

**BIOMATERIAIS BIOATIVOS E REGENERAÇÃO ÓSSEA EM RECONSTRUÇÕES
MAXILOFACIAIS: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

**BIOACTIVE BIOMATERIALS AND BONE REGENERATION IN MAXILLOFACIAL
RECONSTRUCTIONS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW**

**BIOMATERIALES BIOACTIVOS Y REGENERACIÓN ÓSEA EN RECONSTRUCCIONES
MAXILOFACIALES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA**



10.56238/revgeov17n3-130

Maria Josilaine das Neves de Carvalho

Graduanda em Odontologia

Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU) - Campus Caruaru

E-mail: josilaine.carvalho.odontologia@gmail.com

Marcos Gustavo Oliveira da Silva

Mestre em Saúde da Família

Instituição: Centro de Pesquisa Aggeu Magalhães (CPqAM/FIOCRUZ)

E-mail: marcos.osilva@hotmail.com

Leandro Guilherme dos Santos

Cirurgião-Dentista

Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU)

E-mail: drleandroguilherme@gmail.com

Renan Lennon Silva Henrique

Pós-graduado em Implantodontia

E-mail: dr.renanlennon2@gmail.com

Brunna Karyni Inácio de Oliveira

Especialista em Endodontia

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

E-mail: brunnainacio21@gmail.com

Gustavo Anderson de Souza Lima

Especialista em Implantodontia, Prótese e Dentística

Instituição: Centro Universitário Dr. Leão Sampaio (UNILEÃO), Faculdade Cecape

E-mail: gusttavoanderson14@gmail.com

Michel Florêncio da Silva

Graduando em Odontologia

Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU) - Campus Caruaru

E-mail: michaelssilva90@outlook.com



Deocleciana Felisardo de Magalhães

Especialista em Implantodontia
Instituição: Centro Universitário FIS (UNIFIS)
E-mail: deocle2017@outlook.com.br

Vinicius Souto Magalhães

Mestre em Odontologia
Instituição: Centro Universitário FIS (UNIFIS)
E-mail: viniussoutoodonto@gmail.com

Ítalo Guilherme de Medeiros Silva

Bacharelado em Odontologia
Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU) - Campus Caruaru
E-mail: italoguims2003@gmail.com

Thainara da Silva dos Santos

Graduanda em Odontologia
Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU)
E-mail: thainarasantos1927@gmail.com

Asllan Jhon da Silva Menino

Graduando em Odontologia
Instituição: Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU) - Campus Caruaru
E-mail: asllanjhon170@gmail.com

RESUMO

A regeneração óssea em reconstruções maxilofaciais constitui um dos principais desafios da cirurgia bucomaxilofacial contemporânea, sobretudo em defeitos críticos decorrentes de traumas, ressecções tumorais, infecções ou perdas alveolares associadas à reabilitação implantossuportada. Embora o enxerto ósseo autógeno permaneça amplamente reconhecido como padrão-ouro devido às suas propriedades osteogênicas, osteoindutivas e osteocondutivas, limitações como morbidade da área doadora, disponibilidade restrita de volume ósseo e reabsorção imprevisível impulsionaram a busca por alternativas biomateriais. Nesse contexto, os biomateriais bioativos emergem como estratégias terapêuticas inovadoras, capazes de interagir biologicamente com o tecido hospedeiro por meio da liberação controlada de íons e da formação de camada superficial de hidroxiapatita, estimulando a diferenciação osteoblástica e a angiogênese. O presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura acerca da aplicação de biomateriais bioativos na regeneração óssea em reconstruções maxilofaciais, analisando mecanismos biológicos, desempenho experimental e evidências clínicas. A revisão foi conduzida conforme as diretrizes PRISMA 2020, mediante busca nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Embase e SciELO, incluindo estudos publicados entre 2010 e 2024. Foram selecionados estudos in vivo, ensaios clínicos e pesquisas experimentais envolvendo vidros bioativos, vidros bioativos mesoporosos, fosfatos de cálcio e compósitos polímero-cerâmica aplicados a defeitos ósseos maxilofaciais. Os resultados demonstraram que esses biomateriais promovem formação óssea significativa, adequada integração tecidual e modulação favorável da resposta celular, destacando-se o papel da dissolução iônica na ativação de vias osteogênicas e angiogênicas. Observou-se ainda que scaffolds produzidos por manufatura aditiva apresentam



vantagens estruturais relevantes, como controle de porosidade e personalização anatômica. Conclui-se que os biomateriais bioativos representam uma abordagem biologicamente ativa e promissora para reconstruções maxilofaciais complexas, podendo reduzir a dependência de enxertos autógenos. Contudo, evidencia-se a necessidade de ensaios clínicos controlados e estudos longitudinais que consolidem protocolos terapêuticos padronizados e avaliem resultados a longo prazo.

Palavras-chave: Biomateriais Bioativos. Regeneração Óssea. Reconstrução Maxilofacial. Vidro Bioativo. Engenharia Tecidual.

ABSTRACT

Bone regeneration in maxillofacial reconstructions is one of the main challenges in contemporary maxillofacial surgery, especially in critical defects resulting from trauma, tumor resections, infections, or alveolar bone loss associated with implant-supported rehabilitation. Although autogenous bone grafts remain widely recognized as the gold standard due to their osteogenic, osteoinductive, and osteoconductive properties, limitations such as donor site morbidity, restricted bone volume availability, and unpredictable resorption have driven the search for biomaterial alternatives. In this context, bioactive biomaterials emerge as innovative therapeutic strategies, capable of biologically interacting with host tissue through the controlled release of ions and the formation of a superficial hydroxyapatite layer, stimulating osteoblastic differentiation and angiogenesis. This study aimed to conduct a systematic literature review on the application of bioactive biomaterials in bone regeneration in maxillofacial reconstructions, analyzing biological mechanisms, experimental performance, and clinical evidence. The review was conducted according to the PRISMA 2020 guidelines, using searches in the PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Embase, and SciELO databases, including studies published between 2010 and 2024. In vivo studies, clinical trials, and experimental research involving bioactive glasses, mesoporous bioactive glasses, calcium phosphates, and polymer-ceramic composites applied to maxillofacial bone defects were selected. The results demonstrated that these biomaterials promote significant bone formation, adequate tissue integration, and favorable modulation of the cellular response, highlighting the role of ionic dissolution in the activation of osteogenic and angiogenic pathways. It was also observed that scaffolds produced by additive manufacturing present relevant structural advantages, such as porosity control and anatomical customization. It is concluded that bioactive biomaterials represent a biologically active and promising approach for complex maxillofacial reconstructions, potentially reducing the dependence on autogenous grafts. However, the need for controlled clinical trials and longitudinal studies to consolidate standardized therapeutic protocols and evaluate long-term results is evident.

Keywords: Bioactive Biomaterials. Bone Regeneration. Maxillofacial Reconstruction. Bioactive Glass. Tissue Engineering.

RESUMEN

La regeneración ósea en reconstrucciones maxilofaciales es uno de los principales desafíos de la cirugía maxilofacial contemporánea, especialmente en defectos críticos derivados de traumatismos, resecciones tumorales, infecciones o pérdida de hueso alveolar asociada a la rehabilitación con implantes. Si bien los injertos óseos autólogos siguen siendo ampliamente reconocidos como el estándar de oro debido a sus propiedades osteogénicas, osteoinductivas y osteoconductoras, limitaciones como la morbilidad del sitio donante, la disponibilidad restringida de volumen óseo y la reabsorción impredecible han impulsado la búsqueda de biomateriales alternativos. En este contexto, los biomateriales bioactivos emergen como estrategias terapéuticas innovadoras, capaces de interactuar biológicamente con el tejido huésped mediante la liberación controlada de iones y la formación de una capa superficial de hidroxapatita, estimulando la diferenciación osteoblástica y la angiogénesis. Este estudio tuvo como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura sobre la aplicación de biomateriales bioactivos en la regeneración ósea en reconstrucciones maxilofaciales, analizando los mecanismos biológicos, el desempeño experimental y la evidencia clínica. La revisión se realizó según las directrices PRISMA 2020, utilizando búsquedas en las bases de datos



PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Embase y SciELO, incluyendo estudios publicados entre 2010 y 2024. Se seleccionaron estudios in vivo, ensayos clínicos e investigaciones experimentales que involucraban vidrios bioactivos, vidrios bioactivos mesoporosos, fosfatos de calcio y compuestos poliméricos-cerámicos aplicados a defectos óseos maxilofaciales. Los resultados demostraron que estos biomateriales promueven una formación ósea significativa, una integración tisular adecuada y una modulación favorable de la respuesta celular, destacando el papel de la disolución iónica en la activación de las vías osteogénicas y angiogénicas. También se observó que los andamios producidos mediante manufactura aditiva presentan ventajas estructurales relevantes, como el control de la porosidad y la personalización anatómica. Se concluye que los biomateriales bioactivos representan un enfoque biológicamente activo y prometedor para reconstrucciones maxilofaciales complejas, reduciendo potencialmente la dependencia de injertos autólogos. Sin embargo, resulta evidente la necesidad de realizar ensayos clínicos controlados y estudios longitudinales para consolidar protocolos terapéuticos estandarizados y evaluar los resultados a largo plazo.

Palabras clave: Biomateriales Bioactivos. Regeneración Ósea. Reconstrucción Maxilofacial. Vidrio Bioactivo. Ingeniería de Tejidos.



1 INTRODUÇÃO

A reconstrução óssea maxilofacial representa um desafio clínico relevante na prática da cirurgia e traumatologia bucomaxilofacial, especialmente diante de defeitos críticos decorrentes de traumas, ressecções tumorais, malformações congênitas e perdas alveolares associadas à reabilitação implantossuportada. A restauração da arquitetura óssea adequada é fundamental para restabelecimento funcional e estético, além de garantir estabilidade biomecânica para implantes dentários e próteses (SHEIKH et al., 2015).

Historicamente, o enxerto ósseo autógeno tem sido considerado o padrão-ouro em reconstruções ósseas por apresentar propriedades osteogênicas, osteoindutivas e osteocondutivas. Contudo, limitações como morbidade da área doadora, reabsorção imprevisível e disponibilidade volumétrica restrita impulsionaram a busca por biomateriais substitutos (SAKKAS et al., 2017; WANG; YEUNG, 2017). Nesse contexto, os biomateriais bioativos emergiram como alternativa promissora, capazes de interagir dinamicamente com o tecido hospedeiro e estimular a regeneração óssea por mecanismos biológicos específicos.

O conceito de bioatividade foi consolidado a partir do desenvolvimento do Bioglass 45S5, idealizado por Larry L. Hench, cuja formulação demonstrou a capacidade de formar uma camada superficial de hidroxiapatita carbonatada após contato com fluidos fisiológicos, promovendo ligação direta ao tecido ósseo (HENCH, 2006). Estudos subsequentes evidenciaram que a dissolução iônica de vidros bioativos libera silício, cálcio e fósforo, modulando a expressão gênica de osteoblastos e favorecendo a mineralização (HOPPE; GÜLDAL; BOCCACCINI, 2011; RAHAMAN et al., 2016).

Com o avanço da engenharia tecidual, surgiram os vidros bioativos mesoporosos, caracterizados por elevada área superficial e maior capacidade de liberação controlada de íons e moléculas bioativas. Esses materiais demonstraram potencial para entrega de fatores de crescimento e íons terapêuticos, como estrôncio e cobalto, ampliando sua aplicabilidade em defeitos críticos (WU; CHANG, 2012; ZHANG; CHEN; WU, 2018; KARGOZAR et al., 2017). Paralelamente, compósitos polímero-cerâmica e biomateriais à base de fosfatos de cálcio passaram a ser desenvolvidos visando melhorar propriedades mecânicas e controlar a taxa de degradação, aproximando o comportamento do material ao processo fisiológico de remodelação óssea (ALIZADEH-OSGOUEI; LI; WEN, 2019; PRASAD et al., 2023).

Além das propriedades físico-químicas, a interação celular constitui fator determinante para o sucesso regenerativo. Evidências demonstram que biomateriais bioativos influenciam diretamente osteoblastos, osteócitos e a dinâmica de osseointegração, modulando vias moleculares associadas à diferenciação e formação de matriz mineralizada (GALLI et al., 2018; SHAH; THOMSEN; PALMQUIST, 2018). Em modelos experimentais de defeitos críticos, esses materiais apresentaram



formação óssea significativa e integração estrutural adequada (VAJGEL et al., 2014; EL-RASHIDY et al., 2017).

Recentemente, a manufatura aditiva e a impressão tridimensional permitiram o desenvolvimento de scaffolds personalizados, com controle preciso de porosidade e arquitetura interna, favorecendo vascularização e crescimento ósseo guiado (WANG et al., 2019). Essa transição conceitual, de materiais meramente preenchedores de espaço para plataformas biofuncionais ativas, reflete a evolução contemporânea dos substitutos ósseos (KOLK et al., 2019).

Diante desse cenário, torna-se essencial analisar criticamente as evidências disponíveis sobre o desempenho biológico e clínico dos biomateriais bioativos na regeneração óssea maxilofacial. Assim, o presente estudo propõe uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de sintetizar dados experimentais e clínicos acerca de seus mecanismos de ação, eficácia regenerativa e aplicabilidade em reconstruções maxilofaciais complexas.

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão sistemática da literatura, desenvolvida com o objetivo de analisar as evidências científicas disponíveis acerca da utilização de biomateriais bioativos no processo de regeneração óssea. A condução do estudo seguiu as recomendações estabelecidas pelo Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020), amplamente adotado como padrão internacional para elaboração e relato de revisões sistemáticas em pesquisas na área da saúde.

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e SciELO, considerando publicações disponibilizadas entre os anos de 2010 e 2026. Para a identificação dos estudos relevantes foram utilizados descritores controlados e termos livres relacionados ao tema, combinados por meio de operadores booleanos (AND e OR), incluindo os termos “bioactive materials”, “bone regeneration”, “bone graft”, “bone substitutes” e “osseointegration”. A estratégia de busca foi adaptada de acordo com as especificidades de cada base de dados, com o objetivo de ampliar a sensibilidade e recuperar o maior número possível de estudos potencialmente relevantes.

Foram incluídos artigos originais publicados em periódicos científicos que abordassem a aplicação de biomateriais bioativos na regeneração óssea, contemplando estudos experimentais, pré-clínicos ou clínicos que apresentassem avaliação de neoformação óssea, osseointegração ou desempenho regenerativo. Também foram considerados estudos publicados nos idiomas inglês, português e espanhol. Por outro lado, foram excluídos artigos duplicados entre as bases de dados, resumos de eventos científicos, cartas ao editor, capítulos de livros, dissertações, teses e publicações



que não apresentassem relação direta com o tema investigado ou que não disponibilizassem dados suficientes para análise.

A seleção dos estudos foi realizada em duas etapas. Inicialmente, procedeu-se à triagem dos artigos por meio da leitura dos títulos e resumos, com exclusão daqueles que não atendiam aos critérios de elegibilidade previamente estabelecidos. Na etapa subsequente, os estudos potencialmente relevantes foram avaliados na íntegra para confirmação da elegibilidade. Esse processo foi conduzido por revisores independentes, sendo eventuais divergências resolvidas por consenso.

Após a seleção final dos estudos, procedeu-se à extração das informações relevantes, incluindo autor e ano de publicação, tipo de estudo, modelo experimental ou clínico utilizado, biomaterial avaliado e principais resultados relacionados à regeneração óssea. Esses dados foram organizados de forma sistemática, possibilitando a comparação entre os diferentes estudos incluídos na revisão.

Em razão da heterogeneidade dos biomateriais avaliados, dos diferentes modelos experimentais empregados e da variabilidade dos métodos de análise utilizados nos estudos incluídos, optou-se pela realização de uma síntese qualitativa descritiva. Dessa forma, não foi realizada meta-análise estatística. Sempre que possível, foram realizadas comparações descritivas entre os estudos quanto à porcentagem de neoformação óssea, ao grau de osseointegração e ao desempenho regenerativo observado, especialmente entre biomateriais bioativos e enxertos ósseos autógenos.

3 RESULTADOS

A busca nas bases de dados resultou na identificação de estudos potencialmente relevantes sobre o uso de biomateriais bioativos na regeneração óssea maxilofacial. Após a remoção de duplicatas e aplicação dos critérios de elegibilidade, foram incluídos estudos experimentais *in vivo* e ensaios clínicos que investigaram a aplicação de vidros bioativos, vidros bioativos mesoporosos, fosfatos de cálcio e compósitos bioativos em defeitos ósseos críticos do complexo craniofacial. O processo de seleção foi conduzido conforme as recomendações do PRISMA 2020.

Os estudos incluídos apresentaram delineamentos heterogêneos, com predominância de modelos animais envolvendo defeitos críticos em calvária de ratos, mandíbula de coelhos e defeitos alveolares em cães. Em menor proporção, foram identificados estudos clínicos aplicados à reconstrução óssea maxilofacial. De maneira geral, os biomateriais bioativos demonstraram desempenho favorável quanto à formação de tecido ósseo neoformado e integração ao leito receptor.

Os vidros bioativos convencionais apresentaram capacidade de formação de camada superficial de hidroxiapatita após implantação, favorecendo a ligação química direta ao tecido ósseo, conforme descrito nos estudos clássicos sobre bioatividade (HENCH, 2006; RAHAMAN et al., 2011). Esse mecanismo foi associado à estimulação da atividade osteoblástica e à deposição progressiva de matriz mineralizada. Resultados semelhantes foram observados em estudos experimentais que avaliaram a



regeneração óssea em defeitos críticos, nos quais se verificou aumento significativo de neoformação óssea em comparação aos grupos controle (VAJGEL et al., 2014).

Os vidros bioativos mesoporosos demonstraram desempenho regenerativo ainda mais expressivo, atribuível à elevada área superficial e à capacidade de liberação controlada de íons terapêuticos (WU; CHANG, 2012; ZHANG et al., 2014). Esses biomateriais favoreceram não apenas a osteogênese, mas também a angiogênese local, contribuindo para a maturação do tecido ósseo recém-formado. Estudos de revisão e investigações experimentais indicaram que a presença de íons como estrôncio e cobalto potencializou a resposta biológica, promovendo maior expressão de marcadores osteogênicos (KARGOZAR et al., 2018).

Biomateriais à base de fosfatos de cálcio também apresentaram resultados satisfatórios quanto à osteocondução, especialmente quando empregados como scaffolds porosos ou combinados a matrizes poliméricas (PRASAD et al., 2017). Compósitos polímero-cerâmica demonstraram melhoria nas propriedades mecânicas e na estabilidade estrutural, mantendo adequada biocompatibilidade (ALIZADEH-OSGOUEI et al., 2019).

Estudos que utilizaram scaffolds produzidos por manufatura aditiva evidenciaram vantagens relacionadas ao controle da arquitetura tridimensional, porosidade e interconectividade, fatores determinantes para a vascularização e para a formação óssea homogênea (BAINO et al., 2015). Esses scaffolds mostraram-se eficazes na condução do crescimento ósseo em defeitos críticos do complexo maxilofacial.

Quando comparados ao enxerto ósseo autógeno, considerado padrão-ouro, os biomateriais bioativos apresentaram desempenho regenerativo satisfatório, sobretudo em termos de osteocondução e osseointegração (SHEIKH et al., 2015; KOLK et al., 2019). Embora o enxerto autógeno mantenha vantagens relacionadas à osteogênese intrínseca, os biomateriais analisados demonstraram potencial clínico relevante, especialmente por eliminarem a morbidade associada à área doadora.

De modo geral, os estudos incluídos indicaram que os biomateriais bioativos promovem resposta biológica favorável, com formação de tecido ósseo estruturado, integração ao leito receptor e ausência significativa de reação inflamatória adversa, consolidando seu papel como alternativa promissora na regeneração óssea maxilofacial.

4 DISCUSSÃO

A presente revisão sistemática evidenciou que biomateriais bioativos apresentam desempenho promissor na regeneração óssea em defeitos maxilofaciais, demonstrando capacidade de osteocondução, estímulo à atividade osteoblástica e adequada osseointegração. Esses achados corroboram o conceito clássico de bioatividade descrito por Hench, segundo o qual determinados materiais são capazes de estabelecer ligação química direta com o tecido ósseo por meio da formação



de uma camada superficial de hidroxiapatita biologicamente ativa (HENCH, 2006). Tal mecanismo permanece como fundamento biológico central para o uso clínico de vidros bioativos.

Os resultados observados nos estudos incluídos indicam que a liberação controlada de íons desempenha papel determinante no processo regenerativo. Rahaman et al. (2011) destacam que a dissolução iônica dos vidros bioativos estimula vias celulares relacionadas à diferenciação osteoblástica e à mineralização da matriz extracelular. De forma semelhante, Wu e Chang (2012) demonstraram que os vidros bioativos mesoporosos apresentam maior área superficial e cinética de liberação iônica mais eficiente, potencializando respostas celulares e promovendo maior taxa de neoformação óssea quando comparados às formulações convencionais.

A incorporação de íons terapêuticos, como estrôncio e cobalto, também tem sido associada à modulação da osteogênese e da angiogênese, ampliando o potencial regenerativo desses biomateriais (KARGOZAR et al., 2018). A angiogênese, em especial, constitui fator crítico em defeitos ósseos críticos do complexo maxilofacial, onde a vascularização adequada é determinante para a manutenção da viabilidade celular e maturação do tecido neoformado. Nesse contexto, os biomateriais bioativos mesoporosos destacam-se como plataformas multifuncionais, capazes de atuar simultaneamente como arcabouço estrutural e sistema de liberação controlada.

Os scaffolds produzidos por manufatura aditiva também demonstraram relevância significativa. Conforme descrito por BAINO et al. (2015), o controle preciso da arquitetura tridimensional e da interconectividade dos poros favorece a migração celular, a difusão de nutrientes e a formação óssea homogênea. A possibilidade de personalização anatômica representa vantagem adicional em reconstruções maxilofaciais, nas quais a adaptação ao defeito é fator determinante para o sucesso clínico.

Quando comparados ao enxerto ósseo autógeno, considerado padrão-ouro devido à sua propriedade osteogênica intrínseca, os biomateriais bioativos demonstraram desempenho satisfatório sobretudo no aspecto osteocondutor (SHEIKH et al., 2015; KOLK et al., 2019). Embora o enxerto autógeno apresente potencial osteoindutor superior, sua utilização está associada à morbidade da área doadora, maior tempo cirúrgico e limitações quantitativas. Nesse cenário, biomateriais bioativos emergem como alternativa clinicamente relevante, especialmente em defeitos de médio porte ou em situações em que a obtenção de enxerto autógeno é inviável.

Apesar dos resultados favoráveis, esta revisão identificou heterogeneidade metodológica significativa entre os estudos incluídos, envolvendo diferenças quanto ao modelo animal, tamanho do defeito, tempo de acompanhamento e métodos de análise histomorfométrica. Essa variabilidade limita a comparabilidade direta dos achados e inviabiliza a realização de meta-análise quantitativa, justificando a opção por síntese qualitativa descritiva. Além disso, observou-se número ainda restrito



de ensaios clínicos controlados de longo prazo, o que reforça a necessidade de estudos clínicos randomizados para consolidação das evidências.

Outro aspecto relevante refere-se à padronização dos modelos de defeito crítico. Estudos como o de Vajgel et al. (2014) destacam que variações no tamanho e localização do defeito podem influenciar significativamente a resposta regenerativa, dificultando extrapolações diretas para a prática clínica. Assim, embora os resultados experimentais sejam encorajadores, a translação clínica deve ser realizada com cautela.

De modo geral, os achados desta revisão sustentam que biomateriais bioativos, especialmente os vidros bioativos mesoporosos e scaffolds tridimensionais, apresentam potencial significativo para aplicação em reconstruções maxilofaciais, atuando por meio de mecanismos combinados de osteocondução, bioestimulação iônica e suporte estrutural. Contudo, a consolidação de sua aplicação clínica ampla depende de maior padronização metodológica e de evidências clínicas de longo prazo.

5 CONCLUSÃO

Com base na análise sistemática da literatura, conclui-se que os biomateriais bioativos demonstram desempenho favorável na regeneração óssea em defeitos do complexo maxilofacial, apresentando adequada osteocondução, estímulo à atividade osteoblástica e integração estrutural ao tecido ósseo adjacente. Evidenciou-se que os mecanismos de bioatividade, especialmente a formação de camada superficial de hidroxiapatita e a liberação controlada de íons terapêuticos, desempenham papel central na modulação da resposta biológica e na promoção da neoformação óssea.

Os vidros bioativos mesoporosos e os scaffolds tridimensionais produzidos por manufatura aditiva destacaram-se pelo potencial regenerativo ampliado, associado à elevada área superficial, à capacidade de incorporação de íons bioativos e ao controle da arquitetura porosa, fatores determinantes para a vascularização e maturação do tecido neoformado. Quando comparados ao enxerto ósseo autógeno, os biomateriais bioativos apresentaram desempenho regenerativo satisfatório, configurando-se como alternativa promissora, sobretudo por eliminarem a morbidade relacionada à área doadora.

Entretanto, a heterogeneidade metodológica entre os estudos incluídos, bem como o número ainda limitado de ensaios clínicos controlados de longo prazo, indica a necessidade de investigações adicionais com maior padronização experimental e delineamentos clínicos robustos. A consolidação do uso clínico ampliado desses biomateriais depende da produção de evidências com maior nível de rigor metodológico e acompanhamento prolongado.

Assim, os biomateriais bioativos configuram-se como estratégia terapêutica relevante e em expansão no contexto da reconstrução óssea maxilofacial, apresentando potencial para contribuir significativamente com abordagens regenerativas menos invasivas e biologicamente orientadas.



REFERÊNCIAS

Amini AR, Laurencin CT, Nukavarapu SP. Bone tissue engineering: recent advances and challenges. *Crit Rev Biomed Eng.* 2012;40(5):363-408. doi:10.1615/CritRevBiomedEng.v40.i5.10.

Alizadeh-Osgouei M, Li Y, Wen C. A comprehensive review of biodegradable synthetic polymer-ceramic composites and their manufacture for biomedical applications. *Bioact Mater.* 2019;4:22-36. doi:10.1016/j.bioactmat.2018.11.003.

Baino F, Hamzehlou S, Kargozar S. Bioactive glasses: where are we and where are we going? *J Funct Biomater.* 2018;9(1):25. doi:10.3390/jfb9010025.

Baino F, Novajra G, Vitale-Brovarone C. Bioceramics and scaffolds: a winning combination for tissue engineering. *Front Bioeng Biotechnol.* 2015;3:202. doi:10.3389/fbioe.2015.00202.

Barradas AMC, Yuan H, van Blitterswijk CA, Habibovic P. Osteoinductive biomaterials: current knowledge of properties, experimental models and biological mechanisms. *Eur Cell Mater.* 2011;21:407-429.

Boccaccini AR, Keim S, Ma R, Li Y, Zhitomirsky I. Electrophoretic deposition of biomaterials. *J R Soc Interface.* 2010;7(Suppl 5):S581-S613. doi:10.1098/rsif.2010.0156.focus.

Bose S, Roy M, Bandyopadhyay A. Recent advances in bone tissue engineering scaffolds. *Trends Biotechnol.* 2012;30(10):546-554. doi:10.1016/j.tibtech.2012.07.005.

El-Rashidy AA, Roether JA, Harhaus L, Kneser U, Boccaccini AR. Regenerating bone with bioactive glass scaffolds: a review of in vivo studies in bone defect models. *Acta Biomater.* 2017;62:1-28. doi:10.1016/j.actbio.2017.08.030.

Fujioka-Kobayashi M, Miron RJ. Osteoinductive biomaterials for bone regeneration. *J Periodontal Res.* 2017;52(3):417-426. doi:10.1111/jre.12414.

Gaharwar AK, Singh I, Khademhosseini A. Engineered biomaterials for in situ tissue regeneration. *Nat Rev Mater.* 2020;5(9):686-705. doi:10.1038/s41578-020-0209-x.

Galli C, Macaluso GM, Piemontese M, Passeri G. Osteoblast response to biomaterials in dental implantology. *Clin Oral Implants Res.* 2018;29(Suppl 18):57-69. doi:10.1111/clr.13260.

Hench LL. The story of Bioglass®. *J Mater Sci Mater Med.* 2006;17(11):967-978. doi:10.1007/s10856-006-0432-z.

Hoppe A, Güldal NS, Boccaccini AR. A review of the biological response to ionic dissolution products from bioactive glasses and glass-ceramics. *Biomaterials.* 2011;32(11):2757-2774. doi:10.1016/j.biomaterials.2011.01.004.

Kargozar S, Lotfibakhshaiesh N, Ai J, et al. Strontium- and cobalt-containing bioactive glasses for bone tissue engineering. *Acta Biomater.* 2017;49:170-183. doi:10.1016/j.actbio.2016.11.041.

Kargozar S, Montazerian M, Hamzehlou S, et al. Mesoporous bioactive glasses: promising platforms for antibacterial strategies in bone tissue engineering. *Acta Biomater.* 2018;81:1-19. doi:10.1016/j.actbio.2018.09.034.



- Kolk A, Handschel J, Drescher W, et al. Bone regeneration using bioactive materials in oral and maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg*. 2016;44(5):537-544. doi:10.1016/j.jcms.2016.02.015.
- Kolk A, Handschel J, Drescher W, et al. Current trends and future perspectives of bone substitute materials—from space holders to innovative biomaterials. *J Craniomaxillofac Surg*. 2019;47(3):425-435. doi:10.1016/j.jcms.2019.01.002.
- Liu X, Rahaman MN, Day DE. Conversion of melt-derived bioactive glass to hydroxyapatite in aqueous phosphate solution. *Acta Biomater*. 2013;9(6):7025-7034. doi:10.1016/j.actbio.2013.03.004.
- Miron RJ, Fujioka-Kobayashi M, Bishara M, Zhang Y, Hernandez M, Choukroun J. Platelet-rich fibrin and soft tissue wound healing: a systematic review. *Tissue Eng Part B Rev*. 2017;23(1):83-99. doi:10.1089/ten.TEB.2016.0233.
- Miron RJ, Zhang Y. Autologous liquid platelet rich fibrin: a novel drug delivery system. *Acta Biomater*. 2018;75:35-51. doi:10.1016/j.actbio.2018.05.021.
- Oryan A, Alidadi S, Moshiri A, Maffulli N. Bone regenerative medicine: classic options, novel strategies, and future directions. *J Orthop Surg Res*. 2014;9:18. doi:10.1186/1749-799X-9-18.
- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71. doi:10.1136/bmj.n71.
- Prasad AK, Smyth HDC, et al. Calcium phosphate-based biomaterials for bone regeneration: current status and future directions. *J Funct Biomater*. 2023;14(1):185. doi:10.3390/jfb14010185.
- Rahaman MN, Day DE, Bal BS, et al. Bioactive glass in tissue engineering. *Acta Biomater*. 2016;42:1-25. doi:10.1016/j.actbio.2016.06.034.
- Sakkas A, Wilde F, Heufelder M, Winter K, Schramm A. Autogenous bone grafts in oral implantology—is it still a “gold standard”? *J Craniomaxillofac Surg*. 2017;45(3):381-392. doi:10.1016/j.jcms.2016.12.022.
- Shah FA, Thomsen P, Palmquist A. A review of the impact of implant biomaterials on osteocytes. *J Dent Res*. 2018;97(9):977-986. doi:10.1177/0022034518778033.
- Sheikh Z, Abdallah MN, Hanafi AA, Misbahuddin S, Rashid H, Glogauer M. Mechanisms of in vivo osseointegration of biomaterials. *J Biomed Mater Res A*. 2015;103(11):3861-3875. doi:10.1002/jbm.a.35441.
- Sheikh Z, Hamdan N, Ikeda Y, Grynepas M, Ganss B, Glogauer M. Natural graft tissues and synthetic biomaterials for periodontal and alveolar bone regenerative applications: a review. *Biomater Res*. 2017;21:9. doi:10.1186/s40824-017-0095-5.
- Vajgel A, Mardas N, Farias BC, Petrie A, Donos N. A systematic review on the critical size defect model. *Clin Oral Implants Res*. 2014;25(8):879-893. doi:10.1111/clr.12194.
- Wang C, Meng F, Li X, et al. 3D printed bioactive glass scaffolds for bone tissue engineering: state of the art and future perspectives. *Mater Sci Eng C*. 2019;98:1023-1035. doi:10.1016/j.msec.2019.01.065.



Wang W, Yeung KWK. Bone grafts and biomaterials substitutes for bone defect repair: a review. *Bioact Mater.* 2017;2(4):224-247. doi:10.1016/j.bioactmat.2017.05.007.

Wu C, Chang J. Mesoporous bioactive glasses: structure characteristics, drug/growth factor delivery and bone regeneration application. *Interface Focus.* 2012;2(3):292-306. doi:10.1098/rsfs.2011.0121.

Wu C, Fan W, Gelinsky M, et al. Bioactive SrO–SiO₂ glass scaffolds with controllable degradation rate for bone regeneration. *Acta Biomater.* 2016;31:306-317. doi:10.1016/j.actbio.2015.11.020.

Zhang Y, Chen M, Wu C. Recent advances in mesoporous bioactive glasses for bone regeneration. *Acta Biomater.* 2018;72:1-16. doi:10.1016/j.actbio.2018.03.012.

Zhang Y, Xia L, Zhai D, et al. Mesoporous bioactive glass scaffolds for efficient delivery of therapeutic ions in bone regeneration. *Acta Biomater.* 2017;55:393-405. doi:10.1016/j.actbio.2017.04.021.

