



QUALIS
A2



NANOPARTÍCULAS NA MODULAÇÃO DA OSSEOINTEGRAÇÃO DE IMPLANTES DENTÁRIOS: REVISÃO DA LITERATURA¹

NANOPARTICLES IN THE MODULATION OF OSSEOINTEGRATION OF DENTAL IMPLANTS: A LITERATURE REVIEW

Bianka Araújo MIRANDA

Centro Universitário de Floriano (UNIFAESF)

E-mail: biankamirandadesantana@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-0820-8868>

Maria Fernanda Melo COSTA

Centro Universitário de Floriano (UNIFAESF)

E-mail: mf701524@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6403-9265>

Maria Rita Callou Nunes de Almeida MIRANDA

Centro Universitário de Floriano (UNIFAESF)

E-mail: mariaritacalloununesdealmeidam@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6541-8128>

Irisvaldo Lima GUEDES

Centro Universitário de Floriano (UNIFAESF)

E-mail: guedes.ufpi@hotmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-9372-1203>

RESUMO

Introdução: a osseointegração é um processo fundamental para o sucesso dos implantes dentários, sendo diretamente influenciada pelas características da superfície implantária. Nesse contexto, a incorporação de nanopartículas tem emergido como estratégia promissora para otimizar a resposta biológica peri-implantar e superar limitações das superfícies convencionais. **Objetivo:** abordar os principais tipos de nanopartículas incorporadas às superfícies de implantes dentários e apresentar seus efeitos no processo de osseointegração. **Metodologia:** trata-se de uma revisão integrativa da literatura, estruturada a partir da estratégia PICo. A busca foi realizada nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e Embase, utilizando os descritores “nanoparticles”, “dental implants”, “implant surface modification”, “nanotechnology” e “osseointegration”, combinados por operadores booleanos. Foram incluídos estudos originais que avaliaram a incorporação de

¹ COMO CITAR: (ABNT): MIRANDA, B. A.; COSTA, M. F. M.; MIRANDA, M. R. C. N. A.; GUEDES, I. L. Nanopartículas na Modulação da Osseointegração de Implantes Dentários: Revisão da Literatura. **JNT Facit Business and Technology Journal**. Qualis A2. ISSN: 2526-4281, Mês de Abril de 2026 - Ed. 73. VOL. 02. Págs. 56-74. Disponível: <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. Acesso em: __/__/__.

nanopartículas e seus efeitos na osseointegração, nos idiomas inglês, português e espanhol, com texto completo disponível. Foram excluídos artigos de revisão, relatos de caso e estudos sem avaliação biológica ou biomecânica. A seleção foi realizada em etapas, incluindo remoção de duplicatas, triagem por títulos e resumos e leitura na íntegra. **Resultados:** ao final, 15 estudos foram incluídos na análise qualitativa, com predominância de delineamentos experimentais *in vitro* e *in vivo*. As principais nanopartículas identificadas incluíram prata, hidroxiapatita, dióxido de titânio, zinco, ouro e cobre. De modo geral, os achados demonstraram que essas nanopartículas promovem aumento da adesão e proliferação celular, estímulo à diferenciação osteoblástica, maior formação óssea e aumento do contato osso-implante. Além disso, destacam-se efeitos antimicrobianos e moduladores da resposta inflamatória, contribuindo para um microambiente favorável à osseointegração. **Conclusão:** conclui-se que a incorporação de nanopartículas em superfícies implantárias representa uma estratégia eficaz para melhorar a osseointegração, especialmente por meio de efeitos osteogênicos e antimicrobianos. Contudo, a heterogeneidade metodológica e a escassez de estudos clínicos evidenciam a necessidade de pesquisas adicionais para consolidação de sua aplicação clínica.

Palavras-chave: Nanopartículas. Implantes dentários. Osseointegração. Nanotecnologia. Superfície de implante.

ABSTRACT

Introduction: osseointegration is a fundamental process for the success of dental implants, directly influenced by implant surface characteristics. In this context, the incorporation of nanoparticles has emerged as a promising strategy to optimize the peri-implant biological response and overcome limitations of conventional surfaces.

Objective: to address the main types of nanoparticles incorporated into dental implant surfaces and present their effects on the osseointegration process.

Methodology: this is an integrative literature review, structured using the PICO strategy. The search was conducted in PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science and Embase databases, using the descriptors “nanoparticles”, “dental implants”, “implant surface modification”, “nanotechnology” and “osseointegration”, combined by Boolean operators. Original studies evaluating nanoparticle incorporation and its effects on osseointegration, published in English, Portuguese and Spanish, with full text available, were included. Review articles, case reports and studies without biological or biomechanical evaluation were excluded. Selection was carried out in

stages, including removal of duplicates, screening by titles and abstracts and full reading. **Results:** at the end, 15 studies were included in the qualitative analysis, with a predominance of in vitro and in vivo experimental designs. The main nanoparticles identified included silver, hydroxyapatite, titanium dioxide, zinc, gold and copper. Overall, the findings demonstrated that these nanoparticles promote increased cell adhesion and proliferation, stimulation of osteoblastic differentiation, greater bone formation and increased bone-implant contact. In addition, antimicrobial effects and modulators of the inflammatory response stand out, contributing to a favorable microenvironment for osseointegration. **Conclusion:** it is concluded that the incorporation of nanoparticles into implant surfaces represents an effective strategy for improving osseointegration, especially through osteogenic and antimicrobial effects. However, methodological heterogeneity and the scarcity of clinical studies highlight the need for additional research to consolidate their clinical application.

Keywords: Nanoparticles. Dental implants. Osseointegration. Nanotechnology. Implant surface.

INTRODUÇÃO

A osseointegração corresponde ao processo biológico de contato direto e funcional entre o tecido ósseo vivo e a superfície de um implante, sem a interposição de tecido fibroso (Almeida et al, 2023). Esse fenômeno é fundamental para o sucesso dos implantes dentários, pois garante a estabilidade estrutural necessária para suportar cargas mastigatórias ao longo do tempo (Kasai et al, 2024). A adequada cicatrização óssea e a remodelação do tecido peri-implantar influenciam diretamente a fixação do implante e sua durabilidade clínica (Tian et al, 2023). Nesse contexto, a qualidade da interface entre o osso e o implante assume papel central na previsibilidade terapêutica, sendo considerada determinante para o sucesso do tratamento (Vandamme et al, 2021).

Ao longo do tempo, as superfícies implantárias passaram por modificações significativas com o objetivo de otimizar a interação entre biomaterial e tecido ósseo (Toscano et al, 2024). Estratégias físico-químicas têm sido empregadas para melhorar propriedades como rugosidade, energia de superfície e bioatividade (Qing et al, 2018). Entretanto, ainda persistem limitações biológicas que comprometem a resposta óssea, especialmente nas fases iniciais da osseointegração. Fatores como atraso na adesão celular e resposta inflamatória inadequada podem interferir na estabilidade inicial do implante (Faiz et al, 2024). Diante desses desafios, novas

abordagens vêm sendo investigadas com o intuito de modular de forma mais eficiente o comportamento biológico peri-implantar (Bezerra neta et al, 2020).

A nanotecnologia consiste na manipulação de materiais em escala nanométrica, permitindo alterações estruturais capazes de modificar propriedades físico-químicas e biológicas dos biomateriais (Almeida et al, 2023). Em nível celular, superfícies nanoestruturadas apresentam maior capacidade de interação com proteínas, células e matriz extracelular, influenciando diretamente eventos como adesão, proliferação e diferenciação celular (Dabbah et al,2022). Essas modificações podem favorecer a atividade osteoblástica e a mineralização (Tian et al, 2023). No contexto da implantodontia, a aplicação da nanotecnologia tem sido explorada como estratégia promissora para otimizar a interface osso-implante e acelerar a osseointegração (Heo et al, 2016; Madiwal, 2024).

Existe um aumento expressivo de estudos voltados à incorporação de nanopartículas em superfícies de implantes dentários. Essas abordagens têm sido associadas a efeitos como aumento da bioatividade, ação antimicrobiana e estímulo à osteogênese (Lee et al, 2015; Qing et al, 2018; Vandamme et al, 2021;). Apesar dos avanços, ainda não há uma síntese estruturada que integre os diferentes tipos de nanopartículas e seus impactos biológicos na osseointegração. A sistematização dessas informações é essencial para subsidiar a prática clínica e orientar o desenvolvimento de novos biomateriais. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo abordar os principais tipos de nanopartículas incorporadas às superfícies de implantes dentários e apresentar seus efeitos no processo de osseointegração.

METODOLOGIA

Tipo e Delineamento do Estudo

O presente estudo consistiu em uma revisão integrativa da literatura desenvolvida com o propósito de reunir, examinar criticamente e integrar evidências científicas acerca da aplicação de nanopartículas na modificação da superfície de implantes dentários e seus efeitos sobre a osseointegração. Optou-se por esse delineamento por possibilitar a inclusão de diferentes abordagens metodológicas, contemplando pesquisas *in vitro*, estudos em modelo animal e investigações clínicas.

Estruturação da Pergunta Norteadora (Estratégia PICO)

Para organizar a questão investigativa, utilizou-se a estratégia PICO, adequada a revisões que abrangem múltiplos desenhos experimentais. Foram considerados: P (Problema): implantes dentários com superfícies modificadas; I (Interesse): aplicação de nanopartículas; Co (Contexto): processo de osseointegração. Com base nessa estrutura, estabeleceu-se a seguinte pergunta: Quais nanopartículas têm sido empregadas na modificação da superfície de implantes dentários e quais impactos exercem sobre a osseointegração? Essa definição permitiu delimitar com precisão o foco da investigação e orientar a seleção dos descritores utilizados na busca bibliográfica.

Estratégia de Busca Bibliográfica

A busca foi conduzida nas bases de dados PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e Embase, selecionadas por sua relevância nas áreas de biomateriais e implantodontia. Empregaram-se descritores controlados (MeSH e DeCS) associados a termos livres, combinados por operadores booleanos (AND e OR). Entre os termos utilizados estiveram: “nanoparticles”, “dental implants”, “implant surface modification”, “nanotechnology” e “osseointegration”.

Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram considerados elegíveis estudos originais publicados em periódicos indexados que investigaram a incorporação de nanopartículas à superfície de implantes dentários e analisaram desfechos associados à osseointegração, tais como contato osso-implante, formação óssea peri-implantar, torque de remoção, análise histomorfométrica ou expressão de marcadores osteogênicos. Incluíram-se publicações nos idiomas inglês, português e espanhol, com metodologia descrita de forma clara e texto completo disponível.

Foram excluídos editoriais, relatos de caso, resumos de congresso e estudos que não abordaram diretamente a modificação superficial por nanopartículas. Também foram removidas investigações que não apresentaram avaliação biológica ou biomecânica da interface osso-implante, bem como estudos duplicados identificados entre as bases pesquisadas.

Processo de Seleção dos Estudos

A seleção ocorreu em etapas sucessivas. Inicialmente, procedeu-se à eliminação das duplicidades. Em seguida, realizou-se a leitura dos títulos para verificação de pertinência temática, seguida da análise dos resumos. Os artigos potencialmente elegíveis foram avaliados na íntegra para confirmação dos critérios estabelecidos. A triagem foi realizada de maneira independente por dois avaliadores, sendo eventuais divergências solucionadas por consenso.

Extração e Organização das Informações

Foi elaborado instrumento estruturado para registro padronizado das informações extraídas dos estudos selecionados. Foram coletados dados referentes a autor e ano de publicação, país de origem, tipo de nanopartícula utilizada, método de incorporação à superfície implantária, modelo experimental empregado e principais resultados relacionados à osseointegração. As informações foram organizadas em quadro comparativo, possibilitando análise sistemática entre as diferentes abordagens metodológicas.

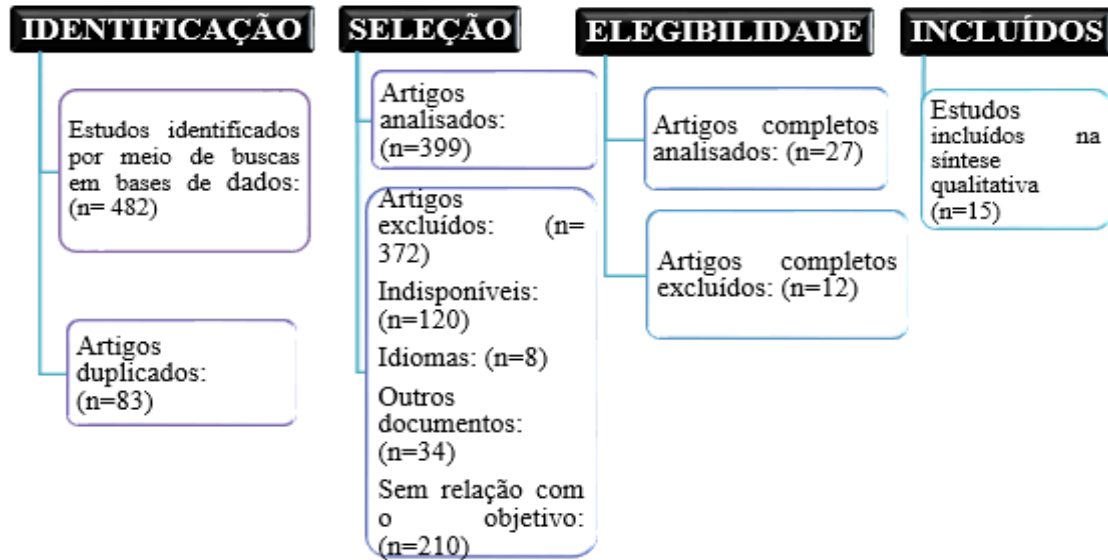
Síntese e Análise dos Achados

A integração dos resultados foi conduzida de forma descritiva e interpretativa, agrupando os estudos conforme as propriedades biológicas das nanopartículas investigadas, tais como potencial osteoindutor, atividade antimicrobiana e capacidade de modulação inflamatória. A análise destacou convergências, divergências e limitações metodológicas identificadas, além de apontar tendências emergentes na engenharia de superfícies implantáveis. Essa síntese permitiu consolidar o panorama científico atual e identificar lacunas que demandam investigações futuras.

RESULTADOS

A seleção dos estudos incluídos nesta revisão seguiu um processo sistematizado e rigoroso, conforme apresentado no fluxograma (Figura 1). Após essa etapa, os artigos potencialmente elegíveis foram avaliados na íntegra, considerando os critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Ao final do processo, 15 estudos foram incluídos na análise.

Figura 1: fluxograma com o método de seleção dos artigos incluídos na revisão



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 apresenta as características gerais dos estudos incluídos nesta revisão, contemplando informações referentes aos autores, ano de publicação, país de origem, delineamento metodológico e objetivos dos trabalhos. Observa-se uma predominância de estudos experimentais, especialmente *in vivo* em modelos animais, frequentemente associados a etapas complementares *in vitro*, evidenciando o caráter translacional das pesquisas na área de implantodontia. Além disso, foram identificadas revisões de literatura e revisões sistemáticas, reforçando o interesse crescente da comunidade científica na consolidação do conhecimento acerca do uso de nanopartículas na modificação de superfícies implantárias.

Do ponto de vista geográfico, os estudos apresentam distribuição internacional, com destaque para países como China, Brasil, Coreia do Sul e Índia, indicando ampla difusão global das pesquisas em nanotecnologia aplicada à osseointegração. Em relação aos objetivos, verifica-se uma convergência temática centrada na avaliação do impacto de diferentes nanopartículas sobre parâmetros biológicos e mecânicos da osseointegração, incluindo formação óssea, contato osso-implante e propriedades antimicrobianas.

Tabela 1: Características gerais dos artigos selecionados

| Autor/ ano de publicação | País de publicação | Tipos de estudos | Objetivos do trabalho |
|---------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Xie <i>et al</i> , 2014 | China | Estudo experimental <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> | Desenvolver e avaliar um revestimento de hidroxiapatita contendo nanopartículas de prata e BMP-2 em superfícies de implantes metálicos. |
| Lee <i>et al</i> , 2015 | Coreia do Sul | Estudo experimental: <i>in vivo</i> (animal), com etapa <i>in vitro</i> complementar | Avaliar o efeito de nanotubos de TiO ₂ associados à proteína morfogenética óssea recombinante (rhBMP - 2) na osseointegração de implantes dentários, analisando o contato osso-implante e a formação óssea em comparação com diferentes superfícies de implantes |
| Heo <i>et al</i> , 2016 | Coreia do Sul | Estudo experimental: <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> (animal) | Investigar o efeito de implantes de titânio funcionalizados com nanopartículas de ouro (GNPs) na osseointegração, analisando a diferenciação osteogênica celular e a formação óssea ao redor do implante, com o objetivo de melhorar a formação da interface osso-implante |
| Covarrubias <i>et al</i> , 2018 | Chile | Estudo experimental: <i>in vivo</i> (animal) | Investigar o efeito de superfícies de implantes modificadas com nanotubos de TiO ₂ na osseointegração, analisando parâmetros como formação óssea e contato osso-implante, em comparação com superfícies convencionais. |
| Qing <i>et al</i> , 2018 | China | Revisão | Analisar os possíveis mecanismos antibacterianos das nanopartículas de prata (AgNPs), além de discutir seus efeitos em células relacionadas à osteogênese e revisar estratégias para melhorar a biocompatibilidade e otimizar implantes ortopédicos. |
| He <i>et al</i> , 2018 | China | Estudo experimental: <i>in vivo</i> (animal) | Confirmar o efeito <i>in vivo</i> de implantes de titânio com revestimento contendo zinco, preparados pelo método de oxidação eletrolítico por plasma (PEO), no processo de osseointegração. |
| Vandamme <i>et al</i> , 2021 | Bélgica (Ku Leuven, Leuven) | Estudo experimental: <i>in vivo</i> (animal) | Avaliar a osseointegração de implantes de titânio funcionalizados com sílica mesoporosa (Ti/SiO ₂), previamente desenvolvidos para liberação controlada de agentes antimicrobianos, verificando se essa modificação compromete o processo de integração óssea |
| Bezerra <i>et al</i> , 2020 | Brasil | Revisão (Review/ revisão bibliográfica) | Revisar o estado da arte do dióxido de titânio (TiO ₂) nano estruturado para uso em implantes ósseos, abordando suas características, métodos de síntese e propriedades biológicas, além de destacar seu potencial para crescimento celular e regeneração óssea no campo biomédico. |
| Dabbah <i>et al</i> , 2022 | Israel | Estudo experimental: <i>in vitro</i> | Investigar os efeitos de um novo revestimento de nanopartículas ZnCuO em superfícies de titânio (Ti-6Al-4V), comparando com superfícies convencionais, quanto à formação de biofilme bacteriano e ao comportamento de células do hospedeiro (osteoblastos e macrófagos), avaliando seu potencial para aplicação em implantes dentários. |
| Almeida <i>et al</i> , 2023 | Brasil | Estudo experimental: <i>in vivo</i> (animal) | Avaliar biomecamente, histomorfometricamente e histologicamente a osseointegração de implantes com revestimento de hidroxiapatita nanoestruturada, comparando-os com implantes de superfície tratada por duplo ataque ácido, com osso de baixa densidade |
| Tian <i>et al</i> , 2023 | China | Estudo experimental: (<i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>) | Desenvolver e analisar um revestimento híbrido de nanopartículas de ouro (AuNPs) e polidopamina (PDA) em superfícies de titânio (Ti- PDA- Au) para melhorar a osseointegração. O estudo focou em verificar se essa modificação poderia promover a adesão, proliferação e diferenciação osteogênica de células-tronco mesenquimais da medula óssea (BMMSCs), além de acelerar a formação óssea <i>in vivo</i> . |

| | | | |
|-----------------------------|-------|---------------------|---|
| Toscano <i>et al</i> , 2024 | Índia | Revisão sistemática | Investigar o impacto da adição de nanopartículas de hidroxiapatita em superfícies de implantes tratadas com jateamento de zircônia e ataque ácido (ZiHa), com foco nas alterações estruturais e nos parâmetros de cicatrização óssea em sítios ósseos de baixa densidade. |
| Madiwal <i>et al</i> , 2024 | Índia | Revisão sistemática | Avaliar, por meio da literatura publicada, o efeito do revestimento de nanopartículas de ouro no aumento da osseointegração de implantes dentários, comparando-os com implantes de titânio não revestidos. |
| Kasai <i>et al</i> , 2024 | Índia | Revisão sistemática | Analisar evidências científicas passadas e presentes para comparar a osseointegração de superfícies de implantes dentários revestidas com nanopartículas de ouro (AuNP) submetidas a carga com a de superfícies de implantes dentários não revestidas. |
| Faiz <i>et al</i> , 2024 | Índia | Revisão sistemática | Analisar evidências científicas para comparar a osseointegração de implantes dentários revestidos com nanopartículas de ouro (AuNPs) em relação a implantes de titânio não revestidos. |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2: Nanopartículas incorporadas às superfícies de implantes dentários e seus efeitos na osseointegração:

| Autor e ano de publicação | Tipo de nanopartículas | Efeitos na osseointegração |
|---------------------------------|--|---|
| Xie <i>et al</i> , 2014 | Nanopartículas de prata distribuídas em revestimento de hidroxiapatita(CS/Ag/HA). | Nanopartículas: prata (AgNPs) incorporadas em hidroxiapatita, estabilizadas por quitosana. Efeito na osseointegração: promovem osteoindução, aumentam diferenciação osteoblástica, favorecem formação óssea in vivo e apresentam ação antibacteriana, contribuindo para melhor integração do implante ao osso. |
| Lee <i>et al</i> , 2015 | Nanotubos de TiO ₂ (TiO ₂ nanotube arrays) e Nanotubos de TiO ₂ + rhBMP-2 | Os nanotubos de TiO ₂ , principalmente quando associados ao rhBMP-2, aumentam o contato osso-implante e o volume ósseo, estimulam a formação e remodelação óssea e favorecem a atividade celular, resultando em uma osseointegração mais rápida e eficaz. |
| Heo <i>et al</i> , 2016 | Nanopartículas de titânio (TiO ₂) | Os efeitos na osseointegração incluem o aumento da adesão e proliferação celular, além do estímulo à diferenciação osteogênica. Também favorecem a formação óssea ao redor do implante, contribuindo para uma melhora significativa no processo de osseointegração. |
| Covarrubias <i>et al</i> , 2018 | Nanopartículas de vidro bioativo (nBG) Incorporadas em sílica porosa nanoestruturada sobre titânio | Os efeitos na osseointegração incluem o aumento da formação de apatita, indicando maior bioatividade do material, além do estímulo à diferenciação osteogênica de células-tronco. Observa-se também a aceleração da formação óssea ao redor do implante e a melhora do contato direto entre o osso e a superfície. |
| Qing <i>et al</i> , 2018 | Nanopartículas de Prata (AgNPs) | O uso de nanopartículas de prata (AgNPs) em implantes apresenta um efeito dual na osseointegração: em concentrações baixas (até 10 μg/mL), elas promovem a diferenciação de células estaminais e a mineralização óssea, favorecendo a integração; |
| He <i>et al</i> , 2018 | Óxido de Zinco (ZnO) | Os principais efeitos observados incluem um aumento significativo na atividade dos osteoblastos e na mineralização da matriz óssea, o que resulta em maiores índices de contacto osso-implante (BIC) e na taxa de aposição mineral (MAR) ao longo das semanas. |
| Vandamme <i>et al</i> , 2021 | Sílica mesoporosa (SiO ₂) | A funcionalização de implantes de titânio macroporoso com sílica mesoporosa, não prejudicar a osseointegração. Em modelos in vivo, os implantes com sílica apresentaram contato osso-implante (BIC) e volume ósseo peri-implantar (BV) estatisticamente semelhantes aos implantes de titânio poroso sem a substância. |

| | | |
|----------------------------------|---|--|
| Bezerra neta <i>et al</i> , 2020 | Dióxido de titânio (TiO ₂) nanoestruturado, frequentemente organizado na forma de nanotubos, na ódios ou nanopós | O dióxido de titânio (STiO_2S) nanoestruturado atua como uma superfície bioativa que mimetiza a arquitetura natural do osso, facilitando a adaptação biológica imediata. Devido à sua elevada hidrofília e grande área de superfície, estas nanoestruturas potencializam a adsorção de proteínas e a diferenciação de osteoblastos, acelerando a formação de cristais de hidroxiapatita. |
| Dabbah <i>et al</i> , 2022 | Nanopartículas de óxido de zinco e óxido de cobre (ZnCuO) | o nanorrevestimento de Óxido de Zinco e Óxido de Cobre (ZnCuO) favorece a osseointegração ao criar um ambiente biológico propício à cicatrização óssea. As nanopartículas demonstram excelente biocompatibilidade, promovendo a adesão e a proliferação de pré-osteoblastos sem alterar a sua morfologia funcional. |
| Almeida <i>et al</i> , 2023 | Nanopartículas de ouro (AuNPs) | Os efeitos na osseointegração incluem o aumento do contato osso-implante (BIC) e da formação de osso novo ao redor do implante, além do estímulo à diferenciação osteogênica e à regeneração óssea. Esses fatores contribuem para uma melhora significativa e mais rápida do processo de osseointegração |
| Tian <i>et al</i> , 2023 | Íons de Zinco (Zn) | A incorporação de íons de zinco na superfície do titânio, através da tecnologia PIIID, acelera a osseointegração inicial ao estimular a expressão de proteínas fundamentais como o colágeno de tipo I. Esta modificação promove uma diferenciação mais ativa dos osteoblastos e aumenta a formação de osso novo ao redor do implante. |
| Toscano <i>et al</i> , 2024 | Nanopartículas de hidroxiapatite (Nano - HA) Aplicadas sobre uma superfície previamente tratada com jato de zircônia e ataque ácido | A adição de nanopartículas de hidroxiapatite (Nano-HA) em superfícies de titânio otimiza a osseointegração ao acelerar a maturação óssea e aumentar significativamente o contacto osso-implante (BIC). Esta modificação cria uma topografia rugosa que favorece a estabilidade biomecânica e a resposta celular inicial. |
| Madiwal <i>et al</i> , 2024 | Prata(Ag) | As nanopartículas de prata (Ag) depositadas no titânio por DC aputtering atuam como um revestimento profilático que acelera a osseointegração ao melhorar a molhabilidade e a energia da superfície do implante. |
| Kasai <i>et al</i> , 2024 | Nanopartículas de hidroxiapatite (Nano-HÁ) | O nanorrevestimento de óxido de zinco e óxidos de cobre (ZnCuO) favorece a osseointegração ao criar um ambiente biológico propício á cicatrização. As nanopartículas demonstram excelente biocompatibilidade, promovendo a adesão e a proliferação de pré-osteoblasto sem alterar a sua morfologia funcional. |
| Faiz <i>et al</i> , 2024 | Nanoparticulas de ouro (AuNPs) | Os efeitos na osseointegração incluem o aumento do contato osso-implante (BIC), maior formação e densidade óssea ao redor do implante e melhora da estabilidade mecânica, evidenciada por maiores valores de torque de remoção. |

Fonte: Autoria própria.

DISCUSSÃO

A presente revisão teve como objetivo identificar e analisar os principais tipos de nanopartículas incorporadas às superfícies de implantes dentários, avaliando seus efeitos sobre o processo de osseointegração. Considerando que a qualidade da interface osso-implante é determinante para o sucesso clínico e que as superfícies convencionais ainda apresentam limitações, especialmente nas fases iniciais do reparo ósseo, este estudo buscou sintetizar as evidências disponíveis acerca do papel das estratégias nanotecnológicas na modulação da resposta biológica peri-implantar.

As nanopartículas de prata têm sido amplamente utilizadas na modificação de superfícies implantárias devido à sua potente atividade antimicrobiana de amplo espectro, incluindo ação contra microrganismos resistentes (Li et al, 2023; Kheirmand-Parizi et al, 2024). Os estudos analisados demonstraram que sua incorporação reduz significativamente a adesão bacteriana e a formação de biofilme, o que contribui para a prevenção de infecções peri-implantares e, conseqüentemente, favorece a osseointegração (Li et al, 2023; Yin et al, 2025).

Seu mecanismo de ação envolve tanto o contato direto com a membrana bacteriana, promovendo sua desorganização, quanto a liberação de íons Ag^+ , que interferem em processos metabólicos essenciais e na replicação celular, além da indução de espécies reativas de oxigênio (Sotiriou, 2024; Zhang et al, 2026). Indiretamente, a redução da carga microbiana diminui a resposta inflamatória local, criando um ambiente mais propício à formação óssea (Wang et al, 2026; Yin et al, 2025). Em baixas concentrações, as AgNPs também podem estimular vias osteogênicas, mas esse efeito é dependente da dose, sendo que concentrações elevadas podem induzir citotoxicidade e comprometer a diferenciação celular (Zhao et al, 2013; Sotiriou, 2024).

A hidroxiapatita nanoestruturada tem sido amplamente utilizada como revestimento de implantes devido à sua elevada biocompatibilidade e similaridade química com o tecido ósseo, favorecendo a adesão celular e a osseointegração (Bose et al, 2012; Ramesh et al, 2008). Os estudos incluídos nesta revisão demonstraram que superfícies revestidas com HAnano apresentam aumento significativo do contato osso-implante e da formação óssea, especialmente em regiões de baixa densidade óssea (Almeida et al, 2023; Xie et al, 2014).

A superioridade desse material está relacionada à sua capacidade osteocondutora e à formação de ligação direta com o tecido ósseo. A topografia nanométrica favorece a adsorção de proteínas da matriz extracelular, como fibronectina e vitronectina, mediando a adesão de osteoblastos e ativando vias de sinalização que estimulam proliferação e diferenciação celular (Gittens et al, 2014; Zhao et al., 2013). Além disso, a dissolução parcial da hidroxiapatita libera íons cálcio e fosfato, promovendo a nucleação de nova apatita e contribuindo para a mineralização óssea (LeGeros, 2008; Barrère et al, 1999).

O dióxido de titânio nanoestruturado tem sido amplamente utilizado na modificação de superfícies implantárias devido à sua elevada biocompatibilidade, estabilidade química e capacidade de modular a resposta celular (Gittens et al, 2014; Variola et al, 2011). Os estudos incluídos nesta revisão demonstraram que superfícies

modificadas com TiO_2 , especialmente na forma de nanotubos obtidos por anodização, promovem aumento da adesão celular, proliferação osteoblástica e melhora da osseointegração (Heo et al, 2016; Lee et al, 2015).

Esse desempenho está relacionado à nanotopografia da superfície, que mimetiza a matriz extracelular óssea e favorece a adsorção de proteínas e a ancoragem celular. A estrutura nanotubular aumenta a rugosidade e a hidrofília, facilitando a interação célula-superfície e ativando vias de sinalização associadas à diferenciação osteogênica (Brammer et al, 2009; Park et al, 2007). Além disso, o TiO_2 apresenta capacidade de induzir a formação de hidroxiapatita em contato com fluidos biológicos, especialmente quando na fase anatásio, contribuindo para a bioatividade da superfície implantária (Kokubo & Takadama, 2006; Zhao et al, 2014).

Embora apresente potencial antimicrobiano associado à atividade fotocatalítica e à geração de espécies reativas de oxigênio, esse efeito é limitado em condições clínicas sem ativação por luz UV. Dessa forma, o TiO_2 atua predominantemente como modulador da resposta biológica inicial, contribuindo para a osseointegração por meio da otimização da interação célula-material (Fujishima et al, 2008; Roy et al, 2011).

As nanopartículas de óxido de zinco e os íons Zn^{2+} têm sido amplamente investigados na modificação de superfícies implantárias devido às suas propriedades antimicrobianas e ao seu potencial de favorecer a resposta óssea. Os estudos incluídos nesta revisão demonstraram que superfícies enriquecidas com zinco promovem melhora da interface osso-implante, com redução de tecido fibroso, aumento da deposição de matriz óssea e efeito inibitório significativo sobre biofilmes multiespécie (Tian et al, 2023; Dabbah et al, 2022).

O mecanismo de ação antibacteriano do zinco envolve a liberação de íons Zn^{2+} , que desestabilizam a membrana bacteriana, interferem em sistemas enzimáticos e induzem a produção de espécies reativas de oxigênio, comprometendo a viabilidade celular microbiana (Sirelkhatim et al, 2015; Li et al, 2020). No contexto da osseointegração, o Zn^{2+} atua estimulando a proliferação e diferenciação osteoblástica, aumentando a atividade de fosfatase alcalina e a síntese de colágeno tipo I, fatores diretamente relacionados à formação e mineralização da matriz óssea (Yamaguchi, 1998; Tian et al, 2023).

As nanopartículas de ouro têm sido investigadas na modificação de superfícies implantárias devido à sua elevada biocompatibilidade e capacidade de modular a resposta celular, apresentando baixo potencial citotóxico em comparação a outros metais (Dykman & Khlebtsov, 2012; Khlebtsov & Dykman, 2011). Embora

apresentem atividade antimicrobiana limitada, estudos demonstram que sua principal contribuição está relacionada ao estímulo da proliferação e diferenciação osteoblástica, favorecendo a formação óssea peri-implantar (Heo et al, 2014; Li et al, 2016).

O efeito osteogênico das AuNPs está associado à ativação de vias de sinalização intracelular, como MAPK e Runx2, que regulam a diferenciação de osteoblastos e a expressão de marcadores como fosfatase alcalina e colágeno tipo I (Li et al, 2016; Zhang et al, 2014). Além disso, sua superfície permite funcionalização com biomoléculas, atuando como plataforma para liberação controlada de fatores bioativos, o que amplia seu potencial na engenharia de tecidos ósseos (Dykman & Khlebtsov, 2012; Khlebtsov & Dykman, 2011).

Apesar desses benefícios, sua eficácia depende de parâmetros como tamanho, concentração e morfologia das partículas, fatores que influenciam diretamente a interação com células e tecidos (Dykman & Khlebtsov, 2012; Khlebtsov & Dykman, 2011). Além disso, variações nesses parâmetros podem alterar a internalização celular e a resposta biológica, impactando a diferenciação osteogênica. Dessa forma, as AuNPs configuram-se como uma estratégia promissora para modulação da osseointegração, especialmente quando associadas a outros materiais com propriedades antimicrobianas ou osteocondutoras (Li et al, 2016).

As nanopartículas de óxido de cobre têm sido investigadas na modificação de superfícies implantárias devido à sua relevante atividade antimicrobiana, com eficácia demonstrada contra diferentes espécies bacterianas associadas a infecções peri-implantares (Ren et al, 2018). Além disso, o cobre é reconhecido como um elemento traço essencial ao metabolismo ósseo, participando de processos biológicos relacionados à formação e manutenção do tecido ósseo (Yamaguchi, 1998). Estudos experimentais demonstram que superfícies contendo cobre apresentam redução significativa da adesão bacteriana e da formação de biofilmes, inclusive em modelos multiespécie (Dabbah et al, 2022).

O mecanismo antimicrobiano das nanopartículas de cobre está associado à liberação de íons Cu^{2+} , que promovem danos estruturais à membrana bacteriana e comprometem a integridade celular (Borkow & Gabbay, 2009). Esses íons também interferem em sistemas enzimáticos essenciais e no metabolismo bacteriano, levando à morte celular (Borkow & Gabbay, 2009). Adicionalmente, as nanopartículas de cobre induzem a formação de espécies reativas de oxigênio, contribuindo para o estresse oxidativo e dano ao material genético dos microrganismos (Ren et al, 2018). No contexto da regeneração óssea, o cobre desempenha papel importante na

angiogênese, estimulando a expressão de fatores como o VEGF e favorecendo a vascularização local (Sen et al, 2002).

A análise comparativa dos estudos incluídos evidencia que as nanopartículas atuam por mecanismos distintos e complementares no processo de osseointegração. A hidroxiapatita nanoestruturada apresenta maior impacto no contato direto osso-implante, promovendo uma integração estrutural mais eficiente, conforme demonstrado por aumento significativo do contato osso-implante (BIC) e da formação óssea peri-implantar (Almeida et al, 2023; Xie et al, 2014). Em contrapartida, o zinco destaca-se por sua capacidade de estimular a formação óssea e modular a resposta inflamatória, contribuindo para um microambiente mais favorável à regeneração tecidual (Tian et al, 2023; Dabbah et al, 2022). Já as nanopartículas de prata exercem papel fundamental no controle da colonização bacteriana, reduzindo a formação de biofilme e prevenindo complicações infecciosas na interface implante-tecido (Qing et al, 2018; Madiwal et al, 2024).

O dióxido de titânio, por sua vez, atua predominantemente na modulação da resposta celular inicial, favorecendo a adesão, proliferação e diferenciação osteoblástica por meio de sua nanotopografia e propriedades de superfície (Lee et al, 2015; Heo et al., 2016). Dessa forma, os diferentes materiais não competem entre si, mas contribuem de maneira complementar para o processo de osseointegração, reforçando a importância de abordagens multifuncionais na modificação de superfícies implantárias.

Nesse contexto, estratégias que combinam diferentes nanopartículas têm demonstrado maior potencial terapêutico, por integrarem propriedades osteocondutoras, osteoindutoras e antimicrobianas em uma única superfície. Evidências experimentais indicam que sistemas híbridos, como associações entre hidroxiapatita, prata e zinco, promovem simultaneamente controle da infecção e estímulo à formação óssea, resultando em desfechos superiores em comparação às abordagens isoladas (Xie et al, 2014; Dabbah et al, 2022). Essa abordagem sinérgica tende a maximizar os resultados clínicos e representa uma das principais tendências no desenvolvimento de implantes biomédicos.

Embora a maioria dos estudos tenha demonstrado resultados positivos, observou-se considerável heterogeneidade entre os trabalhos, incluindo variações nos modelos experimentais, tipos de nanopartículas, métodos de síntese e concentrações utilizadas. Essa variabilidade dificulta a comparação direta dos achados e limita a padronização das evidências.

Além disso, alguns materiais apresentaram resultados dependentes das condições experimentais, como observado para as nanopartículas de prata, que podem apresentar efeitos benéficos ou citotóxicos dependendo da dose. Também foi evidenciado que estudos *in vitro*, apesar de úteis para compreensão dos mecanismos celulares, não reproduzem completamente a complexidade do ambiente biológico, enquanto estudos em animais, embora mais robustos, ainda apresentam limitações na extrapolação para humanos.

Esta revisão apresenta limitações relacionadas à heterogeneidade dos estudos incluídos, à ausência de padronização nos desfechos avaliados e à predominância de estudos experimentais. A escassez de ensaios clínicos randomizados em humanos limita a aplicabilidade dos resultados na prática clínica. Além disso, a possibilidade de viés de publicação deve ser considerada, uma vez que estudos com resultados positivos tendem a ser mais frequentemente reportados.

Apesar dos resultados promissores, a aplicação clínica das nanopartículas ainda enfrenta desafios importantes. A ausência de estudos clínicos robustos, a falta de padronização metodológica e a necessidade de definição de parâmetros ideais de aplicação ainda limitam sua incorporação na prática odontológica. O desenvolvimento de superfícies multifuncionais, capazes de integrar propriedades osteogênicas, antimicrobianas e moduladoras da resposta inflamatória, surge como a principal perspectiva futura. No entanto, a consolidação dessas abordagens depende da realização de estudos clínicos bem delineados e de longo prazo, capazes de validar a eficácia e segurança dessas tecnologias.

CONCLUSÃO

Os achados desta revisão integrativa demonstram que a incorporação de nanopartículas às superfícies de implantes dentários representa uma estratégia promissora para otimizar a osseointegração, atuando por mecanismos complementares que envolvem estímulo à osteogênese, modulação da resposta inflamatória e ação antimicrobiana. Materiais como hidroxiapatita nanoestruturada, dióxido de titânio, prata, zinco, ouro e cobre evidenciaram potencial em melhorar a interação osso-implante, favorecendo a adesão e diferenciação celular, além de aumentar parâmetros como formação óssea e contato osso-implante.

Contudo, a heterogeneidade metodológica e a predominância de estudos pré-clínicos limitam a extrapolação dos resultados para a prática clínica. Dessa forma, destaca-se a necessidade de ensaios clínicos bem delineados e da padronização dos protocolos experimentais, visando a consolidar a aplicabilidade dessas tecnologias e

orientar o desenvolvimento de superfícies implantárias multifuncionais mais seguras e eficazes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D.; SARTORETTO, S. C.; CALASANS-MAIA, J. D. A.; GHIRALDINI, B.; BEZERRA, F. J. B.; et al. In vivo osseointegration evaluation of implants coated with nanostructured hydroxyapatite in low density bone. **PLOS ONE**, v. 18, n. 2, e0282067, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282067>.
- BARRÉRE, F.; LAYROLLE, P.; VAN BLITTERSWIJK, C. A.; DE GROOT, K. Biomimetic calcium phosphate coatings on Ti6Al4V: a crystal growth study of octacalcium phosphate and inhibition by Mg²⁺ and HCO₃⁻. **Bone**, v. 25, n. 2 Suppl, p. 107S-111S, 1999. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10458288/>.
- BEZERRA NETA, I. A.; MOTA, M. F.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R. Nanostructured titanium dioxide for use in bone implants: a brief review. **Cerâmica**, v. 66, n. 380, p. 440–450, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802905>
- BOSE, S.; TARAFDER, S. Calcium phosphate ceramic systems in growth factor and drug delivery for bone tissue engineering: a review. **Acta Biomaterialia**, v. 8, n. 4, p. 1401-1421, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22127225/>.
- BORKOW, G.; GABBAY, J. Copper as a biocidal tool. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 20, n. 3, p. 342–348, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.08.002>.
- BRAMMER, K. S.; OH, S.; COBB, C. J.; BJURSTEN, L. M.; VAN DER HEYDE, H.; JIN, S. Improved bone-forming functionality on diameter-controlled TiO₂ nanotube surface. **Acta Biomaterialia**, v. 5, n. 8, p. 3215–3223, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.05.020>.
- COVARRUBIAS, C.; TÜBER, R.; ARANCIBIA, A.; TAPIA, C. Synthesis and in vitro assessment of nanobioactive glass/titania hybrid coatings for osseointegration of dental implants. **Journal of Biomaterials Applications**, v. 32, n. 9, p. 1311–1322, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0885328218757861>.
- DABBAH, K.; PERELSHTEIN, I.; GEDANKEN, A.; HOURI-HADDAD, Y.; FEUERSTEIN, O. Effects of a ZnCuO nanoparticle-coated Ti-6Al-4V surface on bacterial and host cells. **Materials**, v. 15, p. 2514, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15072514>.
- DYKMAN, L.; KHLEBTSOV, N. Nanopartículas de ouro em aplicações biomédicas: avanços e perspectivas recentes. **Chemical Society Reviews**, v. 41, n. 6, p. 2256–2282, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c1cs15166e>.
- FAIZ, N.; VENUGOPAL, S.; SIVASAMY, V. The effect of gold nanoparticle-coated dental implants on osseointegration: a systematic review. **Indian Journal of Dental Research**, v. 35, n. 2, p. 232, 2024. Disponível em: https://journals.lww.com/ijdr/Fulltext/2024/35020/The_effect_of_gold_nanoparticle_coated_dental.11.aspx.

FUJISHIMA, A.; ZHANG, X.; TRYK, D. A. TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. **Surface Science Reports**, v. 63, n. 12, p. 515–582, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>.

GITTENS, R. A.; SCHEIDELER, L.; RUPP, F.; HYZY, S. L.; GEIS-GERSTORFER, J.; SCHWARTZ, Z.; BOYAN, B. D. A review on the wettability of dental implant surfaces II: biological and clinical aspects. **Acta Biomaterialia**, v. 10, n. 7, p. 2907–2918, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4041540/>.

HEO, D. N.; KO, W.-K.; LEE, H. R.; et al. Titanium dental implants surface-immobilized with gold nanoparticles as osteoinductive agents for rapid osseointegration. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 469, p. 129–137, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.02.022>.

HEO, S. J.; KOAK, J. Y.; KIM, S. SK.; LEE, S. J.; HEO, M. S. Gold nanoparticles promote osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells. **Materials Science and Engineering C**, v. 39, p. 176–184, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.02.015>.

KASAI, H.; BERGAMO, E. T. P.; BALDERRAMA, Í. F.; et al. The effect of nano hydroxyapatite coating implant surfaces on gene expression and osseointegration. **Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal**, v. 29, n. 3, p. e326–e333, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4317/2Fmedoral.26303>.

KHEIRMAND-PARIZI, M.; DOLL-NIKUTTA, K.; GAIKWAD, A.; DENIS, H.; STIESCH, M. Effectiveness of strontium/silver-based titanium surface coatings in improving antibacterial and osteogenic implant characteristics. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2024.1346426/full>.

KHLEBTSOV, N.; DYKMAN, L. Biodistribution and toxicity of engineered gold nanoparticles. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 3, p. 1647–1671, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C0CS00018C>.

KOKUBO, T.; TAKADAMA, H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity?. **Biomaterials**, v. 27, n. 15, p. 2907–2915, 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16448693/>.

LEE, J.-K.; CHOI, D.-S.; JANG, I.; CHOI, W.-Y. Improved osseointegration of dental titanium implants by TiO₂ nanotube arrays. **International Journal of Nanomedicine**, v. 10, p. 1145–1154, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2147/IJN.S78138>.

LEGEROS, R. Z. Calcium phosphate-based osteoinductive materials. **Chemical Reviews**, v. 108, n. 11, p. 4742–4753, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19006399/>.

LI, J.; WU, X.; LIANG, Z.; et al. A programmed surface on dental implants sequentially initiates bacteriostasis and osseointegration. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 230, p. 113477, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37544027/>.

LI, J.; ZHANG, X.; LIU, H.; ZHOU, W.; LI, X. Gold nanoparticles enhance osteogenic differentiation. **Biomaterials**, v. 74, p. 1–12, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.09.012>.

MADIWAL, V.; RAJWADE, J. Titanium with silver deposition as a prophylactic nanocoating for peri-implantitis. **Nanoscale Advances**, v. 6, p. 2113–2128, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d3na00898c>.

PARK, J.; BAUER, S.; VON DER MARK, K.; SCHMUKI, P. Nanosize and vitality: TiO₂ nanotube diameter directs cell fate. **Nano Letters**, v. 7, n. 6, p. 1686–1691, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/nl070678d>.

QING, Y.; CHENG, L.; LI, R.; et al. Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles. **International Journal of Nanomedicine**, v. 13, p. 3311–3327, 2018. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5993028/>.

RAMESH, S.; TAN, C. Y.; AW, K. L.; et al. Sintering behaviour of hydroxyapatite bioceramics. **Medical Journal of Malaysia**, v. 63, Suppl A, p. 89–90, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19024998/>.

REN, L.; WONG, H. M.; YAN, C. H.; et al. Antibacterial properties of copper-containing biomaterials. **Acta Biomaterialia**, v. 79, p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.08.044>.

ROY, P.; BERGER, S.; SCHMUKI, P. TiO₂ nanotubes: synthesis and applications. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 50, p. 2904–2939, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/anie.201001374>.

SEN, C. K.; KHANNA, S.; VENOJARVI, M.; et al. Copper-induced vascular endothelial growth factor expression. **PNAS**, v. 99, n. 15, p. 10035–10040, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.152324399>.

SIRELKHATIM, A.; MAHMUD, S.; SEENI, A.; et al. Review on zinc oxide nanoparticles. **Nano-Micro Letters**, v. 7, n. 3, p. 219–242, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>.

SOTIRIOU, G. A. Optimizing nanosilver for implant success. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 26, p. 264, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11051-024-06181-2.pdf>.

TIAN, X.; ZHANG, P.; XU, J. Incorporating zinc ion into titanium surface promotes osteogenesis. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 34, n. 11, p. 55, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10622348/>.

TOSCANO, R. A.; BARBOSA, S.; CAMPOS, L. G.; et al. The addition of hydroxyapatite nanoparticles on implant surfaces. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 13, p. 7321, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms25137321>.

VANDAMME, K.; THEVISSSEN, K.; MESQUITA, M. F.; et al. Implant functionalization with mesoporous silica. **Clinical and Experimental Dental Research**, v. 7, n. 4, p. 502–511, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cre2.395>.

VARIOLA, F.; et al. Nanoscale surface modifications of medically relevant metals. **Nanoscale**, v. 3, p. 335-353, 2011. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3105323/>.

WANG, H.; et al. Silver nanoparticle-antimicrobial peptide nanocomposite coating improves implant osseointegration. **Nanomedicine**, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17435889.2026.2614548>.

XIE, C. M.; LU, X.; WANG, K. F.; et al. Silver nanoparticles incorporated hydroxyapatite coatings. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 6, n. 11, p. 8580-8590, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/am501428e>.

YAMAGUCHI, M. Role of zinc in bone formation. **Journal of Trace Elements in Experimental Medicine**, v. 11, p. 119-135, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-670X\(1998\)11:2/3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-670X(1998)11:2/3).

YIN, I. X.; UDDUTTULLA, A.; XU, V. W.; CHEN, K. J.; ZHENG, M. Y. Use of antimicrobial nanoparticles for dental diseases. **Nanomaterials**, v. 15, n. 3, p. 209, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/15/3/209>.

ZHANG, Y.; DAI, Z.; LI, X.; et al. Emerging non-antibiotic strategies for implant-associated biofilm infections. **npj Biofilms and Microbiomes**, v. 12, p. 42, 2026. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41522-025-00907-3.pdf>.

ZHAO, L.; et al. The influence of silver nanoparticles on osteoblasts and osteoclasts. **Biomaterials**, v. 34, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.03.043>.