Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação — REASE

OPEN ACCESS

doi.org/10.51891/rease.v12i11.31790

MATERIAIS BIOATIVOS NA REMINERALIZAÇÃO DE LESÕES DE CÁRIE: MECANISMOS DE AÇÃO, EVIDÊNCIAS ATUAIS E APLICAÇÕES CLÍNICAS

BIOACTIVE MATERIALS IN THE REMINERALIZATION OF CARIES LESIONS: MECHANISMS OF ACTION, CURRENT EVIDENCE, AND CLINICAL APPLICATIONS

Mariane Ribeiro Rodrigues[1]
Tereza Maria Alcântara Neves[2]
Márcia Regina Soares Cruz[3]
Thiago Lima Monte[4]
Isabel Cristina Quaresma Rêgo[5]
Tainá de Castelo Branco Araújo[6]

RESUMO: Introdução: A cárie dentária permanece como uma condição crônica de alta prevalência, caracterizada pelo desequilíbrio dinâmico no processo de des-remineralização dos tecidos duros do dente. Com o advento da Odontologia Minimamente Invasiva, os materiais bioativos ganharam destaque por interagirem ativamente com o meio bucal, liberando íons terapêuticos capazes de paralisar e reverter lesões não cavitadas. Objetivo: Analisar, por meio de uma revisão integrativa da literatura recente (2021–2025), a eficácia e o papel dos materiais bioativos na remineralização de lesões de cárie, destacando seus mecanismos de ação, vantagens e limitações na prática clínica. Metodologia: Realizou-se uma revisão integrativa com buscas nas bases PubMed/MEDLINE, ScienceDirect e Google Acadêmico, utilizando descritores combinados via operadores booleanos. Incluíram-se estudos in vitro, ensaios clínicos e revisões (sistemáticas e narrativas) publicados entre 2021 e 2025 nos idiomas português e inglês que abordassem a bioatividade no controle da cárie. Resultados e Discussão: Selecionaram-se 10 artigos representativos. Os achados demonstram que a nano-hidroxiapatita e os biovidros bioativos promovem rápida recuperação da microdureza superficial por precipitação de apatita, enquanto o CPP-ACP atua de forma sinérgica com fluoretos mantendo íons biodisponíveis. Os peptídeos auto-arranjáveis (P_{11}-4) destacam-se pela regeneração biomimética 3D na profundidade da lesão. Em materiais restauradores, o incremento bioativo confere ação antimicrobiana contra Streptococcus mutans e previne a cárie secundária, embora a sustentabilidade da liberação iônica a longo prazo (rechargeability) ainda necessite de maior estabilidade em resinas compostas. Conclusão: Os materiais bioativos são eficazes na reversão e paralisação de lesões cariosas, oferecendo uma abordagem conservadora e biologicamente ativa. A escolha da tecnologia deve considerar a profundidade e localização da lesão para otimizar os resultados clínicos.

Palavras-chave: Cárie dentária. Materiais bioativos. Remineralização dentária. Odontologia minimamente invasiva. Vidro bioativo. Nano-hidroxiapatita.

ABSTRACT: Introduction: Dental caries remains a highly prevalent chronic condition characterized by a dynamic imbalance in the demineralization-remineralization process of hard dental tissues. With the advent of Minimally Invasive Dentistry, bioactive materials have gained prominence due to their active interaction with the oral environment, releasing therapeutic ions capable of arresting and reversing non-cavitated lesions. Objective: To analyze, through an integrative review of recent

[1] Estudante da AFYA Uninovafapi.
[2] Coorientadora. Professora da AFYA Uninovafapi.
[3] Coorientadora. Professora da AFYA Uninovafapi.
[4] Coorientador. Professor da AFYA Uninovafapi.
[5] Coorientadora. Professora da AFYA Uninovafapi.
[6] Orientadora. Professora da AFYA Uninovafapi.

literature (2021–2025), the efficacy and role of bioactive materials in the remineralization of caries lesions, highlighting their mechanisms of action, clinical advantages, and limitations. Methodology: An integrative literature review was conducted across PubMed/MEDLINE, ScienceDirect, and Google Scholar databases using descriptor combinations via Boolean operators. In vitro studies, clinical trials, and reviews (systematic and narrative) published between 2021 and 2025 in Portuguese and English addressing bioactivity in caries management were included. Results and Discussion: Ten representative articles were selected. Findings indicate that nanohydroxyapatite and bioactive glasses promote rapid surface microhardness recovery through apatite precipitation, while CPP-ACP acts synergistically with fluorides by maintaining bioavailable ions. Self-assembling peptides (P_{11}-4) stand out for 3D biomimetic regeneration within the deep body of the lesion. In restorative materials, bioactive incorporation provides antimicrobial activity against Streptococcus mutans and prevents secondary caries, although long-term ion release sustainability (rechargeability) still requires further stability in resin composites. Conclusion: Bioactive materials are effective in reversing and arresting caries lesions, offering a conservative and biologically active approach. Technology selection should consider lesion depth and site to optimize clinical outcomes.

Keywords: Dental caries. Bioactive materials. Tooth remineralization. Minimally invasive dentistry. Bioactive glass. Nanohydroxyapatite.

1 INTRODUÇÃO

A cárie dentária continua sendo uma das doenças crônicas mais prevalentes no mundo, caracterizada como um processo dinâmico de desmineralização e remineralização dos tecidos duros do dente, mediado pelo biofilme e influenciado pela dieta (Bogovska-Gigova, 2025). Historicamente, a abordagem terapêutica da cárie focava na remoção cirúrgica do tecido afetado e na restauração mecânica. No entanto, o avanço da Odontologia Minimamente Invasiva (OMI) promoveu uma mudança de paradigma, priorizando a paralisação, o controle e a reversão das lesões cariosas não cavitadas por meio do fortalecimento do processo natural de remineralização (Philip, 2021).

Nesse contexto, os materiais bioativos ganharam destaque como biomateriais funcionais de última geração. Diferente dos materiais restauradores passivos, os compostos bioativos têm a capacidade de interagir dinamicamente com o meio bucal, liberando íons terapêuticos cruciais como cálcio, fosfato, fluoreto e silício em resposta aos desafios ácidos do biofilme (Abozaid et al., 2025; Gjorgievska et al., 2025). Essa liberação iônica atua diretamente na precipitação de cristais de hidroxiapatita e fluorapatita, recuperando a microdureza superficial e a integridade estrutural do esmalte e da dentina (Lee et al., 2025).

Diversas tecnologias bioativas têm sido incorporadas a vernizes, dentifrícios, resinas e cimentos para otimizar o manejo da cárie. Entre elas, destacam-se os biovidros bioativos, o fosfopeptídeo de caseína com fosfato de cálcio amorfo (CPP-ACP), a nano-hidroxiapatita e os peptídeos auto-arranjáveis (Santhosh; Ankola; Sankeshwari, 2023; Babu et al., 2025). Ademais,

a aplicação de resinas e cimentos ionoméricos bioativos tem demonstrado não apenas eficácia na remineralização de lesões subsuperficiais, mas também propriedades antimicrobianas e potencial de prevenção de cárie secundária nas margens restauradoras (Baccolini et al., 2025; Lopes et al., 2025; Sonbul, 2025).

Diante do crescente volume de evidências e da diversidade de formulações disponíveis, faz-se necessário sintetizar os achados recentes sobre os mecanismos de ação e o potencial clínico desses biomateriais no tratamento não invasivo do tecido dental.

O objetivo deste estudo é analisar, por meio de uma revisão da literatura recente, o papel e a eficácia dos materiais bioativos na remineralização de lesões de cárie, destacando seus mecanismos de ação, aplicações clínicas e vantagens na prática odontológica minimamente invasiva.

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de caráter descritivo e abordagem qualitativa, desenvolvida para sintetizar os conhecimentos atuais sobre a eficácia e os mecanismos de ação dos materiais bioativos no processo de remineralização de lesões cariosas. Para a operacionalização deste estudo, a coleta de dados foi realizada em etapas ordenadas, iniciando-se pela delimitação da pergunta condutora, definição dos critérios de elegibilidade e estratégias de busca nas bases de dados científicas PubMed/MEDLINE, ScienceDirect e Google Acadêmico, abrangendo publicações do período compreendido entre 2021 e 2025.

A estratégia de busca fundamentou-se no cruzamento de descritores controlados do *Medical Subject Headings* (MeSH) e termos livres utilizando os operadores booleanos *AND* e *OR*. A chave de busca principal combinou os termos "Bioactive Materials", "Tooth Remineralization", "Dental Caries", "Bioactive Glass", "Casein Phosphopeptide-Amorphous Calcium Phosphate" e "Nanohydroxyapatite". A seleção dos estudos ocorreu de maneira sequencial: primeiramente, foi realizada a leitura e triagem dos títulos e resumos das publicações identificadas para eliminar estudos irrelevantes ou duplicados; em seguida, os artigos pré-selecionados foram lidos na íntegra para verificação criteriosa do cumprimento dos critérios de inclusão e exclusão.

Foram incluídos artigos originais de pesquisa in vitro e in vivo, ensaios clínicos e revisões da literatura (sistemáticas e narrativas) publicados nos idiomas inglês e português, dentro do recorte temporal estabelecido (2021 a 2025), que abordassem diretamente a liberação

iônica, a precipitação mineral em esmalte ou dentina desmineralizada ou a ação antimicrobiana de materiais bioativos. Excluíram-se trabalhos que abordavam unicamente biomateriais restauradores passivos (sem bioatividade ou liberação de íons), resumos de anais de eventos acadêmicos, teses, dissertações, capítulos de livro e artigos inacessíveis na íntegra. Após a consolidação da amostra final, os dados extraídos foram agrupados e categorizados de forma temática, permitindo a interpretação crítica e a estruturação lógica dos resultados e da discussão deste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca bibliográfica e a aplicação dos critérios de elegibilidade resultaram na seleção de 10 artigos científicos publicados no período de 2021 a 2025 que investigaram a atuação de diferentes tecnologias bioativas no processo de remineralização e paralisação de lesões de cárie. Os trabalhos recuperados englobam ensaios *in vitro*, revisões narrativas, revisões sistemáticas e meta-análises, demonstrando o panorama atual das evidências sobre biovidros bioativos, fosfopeptídeo de caseína com fosfato de cálcio amorfo (CPP-ACP), nano-hidroxiapatita (nano-HA), peptídeos auto-arranjáveis, silicatos de cálcio e resinas/cimentos ionoméricos bioativos. A Tabela 1 sintetiza as principais características, metodologias e achados dos estudos incluídos nesta revisão.

Tabela 1 – Síntese dos estudos selecionados sobre materiais bioativos na remineralização de lesões de cárie (2021–2025).

Autor(es) e Ano	Tipo de Estudo	Material/Tecnologia Avaliada	Principais Achados / Conclusões
Abozaid et al. (2025)	Revisão Abrangente	Materiais restauradores bioativos e liberadores de íons	Destacam que os bioativos superam materiais inertes por liberarem Ca^{2+}, PO_4^{3-} e F^-, reduzindo microinfiltração e induzindo apatita na interface.
Babu et al. (2025)	Revisão Sistemática	Peptídeos auto-arranjáveis (P_{11}-4) vs. Fluoretos	Demonstraram que o P_{11}-4 atua como um biomimético 3D, induzindo a nucleação de minerais na profundidade da lesão, com resultados superiores ou equivalentes aos fluoretos isolados.
Baccolini et al. (2025)	Revisão Sistemática	CPP-ACP e CPP-ACPF	Confirmaram a eficácia do CPP-ACP na regressão de manchas brancas, ressaltando ganho sinérgico quando associado ao fluoreto (CPP-ACPF).
Bogovska-Gigova (2025)	Revisão Narrativa	Agentes bioativos em cárie inicial	Enfatiza que a bioatividade altera a dinâmica do ciclo DES-RE e propõe o uso precoce para evitar intervenções restauradoras invasivas.
Gjorgievska et al. (2025)	Revisão de Literatura	Tecnologias a base de fosfato de cálcio e biovidros	Mapearam o estado da arte dos carreadores de cálcio e fosfato, ressaltando a

Autor(es) e Ano	Tipo de Estudo	Material/Tecnologia Avaliada	Principais Achados / Conclusões
			superioridade da fluorapatita gerada em comparação à hidroxiapatita convencional sob pH ácido.
Lee et al. (2025)	Estudo In Vitro	Biovidro bioativo (BGS-7)	Evidenciaram a recuperação significativa da microdureza do esmalte e precipitação cristalina rápida em meio simulado após o desafio ácido.
Lopes et al. (2025)	Estudo In Vitro	Resinas compostas bioativas	Demonstraram que o incremento de carga bioativa confere atividade antibacteriana contra Streptococcus mutans aliada ao potencial remineralizante.
Philip (2021)	Revisão Crítica	Materiais ion-releasing e efeito tampão	Detalhou os mecanismos de liberação e recarga (rechargeability) de íons, evidenciando o papel no amortecimento do pH crítico do biofilme.
Santhosh, Ankola e Sankeshwari (2023)	Revisão Sistemática e Meta-Análise	CPP-ACP vs. Nano-HA vs. Biovidro	Revelaram em meta-análise que tanto a nano-HA quanto o Biovidro apresentaram ganho de microdureza ligeiramente superior ao CPP-ACP em lesões superficiais de esmalte.
Sonbul (2025)	Estudo Clínico e In Vitro	Materiais restaurares bioativos e cárie secundária	Observou menor incidência de desmineralização marginal ao redor de restaurações bioativas quando comparadas às resinas compostas convencionais.

Fonte: Autoria Própria.

A análise conjunta da literatura evidencia um consenso definitivo entre os pesquisadores: a Odontologia contemporânea consolida a migração de um modelo focado no selamento passivo para uma abordagem biologicamente ativa (Philip, 2021; Abozaid et al., 2025). Contudo, a divergência de opiniões e os pontos de contraposição emergem quando se compara a eficácia real, a profundidade de ação e a durabilidade clínica das diferentes classes de materiais bioativos.

No que tange à eficácia de remineralização em lesões de mancha branca no esmalte, Baccolini et al. (2025) defendem que o CPP-ACP é o padrão-ouro de tratamento, especialmente quando associado ao fluoreto (CPP-ACPF), devido à sua capacidade de manter cálcio e fosfato biodisponíveis em estado amorfo mesmo em condições de saturação. Em contrapartida, os achados de Santhosh, Ankola e Sankeshwari (2023) estabelecem um contraponto direto a essa visão: em sua meta-análise, os autores identificaram que a nano-hidroxiapatita (nano-HA) e os biovidros apresentaram desempenho superior ao CPP-ACP no restabelecimento da microdureza superficial do esmalte. Santhosh, Ankola e Sankeshwari (2023) justificam que a nano-HA se deposita diretamente na porosidade dos prismas de esmalte atuando como semente

cristalina, enquanto o CPP-ACP depende fortemente da saliva e do pH local para a dissociação e entrega efetiva dos íons.

Aprofundando essa discussão, Lee et al. (2025) comprovaram a rápida capacidade dos biovidros (como a tecnologia BGS-7 e NovaMin) em formar uma camada de carbonato-apatita em curto período, o que apoia os achados de Gjorgievska et al. (2025) sobre a elevada reatividade do silício contido nesses vidros. Entretanto, Bogovska-Gigova (2025) aponta uma limitação crítica negligenciada por Lee et al. (2025): embora os biovidros induzam uma mineralização superficial expressiva, a camada mineral densa formada precocemente na superfície da lesão pode obliterar os poros externos do esmalte, impedindo que os íons cálcio e fosfato penetrem na zona subsuperficial mais profunda da lesão de cárie.

É nesse ponto cego da remineralização subsuperficial que a tecnologia de peptídeos auto-arranjáveis (P_{11}-4), investigada por Babu et al. (2025), se contrapõe às abordagens iônicas tradicionais. Babu et al. (2025) sustentam que nem o fluoreto, nem o CPP-ACP e tampouco os biovidros conseguem regenerar a arquitetura tridimensional do esmalte de forma biomimética pura. O peptídeo P_{11}-4 infiltra-se na profundidade do corpo da lesão e forma uma matriz fibrosa que atrai íons cálcio e fosfato da saliva, promovendo a nucleação *de novo* de dentro para fora. O estudo de Babu et al. (2025) preenche, assim, a lacuna deixada por pesquisas com géis e vernizes fluoretados convencionais, que falham em reestruturar a matriz mineral interna de lesões profundas não cavitadas.

No âmbito dos materiais restauradores diretos, a discussão desloca-se da remineralização isolada para o combate à cárie secundária. Sonbul (2025) e Lopes et al. (2025) concordam que as resinas compostas bioativas e os cimentos ionoméricos representam um avanço crucial na proteção das margens restauradoras. Contudo, enquanto Sonbul (2025) foca sua justificativa no selamento dinâmico e no ganho de microdureza na dentina afetada adjacente, Lopes et al. (2025) demonstram que a verdadeira vantagem desses materiais reside no efeito sinérgico entre a remineralização e a ação antimicrobiana direta contra o *Streptococcus mutans*.

Por outro lado, Philip (2021) faz uma ressalva fundamental a essa visão otimista de Lopes et al. (2025) e Abozaid et al. (2025). Philip (2021) destaca o fenômeno do esgotamento iônico: a maioria das resinas bioativas apresenta uma liberação iônica inicial intensa (*burst release*), mas que declina drasticamente com o tempo. O autor afirma que, ao contrário do cimento de ionômero de vidro clássico que possui capacidade contínua de "recarga" (*rechargeability*) a partir

de dentifrícios e enxaguatórios fluoretados , muitas resinas bioativas modernas ainda carecem de comprovação científica de longo prazo sobre sua capacidade de recarga contínua.

Portanto, a literatura atual revela que, embora existam múltiplas alternativas bioativas eficazes, não há um material único ideal para todas as situações clínicas. O que fica evidente nos estudos de 2021 a 2025 é que enquanto a nano-HA e o CPP-ACP se consolidam para o manejo não invasivo de superfícies livres, os peptídeos auto-arranjáveis surgem para resolver a remineralização em profundidade, e os biomateriais restauradores bioativos necessitam de maior desenvolvimento no quesito sustentabilidade da liberação iônica a longo prazo.

4 CONCLUSÃO

A análise da literatura científica recente (2021–2025) permite concluir que os materiais bioativos consolidam uma transformação indispensável no paradigma da Odontologia Minimamente Invasiva, migrando com sucesso do selamento passivo para a intervenção terapêutica ativa. A capacidade desses biomateriais de interagir com o meio bucal por meio da liberação continuada de íons essenciais, como cálcio, fosfato e fluoreto, possibilita a paralisação e a reversão de lesões de cárie não cavitadas, promovendo o restabelecimento da microdureza e da integridade estrutural dos tecidos dentários.

Dentre as diferentes tecnologias disponíveis, observa-se que a nano-hidroxiapatita e os biovidros bioativos destacam-se pela rápida precipitação mineral e ganho de dureza superficial em lesões de esmalte, enquanto o CPP-ACP permanece como uma alternativa consolidada e sinérgica ao uso de fluoretos. Por sua vez, os peptídeos auto-arranjáveis emergem como uma inovação promissora na reconstituição biomimética tridimensional do corpo da lesão em profundidade, superando limitações de obliteração superficial vistas em abordagens iônicas tradicionais.

Ademais, a incorporação de propriedades bioativas e antimicrobianas a resinas e cimentos ionoméricos demonstra eficácia na proteção do fundo cavitário e na prevenção da cárie secundária ao redor de restaurações. Contudo, evidencia-se a necessidade de novos estudos clínicos longitudinais focados na sustentabilidade da liberação e capacidade de recarga iônica desses materiais ao longo do tempo. Conclui-se, portanto, que a escolha do material bioativo deve ser fundamentada nas características específicas da lesão cariosas, garantindo tratamentos mais conservadores, previsíveis e biologicamente compatíveis na prática clínica contemporânea.

REFERÊNCIAS

ABOZAID, D. et al. Bioactive restorative materials in dentistry: a comprehensive review of mechanisms, clinical applications, and future directions. Odontology, v. 114, n. 2, p. 349-377, 2025.

BABU, B. et al. Remineralization potential of self-assembling peptides versus conventional fluorides in early enamel caries: A systematic review. Journal of Dentistry, v. 148, p. 105230, 2025.

BACCOLINI, V. et al. The role of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate (CPP-ACP) in white spot lesion remineralization—A systematic review. Journal of Functional Biomaterials, v. 16, n. 2, p. 45-62, 2025.

BOGOVSKA-GIGOVA, R. Bioactive materials in dentistry – A narrative review of the literature on caries prevention and remineralization. International Journal of Development Research, v. 15, n. 4, p. 48910-48915, 2025.

GJORGIEVSKA, E. et al. Enamel remineralizing agents: State of the art on calcium phosphate and bioactive technologies. Materials, v. 18, n. 3, p. 612-628, 2025.

LEE, C. et al. The influence of bioactive glass (BGS-7) on enamel remineralization and surface microhardness recovery: An in vitro study. BMC Oral Health, v. 25, n. 1, p. 118-127, 2025.

LOPES, S. et al. Antimicrobial and remineralizing potential of bioactive resin composites in caries management. Frontiers in Oral Health, v. 6, p. 1625977, 2025.

PHILIP, N. Bioactive ion-releasing dental materials and their potential to arrest or revert enamel demineralization. Journal of Dentistry, v. 105, p. 103574, 2021.

SANTHOSH, V. N.; ANKOLA, A. V.; SANKESHWARI, R. M. Remineralization potential of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate, nanohydroxyapatite crystals, and bioactive glass on initial enamel lesions: A systematic review and meta-analysis. International Journal of Clinical Pediatric Dentistry, v. 16, n. 1, p. 102-111, 2023.

SONBUL, H. M. Influence of bioactive restorative materials on secondary caries prevention: A clinical and in vitro study. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, v. 17, supl. 2, p. S1787-S1789, 2025.