suas propriedades finais. Um novo estudo em 2021 revelou que a condutividade, atividade metabólica e proliferação celular do andaime, que é uma combinação de fibroína de seda e GO (ou rGO), aumenta após a hidratação (Farzin et al., 2023).

Devido à dispersibilidade limitada de materiais à base de grafeno (particularmente grafeno puro) em solventes, o método convencional de eletrofição não é considerado uma estratégia eficiente. Assim, em novas abordagens, os GOBMs são revestidos na superfície do andaime nanofibroso em vez de encapsulados em fibras, sem efeito prejudicial na estrutura nanofibrosa. Semelhante aos nervos, os músculos (esqueléticos, cardíacos e lisos) têm uma característica de resposta a estímulos elétricos; portanto, a utilização de biomateriais condutores foi proposta. Não houve diferença na adesão celular e no crescimento celular em uma esteira eletrofiada GO aleatória e alinhada, que foi modificada com plasma de oxigênio. A espuma de poliuretano (PU) GO é considerada um arcabouço benéfico para a miogênese na engenharia de tecidos esqueléticos. Este arcabouço é fabricado pelo método de revestimento por imersão com uma concentração biocompatível de 10 µg/mL para GO.

Os resultados mostraram diferenciação miogênica espontânea aprimorada sem quaisquer fatores miogênicos (Mohammadi-Manesh et al., 2023).

Conforme mencionado, os músculos cardíacos são eletricamente condutores ( $0,03$  a  $0,6$  S/m<sup>3</sup>); portanto, os biomateriais condutores (especialmente com substratos poliméricos) são candidatos potenciais que podem imitar a matriz extracelular nativa (ECM) para o crescimento celular, promover a condução do sinal elétrico e preservar o acoplamento elétrico entre as células do miocárdio. A incorporação de GOBMs pode tratar vários distúrbios cardíacos, incluindo regeneração cardíaca após infarto do miocárdio (IM), distúrbios de condução e restauração (Tiwari et al., 2020).

Particularmente no caso de IM, os GOBMs podem superar o alto estresse oxidativo no tecido infartado devido à atividade antioxidante. Uma combinação de outros biomateriais, principalmente GO e rGO, poderia ser usada para desenvolver vasos sanguíneos e válvulas cardíacas para superar os defeitos e parece ser uma alternativa atraente para próteses mecânicas e biológicas devido à alta durabilidade, alta biocompatibilidade e ser hemodinâmica. Por meio da eletrofição, matrizes nanofibras aleatórias e alinhadas podem ser fabricadas para permitir a investigação da condutividade isotrópica (Tiwari et al., 2020).

Para esse objetivo, misturas de fibroína de seda com GO (SF/GO) e rGO (SF/rGO) foram preparadas para eletrofição aleatória e alinhada em um estudo anterior, o que resultou em propriedades de condução elétrica superiores em SF/rGO (de uma resistência média de  $4866,7$  M $\Omega$  a  $4,3$  M $\Omega$ ) de maneira dependente da concentração. As nanofibras alinhadas não apenas causaram condutividade anisotrópica, mas também alinharam e fortaleceram estruturas sarcoméricas, com uma espessura ótima de rGO de  $\sim 100$  nm. A concentração de  $0,02$ – $0,08$  mg/mL de rGO aumentou fundamentalmente a expressão de proteínas cardíacas específicas, a formação de junções comunicantes, a taxa de batimentos, a contração do tecido cardíaco e a regeneração. A micro e nanopadronização é outro método para desenvolver andaimes condutores anisotrópicos para aumentar a biomimética de construções de tecido cardíaco. Smith et al. transferiram filmes de GO para substratos poliméricos, de polietilenoglicol (PEG) e topográficos. O andaime eletrocondutor tinha uma resistência de  $7,071 \pm 0,124$  K $\Omega$  na orientação transversal, o que indicou um incremento na propriedade miofibrilar e sarcômero, acoplamento célula-célula e expressão de proteína de manuseio de cálcio e potencial de ação. Em vários estudos, outros andaimes condutores (ou seja, hidrogéis, microgéis, esponjas e espumas), com uma combinação de GOBMs, fabricaram e melhoraram fundamentalmente a regeneração e a função cardíaca (Kumar et al., 2019).

### 3.4 Engenharia de Tecidos Ósseos

O osso tem uma capacidade proeminente de regeneração; no entanto, o esqueleto humano tem uma capacidade limitada de autorregeneração quando os defeitos ósseos são grandes o suficiente ou de tamanho crítico. Várias abordagens diferentes foram utilizadas para engenharia de tecido ósseo (BTE); as mais comuns foram aquelas que tentaram imitar o processo natural de reparo ósseo usando andaimes osteocondutores 3D. Recentemente, o potencial dos GOBMs ganhou tremenda atenção para facilitar e melhorar o BTE em suas várias formas, ou seja, andaimes, revestimentos, membranas ósseas guiadas e sistemas de administração de medicamentos (Kumar et al., 2019).

Além disso, os GOBMs, particularmente com baixo teor de oxigênio, têm uma influência fundamental nas células-tronco mesenquimais adultas (MSCs) para aumentar a osteoindutividade e a osteocondutividade. O osso é um tecido piezoelétrico; portanto, usando GOBMs, eles fornecem requisitos mecânicos e biológicos essenciais ou condutividade elétrica. GOBMs, rGO em particular, podem aumentar os níveis de biocompatibilidade, atividade da fosfatase alcalina e depósitos de cálcio, que são essenciais para a regeneração óssea. Fosfato de cálcio bifásico (BCP) revestido com rGO (BCP-rGO) em várias concentrações foi fabricado em um estudo anterior. Resumidamente, os materiais de enxerto ósseo preparados foram implantados em ratos com defeitos calvários, o modelo comum para investigar a regeneração óssea nova (Kumar et al., 2018).

O enxerto resultou em um novo volume de formação óssea após oito semanas, particularmente em um espécime com uma proporção de concentração de 4:1000 rGO:BCP ( $7,65 \pm 1,39 \text{ mm}^3$ ). Os resultados indicaram que o rGO aumenta a regeneração óssea, embora quando a porcentagem de rGO excedeu um certo nível limite ( $\geq 100 \mu\text{g/mL}$ ), tornou-se severamente citotóxico, o que está de acordo com outros estudos. Recentemente, pesquisadores desenvolveram andaimes impressos em 3D envolvendo GOBMs para imitar não apenas a geometria óssea, mas também a remodelação óssea. Wang et al. fabricaram um novo andaime impresso em 3D feito de poli( $\epsilon$ -caprolactona)/grafeno. Como esperado, a adição de pequenas concentrações de GO melhorou as propriedades mecânicas e a osteogênese (aplicando estimulação elétrica,  $10 \mu\text{A}$ ), o que levou a um melhor tratamento de defeitos ósseos e deposição óssea (Maegawa et al., 2023).

Além disso, os GOBMs (GO e rGO em particular) apresentaram atividade antimicrobiana sem comprometer a viabilidade, a fixação e a proliferação dos osteoblastos. Uma característica fundamental dos GOBMs é a capacidade de induzir diferenciação óssea, o que leva ao rápido reparo ósseo. Foi relatado que andaimes compostos bioinspirados baseados em gelatina e GO (GG) poderiam induzir a diferenciação bidirecional de células estromais da medula óssea (BMSCs) ativando a via Erk1/2 e AKT. A presença de GG criou a hipóxia inicial, que gradualmente se transformou em uma condição robusta de vasculatura bem com a bidiferenciação de BMSCs em modelos de defeitos calvários (Rana et al., 2022).

### 3.5 Aplicações do grafeno e seus derivados na Medicina

Com sua estrutura de nanoporos, o grafeno foi usado na área da saúde, especialmente no tratamento de doenças como administração de medicamentos, terapia genética, reparo de células cerebrais e nervosas, replicação de DNA, epilepsia e diabetes. Os nanoporos de grafeno eram compatíveis com a estrutura e o tamanho dentro da célula e, ao mesmo tempo, eram usados para administração de medicamentos, direcionamento para regiões relevantes, ajuste de dose no uso de medicamentos e diagnóstico de doenças quando eram reunidos com pequenas nanoestruturas e entregues ao corpo, transformando-os em eletrólitos e biossensores para pacientes usarem medicamentos continuamente ou para um dispositivo. Ele proporcionou facilidade de posicionamento em áreas sensíveis, como o cérebro e os nervos, com sua estrutura flexível. Por ter poros, permitiu que a replicação do DNA fosse replicada afetando-o eletricamente através do poro. Ele proporcionou fácil detecção de doenças hereditárias e tratamento delas por meio do transporte de genes. Devido à estrutura do grafeno, ele foi objeto de pesquisa em muitos campos. As propriedades do grafeno foram melhor utilizadas com sistemas compostos. A produção de compósitos de filme fino proporcionou vantagens nos campos de dispositivos eletrônicos flexíveis e displays inteligentes. Dessa forma, o potencial de biossensores, aplicações antimicrobianas e dispositivos substituíveis no corpo humano aumentaram o uso do material no campo da saúde (Kumar et al., 2017; Kumar et al., 2022).

Além disso, ele ofereceu vantagens em aplicações biomédicas com os pontos quânticos de carbono e semicondutores obtidos usando óxido de grafeno e micro-ondas (MW), que eram derivados do grafeno. Como esses dois materiais tinham propriedades mecânicas, eletrônicas e ópticas mais fortes do que outros materiais, biossensores foram usados para engenharia de tecidos. Esses dois materiais ofereceram opções de diagnóstico e tratamento precoces para a doença até então conhecida, que era difícil de tratar. O material de grafeno era um dos alótropos importantes do elemento carbono e era um material importante em termos de ter propriedades bidimensionais e superiores. Era o material mais forte e leve conhecido no mundo até agora, conduzia corrente elétrica muito bem em comparação com metais e tinha alta resistência térmica. Além disso, era a única forma de carbono que permitia fácil reação química em ambos os lados devido à sua estrutura bidimensional (Depan et al., 2021).

## 4. Considerações finais

Neste artigo, foi realizada uma revisão abrangente da literatura sobre o uso do grafeno e seus derivados no campo da saúde. Quando os resultados foram examinados, observou-se que o nanomaterial de grafeno e os nanoporos de grafeno poderiam ser usados de forma versátil no campo da saúde e poderiam alcançar resultados bem-sucedidos em comparação aos métodos de tratamento atuais. No futuro, o uso do grafeno e seus nanoporos no campo da saúde mudaria completamente os métodos de tratamento existentes.

## Referências

- Chang, S., et al. (2023). Sondando as características de desgaste do grafeno em substratos de polímero flexíveis usando uma ponta de microscopia de força atômica aquecida. *Mater*, 6 (5).
- Chen, W., et al. (2023). Um eletrodo de filme composto flexível e supercapacitor baseado no efeito combinado entre óxido de grafeno e grafeno. *Mater*, 16 (7).
- Depan, D., et al. (2021). Liberação controlada de fármaco a partir de sistema de administração de fármacos mediado por grafeno e decorado com folato: síntese, eficiência de carga e resposta à liberação do fármaco. *Internacional J. Pharm.*, 6 (2).
- Farzin, A., et al. (2023). Investigando as propriedades mecânicas do  $\psi$ -grafeno perfeito e defeituoso: uma simulação de dinâmica molecular. *Mater*, 4 (3).
- Ju, B., et al. (2023). Efeito de defeitos de vacância do grafeno na ligação interfacial e no mecanismo de fortalecimento do compósito grafeno/Al. *Interfaces*, 7 (2).
- Kim, M., et al. (2023). Ajuste da função de trabalho do grafeno cultivado diretamente por meio de tratamento ultravioleta-ozônio para aplicação de eletrodos em dispositivos fotovoltaicos orgânicos. *Interfaces*, 6 (3).
- Köche, J. C. (2011). Fundamentos de metodologia científica. Petrópolis: Vozes.
- Kumar, R., et al. (2017). Síntese, redução e micropadronização assistida por laser de grafeno: progressos e aplicações recentes. *Internacional J. Pharm.*, 5 (4).
- Kumar, R., et al. (2018). Avanços recentes na síntese e modificação de materiais 2D à base de carbono para aplicação em conversão e armazenamento de energia. *Internacional J. Pharm.*, 10 (1).
- Kumar, R., et al. (2019). Progresso recente na síntese de grafeno e materiais derivados para eletrodos de próxima geração de baterias de íons de lítio de alto desempenho. *Internacional J. Pharm.*, 8 (4).
- Kumar, R., et al. (2022). Processamento a laser de grafeno e materiais relacionados para armazenamento de energia: estado da arte e perspectivas futuras. *Internacional J. Pharm.*, 8 (4).
- Lomas, T., et al. (2023). Esfoliação eletrolítica de grafeno/dodecilbenzenossulfonato de sódio de poucas camadas para eletrodos supercapacitores de células cilíndricas e tipo moeda. *Diam. Relat. Mat.*, 1 (4).
- Maegawa, K., et al. (2023). Desenvolvimento de modificação de polibenzimidazol com membranas compostas de óxido de grafeno poroso/de bordas abertas para excelente estabilidade e melhor desempenho de célula de combustível PEM. *Internacional J. Pharm.*, 6 (4).
- Mohammadi-Manesh, E., et al. (2023). Grafeno monocamada e bicamada dopado com Ag para sensor de gás e purificador de óleos industriais. *Acta Biomater*, 5 (7).
- Rana, D. S., et al. (2022). Nanocompósito bidimensional de óxido de grafeno reduzido em camadas-dissulfeto de tungstênio para determinação altamente sensível e seletiva de para nitrofenol. *Nanotecnologia Ambiental*, 8 (1).
- Randviir, E. P., et al. (2014). Uma década de pesquisa sobre grafeno: produção, aplicações e perspectivas. *Nanotecnologia Ambiental*, 10 (3).
- Sampiere, R. H. et al. (2013). Metodologia da pesquisa. Bookman/McGrawHill.
- Singh, D. P., et al. (2018). Óxido de grafeno: um material eficiente e uma abordagem recente para aplicações biotecnológicas e biomédicas. *Materials Science and Engineering*, 31 (10).
- Singh, D. P., et al. (2019). Progresso na síntese assistida por micro-ondas de pontos quânticos (grafeno/carbono/semicondutor) para bioaplicações: uma revisão. *Internacional J. Pharm.*, 5 (1).
- Tiwari, S. K., et al. (2020). Pesquisa sobre grafeno e seus resultados: status e perspectiva. *Acta Biomater*, 9 (1).
- Zhang, Y., et al. (2023). Desenvolvimento de um fio de algodão altamente condutor e resistente por meio de arquitetura de dupla camada de grafeno para dispositivos vestíveis inteligentes Engenharia Química. *Mater*, 6 (6).
- Zhou, Y., et al. (2023). Nanotubos de carbono de crescimento verde em grafeno para baterias de lítio-enxofre de alto desempenho. *Mater*, 14 (1).