

U. PORTO



FACULDADE DE
MEDICINA DENTÁRIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Medicina Dentária

Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto

Artigo de Revisão Bibliográfica

**NANOTECNOLOGIA APLICADA À IMPLANTOLOGIA: UMA
REVISÃO DE LITERATURA SOBRE TRATAMENTO DE
SUPERFÍCIE E SEUS IMPACTOS NA OSTEOINTEGRAÇÃO**

“NANOTECHNOLOGY APPLIED TO IMPLANTOLOGY: A
LITERATURE REVIEW ON SURFACE TREATMENT AND ITS
IMPACTS ON OSTEOINTEGRATION”

Leandro Camargo Cardoso

Porto, 2024



FACULDADE DE
MEDICINA DENTÁRIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Mestrado Integrado em Medicina Dentária

Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto

Artigo de Revisão Bibliográfica

NANOTECNOLOGIA APLICADA À IMPLANTOLOGIA: UMA REVISÃO DE LITERATURA SOBRE TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE E SEUS IMPACTOS NA OSTEOINTEGRAÇÃO

“NANOTECHNOLOGY APPLIED TO IMPLANTOLOGY: A LITERATURE REVIEW ON SURFACE TREATMENT AND ITS IMPACTS ON OSTEOINTEGRATION”

Área Científica: Reabilitação Oral

Autor: Leandro Camargo Cardoso

Número mecanográfico: UP202300132

Contacto: up202300132@up.pt

Orientador: Prof. Doutor Mário Ramalho de Vasconcelos

Professor Associado com Agregação da Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto

Porto, 2024

Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em
Medicina Dentária, apresentada à
Faculdade de Medicina Dentária da Universidade do Porto.

*“Outras vezes oiço passar o vento,
E acho que só para ouvir passar o vento vale a pena ter nascido.”*

- Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Em cada palavra escrita neste trabalho, encontra-se o eco do amor e do apoio incondicional daqueles que tornaram esta jornada não apenas possível, mas também significativa. É com um coração repleto de gratidão que dedico este capítulo a minha esposa, Sendhy, e a nossa preciosa filha, Lara, as luzes guias da minha vida.

A aventura que escolhemos empreender, deixando para trás a segurança do conhecido no Brasil para recomeçar em Portugal, foi repleta de desafios e incertezas. Sendhy, com sua força e determinação, foi o pilar que sustentou nossa família nos momentos mais turbulentos. Sua capacidade de ver beleza onde só existem obstáculos inspirou-me a perseverar, mesmo quando o caminho parecia intransponível.

A nossa pequena Lara, que com apenas 3 meses de vida embarcou conosco nesta jornada. Você é a personificação da esperança e do futuro pelo qual trabalhamos incansavelmente. Seu sorriso e alegria diários são lembretes constantes de que as maiores conquistas requerem sacrifícios e que o amor é a força mais poderosa que existe.

Não posso deixar de mencionar a ausência de uma rede de apoio tradicional neste novo país. Longe de amigos e familiares, descobrimos que, quando se tem amor, se tem tudo. Sendhy e Lara, vocês são meu lar, minha família, e meu tudo.

Este trabalho é dedicado a vocês, não apenas como um símbolo de minha gratidão, mas como um testemunho do nosso amor, força e coragem. Juntos, transformamos o desafio da imigração em uma história de sucesso e esperança. Obrigado por serem minha inspiração diária e por me ajudarem a transformar sonhos em realidade.

RESUMO

Introdução: A nanotecnologia na implantologia dentária representa uma revolução na maneira como abordamos a osteointegração e a cicatrização de tecidos em torno dos implantes. A capacidade de manipular materiais na escala nanométrica oferece potenciais inéditos para melhorar a interface entre o implante e o osso, promovendo uma integração mais rápida e eficaz. Este avanço é crucial não apenas para a funcionalidade dos implantes dentários, mas também para a estética, pois implantes bem integrados suportam melhor as restaurações protéticas, levando a resultados mais naturais e satisfatórios. No entanto, a aplicação eficaz da nanotecnologia na implantologia requer uma compreensão profunda dos materiais envolvidos, dos mecanismos de interação com o tecido biológico e dos potenciais riscos associados.

Objetivo: O objetivo deste trabalho é explorar como a nanotecnologia aplicada à superfície dos implantes pode impactar a osteointegração e, por consequência, os resultados estéticos e funcionais na implantologia dentária. Pretende-se, através de uma revisão da literatura científica recente, identificar, descrever e caracterizar os avanços nanotecnológicos específicos que mostram promessa na melhoria da interface implante-osso.

Materiais e métodos: Para alcançar os objetivos propostos, foi realizada uma pesquisa bibliográfica extensiva na base de dados PubMed, com foco em artigos publicados nos últimos 10 (dez) anos. A seleção dos artigos baseou-se inicialmente na relevância dos títulos para o tema de nanotecnologia aplicada à implantologia, seguida de uma análise cuidadosa dos resumos e, por fim, da leitura integral dos artigos selecionados. Foram incluídos estudos de revisão sistemática, meta-análises, ensaios clínicos e artigos de pesquisa original que disponibilizassem o texto integral. Artigos incompletos ou não relacionados diretamente com os avanços nanotecnológicos em superfícies de implantes dentários foram excluídos.

Desenvolvimento: A nanotecnologia tem o potencial de transformar a implantologia dentária, melhorando a osteointegração através da modificação de superfícies de implantes em escala nanométrica. Estas modificações podem incluir a criação de padrões nanoestruturados que imitam a matriz óssea natural, a incorporação de nanopartículas com propriedades antimicrobianas ou osteoindutivas, e o desenvolvimento de revestimentos que liberam fatores de crescimento de forma controlada. Tais avanços não só prometem melhorar a integração dos implantes com

o tecido ósseo circundante, mas também minimizar o risco de infecções e acelerar o processo de cicatrização, contribuindo para resultados estéticos e funcionais superiores.

Conclusão: A incorporação da nanotecnologia na superfície dos implantes dentários oferece um caminho promissor para superar os desafios tradicionais da implantologia, como a prolongada osteointegração e o risco de falhas de implante. Com base na literatura revisada, é evidente que a nanotecnologia não apenas melhora a funcionalidade dos implantes dentários, mas também contribui significativamente para a estética das restaurações, atendendo às expectativas dos pacientes. Portanto, é essencial que os profissionais da área dentária continuem a explorar e a aplicar esses avanços tecnológicos, sempre considerando os resultados de pesquisas atualizadas para garantir a segurança e a eficácia dos tratamentos implantológicos.

PALAVRAS-CHAVE: nanotecnologia, implantes dentários, tratamento de superfície, osteointegração.

ABSTRACT

Introduction: Nanotechnology in dental implantology represents a revolution in the way we approach osseointegration and tissue healing around implants. The ability to manipulate materials at the nanometric scale offers unprecedented potential to improve the interface between the implant and the bone, promoting faster and more effective integration. This advancement is crucial not only for the functionality of dental implants, but also for aesthetics, as well-integrated implants better support prosthetic restorations, leading to more natural and satisfactory results. However, the effective application of nanotechnology in implantology requires a deep understanding of the materials involved, the mechanisms of interaction with biological tissue and the potential associated risks.

Objective: The objective of this work is to explore how nanotechnology applied to the surface of implants can impact osseointegration and, consequently, aesthetic and functional results in dental implantology. It is intended, through a review of recent scientific literature, to identify, describe and characterize specific nanotechnological advances that show promise in improving the implant-bone interface.

Materials and methods: To achieve the proposed objectives, an extensive bibliographic search was carried out in the PubMed database, focusing on articles published in the last 10 years. The selection of articles was initially based on the relevance of the titles to the topic of nanotechnology applied to implantology, followed by a careful analysis of the abstracts and, finally, the full reading of the selected articles. Systematic review studies, meta-analyses, clinical trials and original research articles that made the full text available were included. Incomplete articles or articles not directly related to nanotechnological advances in dental implant surfaces were excluded.

Development: Nanotechnology has the potential to transform dental implantology, improving osseointegration through the modification of implant surfaces on a nanometric scale. These modifications may include the creation of nanostructured patterns that mimic natural bone matrix, the incorporation of nanoparticles with antimicrobial or osteoinductive properties, and the development of coatings that release growth factors in a controlled manner. Such advances not only promise to improve the integration of implants with the surrounding bone tissue, but also minimize

the risk of infections and accelerate the healing process, contributing to superior aesthetic and functional results.

Conclusion: The incorporation of nanotechnology into the surface of dental implants offers a promising way to overcome traditional implantology challenges, such as prolonged osseointegration and the risk of implant failures. Based on the reviewed literature, it is evident that nanotechnology not only improves the functionality of dental implants, but also contributes significantly to the aesthetics of restorations, meeting patients' expectations. Therefore, it is essential that dental professionals continue to explore and apply these technological advances, always considering the results of up-to-date research to ensure the safety and effectiveness of implant treatments.

KEYWORDS: "nanotechnology", "dental implants", "surface treatment", "osseointegration".

ÍNDICE

<i>AGRADECIMENTOS</i>	V
<i>RESUMO</i>	VI
<i>ABSTRACT</i>	VIII
<i>LISTA DE ABREVIATURAS</i>	XI
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	XII
<i>ÍNDICE DE TABELAS</i>	XIII
1. <i>INTRODUÇÃO</i>	XIV
2. <i>OBJETIVOS</i>	XV
3. <i>MATERIAIS E MÉTODOS</i>	XVI
4. <i>DISCUSSÃO</i>	XXIII
4.1. Capítulo 1 - Introdução à Convergência da Nanotecnologia e Implantologia	XXIII
4.2. Capítulo 2 - Nanotopografia e Melhoria da Osteointegração em Implantes Dentários	XXIV
4.3. Capítulo 3: Nanotecnologia e Liberação Controlada de Medicamentos em Implantologia	XXVI
4.4. Capítulo 4: Materiais Nanoestruturados em Tratamentos de Superfície para Implantes Dentários.....	XXVIII
4.5. Capítulo 5 - Nanotecnologia na Prevenção e Diagnóstico de Infecções Peri-Implantares	XXX
4.6. Capítulo 6 - Nanotecnologia na Regeneração Tecidual: Avanços e Aplicações	XXXII
4.7. Capítulo 7 - O Futuro da Nanotecnologia na Implantologia	XXXIV
5. <i>CONCLUSÃO</i>	XXXVI
6. <i>REFERÊNCIAS</i>	XXXVII

LISTA DE ABREVIATURAS

Ag – Prata

Al₂O₃ – Alumina

AgNPs - Nanopartículas de Prata

Ce-TZP – Zircônia Tetragonal Policristalina Estabilizada com Cério

CNTs – Nanotubos de Carbono

Cu – Cobre

FEA – Análise de Elementos Finitos

HA – Hidroxiapatita

LC-MS - Cromatografia Líquida acoplada à Espectrometria de Massas

MS - Espectrometria de Massas

nHA – Nano-Hidroxiapatite

NZnO – Nano partículas de oxido de zinco

PEEK – Polietereetercetona

rGO – Óxido de Grafeno Reduzido

RF – Radiofrequência

RFID - Identificação por Radiofrequência

Si – Silício

Sr – Estrôncio

Ti - Titânio

TiO₂ - Dióxido de Titânio

ZnO – Óxido de Zinco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Fluxograma do processo de seleção de artigos incluídos.....</i>	XVII
Figura 2. <i>Fotomicrografias eletrônicas mostrando a superfície duplo ataque ácido depois de aplicada as nanopartículas de hidroxiapatite.....</i>	XXVI
Figura 3. <i>Nanopartículas recobrando a superfície do implante.....</i>	XXX
Figura 4. <i>Células mesenquimais se diferenciando em osteoblastos.....</i>	XXXIV

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I. <i>Síntese dos artigos utilizados</i>	XVIII
--	-------

1. INTRODUÇÃO

A aplicação da nanotecnologia na implantologia tem proporcionado avanços significativos na melhoria da interação entre os materiais dos implantes e o tecido ósseo, otimizando a osteointegração e promovendo uma recuperação mais eficaz e duradoura. O desenvolvimento de superfícies de implantes com nanoestruturas tem sido fundamental para aumentar a biocompatibilidade e estimular o processo de cicatrização, evidenciando um impacto positivo na estabilidade dos implantes a longo prazo ⁽¹⁾.

Além disso, as inovações em nanocompósitos e revestimentos de implantes têm mostrado uma capacidade notável de resistir a infecções bacterianas, reduzindo significativamente o risco de complicações pós-operatórias. A incorporação de nanopartículas com propriedades antimicrobianas em materiais de implantes dentários tem se revelado uma estratégia eficaz para prevenir a formação de biofilmes e garantir a integridade dos tecidos peri-implantares ^(2, 3).

O aprimoramento das técnicas de nanofabricação tem permitido a criação de implantes com topografias superficiais específicas que favorecem a adesão e proliferação celular, contribuindo para uma integração mais rápida e eficiente do implante ao osso alveolar. Estudos recentes destacam a importância da precisão na escala nanométrica para alcançar resultados ótimos em procedimentos de implantologia, enfatizando a necessidade de continuidade na pesquisa e desenvolvimento nesta área ^(4, 5).

A tendência em direção à personalização dos tratamentos de implantologia, apoiada pela nanotecnologia, sugere um futuro promissor na medicina dentária regenerativa. A possibilidade de desenvolver implantes personalizados, baseados nas necessidades específicas de cada paciente, representa um avanço notável, oferecendo soluções mais eficazes e adaptadas para a reconstrução dentária e recuperação da função mastigatória ⁽⁶⁾.

Em suma, a integração da nanotecnologia na implantologia dentária está redefinindo os paradigmas de tratamento, proporcionando benefícios significativos em termos de eficácia, segurança e satisfação do paciente. A continuação da pesquisa e desenvolvimento nesta área é essencial para explorar plenamente o potencial das nanoestruturas e nanomateriais, com o objetivo de aprimorar ainda mais as técnicas de implantologia e os resultados para os pacientes.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principal objetivo explorar a aplicação da nanotecnologia na implantologia dentária, para investigar como as inovações em nanoestruturas e nanocompósitos podem melhorar a interação entre implantes e o tecido ósseo, bem como promover uma osteointegração mais eficiente e uma recuperação mais rápida e duradoura. Especificamente, pretende-se:

1. Avaliar o impacto das nanoestruturas na biocompatibilidade dos materiais de implantes e na sua integração ao tecido ósseo, e destacar como essas características influenciam a estabilidade a longo prazo dos implantes.
2. Investigar o potencial dos nanocompósitos e revestimentos antimicrobianos em prevenir infecções e promover a saúde dos tecidos peri-implantares, reduzindo assim as complicações pós-operatórias.
3. Analisar as vantagens de nanofabrico na criação de superfícies de implantes que favorecem a adesão e proliferação celular, contribuindo para uma integração rápida e eficaz dos implantes no osso alveolar.
4. Explorar as possibilidades de personalização dos tratamentos de implantologia, apoiada pela nanotecnologia, para proporcionar soluções mais precisas e adaptadas às necessidades individuais de cada paciente.

Através destes objetivos, busca-se contribuir para o avanço das tecnologias em implantologia, além de oferecer *insights* valiosos para futuras pesquisas e aplicações clínicas no campo da medicina dentária regenerativa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Seleção de Fontes: Bases de dados eletrônicas - PubMed, Scopus, Embase.

Período de busca: últimos 10 anos.

Palavras-chave: "nanotechnology", "dental implants", "surface treatment", "osseointegration", entre outras pertinentes.

Critérios de Inclusão: Artigos originais e revisões sistemáticas.

Publicações entre 2013 e 2023.

Estudos que abordem especificamente tratamentos de superfície utilizando nanotecnologia em implantes dentários.

Critérios de Exclusão: Estudos com amostras pequenas que comprometam a validade estatística. Trabalhos que não abordem diretamente a aplicação de nanotecnologia no tratamento de superfície de implantes.

Estratégia de Análise: Riscos, desconfortos e dificuldades - Reconhecer as possíveis dificuldades e desconfortos inerentes à condução desta revisão de literatura. Isso inclui o tempo e os recursos investidos, os desafios na avaliação da qualidade metodológica, e a necessidade de lidar com a interpretação subjetiva dos resultados. Esses desafios são cruciais para uma compreensão holística do trabalho desenvolvido.

A pesquisa inicial resultou num total de 585 artigos potencialmente selecionáveis, dos quais 270 foram selecionados para análise do título e resumo. Para a leitura integral dos artigos, restaram 70 artigos. A análise dos textos completos levou à inclusão de 50 artigos para esta revisão bibliográfica, como representado na figura 1.

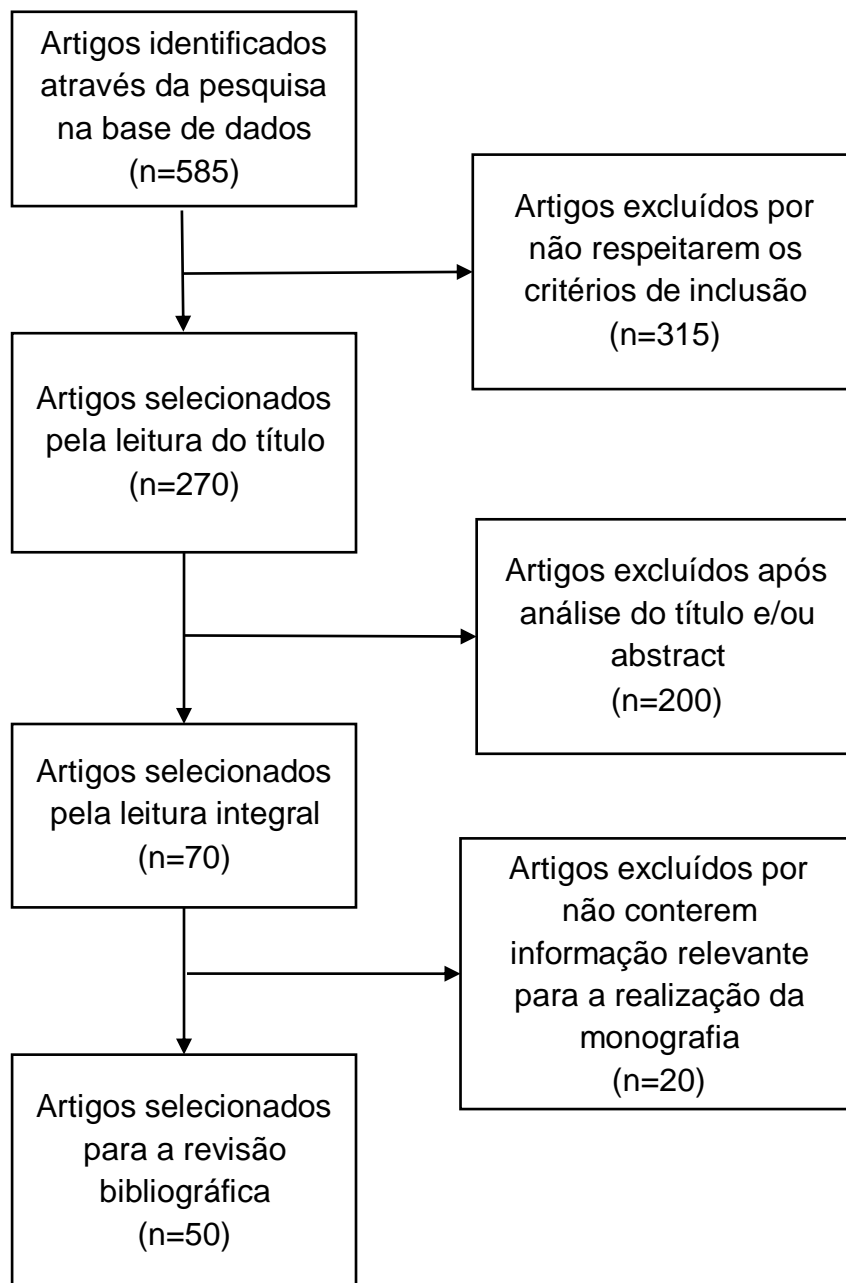


Figura 1. Fluxograma do processo de seleção de artigos incluídos.

É apresentado na tabela 1, a seguir, uma síntese dos artigos utilizados.

Artigo	Autores	Objetivo	Resultados Principais	Conclusão
1	Glowacka-Sobotta A, et al., 2023	Aplicação da nanotecnologia na odontologia, focando em melhorias de compostos odontológicos e implantes dentários.	Uso de nanoestruturas para promover a osteointegração e acelerar a cicatrização. Nanopartículas para diagnóstico precoce do câncer oral.	Necessidade de mais pesquisas sobre a segurança a longo prazo dessas tecnologias.
2	Kunrath MF, et al., 2023	Desenvolvimento de superfícies nanoestruturadas e liberação sustentável de antibióticos em implantes dentários.	Superfícies promovem biocompatibilidade, propriedades antibacterianas eficazes e liberação controlada de rifampicina.	Potencial para melhorar a eficácia clínica dos implantes dentários.
3	Gulati K, et al., 2023	Integração de implantes dentários e terapias locais avançadas por meio de implantes de nanoengenharia.	Liberação de fatores de crescimento, antibióticos e outros agentes terapêuticos para melhorar os resultados do tratamento.	Desenvolver implantes dentários terapêuticos clinicamente traduzíveis.
4	Hossain N, et al., 2023	Avanços nas nanopartículas de zircônio extraídas de plantas e biomassa para aplicações em implantes dentários.	Importância das nanopartículas na melhoria da resistência e flexibilidade dos implantes, além de sua biocompatibilidade.	Necessidade de mais pesquisas para explorar o potencial e segurança.
5	Gomes AM, et al., 2023	Superfícies de titânio revestidas com nanohidroxiapatite para melhorar a adesão e sobrevivência das células endoteliais.	Revestimento nHA promove a angiogênese, sugerindo potencial para melhorar a integração de implantes em pacientes diabéticos.	-
6	Kunrath MF, et al., 2023	Potencial de biomateriais nanotecnológicos e sistemas de entrega de medicamentos para implantes ancorados no osso.	Resultados pré-clínicos promissores, como a aceleração da cicatrização de tecidos e resposta antibacteriana aprimorada.	Necessidade de tratamentos clínicos personalizados e mais pesquisa.
7	Zhu B, et al., 2023	Destacar o papel das nanozimas na periodontologia e implantologia.	Uso de nanozimas em terapias antimicrobianas, anti-inflamatórias, e promoção de regeneração tecidual.	Potencial das nanozimas para aplicações terapêuticas inovadoras.
8	Matos GRM, 2022	Explorar nanotecnologias em superfícies de implantes dentários.	Avaliação da rugosidade nanométrica da superfície e sua relevância clínica.	Nanotecnologias devem ser desenvolvidas com foco em pacientes medicamente comprometidos.
9	Qiao et al., 2024	Modificação de superfícies de implantes de titânio com nanopartículas de prata.	Melhoria da estabilidade do implante e atividade antibacteriana.	A modificação com AgPIII mostrou estabilidade e potencial osteogênico.

10	Çayır Bozoğlu Ü, et al., 2022	Aplicação de hidroxiapatite nanoestruturada dopada com boro em implantes PEEK.	Melhora na adesão e proliferação celular, e diferenciação osteogênica.	Potencial para implantes com maior potencial osteogênico.
11	Silva RCS, et al., 2022	Melhorar a biocompatibilidade e prevenir infecções em implantes dentários de titânio.	Avanços nanotecnológicos em revestimentos e tratamentos de superfície.	Redução do risco de infecções e melhoria no sucesso a longo prazo dos implantes.
12	Li X, et al., 2022	Explorar aplicações de materiais baseados em grafeno em odontologia.	Propriedades físico-químicas, morfologia, biocompatibilidade e atividade antimicrobiana.	Necessidade de mais pesquisa para entender os efeitos a longo prazo.
13	Komasa S, et al., 2022	Avanços em materiais dentários bio-nanotecnológicos.	Investigação sobre regeneração óssea e eficácia de materiais endodônticos.	Inovações bio-nanotecnológicas na odontologia.
14	Shin YC, et al., 2022	Aprimoramento da osteointegração de implantes dentários com óxido de grafeno reduzido.	Melhores resultados em adesão e proliferação celular, e osteogênese.	rGO como candidato promissor para implantes dentários e ortopédicos.
15	Accioni F, et al., 2022	Tendências em modificações de superfície para implantodontia.	Desenvolvimentos inovadores e aplicações analíticas.	Evolução histórica e estratégias de engenharia para revestimentos de superfície.
16	Zhang Y, et al., 2021	Avanços na nanoengenharia de implantes dentários de titânio.	Melhoria da osteointegração e integração com tecidos moles.	Necessidade de mais estudos de longo prazo.
17	Kang MS, et al., 2021	Potencial dos nanocompósitos à base de carbono para engenharia de tecidos dentários.	Reforço mecânico, promoção de osteointegração e propriedades antimicrobianas.	Futuros desenvolvimentos na funcionalização de superfícies com nanomateriais de carbono.
18	Rosa V, et al., 2021	Estabilidade e qualidade do revestimento de nanocamadas de grafeno em implantes de titânio.	Propriedades antiadesivas e potencial de melhoria na formação óssea.	Avanço para o uso clínico de implantes com maior potencial osteogênico.
19	Chopra, D., et al., 2021	Funções antibacterianas dos implantes de titânio com nanotecnologia e anodizados.	Necessidade de otimizar funções antibacterianas para combater a colonização bacteriana.	Desafios e expectativas futuras na personalização de implantes.
20	Kumaravel, V., et al., 2021	Revestimentos nanocompósitos antimicrobianos de TiO ₂ .	Eficácia na desinfecção de patógenos sob iluminação.	Tendências comerciais e desafios na aplicação de revestimentos.

21	Matos, 2021	Revisar rugosidade superficial em implantes e sua relação com a osteointegração.	Micro rugosidade e nano rugosidade contribuem para a melhoria da integração óssea.	Mais pesquisas clínicas necessárias para otimizar a rugosidade superficial.
22	Li et al., 2020	Conceber revestimentos antimicrobianos de nanopartículas para implantes.	Nanopartículas antimicrobianas prometem reduzir infecções relacionadas a implantes.	Considerações sobre fabricação e esterilização são essenciais para a aplicação clínica.
23	Kunrath et al., 2020	Avaliar a influência de superfícies biomédicas nanoestruturadas no comportamento celular.	Nanoestruturas induzem interações celulares específicas, promovendo propriedades biológicas promissoras.	Necessidade de mais estudos para entender as interações moleculares e celulares.
24	Xu et al., 2020	Revisar revestimentos nano/microestruturados em implantes de titânio.	Revestimentos melhoram a osteogênese e propriedades antibacterianas dos implantes.	Elementos biofuncionais em revestimentos de TiO ₂ mostram promessa para o sucesso clínico.
25	Pranno et al., 2020	Investigar a atividade antibacteriana de superfícies de titânio revestidas com grafeno.	Revestimento com grafeno melhora as propriedades antibacterianas dos implantes.	Revestimentos de grafeno são promissores para prevenir infecções relacionadas a implantes.
26	Souza et al., 2019	Explorar modificação de superfície de implantes de titânio na nanoescala.	Funcionalização aumenta a bioatividade e hidrofília das superfícies de implantes.	Desafios incluem custo e validação clínica das tecnologias emergentes.
27	Iviglia et al., 2019	Discutir avanços nanotecnológicos para regeneração periodontal.	Materiais bioativos promovem regeneração de tecidos saudáveis.	Implantes multifuncionais com camadas múltiplas podem efetivamente gerenciar defeitos periodontais.
28	Azzawi et al., 2018	Avaliar a osteointegração de nanopartículas de TiO ₂ em implantes dentários.	Implantes tratados a laser mostram melhor integração óssea e resistência de ligação.	Técnicas de laser oferecem uma alternativa eficaz para revestimento de implantes.
29	Yazdani et al., 2018	Destacar vantagens do revestimento de nanohidroxiapatite em implantes de titânio.	Nano-HA promove melhor ligação ao osso e revestimento biomimético.	Necessidade de estudos adicionais sobre a interface célula-substrato para desenvolvimento eficaz.
30	Rasouli et al., 2018	Rever o papel da nanoestruturação na	Nanoestruturação promove uma osteointegração similar	A nanoestruturação pode melhorar a integração óssea

		performance de implantes dentários.	ou superior à micro rugosa.	de implantes dentários.
31	Oliscovicz NF, et al., 2018	Testar a atividade antimicrobiana de nanoparticulados em superfícies de implantes.	Inibição de crescimento contra patógenos comuns, mas não eficaz contra todos.	Nanopartículas oferecem promessa como revestimentos antimicrobianos, mas requerem mais estudo.
32	Lopez-Píriz R, et al., 2017	Avaliar a biocompatibilidade e a integração óssea de nanocompósitos Al ₂ O ₃ /Ce-TZP.	Excelente biocompatibilidade e alta taxa de integração óssea.	Nanocompósito Al ₂ O ₃ /Ce-TZP é uma alternativa promissora aos implantes tradicionais.
33	Pokrowiecki R, et al., 2017	Investigar implantes de titânio dopados com nanoprata.	Atividade antibacteriana significativa e perfil de liberação dependente da dose.	Dopagem com nanoprata melhora propriedades antibacterianas, mas há considerações toxicológicas.
34	Venugopal A, et al., 2017	Examinar propriedades antibacterianas de microimplantes ortodônticos revestidos com AgNPs.	Microimplantes tratados exibem propriedades antibacterianas excelentes.	Revestimentos com AgNPs são promissores para prevenir agregação microbiana em ortodontia.
35	Heo DN, et al., 2016	Avaliar a imobilização de GNPs em implantes dentários de titânio.	GNPs promovem rápida osteointegração e propriedades osteoindutivas.	Implantes de titânio com GNPs podem induzir a osteointegração e melhorar a formação óssea.
36	Claffey N, et al., 2015	Comparar osteointegração de implantes subperiosteais com duas técnicas de fixação.	Implantes em sulco ósseo mostram melhor integração do que colocação direta sobre o osso.	Técnica de sulco ósseo pode melhorar a osteointegração de implantes subperiosteais.
37	Choi AH, et al., 2015	Discutir o uso de nanobiomaterial coatings em odontologia.	Revestimentos nanobiomateriais melhoram bioatividade, confiabilidade e proteção.	Nanobiomateriais prometem melhorar a eficácia dos implantes dentários.
38	Salou L, et al., 2015	Comparar a osteointegração de implantes nanoestruturados com micro rugosos.	Superfícies nanoestruturadas promovem osteointegração similar ou superior.	Nanoestruturação é eficaz na melhoria da integração óssea de implantes dentários.
39	Goldman M, et al., 2014	Revisar o impacto de superfícies nanoestruturadas na proliferação de osteoblastos.	Superfícies nanoestruturadas melhoram significativamente a proliferação de osteoblastos.	Modificações nanoestruturadas são vantajosas para a osteointegração de implantes.

40	Choi AH, et al., 2014	Explorar o uso de modelagem por elementos finitos na nanomedicina e odontologia.	FEA auxilia na avaliação de implantes e na previsão de comportamento biomecânico.	FEA é uma ferramenta valiosa para o design e análise de implantes dentários.
41	Campos, M.R., et al.	-	Explorar a eficácia do vanadato de prata nanoestruturado em materiais dentários.	Demonstrou capacidade antimicrobiana sem alterar propriedades mecânicas.
42	Sasani N, et al., 2014	Caracterizar e avaliar propriedades nanomecânicas de revestimentos de implantes contendo CNTs decorados com cobre.	Melhoria significativa nas propriedades mecânicas dos revestimentos compósitos.	Adição de CNTs decorados com cobre aprimora as propriedades mecânicas do revestimento.
43	Memarzadeh K, et al., 2015	Avaliar revestimentos de nZnO para implantes dentários e ortopédicos.	Demonstrou atividade antimicrobiana significativa e suporte à proliferação e diferenciação celular.	nZnO oferece um revestimento ótimo combinando propriedades antimicrobianas e biocompatibilidade.
44	Adam M, et al., 2014	Investigar um novo material de revestimento nanoestruturado para implantes dentários.	Promoveu contato ósseo direto e aumentou o contato osso-implante nas primeiras semanas.	A matriz de sílica com hidroxiapatite nanocristalina é promissora para melhorar a osteointegração inicial.
45	Tomisa AP, et al., 2011	Melhorar implantes dentários com nanotecnologia.	Novos revestimentos e nanoestruturação promovem melhor integração óssea e durabilidade.	A nanotecnologia é chave para avanços futuros em implantes dentários mais eficazes.
46	Lee HJ, Yook JG	Rever tendências de biossensores RF para detecção biomolecular.	Melhoria de desempenho com nanomateriais diversos.	RF biossensores eficazes para biomoléculas diversas.
47	Mehrotra P, Chatterjee B, Sen S	Rever biossensores EM-wave incluindo RF, MW, mmW e THz.	Diferenciação de células cancerosas através de assinaturas dielétricas.	Diversas modalidades EM-wave eficazes para diagnósticos.
48	Ünlü MS, Chiari M, Özcan A	Discutir vantagens dos biossensores ópticos.	Alta sensibilidade e adaptação fácil para sistemas multiplexados.	Biossensores ópticos são cruciais na prática clínica moderna.
49	Damborský P, Švitel J, Katrlík J	Descrever tipos e aplicações de biossensores ópticos.	Detecção sensível e seletiva de uma ampla gama de analitos.	Biossensores ópticos oferecem detecção precisa para diversos analitos.
50	Okuzu Y, Fujibayashi S, Yamaguchi	Avaliar a atividade antibacteriana e a resposta celular osteogênica de implantes de Ti modificados para liberar íons de Sr e Ag.	Implantes tratados mostraram aumento significativo na atividade antibacteriana e	Implantes de Ti que liberam íons de Sr e Ag são promissores para aplicações clínicas devido às

	S, et al. 2021		melhor resposta osteogênica sem citotoxicidade.	suas habilidades antibacterianas e de promoção da osteointegração.
--	-------------------	--	---	--

Tabela I. *Síntese dos artigos utilizados.*

4. DISCUSSÃO

4.1. Capítulo 1 - Introdução à Convergência da Nanotecnologia e Implantologia

A medicina dentária enfrenta continuamente o desafio de restaurar a função e a estética dentária com soluções que ofereçam durabilidade, biocompatibilidade e integração tecidual ideal. Na vanguarda dessas soluções, a nanotecnologia emergiu

como um campo revolucionário, com a promessa de transformar a implantologia e superar limitações de tratamentos convencionais. Este capítulo introdutório destaca a importância crescente da nanotecnologia na medicina dentária, especialmente na área de implantes dentários, delineando como essa convergência de campos está definindo um novo paradigma no cuidado e reabilitação oral ^(1, 2, 25, 26).

A introdução da nanotecnologia na implantologia não é apenas uma evolução natural, mas uma necessidade impulsionada pela demanda por tratamentos mais eficientes, personalizados e minimamente invasivos. As propriedades únicas dos materiais nanoestruturados, juntamente com as técnicas avançadas de fabricação e caracterização, abriram novas possibilidades para o desenvolvimento de implantes dentários com superfícies otimizadas para a osteointegração, sistemas de liberação de medicamentos inovadores para a prevenção de infecções e estratégias de regeneração tecidual que promovem a cura e a reconstrução dos tecidos orais ^(3, 4, 5).

4.2. Capítulo 2 - Nanotopografia e Melhoria da Osteointegração em Implantes Dentários

A nanotecnologia tem revolucionado o campo da implantologia por meio do desenvolvimento de superfícies nanoestruturadas que promovem uma osteointegração acima da média. A precisão na criação de nanotopografias em implantes dentários imita a matriz extracelular do tecido ósseo, para facilitar a adesão, proliferação e diferenciação celular, que são essenciais para a formação óssea ao redor do implante. Este capítulo explora como a engenharia de superfícies em escala nanométrica contribui para melhorar a interação biológica entre o implante e o tecido ósseo, destacando os avanços significativos e os materiais envolvidos nesse processo ^(3, 4, 18, 24).

A aplicação de nanopartículas, como a zircônia e a hidroxiapatite, na superfície dos implantes tem demonstrado notáveis melhorias na biocompatibilidade e na osteointegração. Essas nanopartículas proporcionam uma superfície otimizada que facilita a adesão celular e a subsequente formação óssea, para acelerar o processo de cicatrização e melhorando a durabilidade do implante. Além disso, a capacidade destes materiais para serem precisamente manipulados em escala nanométrica permite a criação de superfícies com propriedades específicas desejadas para aplicações clínicas variadas ^(18, 19, 22).

A introdução de elementos bioativos nas nanotopografias, como íons de estrôncio e silício, oferece um potencial adicional para estimular a regeneração óssea e combater infecções bacterianas. A liberação controlada desses elementos no local do implante pode melhorar ainda mais a resposta biológica, promovendo um ambiente favorável à osteointegração e a reduzir o risco de falhas do implante devido a infecções ⁽²⁴⁾. Estudos recentes têm demonstrado que o tratamento de implantes de titânio com nanopartículas de Sr e Ag pode promover a formação óssea e aumentar a resposta osteogênica *in vitro* e *in vivo*. Por exemplo, o estudo de Okuzu et al. (2021) descobriu que implantes de Ti tratados para liberar íons Sr e Ag não mostraram citotoxicidade e induziram uma resposta osteogênica mais elevada em comparação com tratamentos convencionais. Estes íons parecem estimular a proliferação e diferenciação de osteoblastos enquanto reduzem a atividade e diferenciação de osteoclastos, equilibrando assim a remodelação óssea ⁽⁵⁰⁾.

Os desafios na implementação dessas tecnologias abrangem desde a fabricação e esterilização dos implantes até a avaliação da sua eficácia a longo prazo em ambientes clínicos reais. A colaboração entre pesquisadores, clínicos e fabricantes de dispositivos médicos é crucial para superar esses obstáculos e facilitar a tradução desses avanços do laboratório para a clínica ^(3, 4).

A nanotopografia representa um avanço promissor na engenharia de superfícies de implantes dentários, com o potencial de melhorar significativamente a osteointegração e o sucesso a longo prazo dos implantes. A pesquisa contínua e o desenvolvimento nessas áreas são fundamentais para explorar plenamente o potencial da nanotecnologia na implantologia, oferecendo novas soluções para os desafios enfrentados na reabilitação oral de pacientes ^(3, 4, 18, 19, 22, 24).

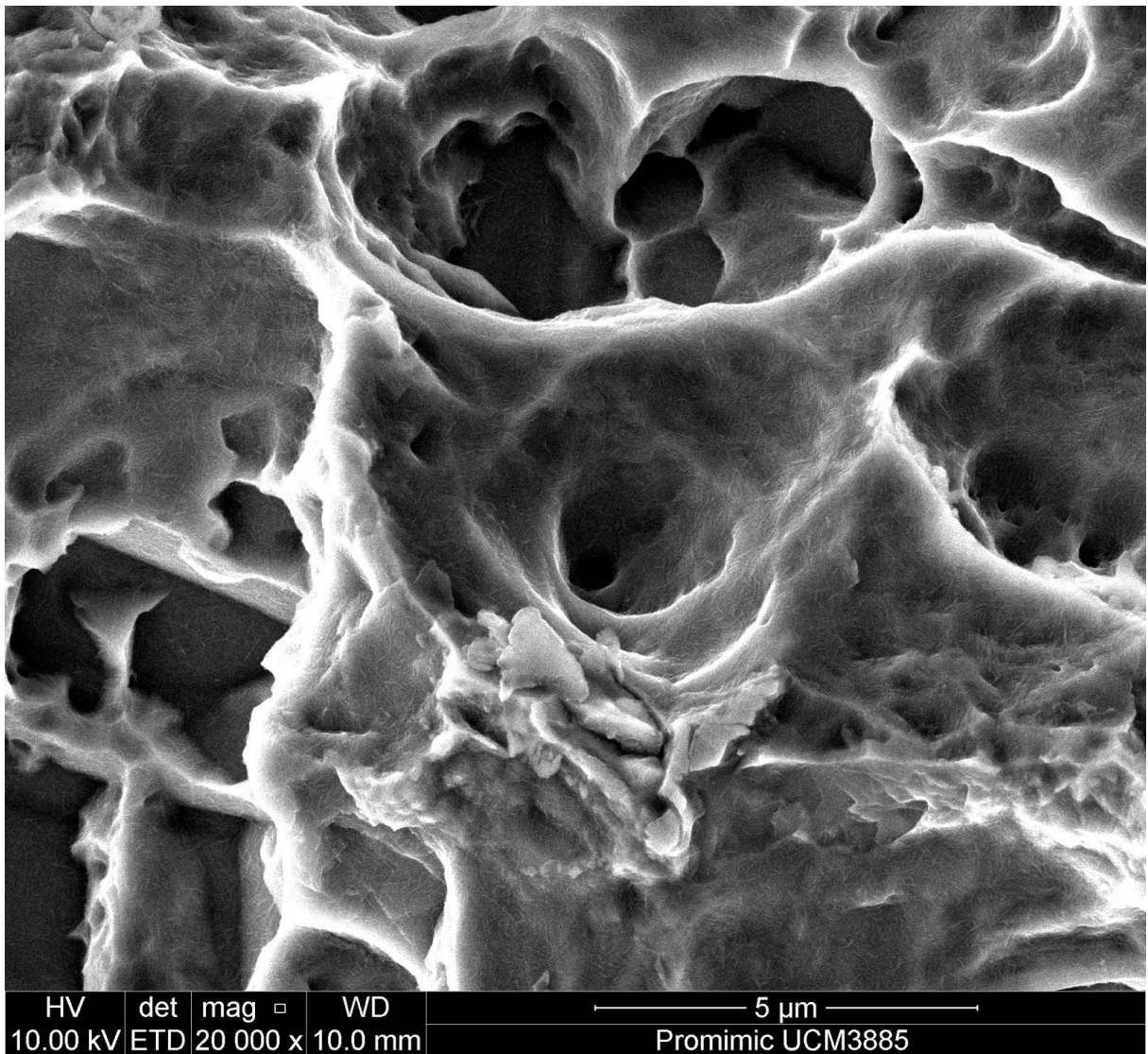


Figura 2. Fotomicrografias eletrônicas mostrando a superfície duplo ataque ácido depois de aplicada as nanopartículas de hidroxiapatite. Fonte: Prof. Dr. Roberto Pessoa e colaboradores; pesquisa de desenvolvimento da superfície HA Nano da S.I.N. Implant System – Brasil

4.3. Capítulo 3: Nanotecnologia e Liberação Controlada de Medicamentos em Implantologia

A interface entre a nanotecnologia e a implantologia tem inaugurado novas fronteiras no tratamento de condições periodontais e na otimização da osteointegração de implantes dentários, com um foco especial na liberação controlada de medicamentos. Esta abordagem revolucionária oferece uma solução direcionada

para combater infecções peri-implantares e acelerar o processo de cicatrização, isto garante resultados clínicos aprimorados e minimizando complicações ^(2, 5, 6).

O desenvolvimento de sistemas de liberação de drogas incorporados aos biomateriais dos implantes permite a entrega localizada de antibióticos e agentes anti-inflamatórios, proporcionando uma concentração terapêutica de medicamentos no sítio de implantação. Esta estratégia é particularmente valiosa para pacientes com alto risco de complicações, como aqueles com diabetes ou osteoporose, onde a regeneração tecidual é desafiadora ^(5, 6).

O fabrico desses sistemas de liberação de drogas enfrenta complexidades relacionadas à esterilização e à manutenção da estabilidade dos medicamentos. No entanto, a utilização de nanopartículas, como a zircônia e a hidroxiapatite, tem mostrado ser uma solução promissora. Essas nanopartículas não apenas melhoram a biocompatibilidade e a interação com o tecido ósseo, mas também funcionam como veículos para a liberação sustentada de medicamentos, potencializando a eficácia do tratamento e reduzindo o risco de infecções ^(3, 4).

A regulamentação rigorosa e os processos de aprovação para novos dispositivos médicos representam um desafio significativo para a introdução dessas inovações no mercado. No entanto, a colaboração contínua entre cientistas, fabricantes e reguladores é essencial para superar esses obstáculos e aproveitar plenamente os benefícios potenciais dessa tecnologia ^(2, 3, 4).

Além dos avanços na liberação de medicamentos, a pesquisa explora o uso de peptídeos antimicrobianos e a combinação de múltiplos agentes terapêuticos para equilibrar a eficácia antimicrobiana e minimizar o risco de desenvolver resistência bacteriana. Essas abordagens inovadoras prometem abrir novos caminhos para o tratamento personalizado e eficaz de complicações associadas aos implantes dentários ^(1, 5).

A integração da nanotecnologia na liberação controlada de medicamentos representa uma evolução significativa na implantologia. Superar os desafios técnicos e regulatórios permitirá que essa tecnologia revolucionária melhore significativamente o cuidado do paciente, oferecendo tratamentos mais eficientes, personalizados e menos invasivos. A pesquisa e o desenvolvimento contínuos são fundamentais para realizar o potencial dessas abordagens avançadas no tratamento dentário e periodontal ^(2, 3, 4, 5, 6).

4.4. Capítulo 4: Materiais Nanoestruturados em Tratamentos de Superfície para Implantes Dentários

A vanguarda da implantologia moderna inclui a aplicação de materiais nanoestruturados para o tratamento de superfície de implantes, visando melhorar a interação com o tecido ósseo e a longevidade do implante. Este capítulo examina a evolução e aplicação desses materiais, destacando sua importância na melhoria da osteointegração e na prevenção de infecções peri-implantares, dois pilares fundamentais para o sucesso dos implantes dentários ^(4, 5, 24).

O tratamento de superfície dos implantes dentários com materiais nanoestruturados, como nanopartículas de titânio, zircônia, e hidroxiapatite, é uma estratégia eficaz para aprimorar a bioatividade e a biocompatibilidade dos implantes. Esses materiais facilitam uma integração mais rápida e robusta entre o implante e o tecido ósseo, promovendo uma osteointegração eficaz e duradoura. Além disso, as superfícies tratadas nanoestruturalmente podem induzir a formação de apatite na superfície do implante quando expostas ao fluido corporal, o que é indicativo de uma excelente biocompatibilidade e osteocondução ^(18, 19).

Adicionalmente, a incorporação de nanopartículas com propriedades antimicrobianas, como a prata, oferece uma abordagem promissora para combater a colonização bacteriana e prevenir infecções peri-implantares. A capacidade destes materiais nanoestruturados para liberar íons de prata de forma controlada pode fornecer uma proteção antimicrobiana prolongada sem comprometer a osteointegração ^(10, 11).

A seleção e otimização dos materiais para tratamento de superfície requerem um entendimento profundo das interações material-tecido, bem como das propriedades mecânicas e químicas dos materiais. A pesquisa contínua nessa área tem o potencial de desbloquear novos materiais e técnicas que podem ser customizados para atender às necessidades específicas de cada paciente, levando a resultados clínicos ainda melhores ^(3, 4).

Os desafios enfrentados na implementação desses avanços tecnológicos incluem a necessidade de métodos de fabricação econômicos e eficientes que possam ser facilmente integrados aos processos de produção existentes. Além disso, a avaliação clínica de longo prazo dessas tecnologias é essencial para garantir a segurança e eficácia dos tratamentos de superfície baseados em materiais nanoestruturados ^(2, 24).

A investigação sobre revestimentos contendo nanotubos de carbono (CNTs) decorados com cobre e revestimentos de nZnO para implantes dentários apresenta um avanço notável nos tratamentos de superfície. Esses materiais demonstraram uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas dos revestimentos e oferecem uma combinação ideal de propriedades antimicrobianas e biocompatibilidade, destacando a importância da inovação material em alcançar melhores resultados clínicos ^(42, 43). Além disso, o estudo sobre o vanadato de prata nanoestruturado ilustra a potencial capacidade antimicrobiana de novos materiais, sem comprometer as propriedades mecânicas dos implantes dentários, ressaltando a relevância de explorar compostos inovadores na nanomedicina dentária ⁽⁴¹⁾.

Os materiais nanoestruturados desempenham um papel crucial no avanço dos tratamentos de superfície para implantes dentários, oferecendo soluções inovadoras para melhorar a osteointegração e prevenir infecções. À medida que a tecnologia continua a evoluir, espera-se que essas estratégias se tornem cada vez mais integradas à prática clínica, beneficiando pacientes e profissionais da área da saúde por meio de implantes mais confiáveis e duradouros ^(4, 5, 10, 11, 18, 19, 24).

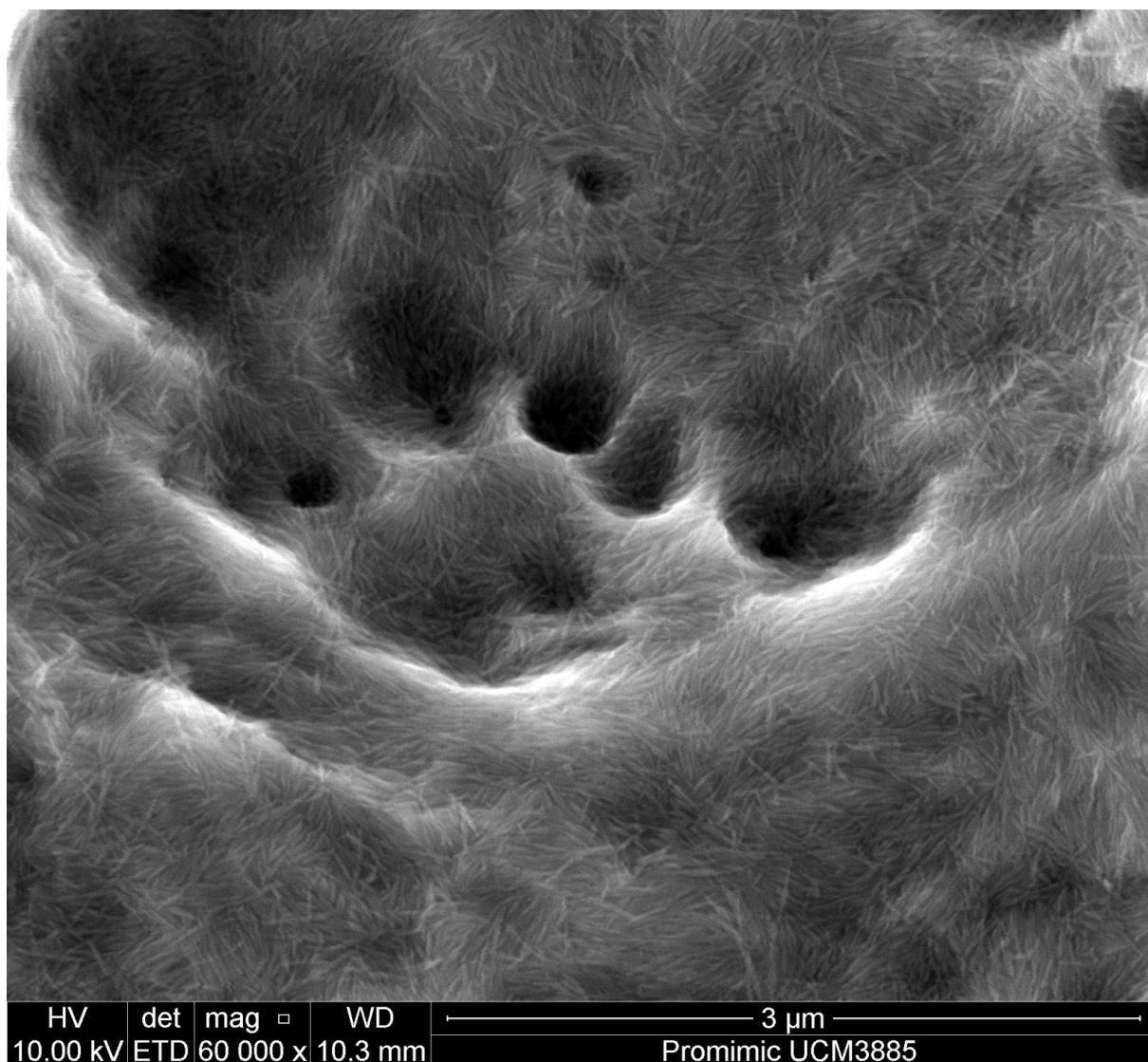


Figura 3. Nanopartículas recobrando a superfície do implante. Fonte: Prof. Dr. Roberto Pessoa e colaboradores; pesquisa de desenvolvimento da superfície HA Nano da S.I.N. Implant System – Brasil

4.5. Capítulo 5 - Nanotecnologia na Prevenção e Diagnóstico de Infecções Peri-Implantares

As infecções peri-implantares representam um dos maiores desafios para a longevidade e sucesso dos implantes dentários. A nanotecnologia oferece estratégias inovadoras para o diagnóstico precoce e prevenção dessas infecções, marcando um avanço significativo na manutenção da saúde peri-implantar. Este capítulo explora como os avanços nanotecnológicos estão sendo utilizados para detectar, prevenir e tratar infecções peri-implantares, destacando a importância dessa abordagem para melhorar os resultados clínicos dos pacientes ^(1, 5, 7). A capacidade antibacteriana das

nanopartículas é um atributo crucial para prevenir infecções pós-operatórias. Implantes modificados com nanopartículas de Ag mostraram eficácia antibacteriana significativa contra *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, como revelado por Okuzu et al. (2021). A presença de íons Ag interrompe a função da membrana bacteriana e inibe processos vitais dentro das células bacterianas, reduzindo assim o risco de infecção ⁽⁵⁰⁾.

O desenvolvimento de biossensores nanoestruturados para a detecção precoce de patógenos peri-implantares é uma das inovações mais promissoras nesta área. Esses dispositivos podem identificar sinais moleculares de infecção em estágios iniciais, permitindo intervenções precoces e mais eficazes. A aplicação desses biossensores pode transformar a maneira como as infecções peri-implantares são gerenciadas, oferecendo um monitoramento contínuo e não invasivo da saúde peri-implantar ^(7, 13). A leitura de biomarcadores detectados por biossensores nanoestruturados em implantes dentários pode ser realizada de várias maneiras, dependendo do design específico do biossensor e do tipo de sinal que ele gera. Leitura por Radiofrequência (RF): Alguns biossensores podem funcionar de maneira semelhante a um RFID (Identificação por Radiofrequência), onde um leitor RF externo envia um sinal ao biossensor, que responde com outro sinal codificado contendo as informações da detecção. Este sinal é então captado pelo leitor e convertido em dados analisáveis.

Leitura Óptica: Para biossensores que mudam de cor ou emitem luz (fluorescência) na presença de um biomarcador, um dispositivo de leitura óptica, como um scanner ou uma câmera especial, pode ser usado para detectar e quantificar essas alterações visuais ou luminescentes ^(46,47,48,49).

Além disso, a incorporação de nanopartículas antimicrobianas nos materiais de implante e revestimentos oferece uma abordagem proativa para prevenir a adesão e proliferação bacteriana. Nanopartículas de prata, por exemplo, têm sido amplamente estudadas por suas propriedades antimicrobianas, demonstrando eficácia na redução do risco de infecções peri-implantares sem comprometer a osteointegração ^(10, 11).

A liberação controlada de antibióticos a partir de revestimentos nanoestruturados é outra estratégia valiosa na prevenção de infecções peri-implantares. Esses sistemas podem fornecer concentrações terapêuticas de antibióticos diretamente no sítio do implante, minimizando o uso sistêmico de medicamentos e reduzindo o risco de desenvolvimento de resistência bacteriana. A personalização desses sistemas de liberação para atender às necessidades

específicas de cada paciente pode oferecer uma abordagem altamente eficaz para o manejo das infecções peri-implantares ^(5, 6).

Os desafios na aplicação dessas tecnologias incluem a necessidade de pesquisa adicional para compreender completamente os mecanismos de ação, a otimização dos sistemas de liberação de medicamentos para garantir a eficácia e segurança a longo prazo, e a integração dessas soluções na prática clínica de maneira econômica e acessível ^(2, 4).

A aplicação da nanotecnologia no diagnóstico e prevenção de infecções peri-implantares abre novos caminhos para a melhoria dos cuidados com implantes dentários. Através do desenvolvimento de biossensores para detecção precoce, revestimentos antimicrobianos e sistemas de liberação de medicamentos, é possível abordar proativamente as complicações associadas às infecções, garantindo melhores resultados para os pacientes e aumentando a longevidade dos implantes ^(1, 5, 7, 10, 11, 13).

4.6. Capítulo 6 - Nanotecnologia na Regeneração Tecidual: Avanços e Aplicações

A regeneração tecidual representa um pilar fundamental na implantologia, especialmente quando desafios como perda óssea significativa ou tecidos moles danificados são enfrentados. A nanotecnologia desempenha um papel vital nesse processo, fornecendo ferramentas e materiais inovadores que podem estimular a regeneração tecidual de maneira eficaz e direcionada. Este capítulo explora os avanços na aplicação da nanotecnologia para a regeneração óssea e tecidual, destacando materiais e estratégias inovadoras que estão remodelando as abordagens de tratamento na odontologia regenerativa ^(8, 9, 22, 24).

A aplicação de *scaffolds* nanoestruturados, por exemplo, tem mostrado grande promessa na promoção da regeneração óssea e no apoio ao crescimento de tecidos moles. Estes *scaffolds*, projetados com precisão na escala nanométrica, não apenas fornecem uma matriz para o crescimento celular, mas também podem ser funcionalizados com bioativos que promovem a proliferação e diferenciação celular. A capacidade de mimetizar a estrutura e composição da matriz extracelular natural faz desses *scaffolds* uma ferramenta poderosa na engenharia tecidual ^(18, 19).

Além disso, a utilização de nanopartículas para a entrega localizada de fatores de crescimento e outros agentes bioativos diretamente no sítio da regeneração

oferece uma abordagem altamente eficiente para estimular a regeneração tecidual. Essa estratégia permite uma liberação controlada e sustentada dos agentes regenerativos, maximizando sua eficácia e minimizando potenciais efeitos colaterais sistêmicos ^(5, 6).

A pesquisa na interface entre nanotecnologia e regeneração tecidual também está explorando o potencial de novos materiais, como nanofibras e hidrogéis nanoestruturados, que podem ser personalizados para atender às necessidades específicas de cada caso clínico. A flexibilidade desses materiais, juntamente com sua capacidade de integrar diversos bioativos, abre novos caminhos para tratamentos personalizados e altamente eficazes na regeneração tecidual ^(3, 4).

No entanto, apesar dos avanços promissores, existem desafios significativos que precisam ser superados para a implementação bem-sucedida dessas tecnologias. Questões relativas à biocompatibilidade, à estabilidade a longo prazo dos materiais nanoestruturados e aos efeitos da degradação dos biomateriais no organismo são críticas para garantir a segurança e a eficácia dos tratamentos de regeneração tecidual ^(2, 24).

Recentemente, foi investigado um novo material de revestimento nanoestruturado que promove contato ósseo direto e aumenta significativamente o contato osso-implante nas primeiras semanas após a implantação. A matriz de sílica com hidroxiapatite nanocristalina apresentada em estudo recente promete melhorar a osteointegração inicial, oferecendo um caminho promissor para aprimorar a regeneração tecidual e a integração dos implantes dentários ⁽⁴⁴⁾.

Em resumo, a nanotecnologia está no centro de importantes avanços na regeneração tecidual dentro da implantodontia, oferecendo novas esperanças para tratamentos que podem restaurar completamente a função e estética após a perda dentária. À medida que a pesquisa continua a avançar, é provável que vejamos a introdução de novas e ainda mais eficazes estratégias de regeneração tecidual, baseadas nas incríveis possibilidades oferecidas pela nanotecnologia ^(8, 9, 22, 24).

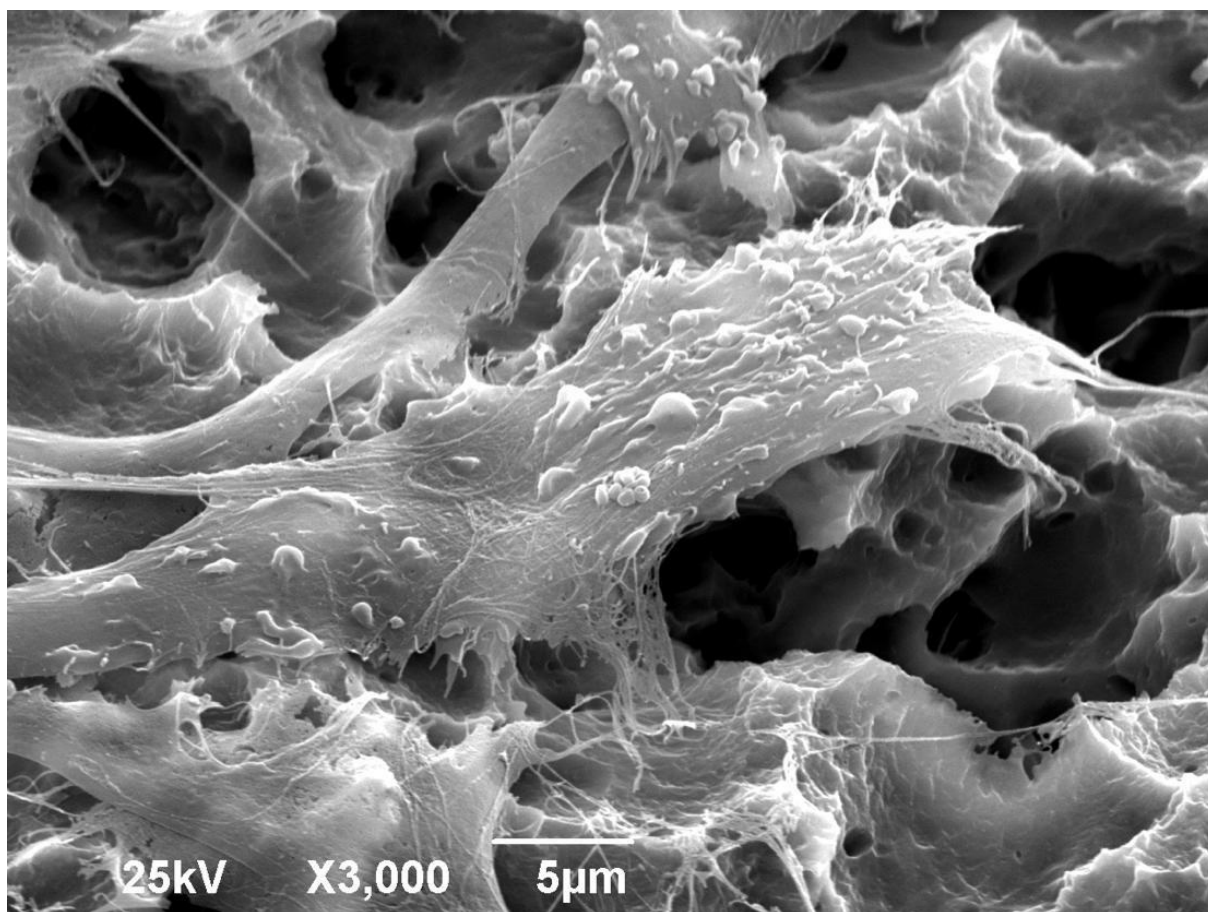


Figura 4. *Células mesenquimais se diferenciando em osteoblastos. Fonte: Prof. Dr. Roberto Pessoa e colaboradores; pesquisa de desenvolvimento da superfície HA Nano da S.I.N. Implant System – Brasil*

4.7. Capítulo 7 - O Futuro da Nanotecnologia na Implantologia

A jornada através da convergência da nanotecnologia com a implantodontia revela um futuro promissor, onde os limites da reabilitação oral são constantemente redefinidos. Os avanços discutidos nos capítulos anteriores não apenas ilustram o potencial da nanotecnologia em melhorar os resultados clínicos dos implantes dentários, mas também destacam a sua capacidade de oferecer soluções personalizadas e adaptadas às necessidades individuais dos pacientes ^(1, 2, 5, 6).

No entanto, a realização plena desse potencial não está isenta de desafios. Questões relacionadas à biocompatibilidade de longo prazo, à estabilidade dos materiais nanoestruturados, à regulamentação e à implementação clínica eficaz devem ser abordadas através de pesquisa contínua, desenvolvimento e colaboração interdisciplinar. A participação ativa de cientistas, clínicos, reguladores e,

crucialmente, dos próprios pacientes, será fundamental para navegar por esses desafios e garantir que os benefícios da nanotecnologia sejam acessíveis a todos que necessitam de cuidados odontológicos ^(24, 27, 28).

Ao olhar para o futuro, a nanotecnologia destaca-se como a chave para avanços em implantes dentários mais eficazes. A investigação sobre novos revestimentos e técnicas de nanoestruturação promete não apenas uma melhor integração óssea e durabilidade, mas também abre portas para soluções inovadoras que podem superar os desafios atuais na reabilitação oral. A visão de implantes dentários aprimorados através da nanotecnologia reflete o potencial ilimitado desta abordagem em transformar a implantologia ⁽⁴⁵⁾.

O futuro da implantologia, enriquecido pela nanotecnologia, promete não apenas a melhoria da qualidade de vida dos pacientes, mas também abre novas frentes de pesquisa e inovação que podem levar a descobertas ainda não imaginadas. À medida que continuamos a explorar e expandir os horizontes da nanotecnologia na medicina dentária, somos convidados a imaginar um mundo onde a perda dentária e as doenças orais podem ser abordadas não apenas com eficácia, mas com soluções que harmonizam perfeitamente com a biologia do corpo humano ^(1, 2, 3, 4, 5, 6).

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento e aplicação da nanotecnologia na implantologia têm proporcionado avanços significativos na otimização da osteointegração, na prevenção de infecções peri-implantares, e na regeneração tecidual. Os capítulos anteriores delinearão a importância da nanotopografia, os benefícios de materiais nanoestruturados em tratamentos de superfície, as estratégias eficazes de liberação controlada de medicamentos, e a aplicação de tecnologias emergentes para a regeneração tecidual.

A integração da nanotecnologia tem melhorado substancialmente as propriedades mecânicas e biológicas dos implantes dentários, evidenciando um impacto positivo na biocompatibilidade e na interação implante-tecido.

Sistemas de liberação de medicamentos nanoestruturados demonstraram ser essenciais para combater eficazmente infecções peri-implantares, reduzindo o risco de falha do implante.

Avanços em materiais e técnicas nanoestruturadas promovem a regeneração tecidual, abrindo novas possibilidades para tratamentos mais eficientes e personalizados.

Conclui-se que a nanotecnologia representa uma fronteira crucial na evolução da implantologia, oferecendo soluções inovadoras que atendem aos desafios atuais e futuros na reabilitação oral. A pesquisa contínua e a colaboração interdisciplinar são essenciais para superar os obstáculos técnicos e regulatórios, garantindo que os benefícios dessas tecnologias avançadas sejam plenamente realizados e acessíveis aos pacientes.

6. REFERÊNCIAS

1. Glowacka-Sobotta A, Ziental D, Czarczynska-Goslinska B, Michalak M, Wysocki M, Güzel E, Sobotta L. Nanotecnologia para Odontologia: Perspectivas e Aplicações. *Nanomateriais*. 2023 Jul 22;13(14):2130. doi: 10.3390/nano13142130.
2. Kunrath MF, Rubensam G, Rodrigues FVF, Marinowic DR, Sesterheim P, de Oliveira SD, Teixeira ER, Hubler R. Superfícies em nanoescala e liberação sustentável de antibióticos do revestimento polimérico para aplicação em implantes intra-ósseos e pilares transmucosais. *Colóides Surf B Biointerfaces*. 2023 Aug; 228:113417. doi: 10.1016/j.colsurfb.2023.113417. Epub 2023 19 de junho. PMID: 37356139
3. Gulati K, Chopra D, Kocak-Oztug NA, Verron E. Ajuste e esqueça: O futuro da terapia de implantes dentários através da nanotecnologia. *Adv Drug Deliv Rev*. 2023.
4. Hossain N, Mobarak MH, Hossain A, Khan F, Mim JJ, Chowdhury MA. Avanços de nanopartículas de zircônio extraídas de plantas e biomassa na aplicação de implantes dentários. *Heliyon*. 2023 6 de maio;9(5):e15973. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15973.
5. Gomes AM, da Silva DF, Bezerra FJ, Zambuzzi WF. Nanohydroxyapatite-Coated Titanium Surface Increases Vascular Endothelial Cells Distinct Signaling Responding to High Glucose Concentration. *J Funct Biomater*. 2023;14(4):188. doi: 10.3390/jfb14040188.
6. Kunrath MF, Shah FA, Dahlin C. "Feasibility of nano-engineered and drug-delivery biomaterials for bone-anchored implants and periodontal applications." *Mater Today Bio*. 2023 Feb; 18:100540. doi: 10.1016/j.mtbio.2022.100540.
7. Zhu B, Li L, Wang B, Miao L, Zhang J, Wu J. Introducing Nanozymes: New Horizons in Periodontal and Dental Implant Care. *ChemBiochem*. 2023 Apr 3;24(7): e202200636.doi: 10.1002/cbic.202200636. Epub 2023 Jan 4. Review. PubMed [citation] PMID: 36510344
8. Matos GRM. Nanotechnology in dental implants of medically compromised patients: is this the right way forward? *An Acad Bras Cienc*. 2022 Dec 2;94(suppl4):e20220467. doi: 10.1590/0001-376520220220467. eCollection 2022. No abstract available. PubMed [citation] PMID: 36477826
9. Qiao et al. Nanotechnology Applied to Implantology: A Literature Review on Surface Treatment and Its Impacts on Osseointegration. 2024

10. Çayır Bozoğlu Ü, Kiremitçi A, Yurtsever MÇ, Gümüşderelioğlu M. Peek dental implants coated with boron-doped nano-hydroxyapatites: Investigation of in-vitro osteogenic activity. *J Trace Elem Med Biol.* 2022 Sep; 73:127026. doi: 10.1016/j.jtemb.2022.127026. Epub 2022 Jun 21. PubMed [citation] PMID: 35797924.
11. Silva RCS, Agrelli A, Andrade AN, Mendes-Marques CL, Arruda IRS, Santos LRL, Vasconcelos NF, Machado G. Titanium Dental Implants: An Overview of Applied Nanobiotechnology to Improve Biocompatibility and Prevent Infections. *Materials (Basel).* 2022 Apr 27;15(9). pii: 3150. doi: 10.3390/ma15093150. Review. PubMed [citation] PMID: 35591484, PMCID: PMC9104688
12. Li X, Liang X, Wang Y, Wang D, Teng M, Xu H, Zhao B, Han L. Graphene-Based Nanomaterials for Dental Applications: Principles, Current Advances, and Future Outlook. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022 Mar 10; 10:804201. doi: 10.3389/fbioe.2022.804201. eCollection 2022. Review.
13. Komasa S, Okazaki J. Special Issue: Advances in Dental Bio-Nanomaterials. *Materials (Basel).* 2022 Mar 12;15(6). pii: 2098. doi: 10.3390/ma15062098.
14. Shin YC, Bae JH, Lee JH, Raja IS, Kang MS, Kim B, Hong SW, Huh JB, Han DW. Enhanced osseointegration of dental implants with reduced graphene
15. Accioni F, Vázquez J, Merinero M, Begines B, Alcludia A. Latest Trends in Surface Modification for Dental Implantology: Innovative Developments and Analytical Applications. *Pharmaceutics.* 2022 Feb 21;14(2). doi: 10.3390/pharmaceutics14020455.
16. Zhang Y, Gulati K, Li Z, Di P, Liu Y. Dental Implant Nano-Engineering: Advances, Limitations and Future Directions. *Nanomaterials (Basel).* 2021 Sep 24;11(10). doi: 10.3390/nano11102489.
17. Kang MS, Jang HJ, Lee SH, Lee JE, Jo HJ, Jeong SJ, Kim B, Han DW. Potential of Carbon-Based Nanocomposites for Dental Tissue Engineering and Regeneration. *Materials (Basel).* 2021 Sep 6;14(17):5104. doi: 10.3390/ma14175104.
18. Rosa V, Malhotra R, Agarwalla SV, et al. Graphene Nanocoating: High Quality and Stability upon Several Stressors. *J Dent Res.* 2021;100(10):1169-1177. doi:10.1177/00220345211024526.
19. Chopra, D., Gulati, K., & Ivanovski, S. (2021). Understanding and optimizing the antibacterial functions of anodized nano-engineered titanium implants. *Acta Biomaterialia*, 127, 80-101. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.03.027>

20. Kumaravel, V., Nair, K. M., Mathew, S., Bartlett, J., Kennedy, J. E., Manning, H. G., ... & Pillai, S. C. (2021). Antimicrobial TiO₂ nanocomposite coatings for surfaces, dental and orthopaedic implants. *Chemical Engineering Journal*, 416, 129071. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129071>
21. Matos, G. R. M. (2021). Surface Roughness of Dental Implant and Osseointegration. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 20(1), 1-4.
22. Li, X., Huang, T., Heath, D. E., O'Brien-Simpson, N. M., & O'Connor, A.J.
23. Kunrath, M. F., Diz, F. M., Magini, R., & Galárraga-Vinueza, M. E. (2020). Nanointeraction: The profound influence of nanostructured and nano-drug delivery biomedical implant surfaces on cell behavior. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102265.
24. Xu, N., Fu, J., Zhao, L., Chu, P. K., & Huo, K. (2020). Biofunctional Elements Incorporated Nano/Microstructured Coatings on Titanium Implants with Enhanced Osteogenic and Antibacterial Performance. *Advanced Healthcare Materials*.
25. Pranno, N., et al. (2020). Antibacterial Activity against *Staphylococcus Aureus* of Titanium Surfaces Coated with Graphene Nanoplatelets to Prevent Peri-Implant Diseases. An In-Vitro Pilot Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1568.
26. Souza, J. C. M., et al. (2019). Nano-scale modification of titanium implant surfaces to enhance osseointegration. *Acta Biomaterialia*, 94, 112-131.
27. Iviglia, G., Kargozar, S., & Baino, F. (2019). Biomaterials, Current Strategies, and Novel Nano-Technological Approaches for Periodontal Regeneration. *J Funct Biomater*, 10(1), E3.
28. Azzawi ZGM, Hamad TI, Kadhim SA, Naji GA. Osseointegration evaluation of laser-deposited titanium dioxide nanoparticles on commercially pure titanium dental implants. *J Mater Sci Mater Med*. 2018 Jun 26;29(7):96. doi: 10.1007/s10856-018-6097-6.
29. Yazdani J, Ahmadian E, Sharifi S, Shahi S, Maleki Dizaj S. A short view on nanohydroxyapatite as coating of dental implants. *Biomed Pharmacother*. 2018 Sep; 105:553-557. doi: 10.1016/j.biopha.2018.06.013. Epub 2018 Jun 7. Review. PubMed PMID: 29886376
30. Rasouli R, Barhoum A, Uludag H. A review of nanostructured surfaces and materials for dental implants: surface coating, patterning and functionalization for

improved performance. *Biomater Sci.* 2018 May 29;6(6):1312-1338. doi: 10.1039/c8bm00021b. Review. PubMed PMID: 29744496.

31. Oliscovicz NF, de Castro DT, Valente MLDC, Watanabe E, Lepri CP, Dos Reis AC. Surface treatment of implant materials with antimicrobial nanoparticulates. *Gen Dent.* 2018 Jan-Feb;66(1):66-73. PubMed PMID: 29303754.

32. Lopez-Píriz R, Fernández A, Goyos-Ball L, Rivera S, Díaz LA, Fernández-Domínguez M, Prado C, Moya JS, Torrecillas R. Performance of a New Al₂O₃/Ce-TZP Ceramic Nanocomposite Dental Implant: A Pilot Study in Dogs. *Materials (Basel).* 2017 Jun 3;10(6):614. doi: 10.3390/ma10060614. PubMed PMID: 28772973, PMCID: PMC5553522.

33. Pokrowiecki, R., Zaręba, T., Szaraniec, B., Pałka, K., Mielczarek, A., Menaszek, E., & Tyski, S. (2017). In vitro studies of nanosilver-doped titanium implants for oral and maxillofacial surgery. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 4285-4297. doi: 10.2147/IJN.S131163

34. Venugopal A, Muthuchamy N, Tejani H, Gopalan AI, Lee KP, Lee HJ, Kyung HM. Incorporação de nanopartículas de prata na superfície de microimplantes ortodônticos para obter propriedades antimicrobianas. *Ortodoria J coreana.* 2017 Jan;47(1):3-10. PMID: 28127534, PMCID: PMC5266125.

35. Heo DN, Ko WK, Lee HR, Lee SJ, Lee D, Um SH, Lee JH, Woo YH, Zhang LG, Lee DW, Kwon IK. Implantes dentários de titânio imobilizados na superfície com nanopartículas de ouro como agentes osteoindutivos para rápida osseointegração. *J Interface Colóide Sci.* 2016 Maio 1; 469:129-137. doi: 10.1016/j.jcis.2016.02.022. Epub 2016 6 de fevereiro. PubMed PMID: 26874978.

36. Claffey N, Bashara H, O'Reilly P, Polyzois I. Evaluation of New Bone Formation and Osseointegration Around Subperiosteal Titanium Implants with Histometry and Nanoindentation. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2015 Sep-Oct;30(5):1004-10. doi: 10.11607/jomi.3647. PubMed PMID: 26394334.

37. Choi AH, Cazalbou S, Ben-Nissan B. Nanobiomaterial Coatings in Dentistry. *Front Oral Biol.* 2015; 17:49-61. doi: 10.1159/000381693. Epub 2015 Jul 20. Review. PubMed PMID: 26201276.

38. Salou L, Hoornaert A, Stanovici J, Briand S, Louarn G, Layrolle P. Comparative bone tissue integration of nanostructured and microroughened dental implants. *Nanomedicine (Lond).* 2015;10(5):741-51. doi: 10.2217/nnm.14.223. PubMed PMID: 25816877.

39. Goldman M, Juodzbaly G, Vilkinis V. Titanium surfaces with nanostructures influence on osteoblasts proliferation: a systematic review. *J Oral Maxillofac Res.* 2014 Oct 1;5(3): e1. doi: 10.5037/jomr.2014.5301. eCollection 2014 Jul. Review. PubMed PMID: 25386228, PMCID: PMC4219860
40. Choi AH, Conway RC, Ben-Nissan B. Finite-element modeling and analysis in nanomedicine and dentistry. *Nanomedicine (Lond).* 2014 Aug;9(11):1681-95. doi: 10.2217/nnm.14.75. Review. PubMed PMID: 25321169
41. de Campos MR, Botelho AL, Dos Reis AC. Nanostructured silver vanadate decorated with silver particles and their applicability in dental materials: A scope review. *Heliyon.* 2021;7(6):e07168. Published 2021 May 28. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e07168
42. Sasani N, Vahdati Khaki J, Mojtaba Zebarjad S. Characterization and nanomechanical properties of novel dental implant coatings containing copper decorated-carbon nanotubes. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2014 Sep; 37:125-32. doi: 10.1016/j.jmbbm.2014.05.003. Epub 2014 May 17. PubMed PMID: 24905179
43. Memarzadeh K, Sharili AS, Huang J, Rawlinson SC, Allaker RP. Nanoparticulate zinc oxide as a coating material for orthopedic and dental implants. *J Biomed Mater Res A.* 2015 Mar;103(3):981-9. doi: 10.1002/jbm.a.35241. Epub 2014 Jun 4. PubMed PMID: 24862288
44. Adam M, Ganz C, Xu W, Sarajian HR, Götz W, Gerber T. In vivo and in vitro investigations of a nanostructured coating material - a preclinical study. *Int J Nanomedicine.* 2014 Feb 14; 9:975-84. doi: 10.2147/IJN.S48416. eCollection 2014. PubMed PMID: 24627631, PMCID: PMC3931640
45. Tomisa AP, Launey ME, Lee JS, Mankani MH, Wegst UG, Saiz E. Nanotechnology approaches to improve dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2011;26 Suppl:25-44. PMID: 21464998, PMCID: PMC3087979
46. Lee HJ, Yook JG. Recent research trends of radio-frequency biosensors for biomolecular detection. *Biosens Bioelectron.* 2014;61:448-459. doi:10.1016/j.bios.2014.05.025
47. Mehrotra P, Chatterjee B, Sen S. EM-Wave Biosensors: A Review of RF, Microwave, mm-Wave and Optical Sensing. *Sensors (Basel).* 2019;19(5):1013. Published 2019 Feb 27. doi:10.3390/s19051013
48. Ünlü MS, Chiari M, Özcan A. Introduction to the special issue of optical biosensors. *Nanophotonics.* 2017;6:623-5

49. Damborský P, Švitel J, Katrlík J. Optical biosensors. *Essays Biochem.* 2016;60(1):91-100. doi:10.1042/EBC20150010
50. Okuzu Y, Fujibayashi S, Yamaguchi S, Masamoto K, Otsuki B, Goto K, Kawai T, Shimizu T, Morizane K, Kawata T, Shimizu Y, Hayashi M, Matsuda S. In vitro study of antibacterial and osteogenic activity of titanium metal releasing strontium and silver ions. *J Biomater Appl.* 2021;35(6):670-680.