



ANÁLISE DA INTEGRAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS PARA FABRICAÇÃO DE SCAFFOLDS INTELIGENTES NA PERIODONTIA¹

ANALYSIS OF THE INTEGRATION OF NEW TECHNOLOGIES FOR THE FABRICATION OF INTELLIGENT SCAFFOLDS IN PERIODONTICS

Lara Maria de Lira PINHO
UNINOVAFAPI - Afya Centro Universitário
E-mail: Laralira844@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-5124-3465>

Lívia Maria da Conceição Andrade AMARAL
UNINOVAFAPI - Afya Centro Universitário
E-mail: livia_amaral230@hotmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-5489-8731>

Eduardo Souza de Lobão VERAS
UNINOVAFAPI - Afya Centro Universitário
E-mail: eduardo.veras@afya.com.br
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4629-8909>

Marta Rosado de Oliveira CAMPOS
UNINOVAFAPI - Afya Centro Universitário
E-mail: marta.campos@afya.com.br
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8650-4688>

José Pereira de Melo NETO
UNINOVAFAPI - Afya Centro Universitário
E-mail: josep.neto@afya.com.br
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6758-9900>

Matheus Araújo Brito Santos LOPES
UNINOVAFAPI - Afya Centro Universitário
E-mail: matheus.araujo@afya.com.br
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9899-8600>

RESUMO

Introdução: No contexto da regeneração óssea periodontal, os enxertos e substitutos ósseos são fundamentais para reconstruir áreas afetadas por doenças, traumas ou condições congênitas. Entre as opções tradicionais, os enxertos autógenos são o padrão-ouro por sua capacidade osteogênica, enquanto os alógenos, xenógenos e aloplásticos oferecem alternativas osteocondutoras. Entretanto, limitações como a

¹ COMO CITAR: (ABNT): PINHO, L. M. L.; AMARAL, L. M. C. A.; VERAS, E. S. L.; CAMPOS, M. R. O.; NETO, J. P. M.; LOPES, M. A. B. S. Análise da Integração de Novas Tecnologias para Fabricação de Scaffolds Inteligentes na Periodontia. **JNT Facit Business and Technology Journal**. Qualis A2. ISSN: 2526-4281, Mês de Maio de 2026 - Ed. 74. VOL. 01. Págs. 215-235. Disponível: <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. Acesso em: __/__/__.

morbidade do sítio doador, riscos de rejeição e infecções impulsionaram o desenvolvimento dos *scaffolds*. **Objetivo:** O presente estudo analisa, por meio de uma revisão de literatura, como as novas tecnologias se integram na fabricação de *scaffolds* inteligentes para uso na odontologia regenerativa. **Metodologia:** A pesquisa configura-se como uma revisão integrativa da literatura fundamentada em buscas nas bases de dados PubMed e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), realizadas entre agosto e setembro de 2024. A estratégia de busca utilizou descritores como "Odontogeriatrics", "Edentulism" e "Oral Health". **Resultados:** Os achados evidenciam que a incorporação de nanopartículas, como magnésio, estrôncio e óxido de ferro, em matrizes poliméricas (PCL, PLA) ou naturais (gelatina, quitosana), estimula significativamente a diferenciação osteogênica e a angiogênese. **Discussão:** A discussão ressalta que os *scaffolds* modernos evoluíram de suportes passivos para sistemas inteligentes capazes de modular o microambiente tecidual. **Considerações finais:** Conclui-se que os *scaffolds* inteligentes representam uma alternativa promissora e menos invasiva para a odontologia regenerativa, superando limitações dos enxertos tradicionais.

Palavras-chave: Regeneração Óssea Periodontal. Scaffolds. Engenharia de Tecidos. Bioimpressão 3D. Biomateriais.

ABSTRACT

Introduction: In the context of periodontal bone regeneration, bone grafts and substitutes are essential for reconstructing areas affected by diseases, trauma, or congenital conditions. Among the traditional options, autogenous grafts are considered the gold standard due to their osteogenic capacity, while allogeneic, xenogeneic, and alloplastic grafts provide osteoconductive alternatives. However, limitations such as donor site morbidity, risks of rejection, and infections have driven the development of scaffolds. **Objective:** The present study analyzes, through a literature review, how new technologies are being integrated into the fabrication of smart scaffolds for use in regenerative dentistry. **Methodology:** This research is characterized as an integrative literature review based on searches conducted in the PubMed and Virtual Health Library (BVS) databases between August and September 2024. The search strategy used descriptors such as "Geriatric Dentistry," "Edentulism," and "Oral Health." **Results:** The findings demonstrate that the incorporation of nanoparticles, such as magnesium, strontium, and iron oxide, into polymeric (PCL, PLA) or natural (gelatin, chitosan) matrices significantly stimulates

osteogenic differentiation and angiogenesis. Discussion: The discussion highlights that modern scaffolds have evolved from passive supports into intelligent systems capable of modulating the tissue microenvironment. Final considerations: It is concluded that smart scaffolds represent a promising and less invasive alternative for regenerative dentistry, overcoming the limitations of traditional grafts.

Keywords: Periodontal Bone Regeneration. Scaffolds. Tissue Engineering. 3D Bioprinting. Biomaterials.

INTRODUÇÃO

No contexto da regeneração óssea periodontal, os enxertos e substitutos ósseos assumem papel fundamental como recursos terapêuticos destinados à reconstrução de áreas afetadas por doença periodontal, trauma ou outras condições (Thalakiriyawa et al, 2024). Esses materiais são classificados em quatro categorias: autógenos, alógenos, xenógenos e aloplásticos. Entre eles, os enxertos autógenos, obtidos do próprio paciente, são considerados padrão-ouro devido à sua elevada capacidade osteogênica, ou seja, à habilidade de formar novo tecido ósseo por meio de células osteoprogenitoras presentes no próprio enxerto (Farjaminejad et al, 2024).

Já o enxerto alógeno vem de um doador humano e passa por processos de esterilização para segurança do paciente. Eles fornecem uma matriz óssea natural que acaba facilitando a osteocondução, pode também ter a propriedade de osteoindutivas, dependendo do processo de preparo (Ciszyński *et al*, 2023).

Outro tipo de enxerto é o xenógenos que são obtidos de outra espécie, e são processados para remover qualquer material orgânico, para diminuir o risco de reações imunológicas. Eles também são osteocondutores e oferecem uma estrutura semelhante ao osso humano, funcionando como arcabouço para o crescimento de novas células ósseas (Zhang *et al*, 2021).

E por último, os enxertos aloplásticos que são substitutos sintéticos, podendo ser de hidroxiapatita e fosfato de cálcio, também são osteocondutores, proporcionando uma estrutura que permite a migração de células ósseas, mas quase sempre não promovem osteoindução (Fukuba *et al*, 2021). Esses enxertos são analisados e escolhidos de acordo com a necessidade e a condição do paciente.

Atualmente, com novas tecnologias em desenvolvimento, existem outros meios de regeneração óssea além dos métodos tradicionais citados anteriormente, em foco o uso de *scaffolds* (Chocholata *et al*, 2019). Sendo diferente dos outros métodos que envolve o transplante de osso ou material sintético, os *scaffolds* são

estruturas tridimensionais criadas para imitar a matriz óssea natural, que acaba servindo como suporte para o crescimento celular e formação de novo osso (Curbelo *et al*, 2020).

Podendo ser feito de vários materiais biocompatíveis, como polímeros, cerâmicas e até biomateriais bioimpressos em 3D, eles têm como objetivo proporcionar uma base para a osteocondução, onde as células ósseas do próprio paciente podem migrar, aderir e proliferar (Gašparovič *et al*, 2024).

Essa alternativa acaba por avançar ainda mais quando tem a capacidade de osteoindução e até mesmo osteogênica, dependendo dos componentes adicionados, como fatores de crescimento e células-tronco, para acelerar e guiar a formação óssea (Chocholata *et al*, 2019). Em comparação a outros enxertos tradicionais, os *scaffolds* tem vantagens como a possibilidade de personalização pro próprio paciente, que se adequa ao formado específico que o paciente está precisando e reduz o risco de rejeição ou transmissão de doenças, como pode ocorrer em outros enxertos como alógeno e xenógeno (Galli *et al*, 2021).

Dessa forma os *scaffolds* representa uma alternativa promissora na engenharia de tecidos na periodontia e odontologia regenerativa melhorando as possibilidades de tratamento (Curbelo *et al*, 2020). Os *scaffolds* desempenham um papel fundamental na odontologia regenerativa, facilitando a regeneração de tecidos e restauração de estruturas dentárias danificadas ou ausentes (Chocholata *et al*, 2019).

Esses materiais biocompatíveis e as estruturas biomiméticas devem possuir estruturas conectadas que acaba possibilitando o movimento das células e nutrientes do corpo e servindo como uma estrutura temporária para as células aderirem, proliferarem e se diferenciarem em tecidos funcionais. Para garantir biocompatibilidade, adaptação e regeneração adequada dos tecidos, certos critérios precisam ser atendidos, incluindo complexidade funcional, coordenação neuromuscular e certas características estéticas (Liang *et al*, 2020).

Tendo em vista os benefícios de uma estrutura 3D é proposto então a hipótese de que a regeneração óssea poderia ser aprimorada através da implantação desses *scaffolds* com estrutura trabecular semelhante à do osso biológico, facilitando a penetração de células e fluidos (Matichescu *et al*, 2020).

O objetivo, portanto, é analisar como essas novas tecnologias podem se integrar de forma positiva e eficiente na fabricação de *scaffolds* com uso na odontologia regenerativa, avaliando os benefícios e desafios que elas trazem para a regeneração óssea guiada. Também será investigado o impacto da utilização de materiais inovadores e métodos de fabricação personalizados na qualidade e eficácia

dos tratamentos periodontais, assim como avaliar os avanços em precisão, segurança na produção de *scaffolds* inteligentes.

REFERENCIAL TEÓRICO

Histórico dos *Scaffolds*

Os *scaffolds*, têm se tornado cada vez mais fundamental na odontologia regenerativa, especialmente na periodontia e na cirurgia. A história se remonta na década de 1990, quando a engenharia de tecidos começou a ser mais estudada e pesquisada, principalmente da medicina (Aghali, 2021). Na odontologia, esses materiais visavam principalmente superar as limitações das técnicas convencionais de tratamento, que seriam os enxertos ósseos que podem apresentar alguns desafios e limitações como a disponibilidade limitada de tecido do paciente e o risco de complicações no tratamento cirúrgico. Então, o estudo e a pesquisa de *scaffolds* evoluíram consideravelmente resultando em uma ampla variedade de materiais e métodos de fabricação (Tong *et al*, 2021).

No início dos anos 2000, houve um aumento significativo de pesquisas que tratavam desse assunto, estudos que exploravam novos biomateriais, que levou ao surgimento de *scaffolds* biocompatíveis e biodegradáveis. Em suma, esses novos biomateriais, como polímeros, cerâmicas e compósitos, foram projetados para imitar as propriedades naturais do tecido ósseo e periodontal, promovendo a fixação celular e a regeneração tecidual (Iftikhar *et al*, 2021). Também teve a introdução de fatores de crescimento como as células tronco que também se tornou um foco importante, buscando não apenas suporte a regeneração, mas também estimular o crescimento celular e a vascularização na área (Aghali, 2021).

Ainda não foram descritas orientações com mais detalhes que afirmassem a troca de tecido vivo sem efeitos adversos que fossem bem sucedida. Deve ser entender a odontologia regenerativa e substituição de tecidos na atualidade, abrangendo a eficácia, finalidade e funcionalidade, evolução e melhores métodos (Tong *et al*, 2021). Para que o tecido vivo do corpo humano seja substituído utilizando enxertos biocompatíveis impressos em 3D (normalmente na forma de *scaffolds*), é necessário compreender os meios biológicos e atuações entre células, tecidos e *scaffolds* (Atia *et al*, 2023).

O mercado nos dias de hoje apresenta variados materiais em particular com capacidades benéficas, atuais procedimentos, técnicas e modos, abrangendo várias possibilidades de bioimpressão e impressão 3D, e vários tipos de células-tronco.

Adicionalmente, diversos fatores de crescimento, fármacos, moléculas sinalizadoras e outros componentes para promover processos regenerativos estão agora amplamente acessíveis (Parisi *et al*, 2020).

Ocorreu várias dificuldades na melhoria do design do *scaffold*, escolha de material e que fosse com a cavidade oral, e que ao longo do tempo foram ultrapassados, exemplo disso são os materiais naturais (colágeno, alginato, seda, ácido hialurônico, quitosana) usados na década de 1990 que eram biocompatível, biodegradável porém proporcionam controle limitado sobre a estrutura dos poros (Nikolova & Chavali, 2019).

Os *scaffolds* híbridos, apresentado em meados dos anos 2000 conciliavam materiais naturais e sintéticos. Apareceram com uma chegada positiva, oferecendo biocompatibilidade, propriedades ajustáveis de polímeros sintéticos. O aparecimento do 3D inovou o progresso dos *scaffolds*, podendo oferecer um gerenciamento exato da geometria do *scaffold* e da sua composição material (Parisi *et al*, 2020). A bioimpressão possibilitou a fabricação de *scaffolds* com estruturas complexas que se assemelham bastante aos tecidos naturais, criando condições favoráveis para a regeneração do tecido (Thalakiriyawa & Dissanayaka, 2024).

No final da década de 1990 e início dos anos 2000 surgiu os polímeros Sintéticos apresentavam um maior controle a respeito das características do *scaffold*. Esses materiais puderam ser planejados com dimensão de poros e constituição próprias para simplificar a migração celular e a construção de tecidos (Parisi *et al*, 2020).

O mais recente na última década e mais avançados (compósitos, hidrogéis, materiais bioativos) mostram avanços significativos pois apresentam fatores de crescimento, moléculas de sinalização, explorações iniciais do uso de materiais 4D, com o objetivo de aprimorar ainda mais a eficiência dos *scaffolds* (Iftikhar *et al*, 2021). A habilidade de desenvolver *scaffolds* personalizados com características específicas oferece perspectivas significativas para avanços na odontologia regenerativa e na recuperação de tecidos dentários comprometidos (Atia *et al*, 2023).

Não só o desenvolvimento de biomateriais foi importante, mas também os avanços da tecnologia dando foco em impressões 3D e a bioimpressão, os scanners intraorais, tomografia computadorizada estão alinhadas a essa inovação tornando a personalização individual de *scaffolds* em realidade. Essas inovações permite a criação e desenvolvimento de estruturas complexas e adaptadas as necessidades específicas de cada paciente (Morrison & Tomlinson, 2021). Essa bioimpressão 3D possibilita que ocorra a combinação de diferentes tipos de células e material criando

o *scaffold*, esse avanço tem progredido cada vez mais e promovido uma nova abordagem no âmbito odontológico, oferecendo soluções mais eficientes e menos invasivas (Shopova *et al*, 2023).

Eficácia e Limitações em Comparação a Métodos Tradicionais

As técnicas que utilizam *scaffolds* têm apresentado resultados bastante positivos em processos de regeneração óssea e de outros tecidos (Gasparovič *et al*, 2024). O *scaffold*, como um fator importante da engenharia de tecidos, proporciona a regeneração atuando como uma rede de apoio mecânico para manter as células-tronco recrutadas no lugar e garantido que os agentes de crescimento se fixem (Venkataiah *et al*, 2021).

A elaboração bioimpressas tridimensionais apresentaram efeitos benéficos *in vitro*, na correção da possibilidade celular e na potencialização do desenvolvimento, proliferação e habilidade de distinção das células, tal como *in vivo* em seguida implantação em modelos de pequenos animais (Mohd *et al*, 2023).

Biomateriais originados do hidrogel possui a capacidade de aprimorar as técnicas terapêuticas que já existem para o desenvolvimento de tecido ósseo (Novos desafios e aplicações prospectivas de hidrogéis). Biotintas bioimpressas tridimensionais feitas em polímeros naturais e sintéticos, associados celulares e esferoides estão mostrando eficácia em utilização odontológicas, em especial para ligamento periodontal, dentina, polpa dentária e regeneração óssea (Thalakiriyawa & Dissanayaka, 2024).

Estudos com uma maior repercussão analisaram como os materiais de *scaffolds* influenciam a proliferação, diferenciação e comportamento das células-tronco. Grafeno, Quitosana e Compósitos: O grafeno mostraram algumas qualidades como antibacterianas e estimulação celular. A bioimpressão 3D que cria *scaffolds* específicos, trazem maiores taxas de sucesso na regeneração do tecido dentário (Iftikhar *et al*, 2021).

Trazendo e comparando com métodos tradicionais o enxerto autógeno carece de cirurgia adicional que pode trazer complexidades como dano nervoso ou lesões arteriais. (Zhang *et al*, 2021).

Os enxertos alógenos demonstram capacidades regenerativas variadas em decorrência da falta de dados sobre as condições do doador (como idade e estado de saúde); além disso, podem ser portadores de agentes infecciosos não identificados e geram debates éticos e religiosos. (Fukuba *et al*, 2021).

Outro método tradicional é os enxertos xenógenos, esses portam perigo de contágio de doenças infecciosas (por exemplo, encefalopatia espongiforme bovina e doença de Creutzfeldt-Jakob); os mesmos também são pontos de controvérsias éticas e religiosas (Tong *et al*, 2021)

Por fim, as capacidades regenerativas dos substitutos ósseos aloplásticos são fracas (Fukuba *et al*. 2021), causando também inflamação e má indução óssea (Zhang *et al.*, 2021). Além disso, foi observado e confirmado que as técnicas com *scaffolds* apresentam maior potencial e funcionalidade superiores no reparo de lesões grandes e danificadas em comparação com aquelas que não utilizam *scaffolds* (Atia *et al*, 2023).

Na perspectiva os biomateriais tradicionais, embora possam se assemelhar a estrutura dos tecidos em alguns aspectos, não conseguem copiar as estruturas finas do tecido periodontal natural, como alguns LGP, fibras, cemento. Um obstáculo característico é a reestruturação das fibras de Sharpey, que fica localizada entre cemento, ligamento periodontal e osso alveolar (Liang *et al*, 2020).

Apesar das melhorias promissoras, até o momento não existe nenhum sistema de *scaffold* que trouxe a resultados clínicos bem-sucedidos na regeneração periodontal em contrapartida o desafio para a tradução clínica de estruturas regenerativas periodontais é o conhecimento da degradação *in vivo* dos materiais de implante é limitado. (Galli *et al*, 2021).

METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão de literatura integrativa, a qual é um método que se caracteriza pela inclusão das evidências na prática clínica com finalidade de reunir e sintetizar resultados de pesquisa sobre um determinado tema ou questão. Esse tipo de estudo tem como pretensão realizar uma análise sobre o conhecimento já construído em pesquisas anteriores sobre o assunto, de modo a possibilitar um panorama geral sobre a temática (Mendes *et al*, 2008).

A coleta de dados ocorreu pela busca da melhor evidência da literatura existente, que incluiu na pesquisa de artigos originais em periódicos e dentro das bases de dados confiáveis, com o objetivo de encontrar referência que condizem com o tema abordado mediante a formulação do problema. Como forma de orientar nossa pesquisa foi realizado uma pergunta norteadora: Quais são as novas tecnologias mais promissoras para a fabricação de *scaffolds* inteligentes na periodontia? Quais materiais estão sendo utilizados no desenvolvimento de *scaffolds* inteligentes e quais são suas vantagens e limitações?

O levantamento de dados foi realizado em bancos de dados online entre os meses de agosto a setembro de 2024: PublicMedline (PubMed) e Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), utilizando-se as seguintes combinações de Descritores em Ciências da Saúde (DECS): “Scaffolds”, “Periodontal regeneration”, “Bone regeneration”, “Tissue engineering”, “Biomaterials” e “3D bioprinting”, combinados pelos operadores booleanos “AND”, “OR” e “NOT”. A análise dos artigos incluídos na revisão sistemática integrativa foi determinada conforme a metodologia PICO (Picos Strategy), que tem início com um cenário de caso, a partir do qual é construída uma pergunta central e relevante ao caso, e formulada de forma a viabilizar a busca de uma resposta (Santos *et al*, 2007). Os dados utilizados no estudo foram demonstrados na Tabela 1.

Tabela 3: Dados utilizados na revisão de literatura com aplicação do modelo PICO.

<i>Population</i>	Pacientes com necessidades de regeneração periodontal. A população de interesse envolve pacientes que apresentam perda de tecido ósseo e/ou gengival decorrente de doenças periodontais e que necessitam de técnicas avançadas para regeneração tecidual.
<i>Intervention</i>	Fabricação e aplicação de <i>scaffolds</i> inteligentes. A intervenção envolve o uso de <i>scaffolds</i> inteligentes (estruturas de suporte bioativas e biodegradáveis) criados com tecnologias avançadas, como bioimpressão 3D, nanotecnologia e biomateriais, para promover a regeneração tecidual periodontal.
<i>Comparison or comparison</i>	Métodos convencionais de regeneração tecidual periodontal. As comparações podem incluir técnicas tradicionais, como o uso de enxertos ósseos e membranas de barreira, em contraste com a aplicação de <i>scaffolds</i> inteligentes.
<i>Outcome</i>	Eficácia na regeneração de tecidos periodontais (ósseo e gengival), biocompatibilidade e integração dos <i>scaffolds</i> ao tecido periodontal, melhoria na previsibilidade e nos resultados clínicos dos tratamentos regenerativos, tempo de recuperação e redução de complicações.

Fonte: Autoria própria.

Os critérios de inclusão estabelecidos foram artigos de pesquisa experimental e revisão de literatura, disponibilizados de forma integral e na língua portuguesa e inglesa, correspondente ao tema proposto. Foram excluídos resumos, anais de eventos, dissertações, monografias, teses e livros cujos temas não se apresentaram na íntegra ou que não estivessem de acordo com os objetivos propostos. A tabela 2 resume todos os critérios de inclusão e exclusão.

Tabela 4: Dados utilizados na revisão de literatura com aplicação do modelo PICO.

Critérios de exclusão	Critérios de inclusão
Resumos, anais de eventos, dissertações, monografias, teses e livros cujos temas não são relevantes.	Trabalhos experimentais e de revisão de literatura
Outras línguas	Texto em português ou inglês

Fonte: Autoria própria.

Após a coleta dos estudos, foi feita a identificação dos mesmos a partir de seus títulos e/ou resumos, registrando os artigos encontrados nas bases de dados de acordo com os descritores em saúde e a estratégia de busca. Para a elegibilidade dos artigos, os textos foram lidos na íntegra analisando os seguintes aspectos: ano de publicação, objeto de estudo, a natureza do estudo, resumo de cada estudo, contemplação do tema e objetivos da revisão. Os dados foram expressos em tabela e esquema, para melhor visualização e apresentação das informações coletadas. Por meio da organização de dados, foi possível comparar todos os estudos selecionados, e identificar padrões e diferenças como parte da discussão geral e conclusão do estudo, a partir das fontes primárias.

A submissão do projeto ao Comitê de Ética em Pesquisa do Centro Universitário Uninovafapi não foi necessária por não se tratar de pesquisa que envolva seres-humanos ou se utilize de dados secundários de sistemas de informação, sendo integralmente composto por abordagem metodológica.

RESULTADOS

Tipos de Biomateriais Usados na Fabricação

A cada dia vem aparecendo cada vez mais pesquisas no que diz respeito a inovações no ramo da odontologia regenerativa por conta da crescente demanda por tratamento que visa a regeneração óssea, vem sendo estudado muitos tipos de *scaffolds*, cada um com características e funções únicas destinadas a promover a restauração bem-sucedida do tecido, que tem sido usado na regeneração óssea. Esses *scaffolds* podem ser classificados em várias categorias dependendo da sua origem, estrutura e propriedade (Nikolova *et al*, 2019).

Na hora da escolha do biomaterial é crucial pois a eficácia do tratamento influencia em fatores como porosidade, elasticidade e taxa de degradação na regeneração do tecido. Uma área de estudo está sendo a incorporação de fatores de crescimento e células tronco nos *scaffolds*, essa área tem a possibilidade de não só fornece o suporte estrutural, mas também estimular os processos biológicos que levam a regeneração tecidual mais eficiente (Venkataiah *et al*, 2021).

O artigo de Lei *et al.* (2022) analisou como seria a eficácia de um *scaffold* impresso em 3D, composto por fosfato de magnésio e policaprolactona (PCL), na regeneração óssea em defeitos maxilofaciais em coelhos. Os resultados da pesquisa mostraram que o *scaffold* não apenas preencheu de forma satisfatória o defeito ósseo, mas também promoveu uma regeneração significativa do tecido ósseo ao longo do tempo. Foi dito também que a presença de íons de magnésio no material foi identificada como um fator crucial para estimular a diferenciação celular e melhorar a osteogênese, demonstrando a eficácia desse material.

O artigo de Hanbang Chen *et al.* (2022) investiga a eficácia de um *scaffold* composto Janus de fibras/esponjas combinado com nanopartículas de óxido de ferro (IOPNs) na regeneração óssea guiada oral. Nos resultados mostrou que o *scaffold* promoveu homeostasia eficiente e facilitou a reconstrução de defeitos ósseos, com análises evidenciando a capacidade do material de melhorar a adesão celular e estimular a osteogênese a partir de células-tronco mesenquimatosas. Após a aplicação do *scaffold* em modelos animais, observou-se uma regeneração óssea significativa, com aumento na densidade óssea e integração tecidual.

Lin Zhang *et al.* (2023) em sua pesquisa investiga um *scaffold* multifuncional composto por hidrogéis, fibrina rica em plaquetas e nanofibras, destinado à regeneração tecidual guiada e regeneração óssea guiada. Este *scaffold* apresenta propriedades que permitem a formação de uma barreira celular que serve para evitar a invasão de tecidos não desejados, além de promover a osteogênese. No final da pesquisa foi visto que o material não apenas favoreceu a adesão e proliferação celular, mas também melhorou a formação óssea em modelos experimentais.

Na pesquisa de Kim *et al.* (2021) aborda um *scaffold* bioativo tridimensional projetado para induzir a formação óssea, combinando nanopartículas RGD (contendo a sequência peptídica RGD), proteína morfogenética óssea 2 (BMP2) e células progenitoras mesenquimais derivadas de células-tronco embrionárias nucleares (NtMPCs). O estudo sugere que a combinação das NtMPCs com os elementos bioativos do *scaffold* pode oferecer uma abordagem eficaz para a regeneração tecidual em aplicações de reconstrução óssea em odontologia e medicina.

Xu *et al.* (2022) estuda o uso de *scaffold* nanocompósitos bioativos de vidro inspirados em biomineralização para regeneração óssea em locais em que foi afetado pela diabetes. No *scaffolds* da pesquisa foi impressos em 3D e são compostos de nanopartículas de vidro bioativo contendo estrôncio (Sr-MBGs) e gelatin methacrylate (GelMA). As propriedades de liberação iônica (Sr, Ca, e Si) acaba proporcionando um ambiente favorável à regeneração óssea, com efeitos

significativos na angiogênese, na modulação imunológica e na formação de colágeno saudável, essencial para a osteogênese. Assim demonstrando ser eficaz em reestruturar a área danificada pela diabetes, ativando processos de mineralização e adesão celular.

No estudo de Nadi *et al.* (2022) eles investigam o uso de *scaffolds* de nanobiocompósitos contendo nanopartículas de bredigita dopadas com estrôncio (Sr-Bre) em uma matriz de poli(ácido lático) (PLA) e policaprolactona (PCL) para a regeneração óssea. Sendo usado para a fabricação impressão 3D, esses *scaffolds* apresentam propriedades que promove a regeneração óssea, incluindo uma boa distribuição das nanopartículas, alta porosidade e resistência mecânica ajustada para suportar o crescimento ósseo. Os testes in vitro demonstraram que o material apoia a viabilidade e proliferação de osteoblastos humanos, essenciais para a osteogênese. Além disso, testes mostraram uma melhor integração e formação óssea em comparação com os *scaffolds* sem nanopartículas de estrôncio, sugerindo eficácia na promoção de regeneração tecidual complexa em defeitos ósseos extensos.

Na pesquisa de Filippi *et al.* (2020) mostra os *scaffolds* de polímeros naturais, como colágeno, quitosana e alginato no processo de regeneração óssea. Esses materiais são vantajosos por sua biocompatibilidade e capacidade de imitar a matriz extracelular, promovendo adesão e crescimento celular. Sendo assim os *scaffolds* com estrutura porosa facilita o transporte de nutrientes e a osteocondução, mostrando-se eficazes na formação de tecido ósseo em testes especialmente quando combinados com compostos bioativos.

Hany *et al.* (2023) estuda um *scaffold* nanocompósito e sua propriedade osteogênica em defeitos ósseos mandibulares de coelhos. O *scaffold* é formulado com propriedades bioativas para promover a regeneração óssea, apresentando uma estrutura que facilita a adesão e proliferação celular e também a deposição de matriz óssea. Nos resultados foi mostraram um efeito osteogênico positivo, com uma maior formação de tecido ósseo no local do defeito, demonstrando a eficácia do material.

Tabela 1: Tabela de resumo dos estudos incluídos que exploraram as diversas variedades de scaffold na regeneração óssea.

Autor(es)	Tipo de <i>scaffolds</i>	Suas propriedades e eficácia na promoção da regeneração óssea
lei e outros (et al, 2022)	Combinação de fosfato de magnésio (Mg3(PO4)2) com <i>scaffold</i> de policaprolactona (PCL)	Os <i>scaffolds</i> de PCL com Mg3(PO4)2 tiveram a melhor chance de estimular a diferenciação osteogênica. Testes in vivo verificaram a capacidade do <i>scaffold</i> de regenerar osso. Demonstrou potencial osteogênico bom, biocompatibilidade e capacidade de mineralização.

Chen e outros (et al, 2022)	Composto de fibra/esponja combinando nanopartículas de óxido de ferro (IONPs)	de Janus	As IONPs aumentaram a osteogênese, enquanto a camada de PP impediu a invasão de células epiteliais e a penetração de fibroblastos. O <i>scaffold</i> promoveu efetivamente a regeneração óssea em um modelo de rato com lesões ósseas na calota craniana.
Zhang e outros (et al, 2020)	Nanofibras, hidrogéis e <i>scaffolds</i> compostos de fibrina ricos em plaquetas		O <i>scaffold</i> composto mostraram características físicas e químicas muito boas, biocompatibilidade e capacidade de promover o desenvolvimento osteogênico. As nanofibras criaram um ambiente favorável à regeneração óssea ao impedir que o tecido conjuntivo penetrasse nas falhas ósseas. Esses <i>scaffolds</i> multifuncionais têm o potencial de melhorar a regeneração guiada de tecidos e ossos no tratamento de defeitos ósseos alveolares.
Kim e outros (et al, 2021)	<i>scaffolds</i> biologicamente ativos tridimensionais (bas) compreendendo microesferas de poli (ácido láctico-co-glicólico) (PLGA)		Em camundongos que receberam transplantes, o sequenciamento de mRNA QuantSeq 3 foi usado para análise do perfil de expressão gênica. Os achados mostraram uma diferenciação óssea superior nos camundongos transplantados com BAs contendo NtMPC, em comparação com aqueles que receberam BAs contendo BMSC.
Xu e outros (et al, 2022)	Bioscaffolds impressos em 3D usando nanopartículas de vidro bioativo mesoporoso contendo Sr (Sr-MBGNS) em combinação com gelatina metacrilato (GELMA)		Os nanocompósitos demonstraram efeitos angiogênicos e anti-inflamatórios e liberaram proteínas relacionadas ao tecido ósseo, promovendo biomineralização simulada e estimulando a formação de colágeno. A pesquisa com pacientes portadores de diabetes mellitus tipo II sugere novas estratégias para a regeneração óssea por meio da remodelação de um microambiente biológico adverso.
Nadi e outros (et al, 2022)	<i>scaffolds</i> biocompósitos nano-		Comparados com <i>scaffolds</i> sem nanopartículas, os <i>scaffolds</i> nanocompósitos resultantes demonstraram maiores taxas de degradação e resistência mecânica. Eles aumentaram a formação de cristais de hidroxiapatita, um componente essencial do tecido ósseo, apresentaram o potencial mais promissor para regeneração do tecido ósseo.
Filippi e outros (et al, 2020)	<i>Scaffolds</i> poliméricos naturais		O material utilizado foi mais biocompatíveis e bioativo do que os sintéticos para dar suporte ao crescimento celular e à regeneração de tecidos. Ele destaca sua combinação com outros materiais e estratégias inovadoras para recriar ambientes ósseos fisiológicos. Esses <i>scaffold</i> mostraram resultados bem-sucedidos em vários tipos de células e aplicações clínicas preliminares.
Hany e outros (et al, 2023)	Estrutura composta nanofibrosa contendo policaprolactona (PCL), alginato (Alg) e hidroxiapatita (HA)		Biocompatibilidade e propriedades físicas, químicas e mecânicas adequadas foram demonstradas no <i>scaffold</i> compósito. A cicatrização óssea aprimorada e a formação óssea madura foram maiores do que no grupo de controle, conforme demonstrado pelo grupo experimental, que era bem organizado.

Fonte: Autoria própria, 2024.

DISCUSSÃO

A presente revisão integrativa permitiu analisar criticamente a integração de novas tecnologias na fabricação de scaffolds inteligentes aplicados à periodontia,

evidenciando avanços significativos na engenharia tecidual, mas também importantes limitações que ainda dificultam sua consolidação clínica. De maneira geral, os achados demonstram que a associação entre biomateriais bioativos, nanotecnologia, bioimpressão tridimensional e incorporação de células-tronco tem ampliado as possibilidades terapêuticas na regeneração óssea periodontal, especialmente em defeitos complexos classificados conforme descrito em Carranza's *Clinical Periodontology* 2014.

Observou-se que os scaffolds modernos deixaram de exercer apenas função estrutural passiva e passaram a atuar como sistemas bioativos capazes de modular o microambiente tecidual. Estudos recentes evidenciam que a incorporação de nanopartículas, como estrôncio, magnésio e vidro bioativo, favorece a osteogênese, angiogênese e modulação inflamatória, promovendo melhor desempenho regenerativo quando comparados a biomateriais convencionais (Xu et al, 2022; Nadi et al, 2022; Zhao et al, 2024). Além disso, a bioimpressão 3D possibilita controle preciso da arquitetura, porosidade e interconectividade estrutural, fatores determinantes para migração celular, deposição de matriz extracelular e integração tecidual (Wu et al, 2022; Zoheir et al, 2024).

Outro achado relevante refere-se à personalização dos scaffolds por meio da integração de exames de imagem e modelagem digital, permitindo a confecção de estruturas adaptadas à morfologia específica do defeito ósseo. Essa característica representa uma vantagem significativa em relação às técnicas tradicionais de Regeneração Óssea Guiada (ROG), que utilizam membranas e enxertos com formato padronizado (Thalakitriyawa & Dissanayaka, 2024). A possibilidade de desenvolvimento de scaffolds multifuncionais, capazes de atuar simultaneamente como barreira celular e suporte osteocondutor, demonstra um avanço conceitual importante na odontologia regenerativa (Chen et al, 2022; Wei et al., 2023).

No entanto, apesar dos resultados promissores observados em estudos *in vitro* e em modelos animais, a literatura ainda apresenta discrepâncias significativas. A maioria das pesquisas concentra-se em estudos experimentais pré-clínicos, com escassez de ensaios clínicos randomizados em humanos que comprovem a superioridade dos scaffolds inteligentes a longo prazo (Saberian et al, 2024). Além disso, não há consenso quanto à taxa ideal de degradação dos biomateriais, sendo relatado que degradações muito rápidas podem comprometer a estabilidade do tecido neoformado, enquanto degradações tardias podem interferir na remodelação óssea fisiológica (Grelewski et al, 2023; Granz et al, 2020).

Outra limitação importante refere-se aos custos elevados associados à bioimpressão 3D, ao uso de nanomateriais e aos processos regulatórios necessários para aprovação clínica desses dispositivos. Embora apresentem potencial de escalabilidade, a aplicação em larga escala ainda depende de padronização de protocolos de fabricação, validação clínica robusta e análise de custo-efetividade (Curbelo et al, 2020; Fu et al., 2022). Ademais, alguns estudos apontam que, apesar do avanço na regeneração óssea, a reconstrução completa do aparato periodontal, incluindo ligamento periodontal funcional e inserção adequada das fibras de Sharpey, ainda constitui um desafio biológico considerável (Yang et al, 2023).

Comparativamente aos métodos tradicionais, como enxertos autógenos, alógenos, xenógenos e aloplásticos, os scaffolds inteligentes apresentam vantagens como menor risco de morbidade cirúrgica, possibilidade de personalização e controle estrutural mais refinado (Ciszyński et al, 2023; Vermeirsche et al, 2024). Entretanto, diferentemente dos enxertos autógenos, que possuem reconhecida capacidade osteogênica, muitos scaffolds ainda dependem da adição de fatores bioativos para atingir desempenho regenerativo semelhante (Farjaminejad et al, 2024).

Dessa forma, as maiores implicações do presente estudo indicam que os scaffolds inteligentes representam uma evolução significativa na periodontia regenerativa, com potencial para melhorar a previsibilidade dos tratamentos e ampliar as possibilidades terapêuticas em defeitos ósseos complexos. Contudo, as discrepâncias metodológicas entre os estudos, a limitação de evidências clínicas em humanos e os desafios relacionados à degradação, custo e regulamentação demonstram que essa tecnologia ainda se encontra em fase de consolidação científica. Assim, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos clínicos controlados, com acompanhamento a longo prazo, para validar a eficácia e segurança desses biomateriais, permitindo sua incorporação definitiva à prática clínica periodontal.

Vantagens e Desvantagens da Aplicação de *Scaffolds*

Na tabela 2 mostra as vantagens e desvantagens associadas ao uso de *scaffolds* na regeneração óssea no campo da odontologia. Diante da pesquisa é mostrado que a utilização de *scaffolds* na odontologia oferece inúmeras vantagens clínicas, incluindo biocompatibilidade, degradação controlada, eficácia aprimorada, versatilidade no design, resistência mecânica e integração com o tecido hospedeiro (Habanjar *et al*, 2021). Os estudos sobre essa tecnologia continuam a crescer e impulsionar melhores resultados clínicos no atendimento ao paciente.

No entanto, também se passa por desafios e limitações como reações imunológicas, taxas de degradação inconsistentes, eficácia variável, altos custos e obstáculos regulatórios devem ser abordados para garantir o uso seguro e eficaz de *scaffolds* na regeneração óssea (Habanjar *et al*, 2021). A personalização e a escalabilidade continuam sendo considerações críticas para a adoção generalizada de tratamentos baseados em *scaffolds*, com tecnologias modernas de imagem e impressão 3D desempenhando um papel fundamental na viabilização da criação de *scaffolds* específicos para o paciente (Zhang *et al*, 2024).

Ne maneira geral, a regeneração óssea com base em *scaffolds* representa um campo promissor de pesquisa e está em rápida evolução, com potenciais para transformar o tratamento odontológico e melhorando a qualidade de vida dos pacientes com defeitos ósseos (Fu *et al*, 2022).

Tabela 2: Vantagens e desvantagens gerais da aplicação de *scaffolds* para regeneração óssea em odontologia.

Autor(es)	Característica	Vantagens	Desvantagens
Zhang <i>et al</i> , 2024; Grelewski <i>et al</i> , 2023.	Escalabilidade	Determinados materiais e configurações de <i>scaffolds</i> são facilmente adaptáveis para aplicação clínica em larga escala.	Pode ser limitada por altos custos de material e processos de fabricação especializados.
Grelewski <i>et al</i> , 2023; Granz <i>et al</i> , 2020.	Degradabilidade	Projetado para se degradar a uma taxa compatível com a formação de novo tecido, evitando a necessidade de remoção cirúrgica.	Taxas de degradação inconsistentes podem afetar o processo de regeneração e os resultados.
Granz <i>et al</i> , 2020; Curbelo <i>et al</i> , 2020.	Regulatório	Potencial para aprovação regulatória mais rápida se for comprovado que é seguro e eficaz devido à alta necessidade clínica.	Os caminhos regulatórios podem ser longos e caros, atrasando a entrada no mercado.
Venkataiah <i>et al</i> , 2021; Curbelo <i>et al</i> , 2020.	Versatilidade	Pode ser projetado para liberar fatores de crescimento gradualmente, melhorando a cicatrização.	Requisitos complexos de design podem aumentar os custos e o tempo de produção.
Curbelo <i>et al</i> , 2020; Grelewski <i>et al</i> , 2023.	Biocompatibilidade	Eles são frequentemente feitos de materiais compatíveis com os tecidos humanos, minimizando o sistema imunológico reações.	Alguns materiais ainda podem desencadear respostas imunológicas menores ou exigir testes de hipersensibilidade.
Grelewski <i>et al</i> , 2023; Granz <i>et al</i> , 2020.	Integração	Facilita a integração de novos tecidos com o osso existente, promovendo uma regeneração estável e duradoura.	A má integração do <i>scaffold</i> pode levar à falha do processo de regeneração.
Venkataiah <i>et al</i> , 2021; Curbelo <i>et al</i> , 2020.	Inovação	Avanços contínuos na ciência dos materiais oferecem novas	Alto custo de pesquisa e desenvolvimento para novas tecnologias de <i>scaffolds</i> .

Venkataiah <i>et al.</i> , 2021; Grelewski <i>et al.</i> , 2023.	Personalização	possibilidades para tratamentos mais eficazes. Pode ser personalizado para se adaptar a defeitos individuais usando tecnologias modernas de imagem e impressão 3D.	Requer geração de imagens e fabricação precisas, aumentando a complexidade e o custo.
Granz <i>et al.</i> , 2020; Curbelo <i>et al.</i> , 2020.	Força	Fornecer suporte mecânico à área de regeneração, o que é crucial em regiões de suporte de carga.	Alguns <i>scaffolds</i> podem não ter resistência suficiente até que ocorra a integração completa do tecido.
Granz <i>et al.</i> , 2020; Curbelo <i>et al.</i> , 2020.	Eficácia	Melhora a administração e retenção, melhorando os resultados da regeneração.	A eficácia pode variar com base na arquitetura do <i>scaffold</i> e nas interações específicas do biomaterial.

Fonte: Autoria própria, 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da análise realizada, conclui-se que a integração de novas tecnologias na fabricação de scaffolds inteligentes representa um avanço promissor na periodontia regenerativa, especialmente no que se refere à regeneração óssea em defeitos complexos. A incorporação de bioimpressão 3D, nanotecnologia, biomateriais bioativos e células-tronco demonstra potencial para aprimorar a previsibilidade clínica, favorecer a osteogênese e proporcionar maior personalização dos tratamentos, superando limitações observadas nos métodos tradicionais descritos em Carranza's Clinical Periodontology. Entretanto, apesar dos resultados experimentais positivos, ainda existem desafios relacionados à padronização dos protocolos, à degradação controlada dos biomateriais, aos custos elevados e à escassez de ensaios clínicos de longo prazo em humanos.

Assim, embora os scaffolds inteligentes apresentem grande potencial transformador, sua consolidação na prática clínica depende do fortalecimento das evidências científicas e da superação das barreiras tecnológicas e regulatórias atualmente existentes.

REFERÊNCIAS

AGHALI, Arbi. Craniofacial bone tissue engineering: current approaches and potential therapy. **Cells**, v. 10, n. 11, p. 2993, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells10112993>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ATIA, Gamal Abdel Nasser et al. New challenges and prospective applications of three-dimensional bioactive polymeric hydrogels in oral and craniofacial tissue engineering: a narrative review. **Pharmaceuticals**, v. 16, n. 5, p. 702, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph16050702>. Acesso em: 18 abr. 2025.

CARRANZA, Fermin A.; NEWMAN, Michael G.; TAKEI, Henry H.; KLINGE, Björn. **Carranza's clinical periodontology**. 12. ed. St. Louis: Elsevier Saunders, 2014.

CHEN, Hanbang et al. Janus fibre/sponge composite combined with IOPNs promotes haemostasis and efficient reconstruction in oral guided bone regeneration.

Materials & Design, v. 222, p. 111083, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111083>. Acesso em: 20 mar. 2025.

CHOCHOLATA, Petra; KULDA, Vlastimil; BABUSKA, Vaclav. Fabrication of scaffolds for bone-tissue regeneration. **Materials**, v. 12, n. 4, p. 568, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.3390/ma12040568>. Acesso em: 18 set. 2024.

CISZYŃSKI, Michał et al. Allogenic bone graft in dentistry: a review of current trends and developments. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 23, p. 16598, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242316598>. Acesso em: 22 mar. 2025.

CURBELO, Sofia et al. Bone regeneration as an example of tissue engineering in dentistry, with an emphasis on the development of scaffolds.

Odontoestomatología, v. 22, n. 36, p. 74-86, 2020. Disponível em:

<https://revistas.udelar.edu.uy/Odontoestomatologia/>. Acesso em: 25 set. 2024.

FARJAMINEJAD, Samira; FARJAMINEJAD, Rosana; GARCIA-GODOY, Franklin.

Nanoparticles in bone regeneration: a narrative review of current advances and future directions in tissue engineering. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 15, n. 9, p. 241, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb15090241>. Acesso em: 26 mar. 2025.

FILIPPI, Miriam et al. Natural polymeric scaffolds in bone regeneration. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8, p. 474, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00474>. Acesso em: 02 out. 2024.

FU, Jiang-Nan et al. Scaffold-based tissue engineering strategies for osteochondral repair. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 812383, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.812383>. Acesso em: 28 mar. 2025.

FUKUBA, Shunsuke et al. Alloplastic bone substitutes for periodontal and bone regeneration in dentistry: current status and prospects. **Materials**, v. 14, n. 5, p. 1096, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051096>. Acesso em: 30 mar. 2025.

GALLI, Matthew et al. Current and future trends in periodontal tissue engineering and bone regeneration. **Plastic and Aesthetic Research**, v. 8, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.20517/2347-9264.2020.176>. Acesso em: 04 abr. 2025.

GAŠPAROVIČ, Michal et al. Evolving strategies and materials for scaffold development in regenerative dentistry. **Applied Sciences**, v. 14, n. 6, p. 2270, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062270>. Acesso em: 31 mar. 2025.

GRANZ, Cornelia Larissa; GORJI, Ali. Dental stem cells: the role of biomaterials and scaffolds in developing novel therapeutic strategies. **World Journal of Stem Cells**, v. 12, n. 9, p. 897, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4252/wjsc.v12.i9.897>. Acesso em: 08 out. 2024.

GRELEWSKI, Piotr Grzegorz; KWAŚNICKA, Monika; BAR, Julia Krystyna. Properties of scaffolds as carriers of mesenchymal stem cells for use in bone engineering.

Polymers in Medicine, v. 53, n. 2, p. 129-139, 2023. DOI:

<https://doi.org/10.17219/pim/167440>. Acesso em: 02 abr. 2025.

HABANJAR, Ola et al. 3D cell culture systems: tumor application, advantages, and disadvantages. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 22, p. 12200, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms222212200>. Acesso em: 05 abr. 2025.

HANY, Eman et al. Characterization of a nanocomposite scaffold and assessment of its osteogenic influence in a rabbit mandibular bone defect model. **Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology**, v. 35, n. 1, p. 76-84, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajoms.2022.07.005>. Acesso em: 04 abr. 2025.

IFTIKHAR, Sundus et al. The trends of dental biomaterials research and future directions: a mapping review. **The Saudi Dental Journal**, v. 33, n. 5, p. 229-238, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2021.02.007>. Acesso em: 09 abr. 2025.

KIM, Hye Jin et al. Induction of bone formation by 3D biologically active scaffolds containing RGD-NPs, BMP2, and NtMPCs. **Advanced Therapeutics**, v. 4, n. 4, p. 2000245, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/adtp.202000245>. Acesso em: 11 abr. 2025.

LEI, Bocheng et al. In situ magnesium phosphate/polycaprolactone 3D-printed scaffold induce bone regeneration in rabbit maxillofacial bone defect model.

Materials & Design, v. 215, p. 110477, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110477>. Acesso em: 07 abr. 2025.

LIANG, Yongxi; LUAN, Xianghong; LIU, Xiaohua. Recent advances in periodontal regeneration: a biomaterial perspective. **Bioactive Materials**, v. 5, n. 2, p. 297-308, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.02.012>. Acesso em: 14 out. 2024.

MATICHESCU, Anamaria et al. Advanced biomaterials and techniques for oral tissue engineering and regeneration—a review. **Materials**, v. 13, n. 22, p. 5303, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13225303>. Acesso em: 10 out. 2024.

MENDES, Karina Dal Sasso; SILVEIRA, Renata Cristina de Campos Pereira; GALVÃO, Cristina Maria. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto – Enfermagem**, v. 17, n. 4, p. 758-764, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>. Acesso em: 15 out. 2024.

MOHD, Nurulhuda et al. Current advances of three-dimensional bioprinting application in dentistry: a scoping review. **Materials**, v. 15, n. 18, p. 6398, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15186398>. Acesso em: 09 abr. 2025.

MORRISON, Devin Grace; TOMLINSON, Ryan E. Leveraging advancements in tissue engineering for bioprinting dental tissues. **Bioprinting**, v. 23, p. e00153, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2021.e00153>. Acesso em: 18 abr. 2025.

NADI, Akram et al. Fabrication of functional and nano-biocomposite scaffolds using strontium-doped bredigite nanoparticles/polycaprolactone/poly lactic acid via 3D printing for bone regeneration. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 219, p. 1319-1336, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.168>. Acesso em: 11 abr. 2025.

NIKOLOVA, Maria P.; CHAVALI, Murthy S. Recent advances in biomaterials for 3D scaffolds: a review. **Bioactive Materials**, v. 4, p. 271-292, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.10.005>. Acesso em: 02 out. 2024.

PARISI, Cristian et al. Biomimetic gradient scaffold of collagen-hydroxyapatite for osteochondral regeneration. **Journal of Tissue Engineering**, v. 11, p. 2041731419896068, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/2041731419896068>. Acesso em: 10 out. 2024.

SABERIAN, Elham et al. Scaffold application for bone regeneration with stem cells in dentistry: literature review. **Cells**, v. 13, n. 12, p. 1065, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells13121065>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SANTOS, Cristina Mamédio da Costa; PIMENTA, Cibele Andrucio de Mattos; NOBRE, Moacyr Roberto Cuce. A estratégia PICO para a construção da pergunta de pesquisa e busca de evidências. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, v. 15, n. 3, p. 508-511, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300023>. Acesso em: 18 out. 2024.

SHOPOVA, Dobromira et al. Advancing dentistry through bioprinting: personalization of oral tissues. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 14, n. 10, p. 530, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb14100530>. Acesso em: 16 abr. 2025.

THALAKIRIYAWA, Dineshi Sewvandi; DISSANAYAKA, Waruna Lakmal. Advances in regenerative dentistry approaches: an update. **International Dental Journal**, v. 74, n. 1, p. 25-34, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.identj.2023.08.003>. Acesso em: 18 abr. 2025.

VENKATAIAH, Venkata Suresh et al. Clinical applications of cell-scaffold constructs for bone regeneration therapy. **Cells**, v. 10, n. 10, p. 2687, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells10102687>. Acesso em: 22 abr. 2025.

VERMEIRSCHE, Brigitte et al. Calcium phosphates for bone tissue engineering: an in vitro and in vivo analysis. **Materials**, v. 17, n. 10, p. 2049, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17102049>. Acesso em: 22 abr. 2025.

WEI, Xinghui et al. Fabrication of a bioactive scaffold of multilayer gelatin/biphasic calcium phosphate via 3D printing for dental bone regeneration. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 12, p. 10266, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241210266>. Acesso em: 28 abr. 2025.

WU, Yingyue et al. Current status of 3D bioprinting applications in dentistry. **Bioprinting**, v. 24, p. e00164, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2021.e00164>. Acesso em: 30 abr. 2025.

XU, Xiaodong; LI, Hui; ZHANG, Minqiang. Mesoporous bioactive glass nanospheres for tissue engineering scaffolds. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**,

v. 10, p. 957450, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.957450>. Acesso em: 05 maio 2025.

YANG, Chao et al. Decellularized matrix-based hydrogels and scaffolds for dental and oral applications. **Journal of Dental Research**, v. 102, n. 1, p. 6-15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/00220345221113762>. Acesso em: 08 maio 2025.

ZHANG, Haibo et al. Emerging trends in scaffold design for bone tissue engineering. **Materials**, v. 13, n. 14, p. 3149, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13143149>. Acesso em: 10 maio 2025.

ZHAO, Yi et al. Nanomaterials for dental tissue regeneration. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 15, n. 10, p. 511, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb15100511>. Acesso em: 12 maio 2025.

ZOHEIR, Neveen et al. Current advances in 3D printing technologies for regenerative dental applications. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 15, n. 5, p. 124, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb15050124>. Acesso em: 19 maio 2025.