

BIOMATERIAIS EMERGENTES E ESTRATÉGIAS REGENERATIVAS APLICADAS AO CAPEAMENTO PULPAR

EMERGING BIOMATERIALS AND REGENERATIVE STRATEGIES APPLIED TO PULP CAPPING

EVELLYN EDUARDA LIMA DOS SANTOS¹, NICOLLE BUENO CECHELERO¹, LAURA BEATRIZ FARTO BRUGNEROTTO¹, BEATRIZ RODRIGUES DOMINGUES¹, ANA BEATRIZ ZANONI DE OLIVEIRA¹, CARLA CATARINA SILVA², ANA PAULA MARQUES DA SILVA², VERIDIANA SILVA CAMPOS^{3*}

1. Acadêmica do curso de graduação de Odontologia da Universidade Estadual do Norte do Paraná; 2. Cirurgiã-Dentista graduada pela Universidade Estadual do Norte do Paraná. 3. Professora Doutora, Disciplina de Dentística do curso de Odontologia da Universidade Estadual do Norte do Paraná.

* Prolongamento da Avenida Pedro Coelho Miranda, S/N, Jardim Panorama, Jacarezinho, Paraná, Brasil. CEP: 86400-000.
veridiana.campos@uenp.edu.br

Recebido em 28/07/2026. Aceito para publicação em 14/08/2026

RESUMO

O capeamento pulpar visa preservar a vitalidade da polpa e estimular a formação de dentina reparadora. Entretanto, limitações associadas aos materiais convencionalmente empregados têm impulsionado a investigação de biomateriais emergentes e de estratégias regenerativas voltadas à modulação dos processos biológicos envolvidos no reparo do complexo dentino-pulpar. Este estudo teve como objetivo revisar a literatura acerca dos biomateriais emergentes com potencial aplicação em procedimentos de capeamento pulpar. Foi realizada uma revisão narrativa da literatura por meio de busca na base de dados PubMed, incluindo estudos publicados entre 2020 e 2025, dos quais foram selecionados 12 estudos. Os biomateriais e as estratégias regenerativas identificados na literatura incluíram sistemas adesivos antibacterianos, hidrogéis, compostos bioativos, sistemas híbridos de regeneração e exossomos. Em conjunto, os achados desta revisão indicam que essas abordagens apresentam potencial para preservar a vitalidade pulpar, estimular a formação de dentina reparadora e modular a resposta biológica do tecido pulpar. Conclui-se que os biomateriais emergentes representam alternativas promissoras para o capeamento pulpar. Entretanto, a maior parte das evidências disponíveis ainda é proveniente de estudos pré-clínicos, tornando necessários estudos clínicos adicionais para confirmar sua segurança, eficácia e previsibilidade a longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Capeamento da Polpa Dentária; Biomateriais; Polpa Dentária.

ABSTRACT

Pulp capping aims to preserve pulp vitality and stimulate the formation of reparative dentin. However, limitations associated with conventionally used materials have driven the investigation of emerging biomaterials and regenerative strategies aimed at modulating the biological processes

involved in dentin–pulp complex repair. This study aimed to review the literature on emerging biomaterials with potential applications in pulp capping procedures. A narrative literature review was conducted through a search of the PubMed database, including studies published between 2020 and 2025, of which 12 were included. The biomaterials and regenerative strategies identified in the literature included antibacterial adhesive systems, hydrogels, bioactive compounds, hybrid regenerative systems, and exosomes. Overall, the findings of this review indicate that these approaches have the potential to preserve pulp vitality, stimulate reparative dentin formation, and modulate the biological response of pulp tissue. Emerging biomaterials represent promising alternatives for pulp capping. However, most of the currently available evidence is still derived from preclinical studies, highlighting the need for additional clinical studies to confirm their long-term safety, efficacy, and predictability.

KEYWORDS: Dental Pulp Capping; Biomaterials; Dental Pulp.

1. INTRODUÇÃO

A terapia pulpar vital consiste em uma abordagem conservadora destinada à manutenção da vitalidade e da integridade do tecido pulpar frente a diferentes formas de injúria. Entre os procedimentos empregados, destacam-se o capeamento pulpar direto e indireto, amplamente utilizados com o objetivo de preservar a vitalidade da polpa e favorecer os processos de reparo tecidual. Nesses procedimentos, materiais protetores são aplicados sobre a polpa exposta ou sobre a dentina remanescente, buscando estimular a formação de dentina reparadora e contribuir para a manutenção do complexo dentino-pulpar^{4,5,6}.

Embora materiais como o hidróxido de cálcio (HC) e os cimentos à base de silicato de cálcio tenham contribuído significativamente para a evolução das

terapias conservadoras da polpa, limitações relacionadas às suas propriedades físico-químicas e biológicas ainda persistem. Deficiências associadas ao selamento, à solubilidade, ao tempo de presa, à manipulação clínica e à capacidade limitada de estimular respostas biológicas associadas ao reparo tecidual têm incentivado a busca por novas alternativas terapêuticas^{2,4,5,8}.

Nesse contexto, diferentes biomateriais têm sido investigados com o objetivo de favorecer o reparo do complexo dentino-pulpar e superar algumas das limitações associadas aos materiais convencionalmente empregados^{4,9}. Além de adequada biocompatibilidade e atividade antimicrobiana, espera-se que esses materiais sejam capazes de estimular processos relacionados à diferenciação celular, mineralização e reparo tecidual^{2,4,8}. Nesse cenário, a investigação de novas abordagens tem avançado além da busca por materiais com função predominantemente protetora, incorporando estratégias voltadas à regeneração tecidual e à modulação biológica da resposta pulpar. Entre as abordagens mais promissoras destacam-se os hidrogéis injetáveis, os exossomos e os sistemas de liberação controlada de moléculas bioativas, que apresentam potencial para atuar não apenas como barreiras protetoras, mas também como mediadores dos processos envolvidos no reparo pulpar^{5,6,9}.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo revisar a literatura acerca de biomateriais emergentes com potencial aplicação em procedimentos de capeamento pulpar, destacando as principais estratégias investigadas, suas características biológicas e seu potencial para favorecer o reparo do complexo dentino-pulpar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada uma revisão narrativa da literatura acerca de biomateriais emergentes e estratégias regenerativas com potencial aplicação em procedimentos de proteção do complexo dentino-pulpar. A busca bibliográfica foi realizada na base de dados PubMed, utilizando os termos de busca em inglês "*dental pulp capping*", "*vital pulp therapy*", "*dentin regeneration*", "*biomaterials*", "*hydrogel*", "*exosomes*" e "*bioactive materials*", empregados de forma isolada e em diferentes combinações, conforme a pertinência ao tema. Foram considerados artigos publicados em língua inglesa entre 2020 e 2025.

Foram incluídos estudos experimentais *in vitro* e *in vivo*, estudos clínicos e revisões da literatura que abordassem o desenvolvimento, a caracterização ou a avaliação biológica de biomateriais com potencial aplicação na preservação da vitalidade pulpar e na regeneração dentino-pulpar. Foram excluídos estudos voltados predominantemente para biomateriais já consolidados na prática clínica, pesquisas direcionadas exclusivamente a dentes decíduos, terapias endodônticas sem relação direta com o capeamento pulpar e estudos limitados à caracterização físico-química de biomateriais que não apresentassem avaliação biológica nem discussão sobre seu potencial

de aplicação na terapia pulpar vital.

A seleção dos estudos foi realizada por meio da leitura dos títulos, resumos e textos completos, considerando sua relevância e compatibilidade com o objetivo da revisão. Ao final desse processo, foram incluídos 12 estudos, cujos achados foram organizados de acordo com a natureza dos biomateriais investigados e seus respectivos mecanismos de atuação no reparo e na regeneração do complexo dentino-pulpar.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Além dos materiais tradicionalmente utilizados no capeamento pulpar, biomateriais de nova geração têm sido investigados com o objetivo de favorecer a preservação da vitalidade pulpar, modular a resposta inflamatória e estimular a formação de dentina reparadora⁹. Entre as estratégias avaliadas nos estudos incluídos nesta revisão, destacam-se materiais bioativos e mineralizadores, compostos naturais, hidrogéis, exossomos e sistemas de liberação controlada.

O sistema adesivo autocondicionante Clearfil Protect Bond (CPB), contendo o monômero antibacteriano MDPB (12-methacryloyloxydodecylpyridinium bromide), foi avaliado por Cobanoglu *et al.* (2021)² como potencial material para capeamento pulpar direto. Os resultados demonstraram manutenção da vitalidade pulpar e resposta inflamatória semelhante à observada para o HC. Embora a formação completa de tecido duro tenha sido mais frequente no grupo tratado com HC, o sistema contendo MDPB também promoveu formação parcial desse tecido, diferentemente do adesivo autocondicionante convencional utilizado para comparação.

Os hidrogéis também têm sido investigados como alternativa promissora para procedimentos de capeamento pulpar. Wang *et al.* (2021)¹¹ desenvolveram um hidrogel funcionalizado com notoginsenosídeo R1 (Gel-MA/NGR1), cujos resultados demonstraram adequada biocompatibilidade, além de favorecerem a diferenciação odontogênica e a formação de tecido mineralizado no modelo experimental. De forma semelhante, Zhao *et al.* (2023)¹² desenvolveram um hidrogel injetável de Fmoc-trifenilalanina contendo nanopartículas de óxido de cério e proteína da matriz dentinária (CNPs/DMP1), observando redução da taxa de necrose, reparo do tecido pulpar lesionado e formação de dentina reparadora. Em revisão recente, Islam *et al.* (2025)⁵ destacam que os hidrogéis injetáveis apresentam características favoráveis, incluindo elevada biocompatibilidade, adaptação ao local de aplicação, capacidade de incorporação e liberação de moléculas bioativas e potencial para estimular processos relacionados à cicatrização pulpar, modulação da inflamação e formação de dentina reparadora.

Outra estratégia investigada consiste no desenvolvimento de cimentos à base de trimetafosfato de sódio. Franzin *et al.* (2022)⁴ avaliaram diferentes formulações desse biomaterial e observaram tempo de presa adequado para utilização na proteção do complexo

dentino-pulpar. Além disso, os materiais atenderam aos requisitos mínimos de radiopacidade e apresentaram atividade antimicrobiana frente a microrganismos, como *Streptococcus mutans* e *Lactobacillus casei*. As formulações contendo nanopartículas também demonstraram melhores propriedades mecânicas, quando comparadas às versões microparticuladas, especialmente em relação à resistência à compressão.

Pedram *et al.* (2023)⁷ avaliaram um cimento experimental composto por vidro bioativo e óxido de zinco modificado por resina orgânica como potencial material para capeamento pulpar. O estudo analisou parâmetros como formação de hidroxiapatita, resistência à compressão, resistência de união ao cisalhamento e citotoxicidade. Algumas formulações apresentaram resultados favoráveis de resistência à compressão, resistência de união à dentina e tempo de presa. Além disso, determinadas formulações demonstraram menor citotoxicidade e maior potencial de diferenciação odontogênica de células-tronco da polpa dentária.

Compostos bioativos e sistemas híbridos de regeneração também têm sido investigados como alternativas para o reparo dentino-pulpar. Couto *et al.* (2020)³ avaliaram, *in vitro*, os efeitos biológicos de materiais experimentais contendo óleo-resina de copaíba associados ao HC ou ao Agregado Trióxido Mineral (MTA) sobre células-tronco da polpa dentária humana. A associação da copaíba ao HC reduziu sua citotoxicidade. Além disso, as formulações contendo copaíba associadas ao MTA ou ao HC favoreceram a migração celular e aumentaram a expressão de marcadores relacionados à diferenciação odontogênica e à biomineralização.

Qi *et al.* (2021)⁸ apontam que o canabidiol foi capaz de estimular a diferenciação odonto/osteogênica de células da polpa dentária humana *in vitro*, sugerindo potencial para o desenvolvimento de novos agentes bioativos destinados à regeneração dentino-pulpar. De forma semelhante, Chang *et al.* (2020)¹ avaliaram um material bifásico de fosfato de cálcio/sulfato de cálcio associado a ácido hialurônico, sinvastatina e collagenase (CPC7-CSH3-Sim-Col), observando adequada viabilidade celular, biocompatibilidade, tempo de presa compatível com a aplicação clínica, estrutura adequada para utilização clínica e capacidade de indução de formação dentinária.

Os exossomos têm sido investigados como potenciais mediadores biológicos dos processos de reparo e regeneração pulpar. Swanson *et al.* (2020)¹⁰ investigaram um sistema baseado em poli(ácido láctico-co-glicólico) (PLGA) para encapsulamento e liberação controlada de exossomos dentinogênicos em defeitos pulpares. Os resultados demonstraram formação de ponte dentinária, preservação do tecido pulpar e ausência de sinais histológicos de inflamação intensa ou necrose no modelo animal. Quanto ao potencial regenerativo dos exossomos, Kong *et al.* (2024)⁶ destacam sua capacidade de estimular proliferação celular, diferenciação odontoblástica, angiogênese,

neurogênese e formação de tecido mineralizado.

4. DISCUSSÃO

Os biomateriais emergentes investigados nos estudos incluídos refletem uma mudança de enfoque na terapia pulpar vital. Enquanto os materiais tradicionalmente utilizados atuam principalmente como barreiras protetoras entre a polpa e o meio bucal, as abordagens mais recentes procuram atuar sobre processos biológicos envolvidos na resposta pulpar à injúria. Nesse contexto, diferentes estratégias têm sido desenvolvidas com o objetivo de associar proteção tecidual a mecanismos capazes de modular a resposta pulpar e favorecer a manutenção da vitalidade do tecido^{5,6,9}. Essa mudança conceitual sugere que a efetividade do capeamento pulpar pode estar relacionada não apenas às propriedades físicas do biomaterial empregado, mas também à sua capacidade de influenciar eventos celulares e moleculares associados ao processo reparador^{5,6}.

Essa diversidade de biomateriais demonstra que a busca por alternativas aos materiais convencionais não está relacionada a uma única limitação, mas à dificuldade de reunir, em um mesmo material, propriedades biológicas e físico-químicas capazes de atender às diferentes exigências do capeamento pulpar. Os biomateriais mais recentes têm sido desenvolvidos com o objetivo de integrar essas propriedades em uma mesma formulação, combinando estratégias voltadas à bioatividade, à interação com os tecidos e ao aprimoramento das características dos materiais^{1,2,4}. Esse panorama evidencia uma tendência ao desenvolvimento de biomateriais capazes de superar limitações previamente identificadas por meio de estratégias complementares, com potencial para reunir propriedades biológicas e físico-químicas favoráveis à terapia pulpar vital^{1,2,4}.

A investigação de compostos bioativos, como o óleo de copaíba e o canabidiol, evidencia o interesse por substâncias capazes de modular processos biológicos relacionados ao reparo pulpar, complementando as estratégias tradicionalmente voltadas ao controle da inflamação e da contaminação bacteriana^{3,8}. Entretanto, a obtenção desses efeitos depende não apenas da atividade intrínseca do agente utilizado, mas também de sua disponibilidade no local de aplicação. Nesse sentido, sistemas híbridos e hidrogéis vêm sendo desenvolvidos para incorporar moléculas bioativas e promover sua liberação de forma mais controlada. Essa estratégia é exemplificada pelos estudos de Chang *et al.* (2020)¹, Wang *et al.* (2021)¹¹ e Zhao *et al.* (2023)¹², que associaram agentes bioativos a matrizes destinadas à sua retenção e liberação local. Esses estudos indicam que a associação entre compostos bioativos e sistemas de liberação tem se consolidado como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de biomateriais destinados ao capeamento pulpar, com potencial para estimular o reparo e a mineralização dos tecidos pulpares^{1,11,12}.

Embora os biomateriais emergentes tenham

ampliado significativamente as possibilidades de intervenção sobre o complexo dentino-pulpar, a maior parte das evidências atualmente disponíveis permanece restrita ao ambiente pré-clínico. Estudos envolvendo exossomos e sistemas avançados de liberação indicam que essas estratégias podem favorecer a resposta dos tecidos pulparem em modelos laboratoriais e animais. No entanto, as evidências ainda são insuficientes para estabelecer seu desempenho clínico^{6,10}. Além da limitada disponibilidade de evidências clínicas, alguns biomateriais também apresentam desafios relacionados à padronização de seus processos de desenvolvimento, à otimização de suas formulações e, em algumas estratégias, aos custos associados à sua obtenção, fatores que podem dificultar sua futura incorporação à prática clínica^{5,6,12}. Sob essa perspectiva, Islam *et al.* (2025)⁵ e Rajasekar *et al.* (2025)⁹ ressaltam que ainda são necessários estudos capazes de esclarecer os efeitos em longo prazo, definir protocolos de aplicação e confirmar a segurança e a eficácia desses biomateriais antes de sua incorporação à prática clínica.

5. CONCLUSÃO

Os biomateriais emergentes avaliados nesta revisão demonstram potencial para ampliar as opções disponíveis para os procedimentos de capeamento pulpar, especialmente por favorecerem processos relacionados ao reparo do complexo dentino-pulpar. Entre as estratégias investigadas, destacam-se os sistemas de liberação baseados em hidrogéis e a incorporação de componentes bioativos aos biomateriais, que demonstraram resultados promissores em estudos experimentais. Entretanto, a limitada disponibilidade de evidências clínicas ainda restringe sua incorporação à prática clínica, reforçando a necessidade de estudos futuros que confirmem sua efetividade e previsibilidade.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Chang HH, Chang YJ, Yeh CL, Lin TA, Lin CP. Development of calcium phosphate/calcium sulfate biphasic biomedical material with hyaluronic acid containing collagenase and simvastatin for vital pulp therapy. *Dent Mater*. 2020 Jun; 36(6):755-64.
- [2] Cobanoglu N, Alptekin T, Kitagawa H, Blatz MB, Imazato S, Ozer F. Evaluation of human pulp tissue response following direct pulp capping with a self-etching adhesive system containing MDPB. *Dent Mater J*. 2021 May; 40(3):689-96.
- [3] Couto RSD, Rodrigues MFSD, Ferreira LS, Diniz IMA, Silva FS, Lopez TCC, et al. Evaluation of resin-based material containing Copaiba oleoresin (*Copaifera reticulata* Ducke): biological effects on the human dental pulp stem cells. *Biomolecules*. 2020 Jun; 10(7):972.
- [4] Franzin NRS, Sostena MMDS, Santos ADD, Moura MR, Camargo ER, Hosida TY, et al. Novel pulp capping material based on sodium trimetaphosphate: synthesis, characterization, and antimicrobial properties. *J Appl Oral Sci*. 2022; 30:e20210483.
- [5] Islam MRR, Islam R, Sano H, Toida Y, Hoshika S, Ahmed HMA, et al. Emerging trends of injectable hydrogels for vital pulp therapy: a comprehensive review. *Int Endod J*. 2025 Oct; 58(10):1490-1528.
- [6] Kong Q, Wang Y, Jiang N, Wang Y, Wang R, Hu X, et al. Exosomes as promising therapeutic tools for regenerative endodontic therapy. *Biomolecules*. 2024 Mar; 14(3):330.
- [7] Pedram P, Najafi F, Heidari S, Hodjat M, Bolhari B, Hooshmand T. Synthesis and characterization of a dental cement based on bioactive glass/zinc oxide modified with organic resin as a novel pulp capping agent. *Biomed Mater*. 2023; 18(5).
- [8] Qi X, Liu C, Li G, Luan H, Li S, Yang D, et al. Investigation of in vitro odonto/osteogenic capacity of cannabidiol on human dental pulp cell. *J Dent*. 2021 Jun; 109:103673.
- [9] Rajasekar V, Abdalla MM, Huang M, Neelakantan P, Yiu CKY. Next-generation biomaterials for vital pulp therapy: exploring biological properties and dentin regeneration mechanisms. *Bioengineering (Basel)*. 2025 Feb; 12(3):248.
- [10] Swanson WB, Gong T, Zhang Z, Eberle M, Niemann D, Dong R, et al. Controlled release of odontogenic exosomes from a biodegradable vehicle mediates dentinogenesis as a novel biomimetic pulp capping therapy. *J Control Release*. 2020 Aug; 324:679-94.
- [11] Wang L, Fu H, Wang W, Liu Y, Li X, Yang J, et al. Notoginsenoside R1 functionalized gelatin hydrogels to promote reparative dentinogenesis. *Acta Biomater*. 2021 Mar; 122:160-71.
- [12] Zhao Y, Song L, Li M, Peng H, Qiu X, Li Y, et al. Injectable CNPs/DMP1-loaded self-assembly hydrogel regulating inflammation of dental pulp stem cells for dentin regeneration. *Mater Today Bio*. 2023 Dec; 24:100907.