

GRAFENO NA ODONTOLOGIA: POTENCIAL DE MODIFICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAIS — UMA REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA

Fabiano Luiz Heggendorn¹; Alexandre Antunes Ribeiro²; Francisco Luiz Correa Rangel²; Fernanda Cristina de Souza Coelho dos Santos²; Mauricio Paiva²; Millene Rodrigues de Souza¹; Marcella Maria Pinna Lopes¹

1 Programa de Pós-Graduação em Odontologia, Universidade do Grande Rio (UNIGRANRIO), Duque de Caxias, RJ, Brasil.

2 Instituto Nacional de Tecnologia (INT), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail do autor principal: marcellamaps.pina@gmail.com

RESUMO

A entrada do grafeno na biomedicina foi gradual e consistente; seus derivados, especialmente o óxido de grafeno, acumularam evidências suficientes para se tornarem um dos nanomateriais mais investigados da atualidade. A razão está nas propriedades: área superficial elevada, dispersibilidade em meio aquoso, grupos funcionais reativos e capacidade de se ligar a proteínas, fármacos e outras moléculas bioativas. O grafeno e seus derivados têm sido aplicados em diversas áreas, como engenharia de tecido, desenvolvimento de eletrodos, sensores, drug delivery e terapias para o câncer. A nanotecnologia surge como alternativa promissora para superar essas limitações, e o óxido de grafeno, nanomaterial bidimensional de propriedades mecânicas, químicas e antimicrobianas notáveis, demonstra-se como um candidato relevante para incorporação em biomateriais odontológicos. Aplicações em engenharia tecidual, regeneração óssea, implantes dentários, materiais restauradores, biossensores e sistemas de liberação de fármacos são potenciais já alcançados pelo grafeno. Este estudo teve como objetivo analisar as evidências disponíveis na literatura acerca do potencial do grafeno e de seus derivados na modificação e no desenvolvimento de biomateriais aplicados à Odontologia.

Palavras-chave: Biomateriais; Nanotecnologia; Óxido de grafeno; Materiais dentários.

1- INTRODUÇÃO

O grafeno consiste em uma folha plana de átomos de carbono organizados em rede hexagonal, com espessura equivalente a um único átomo, configurando-se como um material genuinamente bidimensional. Essa singularidade estrutural confere-lhe propriedades mecânicas, físico-químicas, elétricas, térmicas e ópticas notáveis, o que tem despertado interesse crescente em pesquisas das mais variadas áreas do conhecimento^{1,2}. Essa estrutura corresponde à rede de Bravais da física do estado sólido, na qual cada átomo de carbono se liga a outros três, formando um arranjo hexagonal que remete à estrutura de um favo de mel^{3,4}.

Cotado como o material do futuro, o grafeno representa um dos exemplos mais expressivos da incorporação da nanotecnologia à sociedade contemporânea, com impactos

significativos na produção e no desenvolvimento tecnológico. Sua capacidade de operar em escala nanométrica, aliada às propriedades já descritas, posiciona-o como um dos nanomateriais mais investigados e promissores da atualidade⁵.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão integrativa da literatura, o potencial do grafeno e de seus derivados na modificação e no desenvolvimento de biomateriais aplicados à Odontologia.

2- METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, norteada pela questão: “Qual o potencial do grafeno e de seus derivados para o desenvolvimento e modificação de biomateriais aplicados à Odontologia?”. O levantamento foi realizado nas bases PubMed/MEDLINE e SciELO, combinando os descritores “graphene”, “graphene oxide”, “biomaterials”, “dentistry” e “dental materials” pelos operadores booleanos AND e OR. Foram incluídos relatórios de consenso, diretrizes de prática clínica, revisões sistemáticas, revisões narrativas de escopo abrangente e estudos clínicos originais com desfechos em biomateriais, publicados entre 2004 e 2025, em português e inglês; excluíram-se relatos de casos isolados, cartas ao editor e resumos de anais. Dezesete publicações compuseram o corpus final.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Óxido de grafeno

O grafeno, em sua forma pura, é um material hidrofóbico e de difícil manipulação química. Quando submetido à oxidação, porém, sua natureza muda de maneira significativa, e é dessa transformação que surge o óxido de grafeno (GO). Trata-se de uma folha derivada do óxido de grafite, na qual os átomos de carbono passam a compartilhar espaço com grupos funcionais oxigenados: hidroxila, epóxido e carboxila, principalmente. Essa mudança estrutural é o que torna o GO solúvel em água e quimicamente acessível a uma variedade muito maior de compostos⁶.

3.2 Propriedades do grafeno

O que torna o grafeno tão singular não é uma propriedade isolada, mas a combinação de características excepcionais que coexistem em um único material de espessura atômica. Elétrica, térmica, óptica e mecanicamente, o grafeno ocupa posição de destaque entre os materiais mais estudados da ciência contemporânea. A relação antibacteriana do grafeno sobre bactérias Gram-positivas e Gram-negativas é dose-dependente: altas concentrações de GO

inibem a formação de biofilmes dessas bactérias, ao passo que baixas concentrações podem aumentar sua formação, criando uma reação adversa à esperada⁷. As propriedades antibacterianas tornam o grafeno um biomaterial de excelência para a Odontologia, sendo a baixa citotoxicidade e a capacidade de multidiferenciação características necessárias para essa aplicação; os efeitos antibacterianos de materiais à base de grafeno foram descobertos pela primeira vez por Hu et al.⁸

3.3 Aplicações do grafeno em biomateriais odontológicos

O grafeno em poucas camadas (few-layer graphene, FLG) apresentou elevada biocompatibilidade, além de potencial para melhorar as propriedades mecânicas de biomateriais odontológicos e atividade antimicrobiana contra microrganismos associados às doenças bucais, reduzindo a formação de biofilmes e o risco de infecções secundárias, propriedade essencial em materiais restauradores⁹.

Ainda que promissora, a capacidade antimicrobiana do grafeno apresenta controvérsias, atribuídas a diferenças de dosagem, tempo de exposição, cepa bacteriana e condições experimentais^{10,11}, o que reforça a necessidade de estudos que definam as condições ideais de uso em meio biológico.

Na área odontológica, novos materiais são lançados de forma crescente no mercado. Nesse sentido, os biomateriais estão em contato direto com tecidos pulpares, dentina, periodonto e osso alveolar¹², devendo apresentar propriedades biológicas capazes de suprir ou reparar os tecidos por interação com os sistemas biológicos, estimulando adesão e proliferação celular e biocompatibilidade, além de propriedades físicas, mecânicas e químicas adequadas¹³. O GO cria um microambiente propício à osteogênese e à angiogênese, favorecendo a condução de osteoblastos e de suas células precursoras para os sítios lesados, processos essenciais na regeneração óssea¹⁴. Apresenta ainda potencial osteocondutor e osteoindutor¹⁵, dá suporte ao periósteo, acelera a remodelação óssea e estimula fatores de crescimento.

3.4 Grafeno: nanomaterial promissor na Odontologia e suas aplicações em biomateriais odontológicos

Xing e Liu¹⁶ relataram que biomateriais contendo óxido de grafeno promovem adesão, proliferação e diferenciação de osteoblastos, além de estimular a deposição de matriz óssea e a regeneração de defeitos ósseos.

Já Malta et al.¹⁷, concluíram que o grafeno e seus derivados apresentam elevada biocompatibilidade e excelentes propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, com potencial

como revestimento de biomateriais metálicos na Odontologia. As evidências sugeriram que os materiais à base de grafeno constituem um arcabouço multifuncional capaz de contribuir para avanços em implantodontia, periodontia, engenharia tecidual e materiais restauradores; ainda são necessários, porém, estudos clínicos de longo prazo que confirmem sua segurança e eficácia em aplicações rotineiras¹⁷.

Estudos verificaram que o grafeno inibiu a atividade bacteriana de *Porphyromonas gingivalis* e de *Candida albicans*, ao induzir alta concentração de grupos ativos contendo oxigênio em sua superfície; essa propriedade permite ligação química com medicamentos antibacterianos, potencializando o efeito antibacteriano e antifúngico^{18,19,20}.

3.5 Limitações e desafios dos materiais à base de grafeno: considerações de biossegurança

Em virtude de suas excelentes características e do avanço de suas aplicações biomédicas, é necessário compreender os aspectos que podem levar à toxicidade humana, animal ou ambiental do grafeno. Discute-se o poder citotóxico, a biocompatibilidade e a biodegradabilidade desses compostos de carbono em contato com o organismo; apesar dos efeitos biológicos favoráveis, alguns estudos relataram possíveis efeitos nocivos^{21,22}.

A variedade de resultados sobre a capacidade tóxica do grafeno reforça a necessidade de investigar seu perfil de segurança, ao mesmo tempo em que evidencia sua possível aplicação em meio biológico. Estudos *in vitro* demonstraram que o grafeno e seus derivados possuem capacidade de multidiferenciação osteogênica e de regeneração da polpa dentária em variados tipos celulares, incluindo células-tronco mesenquimais da medula óssea, do ligamento periodontal e da polpa dentária^{23,24,25,26}.

Embora o grafeno utilizado em estudos controlados seja considerado livre de defeitos, a qualidade da síntese deve ser rigorosamente examinada em contexto clínico, pois defeitos de produção podem variar e se tornar imprevisíveis²⁷.

4- CONCLUSÃO

O grafeno e seus derivados apresentam potencial promissor para aplicação em biomateriais odontológicos, principalmente devido às suas propriedades físico-químicas, mecânicas, antimicrobianas e biológicas. Entretanto, diferenças relacionadas à concentração, à funcionalização e à metodologia dos estudos ainda dificultam a padronização dos resultados, sendo necessários novos estudos para estabelecer segurança e aplicabilidade clínica.

REFERÊNCIAS

1. Novoselov KS, et al. A roadmap for graphene. *Nature*. 2012;490(7419):192-200.
2. Sun H, Xu Z, Gao C. Mechanical, thermal and electrical properties of graphene oxide/epoxy resin composites. *RSC Adv*. 2015;5(103):84652-61.
3. Ashcroft NW, Mermin ND. *Solid state physics*. 1st ed. New York: Cengage Learning; 1976.
4. Kittel C. *Introduction to solid state physics*. 8th ed. New York: John Wiley and Sons; 2004.
5. Ramos RM. Produção do grafeno a partir da grafita natural. *Holos*. 2021;37(2):e8861.
6. Warner JH, Schaffel F, Bacsá RR, Rummeli MH. *Graphene: fundamentals and emergent applications*. Amsterdam: Elsevier; 2013.
7. Song C, et al. Influências do óxido de grafeno na formação de biofilmes de bactérias gram-negativas e bactérias gram-positivas. 2018;25(3):2853-60.
8. Hu W, Peng C, Luo W, Lv M, Li X, Li D, et al. Graphene-based antibacterial paper. *ACS Nano*. 2010;4(7):4317-23.
9. Li X, Liang X, Wang Y, Wang D, Teng M, Xu H, et al. Graphene-based nanomaterials for dental applications: principles, current advances and future perspectives. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:804201.
10. Palmieri V, et al. Bacteria meet graphene: modulation of graphene oxide nanosheet interaction with human pathogens for effective antimicrobial therapy. *ACS Biomater Sci Eng*. 2017;3(4):619-27.
11. Seifi T, Kamali AR. Anti-pathogenic activity of graphene nanomaterials: a review. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2021;199:111509.
12. Sinhoreti MAC, Vitti RP, Correr-Sobrinho L. Biomateriais na Odontologia: panorama atual e perspectivas futuras. *Rev Assoc Paul Cir Dent*. 2013;67(4):256-61.
13. Pires ALR, Bierhalz AC, Moraes ÂM. Biomateriais: tipos, aplicações e mercado. *Quím Nova*. 2015;38(7):957-71.
14. Wang W. Efeitos do óxido de grafeno na diferenciação osteogênica e no reparo de defeitos ósseos [dissertação]. Xangai: Universidade Jiao Tong de Xangai; 2020.
15. Hörlle L. Avaliação do processo de cicatrização óssea com diferentes biomateriais em fêmur de ratos [tese]. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul; 2013.
16. Xing J, Liu S. Application of graphene oxide-loaded biomaterials in the repair and treatment of bone defects. *Bone Joint Res*. 2024;13(12):725-40.
17. Malta AFO, Cortez DLL, Romão DA, Pereira JECH, Velo MMAC, Nascimento TRL. Aplicações do óxido de grafeno na odontologia: revisão integrativa da literatura. *J Health Sci*. 2019;21(4):376-81.

18. Wang X, et al. O Ti-6Al-4V revestido com grafeno exibe propriedades antibacterianas e antifúngicas contra patógenos orais. *J Prosthodont*. 2023;32(6):505-11.
19. Nizami MZI, et al. Estudos in vitro do grafeno para o tratamento de cáries dentárias e doenças periodontais: uma revisão concisa. *Pharmaceutics*. 2022;14:1997.
20. Marsala V, Gerasymchuk Y, Saladino ML, Paluch E, Wawrzyńska M, Boiko V, et al. Structural, morphological, and antibacterial attributes of graphene oxide prepared by Hummers' and Brodie's methods. *Molecules*. 2025;30(2):240.
21. Efremova LV, Vasilchenko AS, Rakov EG, Deryabin DG. Toxicity of graphene shells, graphene oxide, and graphene oxide paper evaluated with *Escherichia coli* biotests. *Biomed Res Int*. 2015;2015:869361.
22. Jia PP, Sun T, Junaid M, Yang L, Ma YB, Cui ZS, et al. Nanotoxicity of different sizes of graphene (G) and graphene oxide (GO) in vitro and in vivo. *Environ Pollut*. 2019;247:595-606.
23. Lee JH, et al. Reduced graphene oxide-coated hydroxyapatite composites stimulate spontaneous osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells. *Nanoscale*. 2015;7(27):11642-51.
24. Norahan MH, et al. Reduced graphene oxide: osteogenic potential for bone tissue engineering. *IET Nanobiotechnol*. 2019;13(7):720-5.
25. Xie H, Cao T, Gomes JV, Castro Neto AH, Rosa V. Two and three-dimensional graphene substrates to magnify osteogenic differentiation of periodontal ligament stem cells. *Carbon*. 2015;93:266-75.
26. Zhou Q, et al. Bioactivity of periodontal ligament stem cells on sodium titanate coated with graphene oxide. *Sci Rep*. 2016;6(1):19343.
27. Xiao Y, Pang YX, Yan Y, Qian P, Zhao H, Manickam S, et al. Synthesis and functionalization of graphene materials for biomedical applications: recent advances, challenges, and perspectives. *Adv Sci*. 2023;10(9):2205292.