REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

ARCABOUÇOS ÓSSEOS PERSONALIZADOS EM IMPRESSÃO 3D: PERSPECTIVAS CLÍNICAS APLICADAS À IMPLANTODONTIA

CUSTOMIZED 3D-PRINTED BONE SCAFFOLDS: CLINICAL PERSPECTIVES IN IMPLANT DENTISTRY

Ciências da Saúde • 23/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/795283530

Ícaro Moreira Tomaz[1]

Vinicius Aguiar Fontenele de Paulo[2]

Antonio Guilherme Nunes Silva[3]

Antonio Gustavo do Nascimento Cavalcante[4]

João Victor Menezes do Nascimento[5]

RESUMO

Os arcabouços ósseos personalizados impressos em três dimensões representam uma possibilidade para a reconstrução alveolar na implantodontia. Este estudo objetivou identificar suas aplicações, características e perspectivas clínicas na regeneração óssea. Realizou-se uma revisão integrativa da literatura nas bases PubMed e Biblioteca Virtual em Saúde, com buscas até agosto de 2026 e inclusão de estudos publicados entre 2021 e 2026. A pergunta norteadora foi estruturada pela estratégia População, Conceito e Contexto. Foram incluídos seis estudos, sendo três experimentais em animais e três relatos de caso, que avaliaram estruturas de titânio, poliéter-éter-cetona, policaprolactona, vidro bioativo e hidroxiapatita. Os resultados indicaram manutenção do espaço regenerativo, formação óssea e possibilidade de instalação de implantes nos modelos e casos avaliados. Entretanto, foram registradas complicações, como exposição dos arcabouços e falhas de integração. A heterogeneidade metodológica e a predominância de evidências pré-clínicas e relatos de caso limitaram a comparação entre os materiais e a extrapolação dos resultados. Conclui-se que os arcabouços personalizados impressos em três dimensões apresentam potencial para a regeneração óssea alveolar, mas sua previsibilidade clínica depende de estudos comparativos com amostras maiores e acompanhamento prolongado.

Palavras-chave: Engenharia tecidual; Impressão tridimensional; Regeneração óssea; Materiais biocompatíveis; Implantes dentários.

ABSTRACT

Customized three-dimensional printed bone scaffolds offer a potential approach to alveolar reconstruction in implant dentistry. This study aimed to identify their applications, characteristics, and clinical perspectives in bone regeneration. An integrative literature

review was conducted in the PubMed and Virtual Health Library databases, with searches performed through August 2026 and inclusion of studies published between 2021 and 2026. The research question was structured using the Population, Concept, and Context framework. Six studies were included: three animal experiments and three case reports evaluating titanium, polyetheretherketone, polycaprolactone, bioactive glass, and hydroxyapatite structures. The findings indicated maintenance of the regenerative space, bone formation, and the feasibility of implant placement in the evaluated models and cases. However, complications included scaffold exposure and integration failure. Methodological heterogeneity and the predominance of preclinical evidence and case reports limited comparisons between materials and the generalizability of the findings. Customized three-dimensional printed scaffolds show potential for alveolar bone regeneration, but their clinical predictability requires comparative studies with larger samples and longer follow-up periods.
Keywords: Tissue engineering; Three-dimensional printing; Bone regeneration; Biocompatible materials; Dental implants.

1. INTRODUÇÃO

A implantodontia contemporânea se consolidou como uma das principais áreas da reabilitação oral, tendo como base científica os estudos de Per-Ingvar Brånemark, que demonstraram a possibilidade de ancoragem direta entre o implante de titânio e o tecido ósseo. Esse fenômeno, posteriormente denominado osseointegração, estabeleceu o fundamento biológico para o sucesso dos implantes dentários, permitindo avanços significativos na reabilitação de pacientes parcial ou totalmente edêntulos (Da

Silva; Carvalho; Marangon Jr., 2023; Pandey; Rokaya; Bhattarai, 2022; Buser et al., 2023).

Do ponto de vista biológico, a osseointegração configura-se como um processo dinâmico e altamente regulado, iniciado imediatamente após a instalação do implante. A formação de uma camada de proteínas sobre a superfície do titânio favorece a adesão celular e desencadeia eventos subsequentes de migração, diferenciação e formação óssea. Esse processo envolve etapas interdependentes, como osteocondução, neoformação e remodelação óssea, sendo essencial para a estabilidade funcional e longevidade dos implantes (Nascimento, 2022; Da Silva; Carvalho; Marangon Jr., 2023; Pandey; Rokaya; Bhattarai, 2022).

Apesar dos elevados índices de sucesso clínico, a disponibilidade e a qualidade do tecido ósseo permanecem como fatores determinantes para a previsibilidade dos resultados. Evidências demonstram que a instalação de implantes em áreas com deficiência óssea, especialmente na ausência de parede vestibular adequada, está associada a maior risco de complicações e comprometimento do prognóstico em longo prazo. Dessa forma, a reconstrução do rebordo alveolar tornou-se etapa essencial no planejamento da terapia com implantes (Buser et al., 2023).

Nesse contexto, a regeneração óssea guiada (ROG) destaca-se como uma das principais estratégias terapêuticas para correção de defeitos ósseos e aumento do volume alveolar. Essa abordagem fundamenta-se na utilização de biomateriais associados a membranas de barreira, com o objetivo de estabilizar o coágulo sanguíneo, manter o espaço regenerativo e impedir a invasão de

tecidos de rápida proliferação, favorecendo a formação de novo tecido ósseo (Alavi et al., 2023).

A previsibilidade dessa técnica está diretamente relacionada às propriedades dos biomateriais empregados. Idealmente, esses materiais devem apresentar biocompatibilidade, capacidade de modular a resposta inflamatória, suporte à angiogênese e estímulo à proliferação e diferenciação celular (Haugen et al., 2019). Além disso, características estruturais como a porosidade e o tamanho dos poros influenciam diretamente a osteogênese (Karageorgiou; Kaplan, 2005).

Paralelamente, observou-se uma evolução contínua dos materiais utilizados na regeneração óssea. Inicialmente, os autoenxertos foram considerados o padrão-ouro devido às suas propriedades biológicas superiores; entretanto, limitações como morbidade do sítio doador e disponibilidade restrita estimularam o desenvolvimento de alternativas. Nesse cenário, aloenxertos, xenoenxertos e biomateriais sintéticos passaram a ser amplamente utilizados, embora ainda apresentem desafios relacionados à integração tecidual e à resposta do hospedeiro (Wang; Kang, 2026).

Com o avanço da engenharia de tecidos, os scaffolds passaram a ser empregados na regeneração óssea, oferecendo suporte físico para adesão celular, além de favorecerem a organização e o crescimento do tecido ósseo. Sua eficácia está diretamente relacionada à composição do biomaterial e à sua organização estrutural em níveis macro, micro e nano, os quais influenciam a osteocondução e a integração com o tecido hospedeiro.

Nesse cenário, os scaffolds impressos em 3D destacam-se por possibilitar a combinação de diferentes biomateriais, incluindo cerâmicas, polímeros e compósitos bioativos, frequentemente associados a propriedades inteligentes e moléculas bioativas. Essas características favorecem a integração com o tecido ósseo, promovem suporte mecânico adequado e estimulam a formação de novo osso. Ainda assim, desafios relacionados à vascularização, resistência mecânica e controle da degradação persistem, evidenciando a necessidade de contínuo desenvolvimento científico (Farjaminejad et al., 2024).

Diante desse panorama, torna-se evidente a relevância da compreensão integrada dos princípios biológicos da osseointegração, das estratégias de regeneração óssea e das inovações tecnológicas aplicadas aos biomateriais. Nesse sentido, investigar o potencial dos scaffolds ósseos personalizados obtidos por impressão 3D na implantodontia mostra-se fundamental para consolidar sua aplicabilidade clínica, bem como para identificar suas vantagens, limitações e perspectivas futuras, o que motivou a presente pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Osseointegração

A base científica da implantodontia contemporânea foi estabelecida a partir dos estudos de Per-Ingvar Brånemark, que, na década de 1950, ao investigar a microcirculação óssea em coelhos, observou a integração permanente do titânio ao tecido ósseo. Esse achado levou à descrição, em 1962, do fenômeno de ancoragem direta entre o osso e implantes metálicos, posteriormente aplicado clinicamente

em 1965, marcando o início do uso de implantes osseointegrados em humanos e ampliando significativamente as possibilidades de reabilitação oral (Da Silva; Carvalho; Marangon Jr., 2023).

Em 1976, esse fenômeno foi formalmente definido como osseointegração, caracterizada pela conexão estrutural e funcional direta entre o osso vivo e a superfície do implante sob carga. Desde então, esse conceito consolidou-se como o principal fundamento da implantodontia moderna, promovendo avanços significativos na reabilitação de pacientes parcial ou totalmente edêntulos, em um cenário clínico cada vez mais voltado à previsibilidade, função e estética (Pandey; Rokaya; Bhattarai, 2022; Buser et al., 2023).

Sob a perspectiva biológica, a osseointegração consiste em um processo dinâmico que permite a fixação estável do implante ao tecido ósseo, garantindo sua capacidade de suportar cargas mastigatórias. Esse fenômeno envolve etapas interdependentes, como a osteocondução, a formação óssea e a remodelação, mediadas pela migração e diferenciação de células osteogênicas, bem como pela expressão de proteínas da matriz extracelular, como osteocalcina, osteopontina e fibronectina. No ambiente peri-implantar, o coágulo sanguíneo em contato direto com a superfície do implante exerce papel essencial no reparo tecidual, sendo a angiogênese um evento inicial determinante para a formação óssea subsequente (Nascimento, 2022).

A nível celular e molecular, esse processo inicia-se imediatamente após a instalação do implante, quando a superfície do titânio é rapidamente recoberta por moléculas de água e proteínas, formando uma interface biológica que favorece a adesão, migração e diferenciação celular. Essa interação entre o biomaterial e o meio

biológico regula eventos fundamentais para a consolidação óssea primária e para o sucesso clínico da terapia de implantes (Da Silva; Carvalho; Marangon Jr., 2023).

Além disso, a resposta biológica ao implante é influenciada não apenas por sua composição química, mas também por fatores como a topografia da superfície, a liberação de íons e a interação com componentes da matriz extracelular e proteínas do citoesqueleto. Essas proteínas desempenham papel fundamental na modulação de processos celulares, como expressão gênica, proliferação e sobrevivência, destacando-se o colágeno tipo I, a fibronectina, a osteopontina, a osteonectina, a osteoadesina e a sialoproteína óssea (Da Silva; Carvalho; Marangon Jr., 2023).

Do ponto de vista físico-químico, quando o titânio é exposto ao ar, forma-se espontaneamente uma camada de óxido em sua superfície, responsável por proteger o material contra bioerosão e aumentar sua resistência ao desgaste. Essa camada também favorece a biomineralização, permitindo a adsorção de íons cálcio e fosfato, o que contribui para a formação de novo tecido ósseo. A partir dessa interação inicial, o processo de osseointegração evolui para a formação óssea, adaptação estrutural às cargas funcionais e, por fim, remodelação contínua do tecido ósseo (Pandey; Rokaya; Bhattarai, 2022).

No âmbito clínico-cirúrgico, diversos fatores influenciam o sucesso dos implantes, destacando-se a adequada ancoragem óssea após o período de cicatrização. Historicamente, os implantes eram instalados em áreas previamente cicatrizadas; contudo, estudos demonstraram que a ausência de uma parede óssea vestibular adequada pode aumentar a incidência de complicações nos tecidos

moles e comprometer o prognóstico em longo prazo (Buser et al., 2023).

Diante dessas limitações, áreas com volume ósseo insuficiente passaram a ser consideradas contraindicações relativas, exigindo intervenções para reconstrução do rebordo alveolar. Nesse contexto, diversas técnicas cirúrgicas foram desenvolvidas a partir das décadas de 1980 e 1990, incluindo enxertos autógenos em bloco, levantamento do seio maxilar, enxertos onlay e técnicas de expansão óssea, como o split-crest, ampliando as possibilidades de tratamento (Buser et al., 2023).

Paralelamente a esses avanços, surgiram os primeiros estudos envolvendo o uso de membranas de barreira, inicialmente denominadas Regeneração Tecidual Guiada (RTG). Com a evolução do conhecimento, esse conceito foi ampliado e passou a ser denominado Regeneração Óssea Guiada (ROG), consolidando-se como uma das principais estratégias terapêuticas para reconstrução óssea em implantodontia até os dias atuais (Buser et al., 2023).

2.2. Regeneração Óssea Guiada

A regeneração óssea guiada (ROG) consolidou-se como uma das principais estratégias terapêuticas na implantodontia contemporânea, uma vez que o material de suporte exerce papel fundamental na criação de um microambiente biologicamente favorável à adesão, proliferação e diferenciação celular (Alavi et al., 2023). Essa técnica baseia-se na associação entre enxertos ósseos e membranas de barreira, sendo amplamente indicada para o tratamento de defeitos peri-implantares, como deiscências e fenestrações, além de apresentar crescente aplicação na

reconstrução de defeitos ósseos alveolares em diferentes contextos clínicos.

Em defeitos de maior extensão, a ROG pode ser associada ao uso de enxertos autógenos, potencializando a resposta regenerativa por meio do fornecimento de células osteogênicas, fatores de crescimento e matriz orgânica. Um dos princípios biológicos fundamentais dessa abordagem é a manutenção do espaço do defeito, evitando o colapso do coágulo sanguíneo e a invasão de tecidos de rápida proliferação. Nesse cenário, as membranas de barreira atuam promovendo o isolamento seletivo do sítio, favorecendo a osteogênese ao reduzir a competição celular (Elgali et al., 2017).

O sucesso dessa técnica está diretamente relacionado às propriedades dos biomateriais empregados, que devem apresentar características físico-químicas e biológicas capazes de mimetizar o ambiente do tecido ósseo. Entre essas propriedades, destacam-se a capacidade de fornecer suporte estrutural e estímulos bioquímicos, promover o recrutamento e a diferenciação de células progenitoras, além de modular a resposta inflamatória e imunológica do hospedeiro (Haugen et al., 2019). Adicionalmente, esses materiais devem favorecer a angiogênese, essencial para o suprimento de nutrientes e oxigênio (Kanczler; Oreffo, 2008), e apresentar resistência à contaminação bacteriana.

A dinâmica do tecido ósseo, por sua vez, é caracterizada pelo equilíbrio entre formação e reabsorção, mediado principalmente pela atuação de osteoblastos e osteoclastos. Os osteoblastos são responsáveis pela síntese da matriz osteoide e sua posterior mineralização, enquanto os osteoclastos participam da reabsorção

óssea (Florencio-Silva et al., 2015). A interação entre essas células e a matriz extracelular, mediada por integrinas e proteínas específicas, é determinante para a organização tecidual e para a qualidade do tecido formado, influenciando diretamente o sucesso da osseointegração.

As membranas de barreira constituem um dos pilares biológicos da ROG, pois promovem a exclusão de tecidos moles e direcionam a regeneração óssea por meio do controle seletivo da migração celular (Elgali et al., 2017). No entanto, materiais convencionais, como o politetrafluoretileno e o colágeno, apresentam limitações relacionadas à sua conformação, geralmente plana, o que pode dificultar a adaptação em defeitos tridimensionais mais complexos. Nesse sentido, o desenvolvimento de biomateriais com maior conformabilidade e melhores propriedades mecânicas tem sido amplamente investigado.

Diante dessas limitações, diferentes estratégias vêm sendo propostas com o objetivo de otimizar o desempenho dos biomateriais, incluindo modificações em sua composição química e em sua arquitetura estrutural. Essas abordagens buscam aprimorar a adesão, migração e proliferação celular, favorecendo a integração com o tecido ósseo e aumentando a previsibilidade clínica dos procedimentos regenerativos.

Outro aspecto relevante refere-se às características estruturais dos arcabouços utilizados na engenharia tecidual, especialmente a porosidade e o tamanho dos poros, que influenciam diretamente a osteogênese e a angiogênese. Estruturas macroporosas favorecem a formação de capilares, a difusão de nutrientes e a adsorção de proteínas, além de promoverem a fixação celular (Karageorgiou;

Kaplan, 2005). Adicionalmente, a incorporação de íons como cálcio, fosfato, magnésio e silício tem sido associada ao aumento da formação óssea e à melhora do processo de cicatrização (Hoppe; Güldal; Boccaccini, 2011).

Por fim, destaca-se que, embora o aumento da porosidade favoreça a interconectividade e os eventos celulares envolvidos na regeneração, níveis excessivos podem comprometer a resistência mecânica do biomaterial, exigindo um equilíbrio entre propriedades estruturais e biológicas (Karageorgiou; Kaplan, 2005). Assim, a regeneração óssea guiada deve ser compreendida como uma abordagem multidisciplinar e integrada, envolvendo biomateriais, células e fatores de crescimento, atuando de forma sinérgica para promover a formação de tecido ósseo funcional e garantir o sucesso das reabilitações com implantes.

2.3. Evolução dos Enxertos Ósseos

Ao longo das últimas décadas, observa-se uma evolução progressiva dos biomateriais utilizados na regeneração óssea, iniciando-se com os enxertos autógenos, historicamente considerados padrão-ouro, e avançando para o uso de aloenxertos, xenoenxertos e materiais sintéticos, até alcançar abordagens mais recentes baseadas em engenharia de tecidos e manufatura aditiva (Wang; Kang, 2026).

A complexidade anatômica e funcional da região oral e maxilofacial, aliada à necessidade de reabilitação estética e funcional, torna desafiadora a reconstrução de defeitos ósseos decorrentes de traumas, patologias ou processos infecciosos. Nesse contexto, a regeneração óssea guiada consolidou-se como uma abordagem terapêutica essencial na implantodontia, especialmente para

aumento do volume da crista alveolar e reconstrução de defeitos ósseos.

Historicamente, os autoenxertos se destacaram como a principal opção terapêutica, devido à sua capacidade osteogênica, osteoindutiva e osteocondutiva, conforme descrito classicamente por Urist (1965). No entanto, apesar de suas vantagens biológicas, sua utilização está associada a limitações significativas, como morbidade do sítio doador, disponibilidade restrita e reabsorção progressiva, especialmente em enxertos corticais não vascularizados.

Com o objetivo de minimizar essas limitações, os aloenxertos foram introduzidos como alternativa, embora seu uso apresente restrições relacionadas à resposta imunológica, risco de transmissão de doenças e aspectos éticos (Kanczler; Oreffo, 2008; Wang; Yeung, 2017). Paralelamente, os xenoenxertos e materiais sintéticos passaram a ganhar espaço na prática clínica (Haugen et al., 2019), oferecendo maior disponibilidade e segurança biológica, ainda que com limitações quanto à integração tecidual e remodelação óssea.

Na tentativa de otimizar os resultados clínicos, novas estratégias cirúrgicas foram desenvolvidas, como a técnica da membrana induzida, que tem demonstrado bons resultados na regeneração de defeitos extensos ao criar um ambiente biológico favorável à neoformação óssea (Masquelet; Begue, 2010).

Paralelamente à evolução dos enxertos, as membranas de barreira também passaram por importantes avanços. Inicialmente, as membranas não reabsorvíveis de politetrafluoretileno (PTFE) foram consideradas padrão-ouro na regeneração óssea guiada, devido à

sua capacidade de manter o espaço e atuar como barreira celular eficaz. Entretanto, limitações clínicas, como a necessidade de remoção cirúrgica e maior risco de exposição, impulsionaram o desenvolvimento de membranas reabsorvíveis, especialmente à base de colágeno, que apresentam melhor integração tecidual e menor morbidade (Elgali et al., 2017).

A partir da década de 1990, com o avanço da engenharia de tecidos, conceito inicialmente descrito por Langer e Vacanti (1993), novas abordagens passaram a integrar biomateriais, células e fatores de crescimento, ampliando significativamente o potencial regenerativo. Mais recentemente, a incorporação de nanotecnologia permitiu o desenvolvimento de biomateriais bioativos capazes de modular a interação célula-material e estimular a diferenciação osteogênica (Ye et al., 2020).

Estudos clássicos demonstram a importância da porosidade ideal para a formação óssea, destacando o papel da microestrutura na integração tecidual (Karageorgiou; Kaplan, 2005).

Nos últimos anos, biomateriais biodegradáveis e bioabsorvíveis, como a policaprolactona, têm sido amplamente investigados devido à sua biocompatibilidade, capacidade de degradação controlada e estabilidade estrutural (Dwivedi et al., 2020). Esses materiais também possibilitam a incorporação de agentes bioativos e antibacterianos, ampliando suas aplicações clínicas e contribuindo para melhores resultados regenerativos.

Mais recentemente, a integração entre biomateriais e tecnologias digitais tem promovido uma verdadeira transformação na regeneração óssea. A manufatura aditiva e a impressão 3D

permitem a produção de scaffolds personalizados com controle preciso da porosidade e interconectividade, aplicando de forma mais eficiente conceitos previamente estabelecidos na literatura (Bose; Vahabzadeh; Bandyopadhyay, 2013).

2.4. Biomateriais Impressos 3D

Avanços recentes incluem o desenvolvimento de biomateriais inteligentes biomiméticos, inspirados nas propriedades naturais dos tecidos biológicos. Esses materiais podem apresentar características como atividade piezoelétrica, sendo capazes de gerar estímulos elétricos que influenciam processos biológicos como crescimento celular e regeneração tecidual (Rajabi; Jaffe; Arinzeh, 2015).

Para que um scaffold seja considerado ideal, ele deve apresentar propriedades específicas, como biocompatibilidade, biodegradabilidade controlada, resistência mecânica adequada e arquitetura porosa interconectada. A presença de poros com diâmetro superior a 100 μm é fundamental para favorecer a infiltração celular, a angiogênese e a formação óssea (Karageorgiou; Kaplan, 2005), enquanto microporosidades adicionais aumentam a permeabilidade e aceleram o processo regenerativo. Além disso, a capacidade de integração com o tecido ósseo e a estabilidade estrutural são fatores determinantes para o sucesso clínico.

Apesar dos avanços, ainda existem limitações importantes relacionadas aos scaffolds, incluindo desafios quanto à resistência mecânica, vascularização, controle da degradação e resposta do hospedeiro. Além disso, a necessidade de otimizar a interação entre células, biomateriais e fatores de crescimento permanece como um dos principais focos de pesquisa. Nesse cenário, as perspectivas

futuras apontam para o desenvolvimento de estruturas cada vez mais inteligentes, capazes de responder dinamicamente ao ambiente biológico, integrando tecnologias como impressão 3D, biomateriais bioativos e engenharia de tecidos, com o objetivo de alcançar regeneração óssea mais eficiente e previsível (Farjaminejad et al., 2024).

3. METODOLOGIA

3.1. Tipo de Estudo

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, modalidade de pesquisa que permitiu a síntese do conhecimento científico disponível sobre determinado tema, reunindo estudos com diferentes abordagens metodológicas, a fim de proporcionar uma compreensão ampla, crítica e sistematizada da produção acadêmica existente. Esse tipo de revisão possibilitou a integração de resultados de pesquisas experimentais e não experimentais, contribuindo para o aprofundamento do conhecimento e para a tomada de decisão baseada em evidências científicas (Souza; Silva; Carvalho, 2010; Fineout-Overholt et al., 2010).

A presente revisão foi estruturada com base no modelo PCC (População, Conceito e Contexto), conforme recomendado pelo Joanna Briggs Institute, o qual orientou a construção de questões de pesquisa em revisões integrativas e de escopo. Diferentemente do modelo PICO, o PCC não exigiu a definição de intervenção, comparação ou desfecho, sendo mais adequado para estudos com abordagem ampla e exploratória, permitindo a identificação e o mapeamento de conceitos, contextos e evidências disponíveis na literatura científica (Aromataris; Munn, 2020).

Quadro 1. Desenho do estudo a partir do modelo PCC

Elemento	Descrição
P (População/Problema)	Pacientes com defeitos ósseos maxilofaciais indicados para reabilitação com implantes
C (Conceito)	Scaffolds ósseos personalizados obtidos por impressão 3D
C (Contexto)	Regeneração óssea aplicada à implantodontia

Fonte: Autoria própria, 2026.

3.2. Pergunta Norteadora

Com o intuito de delimitar de forma clara e objetiva o foco da revisão, foi elaborada uma pergunta norteadora fundamentada na estratégia PCC, a qual orientou a construção de investigações científicas voltadas à síntese do conhecimento. Nesse contexto, a questão de pesquisa definida foi: “Quais são as aplicações, características e perspectivas clínicas dos scaffolds ósseos personalizados obtidos por impressão 3D na regeneração óssea em implantodontia?”

A formulação dessa pergunta permitiu direcionar a busca e a análise da literatura de forma sistematizada, favorecendo a identificação dos principais avanços tecnológicos, aplicações clínicas e limitações desses biomateriais no contexto da implantodontia.

3.3. Critérios de Inclusão e Exclusão dos Estudos

Os critérios de inclusão adotados nesta revisão integrativa contemplaram estudos primários e secundários, incluindo ensaios clínicos, estudos experimentais, estudos in vitro, estudos observacionais e revisões sistemáticas, que abordaram diretamente o uso de scaffolds ósseos personalizados por impressão 3D na regeneração óssea aplicada à implantodontia.

Foram considerados elegíveis os estudos publicados nos últimos cinco anos (2021 a 2026), em todos os idiomas, desde que estivessem disponíveis na íntegra. Essa delimitação temporal teve como objetivo reunir evidências científicas atualizadas, considerando a rápida evolução das tecnologias de manufatura aditiva e engenharia de tecidos.

Foram excluídos estudos duplicados, trabalhos incompletos, resumos simples, cartas ao editor, teses e dissertações, bem como aqueles que não apresentaram relação direta com o tema proposto ou que não descreveram claramente sua metodologia. Também foram excluídos estudos que abordaram apenas biomateriais convencionais sem associação com tecnologias de impressão 3D.

A busca bibliográfica foi realizada até agosto de 2026, sendo esse o ponto de corte temporal para inclusão dos estudos, o que garantiu a reprodutibilidade metodológica da pesquisa.

3.4. Seleção das Bases de Dados e Estratégia de Busca

Para a busca bibliográfica, foram utilizadas as bases de dados PubMed e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), utilizando descritores controlados provenientes dos Medical Subject Headings (MeSH) e dos Descritores em Ciências da Saúde (DeCS), associados a termos livres, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2. Descritores utilizados na estratégia de busca

DeCS (Português)	MeSH (Inglês)	Termos livres associados
Engenharia de tecidos	Tissue Engineering	Bone tissue engineering
Impressão 3D	3D Printing	Additive manufacturing
Regeneração óssea	Bone Regeneration	Guided bone regeneration
Biomateriais	Biomaterials	Scaffolds
Implantes dentários	Dental Implants	Implant dentistry

Fonte: Autoria própria, 2026.

Na base PubMed, a estratégia de busca foi estruturada da seguinte forma: ("Tissue Engineering"[MeSH Terms] OR "bone tissue engineering") AND ("3D Printing"[MeSH Terms] OR "additive manufacturing") AND ("Bone Regeneration"[MeSH Terms]) AND ("Biomaterials"[MeSH Terms] OR "scaffolds") AND ("Dental Implants" [MeSH Terms]). Na BVS, foi utilizada a seguinte combinação: ("engenharia de tecidos" OR "tissue engineering") AND ("impressão 3D" OR "3D printing") AND ("regeneração óssea" OR "bone regeneration") AND ("biomateriais" OR "scaffolds") AND ("implantes dentários" OR "implant dentistry").

3.5. Seleção dos Estudos

A seleção dos estudos foi realizada em duas etapas. Inicialmente, foi feita a leitura dos títulos e resumos, com o objetivo de identificar os estudos potencialmente elegíveis conforme os critérios estabelecidos. Em seguida, os artigos selecionados foram submetidos à leitura na íntegra para confirmação da elegibilidade.

Os dados dos estudos incluídos foram extraídos de forma padronizada, considerando as seguintes variáveis: autor/ano, título, objetivos, metodologia, principais resultados e conclusões. Essa padronização permitiu uma análise comparativa e sistemática dos achados.

A análise foi conduzida por dois avaliadores independentes, sendo que eventuais divergências foram resolvidas por consenso. A interpretação dos dados foi realizada por meio de análise temática, permitindo a organização das evidências em categorias relevantes ao tema.

A avaliação da qualidade metodológica dos estudos foi realizada conforme recomendações da literatura, considerando aspectos como delineamento, clareza metodológica e consistência dos resultados, contribuindo para a robustez da síntese final.

3.6. Aspectos Éticos

Por se tratar de uma revisão integrativa da literatura, este estudo não envolveu diretamente seres humanos, não sendo necessária a submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa. No entanto, foram rigorosamente respeitados os princípios éticos relacionados à integridade científica, à originalidade do conteúdo e ao correto referenciamento das fontes utilizadas.

Foram adotadas medidas para evitar qualquer forma de plágio, assegurando a adequada citação dos autores e o cumprimento da Lei nº 9.610/1998, que regulamenta os direitos autorais no Brasil, garantindo o uso ético e responsável das informações científicas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os seis estudos selecionados, publicados entre 2022 e 2026, investigaram a aplicação de scaffolds personalizados produzidos por impressão tridimensional (3D) na regeneração óssea alveolar, contemplando três estudos experimentais in vivo e três relatos de caso clínico. Os materiais utilizados incluíram titânio, poliéter-éter-cetona (PEEK), policaprolactona (PCL), vidro bioativo e hidroxiapatita, associados a diferentes técnicas de reconstrução e preservação óssea. De modo geral, os resultados demonstraram formação de novo tecido ósseo, manutenção do espaço regenerativo e condições favoráveis à instalação de implantes dentários. Entretanto, foram relatadas complicações relacionadas à exposição dos scaffolds e à resposta inflamatória tecidual, evidenciando limitações que ainda precisam ser investigadas. As principais características metodológicas e os resultados dos estudos estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Caracterização dos estudos sobre a utilização de scaffolds impressos em 3D na regeneração óssea alveolar

AUTOR/ANO	TÍTULO	MÉTODO/TIPO DE ESTUDO	RESULTADOS E DISCUSSÃO
Li et al. (2022)	Assessment of Customized Alveolar Bone Augmentation Using Titanium Scaffolds vs Polyetheretherketone (PEEK) Scaffolds: A Comparative Study Based on 3D Printing Technology	Estudo experimental comparativo com testes mecânicos, análise por elementos finitos e avaliação *in vivo* em cães Beagle. Comparou scaffolds de PEEK e titânio com membrana de colágeno.	O PEEK apresentou menor resistência mecânica que o titânio. Ambos mantiveram o espaço regenerativo e apresentaram formação óssea semelhante, superior à observada com a

			membrana de colágeno.
Ivanovski et al. (2024)	Alveolar Bone Regeneration Using a 3D-Printed Patient-Specific Resorbable Scaffold for Dental Implant Placement: A Case Report	Relato de caso com scaffold personalizado e reabsorvível de policaprolactona (PCL) para aumento ósseo alveolar e posterior instalação de implante.	Ganho ósseo de 364,69 mm^3, com formação de osso novo. O implante foi instalado com torque de inserção de 35 N·cm.
Cirrincione, Guarnieri e Morelli (2025)	Digital Workflow with Open-Source CAD-CAM Software Aimed to Design a Customized 3D Laser-Printed Titanium Mesh for Guided Bone Regeneration	Relato de caso com fluxo digital CAD-CAM para produção de malha personalizada de titânio impressa a laser para regeneração óssea guiada (ROG).	Ganhos de 3,5 mm na vertical, 5,6 mm na horizontal e aproximadamente 970 mm^3 de volume regenerado. Não houve exposição da malha; o torque de inserção do implante foi de 40 N·cm.
Deng et al. (2025)	Animal Experimental Study on Delayed Implantation in a Severely Atrophic Alveolar Ridge Reconstructed Using a 3D-Printed Bioactive Glass Scaffold: A Pilot Study	Estudo experimental piloto em quatro cães Beagle, com scaffolds de vidro bioativo impressos em 3D em defeitos mandibulares.	Fração de osso novo de 43,93% e altura média de 4,05 mm. Houve exposição precoce em 37,5% dos sítios.

Aravena et al. (2025)	Alveolar Ridge Preservation Using Three-Dimensional Root Replicas of Polycaprolactone: A Radiological and Histological Evaluation of a Case Report	Relato de caso com réplicas radiculares personalizadas de PCL–PEG impressas em 3D para preservação alveolar.	Um scaffold apresentou osso lamelar e permitiu a instalação de implante com torque superior a 35 N·cm. Outro sofreu exposição e substituição por tecido conjuntivo inflamatório.
Systermans et al. (2026)	Dental Implant Osseointegration Following Mandibular Augmentation Using 3D Printed Hydroxyapatite Blocks: An Experimental In Vivo Study	Estudo experimental em quatro miniporcos com blocos de hidroxiapatita impressos em 3D, com porosidade giroide.	Formação de 39,17% de osso novo e ganho médio de 4,73 mm. O contato osso–implante foi semelhante ao observado no osso nativo.

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os estudos incluídos nesta revisão apontam que os arcabouços personalizados impressos em 3D apresentam potencial para a reconstrução do rebordo alveolar e a posterior instalação de implantes dentários. Apesar das diferenças entre os materiais e os delineamentos empregados, os resultados convergem quanto à possibilidade de manter o espaço regenerativo e favorecer a formação óssea. Entretanto, a ocorrência de exposição e falhas de integração, associada à predominância de estudos experimentais e relatos de caso, demonstra que a viabilidade dessas estruturas ainda precisa ser acompanhada de evidências mais consistentes sobre sua previsibilidade clínica.

A manutenção do espaço constitui um dos principais aspectos para compreender esses resultados. Conforme apresentado por Alavi et al. (2023), a regeneração óssea depende de condições que permitam estabilizar o coágulo e proteger a área durante a cicatrização. Nesse sentido, Li et al. (2022) observaram que os arcabouços de PEEK e titânio proporcionaram formação óssea semelhante e superior à obtida com a membrana de colágeno, embora o PEEK apresentasse menor resistência mecânica. Esse achado sugere que, nas condições experimentais avaliadas, a maior resistência do titânio não se traduziu em maior formação óssea. Assim, o desempenho regenerativo deve ser interpretado considerando a adequação do suporte mecânico às exigências do defeito, em conjunto com as propriedades biológicas do material.

Além da resistência, a arquitetura dos arcabouços participa da interação entre o biomaterial e o tecido receptor. A porosidade, a interconectividade e a composição dos materiais são aspectos relevantes para a regeneração óssea. Os resultados de Deng et al. (2025) e Systermans et al. (2026) são compatíveis com esses fundamentos, ao demonstrarem formação de osso novo em estruturas de vidro bioativo e hidroxiapatita, respectivamente. Contudo, esses estudos avaliaram o conjunto formado pelo material e por sua configuração estrutural, não permitindo determinar isoladamente a contribuição de cada característica para os resultados observados.

Nos modelos animais, Deng et al. (2025) encontraram fração de osso novo de 43,93% e altura média de 4,05 mm, enquanto Systermans et al. (2026) relataram formação de 39,17% de osso novo e ganho médio de 4,73 mm. Embora ambos indiquem potencial regenerativo, esses valores não permitem estabelecer superioridade entre os materiais,

pois foram obtidos em diferentes espécies animais, condições experimentais e protocolos de avaliação. A interpretação conjunta desses trabalhos sustenta a possibilidade de reconstrução óssea com materiais cerâmicos impressos em 3D, mas também evidencia a necessidade de comparações padronizadas antes de extrapolar os resultados para a prática clínica.

A avaliação do tecido regenerado ganha maior relevância quando relacionada à possibilidade de osseointegração. Systermans et al. (2026) observaram contato osso–implante semelhante entre a região aumentada com hidroxiapatita e o osso nativo, acrescentando um desfecho relacionado à interface implantária à análise do ganho ósseo. Esse resultado dialoga com os fundamentos apresentados por Da Silva, Carvalho e Marangon Jr. (2023) e Pandey, Rokaya e Bhattarai (2022), segundo os quais o desempenho dos implantes depende da formação e da remodelação do tecido ósseo em contato com sua superfície. Ainda assim, a semelhança observada nesse modelo experimental não estabelece equivalência quanto à sobrevivência dos implantes ou à estabilidade sob carga em longo prazo.

Nos estudos em humanos, Ivanovski et al. (2024) e Cirrincione, Guarnieri e Morelli (2025) demonstraram a possibilidade de reconstruir defeitos alveolares e instalar implantes após a utilização de estruturas personalizadas. No primeiro, o scaffold reabsorvível de PCL esteve associado a ganho ósseo de 364,69 mm^3, com torque de inserção de 35 N·cm. No segundo, a malha de titânio personalizada permitiu ganhos de 3,5 mm na vertical e 5,6 mm na horizontal, com aproximadamente 970 mm^3 de volume regenerado e torque de 40 N·cm. Esses achados ilustram a aplicação clínica de diferentes estratégias de manufatura aditiva, mas os volumes obtidos não

devem ser comparados como medida de eficácia, uma vez que dependem das dimensões iniciais dos defeitos e das particularidades dos procedimentos.

Também é necessário distinguir a função das estruturas utilizadas nesses casos. Enquanto o arcabouço polimérico reabsorvível constitui uma matriz tridimensional para a regeneração, a malha de titânio atua principalmente na contenção do enxerto e na manutenção do espaço. Essa diferença impede atribuir os resultados exclusivamente ao material impresso, sobretudo quando há associação com outros biomateriais. A personalização representa, portanto, um recurso incorporado ao tratamento regenerativo, cujo resultado depende da interação entre planejamento, estrutura de suporte, enxerto e condições do leito receptor.

Nesse contexto, o fluxo digital constitui um ponto de aproximação entre os estudos, apesar da diversidade dos materiais. Estruturas adaptadas à anatomia do defeito podem ser produzidas mediante planejamento tridimensional e manufatura aditiva. Os relatos de Ivanovski et al. (2024) e Cirrincione, Guarnieri e Morelli (2025) exemplificam essa aplicação na reconstrução alveolar. Entretanto, a obtenção de resultados favoráveis em casos individuais demonstra viabilidade técnica, sem comprovar, por si só, maior precisão, menor tempo cirúrgico ou superioridade clínica em relação aos métodos convencionais.

As complicações observadas mostram que a adaptação anatômica não elimina os desafios da cicatrização. Deng et al. (2025) relataram exposição precoce em 37,5% dos sítios, enquanto Aravena et al. (2025) observaram comportamentos distintos entre as estruturas de PCL–PEG: uma apresentou formação de osso lamelar e possibilitou a

instalação de implante com torque superior a 35 N·cm; outra sofreu exposição e substituição por tecido conjuntivo inflamatório. Em contraste, Cirrincione, Guarnieri e Morelli (2025) não registraram exposição da malha de titânio no caso descrito. Esses resultados reforçam a importância da cobertura dos tecidos moles e da proteção do ambiente regenerativo, mas não permitem comparar taxas de complicação entre os materiais, considerando as diferenças metodológicas e o pequeno número de casos.

A variabilidade observada entre as estruturas poliméricas também indica que a utilização de um material reabsorvível não assegura integração previsível. Os resultados favoráveis com PCL apresentados por Ivanovski et al. (2024), quando analisados em conjunto com a exposição descrita por Aravena et al. (2025), sugerem que o desempenho depende de condições que ultrapassam a composição do biomaterial. Essa interpretação se aproxima das limitações discutidas por Farjaminejad et al. (2024), relacionadas ao equilíbrio entre suporte mecânico, vascularização e degradação das estruturas. Contudo, os estudos incluídos não permitem identificar qual desses fatores contribuiu de forma determinante para cada desfecho.

Outro cuidado necessário diz respeito à interpretação do torque de inserção. Os valores relatados nos estudos clínicos demonstram que foi possível obter estabilidade primária no momento da instalação dos implantes, mas não comprovam isoladamente osseointegração ou sucesso em longo prazo. Essa distinção é coerente com a natureza dinâmica da formação e remodelação óssea descrita por Nascimento (2022) e Pandey, Rokaya e Bhattarai (2022). Dessa forma, a avaliação dessas tecnologias deve incorporar, além do ganho ósseo e da estabilidade inicial, a manutenção do volume regenerado, a

sobrevivência dos implantes e o comportamento dos tecidos após a reabilitação protética.

Por fim, a interpretação desta revisão deve considerar a heterogeneidade dos estudos, que reuniram diferentes materiais, modelos animais, situações clínicas e métodos de mensuração. A ausência de estudos clínicos comparativos entre os trabalhos incluídos limita a definição de indicações específicas e impede recomendar um biomaterial como superior aos demais. As evidências disponíveis sustentam o potencial dos arcabouços personalizados impressos em 3D para a regeneração alveolar, mas sua incorporação clínica mais ampla depende de investigações com grupos de comparação, amostras maiores e acompanhamento prolongado, capazes de avaliar tanto os benefícios regenerativos quanto as complicações e a estabilidade dos resultados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os scaffolds ósseos personalizados impressos em 3D apresentam potencial para a regeneração óssea na implantodontia, com aplicações na preservação do rebordo alveolar e na reconstrução de defeitos previamente à instalação de implantes. A personalização permite produzir estruturas adaptadas à anatomia da região tratada, enquanto a diversidade de biomateriais amplia as possibilidades de suporte mecânico e interação com o tecido receptor. Nos estudos analisados, essas abordagens favoreceram a manutenção do espaço regenerativo e a formação óssea, possibilitando, em determinadas situações, a instalação e a osseointegração de implantes dentários.

Entretanto, os resultados não permitem estabelecer a superioridade de um material ou recomendar a utilização rotineira dessas

estruturas. A ocorrência de exposição e falhas de integração demonstra que a personalização, isoladamente, não assegura o sucesso regenerativo, que também depende das propriedades do biomaterial, das características do defeito e das condições de cicatrização. Além disso, a predominância de estudos experimentais em animais e relatos de caso, associada à diversidade dos métodos empregados, limita a extrapolação dos achados para a prática clínica.

Conclui-se que a impressão 3D constitui um recurso promissor para o desenvolvimento de estratégias individualizadas de reconstrução óssea, embora sua previsibilidade clínica ainda precise ser estabelecida. Estudos clínicos comparativos, com amostras maiores e acompanhamento prolongado, são necessários para definir indicações, avaliar complicações e verificar a manutenção do osso regenerado e o desempenho dos implantes após a reabilitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAVI, S. E. *et al.* Resorbable GBR scaffolds in oral and maxillofacial tissue engineering: design, fabrication, and applications. **Journal of Clinical Medicine,** v. 12, n. 22, art. 6962, 2023. DOI: 10.3390/jcm12226962.

ARAVENA, P. C. *et al.* Alveolar ridge preservation using three-dimensional root replicas of polycaprolactone: a radiological and histological evaluation of a case report. **Reports,** v. 8, n. 2, art. 92, 2025. DOI: 10.3390/reports8020092.

AROMATARIS, E.; MUNN, Z. (ed.). **JBI Manual for Evidence Synthesis.** [S.l.]: JBI, 2020. DOI: 10.46658/JBIMES-20-01.

BOSE, Susmita; VAHABZADEH, Sahar; BANDYOPADHYAY, Amit. Bone tissue engineering using 3D printing. **Materials Today,** v. 16, n. 12, p. 496–504, 2013. DOI: 10.1016/j.mattod.2013.11.017.

BUSER, Daniel *et al.* Guided bone regeneration in implant dentistry: basic principle, progress over 35 years, and recent research activities. **Periodontology 2000,** v. 93, n. 1, p. 9–25, 2023. DOI: 10.1111/prd.12539.

CIRRINCIONE, Claudio; GUARNIERI, Giulia; MORELLI, Annamaria. Digital workflow with open-source CAD-CAM software aimed to design a customized 3D laser-printed titanium mesh for guided bone regeneration. **Bioengineering,** v. 12, n. 5, art. 436, 2025. DOI: 10.3390/bioengineering12050436.

DA SILVA, P. G.; CARVALHO, T. A.; MARANGON JÚNIOR, H. Princípios de osseointegração em implantodontia: uma revisão narrativa. **Research, Society and Development,** v. 12, n. 13, e41121344216, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i13.44216.

DENG, L. *et al.* Animal experimental study on delayed implantation in a severely atrophic alveolar ridge reconstructed using a 3D-printed bioactive glass scaffold: a pilot study. **Journal of Functional Biomaterials,** v. 16, n. 5, art. 176, 2025. DOI: 10.3390/jfb16050176.

DWIVEDI, R. *et al.* Polycaprolactone as biomaterial for bone scaffolds: review of literature. **Journal of Oral Biology and Craniofacial Research,** v. 10, n. 1, p. 381–388, 2020. DOI: 10.1016/j.jobcr.2019.10.003.

ELGALI, I. *et al.* Guided bone regeneration: materials and biological mechanisms revisited. **European Journal of Oral Sciences,** v. 125, n. 5, p. 315–337, 2017. DOI: 10.1111/eos.12364.

FARJAMINEJAD, S. *et al.* Advances and challenges in polymer-based scaffolds for bone tissue engineering: a path towards personalized regenerative medicine. **Polymers,** v. 16, n. 23, art. 3303, 2024. DOI: 10.3390/polym16233303.

FINEOUT-OVERHOLT, E. *et al.* Evidence-based practice step by step: critical appraisal of the evidence: part I. **American Journal of Nursing,** v. 110, n. 7, p. 47–52, 2010.

FLORENCIO-SILVA, R. *et al.* Biology of bone tissue: structure, function, and factors that influence bone cells. **BioMed Research International,** v. 2015, art. 421746, 2015. DOI: 10.1155/2015/421746.

HAUGEN, H. J. *et al.* Bone grafts: which is the ideal biomaterial? **Journal of Clinical Periodontology,** v. 46, supl. 21, p. 92–102, 2019. DOI: 10.1111/jcpe.13058.

HOPPE, A.; GÜLDAL, N. S.; BOCCACCINI, A. R. A review of the biological response to ionic dissolution products from bioactive glasses and glass-ceramics. **Biomaterials,** v. 32, n. 11, p. 2757–2774, 2011. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.01.004.

IVANOVSKI, S. *et al.* Alveolar bone regeneration using a 3D-printed patient-specific resorbable scaffold for dental implant placement: a case report. **Clinical Oral Implants Research,** v. 35, n. 12, p. 1655–1668, 2024. DOI: 10.1111/clr.14340.

KANCZLER, J. M.; OREFFO, R. O. C. Osteogenesis and angiogenesis: the potential for engineering bone. **European Cells and Materials,** v. 15, p. 100–114, 2008. DOI: 10.22203/ecm.v015a08.

KARAGEORGIOU, V.; KAPLAN, D. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis. **Biomaterials,** v. 26, n. 27, p. 5474–5491, 2005. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2005.02.002.

LANGER, Robert; VACANTI, Joseph P. Tissue engineering. **Science,** v. 260, n. 5110, p. 920–926, 1993. DOI: 10.1126/science.8493529.

LI, L. *et al.* Assessment of customized alveolar bone augmentation using titanium scaffolds vs polyetheretherketone (PEEK) scaffolds: a comparative study based on 3D printing technology. **ACS Biomaterials Science & Engineering,** v. 8, n. 5, p. 2028–2039, 2022. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.2c00060.

MASQUELET, A. C.; BEGUE, T. The concept of induced membrane for reconstruction of long bone defects. **Orthopedic Clinics of North America,** v. 41, n. 1, p. 27–37, 2010. DOI: 10.1016/j.ocl.2009.07.011.

NASCIMENTO, Marvin. Interação célula-proteína-implante no processo de osseointegração. **Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences,** v. 4, n. 2, p. 44–59, 2022. DOI: 10.36557/2674-8169.2022v4n2p44-59.

PANDEY, C.; ROKAYA, D.; BHATTARAI, B. P. Contemporary concepts in osseointegration of dental implants: a review. **BioMed Research International,** v. 2022, art. 6170452, 2022. DOI: 10.1155/2022/6170452.

RAJABI, A. H.; JAFFE, M.; ARINZEH, T. L. Piezoelectric materials for tissue regeneration: a review. **Acta Biomaterialia,** v. 24, p. 12–23, 2015. DOI: 10.1016/j.actbio.2015.07.010.

SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo),** v. 8, n. 1, p. 102–106, 2010.

SYSTERMANS, S. *et al.* Dental implant osseointegration following mandibular augmentation using 3D printed hydroxyapatite blocks. An experimental in vivo study. **Clinical Oral Implants Research,** v. 37, n. 2, p. 101–113, 2026. DOI: 10.1111/clr.70056.

URIST, Marshall R. Bone: formation by autoinduction. **Science,** v. 150, n. 3698, p. 893–899, 1965. DOI: 10.1126/science.150.3698.893.

WANG, H.; KANG, J. Bone grafts and synthetic substitutes in dental applications: a comprehensive review of molecular mechanisms, materials evolution, and clinical perspective. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,** v. 13, art. 1759864, 2026. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1759864.

WANG, W.; YEUNG, K. W. K. Bone grafts and biomaterials substitutes for bone defect repair: a review. **Bioactive Materials,** v. 2, n. 4, p. 224–247, 2017. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2017.05.007.

YE, G. *et al.* Nanomaterial-based scaffolds for bone tissue engineering and regeneration. **Nanomedicine,** v. 15, n. 20, p. 1995–2017, 2020. DOI: 10.2217/nnm-2020-0112.

---

[1] Discente do Curso de Graduação em Odontologia do Centro Universitário INTA – UNINTA, Sobral-CE. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2922-6180. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[2] Discente do Curso de Graduação em Odontologia do Centro Universitário INTA – UNINTA, Sobral-CE. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0245-4566. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[3] Discente do Curso de Graduação em Odontologia do Centro Universitário INTA – UNINTA, Sobral-CE. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7263-6191. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[4] Discente do Curso de Graduação em Odontologia do Centro Universitário INTA – UNINTA, Sobral-CE. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8825-4172. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.

[5] Docente do Curso de Graduação em Odontologia do Centro Universitário INTA – UNINTA, Sobral-CE. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0061-4024. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail.