



## Revestimentos em superfícies de implantes dentários visando a melhoria dos parâmetros de osseointegração

Coatings on the surfaces of dental implants aiming to improve osseointegration parameters

Revestimientos en las superficies de implantes dentales con el objetivo de mejorar los parámetros de oseointegración

Tomaz Bergue Bonina Ribeiro<sup>1</sup>, Luiz Henrique Rebouças Mota<sup>1</sup>, Zildenilson da Silva Sousa<sup>2,3</sup>, Khalil Fernandes Viana<sup>2</sup>, Jonas Nogueira Ferreira Maciel Gusmão<sup>2</sup>, Radamés Bezerra Melo<sup>4</sup>, Ana Beatriz Furtado de Oliveira<sup>4</sup>, Raissa Pinheiro Moraes<sup>1</sup>.

### RESUMO

**Objetivo:** Sintetizar dados da literatura científica sobre os atuais biomateriais de revestimento de superfície visando à melhoria da qualidade de osseointegração de implantes dentários (IDs). **Métodos:** Trata-se de uma revisão integrativa da literatura. As estratégias de busca foram desenvolvidas por meio da PubMed/Medline, Scielo, Lilacs e Google Scholar, utilizando os truncamentos dos *Medical Subject Headings* (MeSH) “*dental implants*”, “*osseointegration*”, “*biomaterials*”, “*coated materials*” e “*biocompatible*”, interligados por meio dos operadores booleanos “*and/or*”. O recorte temporal dos estudos incluídos foi de 10 anos (2014 a 2024), selecionando pesquisas *in vivo* publicadas em língua inglesa. **Resultados:** Com a busca, um total de 655 estudos foram localizados. Após a avaliação, 16 pesquisas foram incluídas. Alguns estudos sugeriram que a osseointegração tende a ocorrer de maneira mais rápida em implantes revestidos com hidroxiapatita (HA), mostrando-se uma escolha consistente. Observou-se uma prevalência de análises relacionadas à melhoria significativa da osseointegração em implantes metálicos, com possível aplicabilidade clínica em outros campos da medicina, como na ortopedia. **Considerações finais:** A HA apresentou uma prevalência como material de escolha, resultando em parâmetros adequados para a instalação de IDs, conduzindo o processo de reparo e neoformação óssea.

**Palavras-chave:** Biomateriais, Implantes dentários, Osseointegração.

### ABSTRACT

**Objective:** To synthesize data from the scientific literature on current surface coating biomaterials aimed at improving the quality of osseointegration of dental implants (DIs). **Methods:** This is an integrative literature review. The search strategies were developed through PubMed/Medline, Scielo, Lilacs and Google Scholar, using the truncations of the *Medical Subject Headings* (MeSH) “*dental implants*”, “*osseointegration*”, “*biomaterials*”, “*coated materials*” and “*biocompatible*”, interconnected through the Boolean operators “*and/or*”. The time frame of the included studies was 10 years (2014 to 2024), selecting *in vivo* research published in English. **Results:** With the search, a total of 655 studies were located. After the evaluation, 16 researches were included. Some studies have suggested that osseointegration tends to occur more quickly in implants coated with hydroxyapatite (HA), proving to be a consistent choice. A prevalence of analyses related to significant improvement in osseointegration in metal implants was observed, with possible clinical applicability

<sup>1</sup> Centro Universitário Maurício de Nassau (UNINASSAU), Fortaleza - CE.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza - CE.

<sup>3</sup> Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Fortaleza - CE.

<sup>4</sup> Faculdade Paulo Picanço (FAPP), Fortaleza - CE.

in other fields of medicine, such as orthopedics. **Final considerations:** HA was prevalent as the material of choice, resulting in adequate parameters for the installation of IDs, leading to the process of repair and bone neoformation.

**Keywords:** Biomaterials, Dental implants, Osseointegration.

## RESUMEN

**Objetivo:** Sintetizar datos de la literatura científica sobre biomateriales de recubrimiento de superficies actuales con el objetivo de mejorar la calidad de la osteointegración de implantes dentales (DI). **Métodos:** Se trata de una revisión integradora de la literatura. Las estrategias de búsqueda se desarrollaron a través de PubMed/Medline, Scielo, Lilacs y Google Scholar, utilizando los truncamientos de los Medical Subject Headings (MeSH) “dental implants”, “osseointegration”, “biomaterials”, “coated materials” y “biocompatible”. interconectados a través de los operadores booleanos “y/o”. El marco temporal de los estudios incluidos fue de 10 años (2014 a 2024), seleccionando investigaciones in vivo publicadas en inglés. **Resultados:** Con la búsqueda se localizaron un total de 655 estudios. Después de la evaluación, se incluyeron 16 estudios. Algunos estudios han sugerido que la osteointegración tiende a ocurrir más rápidamente en implantes recubiertos con hidroxapatita (HA), lo que demuestra ser una opción consistente. Se observó un predominio de análisis relacionados con la mejora significativa de la osteointegración en implantes metálicos, con posible aplicabilidad clínica en otros campos de la medicina, como la ortopedia. **Consideraciones finales:** El HA prevaleció como el material de elección, lo que resultó en parámetros adecuados para la instalación de ID, impulsando el proceso de reparación y formación de hueso nuevo.

**Palabras clave:** Biomateriales, Implantes dentales, Oseointegración.

## INTRODUÇÃO

O advento da terapia com implantes dentários (IDs) osseointegráveis de titânio (Ti) marcou um avanço significativo na prática odontológica, trazendo uma notável taxa de sucesso clínico em sua aplicabilidade (ŁUKASZEWSKA KM, et al., 2019). Segundo Branemark (1969), o termo osseointegração se refere ao contato direto entre o osso vivo e a superfície de um implante, de forma que essa ancoragem seja suficiente para suportar a carga funcional no paciente.

Assim, antes de um ID ser considerado osseointegrado, é fundamental que ele atenda a determinados critérios essenciais, como a necessidade de possuir uma base feita de material adequado, uma estrutura porosa que simule as características biomiméticas, além de uma interface de contato bioativa (CHEN HT, et al., 2021). Apesar disso, à medida em se observa o aumento da taxa de implantes instalados na população mundial, as complicações biológicas associadas a esses dispositivos também aumentam, seja antes, durante ou após o processo de osseointegração (DE AVILA ED, et al., 2020).

Vários pesquisadores têm proposto diferentes tratamentos de superfície para IDs, visando melhorar o contato com o osso e aumentar a densidade óssea (CÓRDOBA A, et al., 2018; TANG R, et al., 2022; DE OLIVEIRA PGFP, et al., 2021; VĀRUŢ RM, et al., 2020). Mais recentemente, o critério da interface de contato bioativa entre implante e osso tem se tornado uma área em constante evolução na pesquisa de implantes endósseos, principalmente no que se refere a alteração da superfície de IDs visando o aprimoramento do processo de osseointegração (DE OLIVEIRA PGFP, et al., 2021). Tais técnicas incluem o uso de revestimentos bioativos e a modificação da superfície por meio de técnicas como o ataque ácido e o jateamento (ALENEZI A, et al., 2019).

Materiais bioativos, como a hidroxapatita sintética (HAp) e o vidro bioativo (BAG), são destacados na literatura, possuindo a capacidade de formar uma ligação química com o tecido ósseo através da formação de uma camada de apatita mais resistente do que o osso ou a cerâmica individualmente (VĀRUŢ RM, et al., 2020). No entanto, o revestimento de HAp em implantes apresenta algumas limitações, como a possibilidade de descolamento, reabsorção e uma taxa lenta de osseointegração (ALENEZI A, et al., 2019), o que pode comprometer a estabilidade a longo prazo dos implantes nos tecidos ósseos (AMLER MH, et al., 1960).

É sabido que materiais de base biocompatíveis facilitam a migração das células osteoprogenitoras em direção ao implante, as quais podem se diferenciar em osteoblastos e promover a neoformação óssea (CHEN HT, et al., 2021). Contudo, desafios contínuos no tratamento de condições relacionadas à má qualidade óssea

ou deficiências no processo de cicatrização ainda se fazem presentes (LIU J; KERNS DG, 2014), o que faz surgir a necessidade de mais pesquisas.

Além disso, embora apresente propriedades mecânicas e biológicas adequadas em IDs, seus recursos antimicrobianos são limitados para prevenir a colonização por microrganismos (TOITA R, et al., 2022), o que posteriormente pode acarretar uma infecção microbiana, sendo esta a principal causa de falha no tratamento com IDs (HE W, et al., 2019)

Portanto, garantir uma estabilidade adequada do implante é essencial para garantir o sucesso da osseointegração (LIU J e KERNS DG, 2014). Logo, desenvolver biomateriais capazes de reduzir as respostas inflamatórias infecciosas aos tecidos, ao mesmo tempo em que fortalecem os processos pró-resolução, é essencial para estimular a regeneração dos tecidos, além de garantir que o tratamento com implante alcance o seu objetivo (TOITA R, et al., 2022). O objetivo do estudo foi sintetizar dados da literatura científica acerca dos atuais materiais de revestimento de superfície visando a melhoria da qualidade de osseointegração em IDs.

## MÉTODOS

### Desenho do estudo

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura. Para a realização, foi preconizada as seis etapas operacionais descritas por SOUZA MT, et al. (2010), sendo elas: 1º) criação da pergunta norteadora, 2º) localização dos artigos na literatura, 3º) coleta das informações obtidas para a transcrição de dados, 4º) avaliação dos manuscritos previamente localizados visando a sua inclusão definitiva, 5º) análise entre os principais achados nos estudos selecionados, 6º) apresentação dos novos dados qualitativos na literatura científica.

### Estratégia de busca

A seguinte questão foi formulada para que fosse realizada a busca de estudos na literatura: “Quais são os principais biomateriais de revestimento de superfície de IDs atualmente disponíveis e que apresentam melhores resultados nos parâmetros de osseointegração?” Este tópico foi elaborado usando a estratégia PICO (SANTOS CM, et al., 2007): População (P): Estudos *in vivo*; Intervenção (I): revestimento da superfície de IDs; Controle (C): não aplicável; Desfechos (O): Regeneração/reparação óssea/osseointegração.

Para identificar os estudos a serem incluídos nesta revisão, uma busca eletrônica no PubMed/MEDLINE, *Scientific Electronic Library Online* (SCIELO), Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS) e *Google Scholar* foi idealizada. Truncamentos apropriados e combinações de palavras foram selecionados e adaptados para cada pesquisa nos bancos de dados, utilizando os operadores booleanos 'AND/OR'. Os seguintes *Medical Subject Headings* (Mesh) foram usados para localização dos estudos primários: “*dental implants*”, “*osseointegration*”, “*biomaterials*”, “*coated materials*” e “*biocompatible*”.

Para seleção dos artigos, os examinadores foram treinados para aplicar os critérios de seleção dos estudos que aconteceu em duas fases. A fase 1 envolveu a análise dos títulos e resumos de todos os artigos obtidos nas bases de dados para selecionar os estudos a serem lidos na íntegra. A fase 2 incluiu a leitura completa dos artigos escolhidos na fase 1 para avaliar a elegibilidade pelos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

### Critérios de inclusão e exclusão

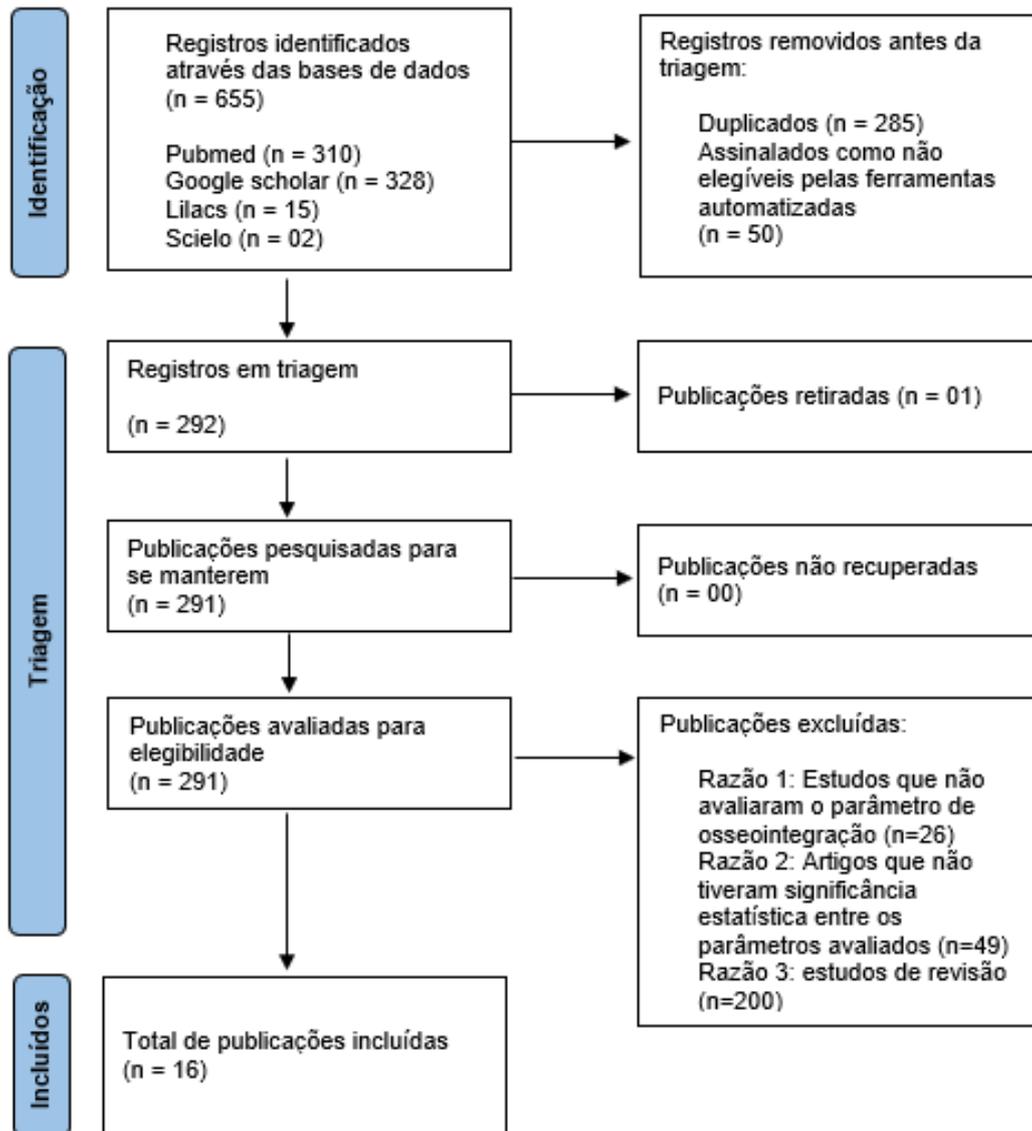
Foram incluídos estudos *in vivo*, publicados na língua inglesa, que avaliaram diferentes métodos de osseointegração de IDs, e que observaram uma redução do tempo da osseointegração. Por outro lado, foram removidas revisões de literatura (narrativa, integrativa e de escopo), teses e/ou dissertação de mestrado ou doutorado, notas do editor, estudos em duplicidade, anais de evento, dados inferiores a 2014, estudos epidemiológicos, *in vitro*, transversais, artigos de opinião, estudos que não avaliavam a qualidade de osseointegração de implantes dentários e não escritos no alfabeto latino (romano).

## RESULTADOS

### Seleção dos estudos

Com base na análise dos títulos e resumos, aplicando todos os critérios de elegibilidade previamente estabelecidos, foi possível selecionar 16 estudos para inclusão na amostra final. A fim de ilustrar de forma clara o processo metodológico utilizado durante a busca nas bases de dados, a **Figura 1** foi desenvolvida.

**Figura 1** – Diagrama de fluxo, adaptado de PRISMA (2020), ilustrando a sequência de seleção de estudos.



Fonte: Ribeiro TBB, et al., 2025.

### Características dos estudos

A hidroxiapatita foi um dos biomateriais mais amplamente empregados na superfície de implantes. Assim, um total de quatro estudos *in vivo* utilizaram o biomaterial hidroxiapatita (ALMEIDA D, et al., 2023; LIU L, et al., 2020; MISTRY S, et al., 2021; DAS S, et al., 2019) visando a análise de osseointegração na tíbia, crista ílica e mandíbula.

Os estudos incluídos foram publicados em 2019 (n = 5), 2020 (n = 5), 2022 (n = 4) e 2023 (n = 2), com tempo de análise variável de duas a 24 semanas. Alguns estudos sugeriram que a osseointegração tende a ocorrer de maneira mais rápida e firme em implantes revestidos com hidroxiapatita, mostrando-se uma

escolha consistente (ALMEIDA D, et al., 2023; LIU L, et al., 2020; MISTRY S, et al., 2021; DAS S, et al., 2019; HE W, et al., 2019).

Entre esses tratamentos, a avaliação de estruturas micro e macroporosas nas superfícies de Ti tem sido conduzida com o objetivo de promover uma maior aposição óssea peri-implantar durante os estágios iniciais da formação óssea. Outros materiais demonstraram prevalência, como o ataque ácido (n = 3), fosfato de titânio dopado com cálcio e peptídeos p17 e p144 (n = 1). Ao todo, um total de 294 animais foram avaliados, incluindo estudos com ratos (n = 170), coelhos (n = 95), ovelhas (n = 10), cães Beagle (n = 10) e cabras (n = 9). Foi previamente elaborada uma tabela customizada com as variáveis de interesse do estudo, a qual foi utilizada para a extração e tabulação dos dados (**Quadro 1**).

**Quadro 1** - Variáveis de interesse extraídas dos estudos tabulados.

Autor/ano	Revestimento da superfície do implante	Amostra utilizada	Número e local de inserção do implante	Tempo de osseointegração	Parâmetros de osseointegração /resultados
He W, et al. (2019)	SLA e MAO.	04 cães beagles.	24 implantes de titânio, diâmetro, 30 mm; espessura, 2 mm em cada fêmur.	Entre 01 e 03 meses.	Melhor formação óssea ao redor dos implantes e uma osseointegração mais eficaz.
Das S, et al. (2019)	Policaprolactona 5,0%, gelatina tipo A 0,5%, (p/v), ácido ascórbico 0,04% e HA 0,04%.	06 coelhos brancos da raça Nova Zelândia.	Implantes tipo parafuso de titânio não revestidos como controles. Local: tíbia.	02, 04, 06, 08 e 12 semanas.	Notável promoção da osseointegração em comparação com os implantes metálicos disponíveis.
Huang TB, et al. (2019)	Ácido clorídrico 5,8 mol L <sup>-1</sup> e Solução de ácido sulfúrico 8,96 mol L <sup>-1</sup> a 80 °C.	30 coelhos brancos da raça Nova Zelândia.	Implantes SLA e SLA-Li. local: osso trabecular do côndilo femoral.	02, 04 e 08 semanas.	Material promissor para a promoção da formação óssea e a regeneração óssea.
Scara no A, et al. (2019)	Ácido duplo revestida com colágeno tipo I.	18 coelhos brancos da raça Nova Zelândia.	36 implantes (4 x 13), 18 jateados e gravados com ácido duplo revestidos com colágeno tipo I na articulação femoral Joelho.	15, 30 e 60 dias.	Técnica promissora, capaz de aprimorar a osseointegração, especialmente em áreas com baixa densidade óssea.
Yin D, et al. (2019)	MAP.	10 Ratos Sprague-Dawley.	Discos de Ti, diâmetro 15 mm; espessura 1 mm, Implantes de parafuso de titânio puro, diâmetro externo 1,2mm; comprimento 12 mm. Local NE.	08 semanas.	O desenvolvimento de um implante composto TNS-MAP eficaz, que incorpora a excelente biocompatibilidade.
Cai B, et al. (2020)	CaTiP, Ti puro, TiP.	36 Ratos Dawley.	Ti, 99,99% de pureza usinados em discos de 10 mm x 1 mm e	04, 08 e 12 semanas.	Revestimento de Ca-TiP tem um amplo potencial de uso em

Autor/ano	Revestimento da superfície do implante	Amostra utilizada	Número e local de inserção do implante	Tempo de osseointegração	Parâmetros de osseointegração /resultados
			hastes de 1 mm x 10 mm. Local NE.		aplicações tanto ortopédicas quanto odontológicas para implantes.
Cirera A, et al. (2020)	Peptídeo P17 e P144.	06 cães da raça Beagle.	36 implantes (VEGA, Klockner®) com conexão interna de 3,5 x 8 mm em cada hemimandíbula.	02 e 04 e 08 semanas.	Melhorias significativas em parâmetros de osseointegração.
Liu L, et al. (2020)	nHA.	18 coelhos da raça Nova Zelândia.	Ti – 6Al – 4V foram inseridas nas tíbias nos diferentes grupos.	14 semanas.	Técnica promissora com potencial aplicação tanto na área odontológica quanto ortopédica, especialmente em contextos de pacientes com diabetes.
Mistry S, et al. (2020)	ZnHAp e Ti6Al4V.	9 cabras pretas de Bengala.	27 cilindros na mandíbula.	06, 12 e 24 semanas.	Abordagem mais apropriada para alcançar uma osseointegração segura e eficaz.
De Oliveira PGFP, et al. (2020)	HA.	72 ratos Wistar machos adultos.	Mini-implantes em tíbias de ratos.	07 e 30 dias.	Vantagens dos implantes com revestimento de nanohidroxiapatita na estimulação da formação óssea.
Li J, et al. (2022)	TFM.	14 coelhos da raça Nova Zelândia.	28 implantes (4 x 10 mm) instalados bilateralmente nos côndilos femorais.	14 semanas.	Os implantes exibiram uma maior densidade e espessura de trabéculas na área ao redor do implante.
Tang R, et al. (2022)	RGD, CaPNPs), TAT (MCPRT)/siRN A CKIP-1 e PLL.	09 coelhos brancos da raça Nova Zelândia.	IDs porosos e núcleo interno denso foram inseridos na tíbia medial anterior.	04, 08 e 12 semanas.	Novo material de implante com potencial para ser utilizado tanto na odontologia quanto na ortopedia.
Nemc akova I, et al. (2022)	Ti6Al4V.	44 coelhos brancos da raça Nova Zelândia.	Ti6Al4V na forma de parafusos autocortantes (HA 3,5x8 mm).	04 e 12 semanas.	A funcionalização da superfície do revestimento O-NCD com BMP-7 demonstra ser uma promissora

Autor/ano	Revestimento da superfície do implante	Amostra utilizada	Número e local de inserção do implante	Tempo de osseointegração	Parâmetros de osseointegração /resultados
					na melhoria da osseointegração.
Wheeli s SE, et al. (2022)	cpTi.	40 Ratos Lewis.	Pinos de dentina com rosca de cpTi Local: maxila.	02 e 14 dias.	Osseointegração bem-sucedida em todos os grupos, mostrando potencial para prevenir falhas.
Almeid a D, et al. (2023)	HA.	10 Ovelhas saudáveis.	20 implantes dentários de 3,5 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento na crista ilíaca.	14 e 28 dias.	A presença de HA promoveu a osseointegração de implantes odontológicos.
Wen Z, et al., (2023)	MTC e ZnO no nZnO / MTC-Ti.	08 Ratos Sprague-Dawley.	Diferentes implantes foram implantados na fossa alveolar.	02 e 08 semanas.	A eficácia dos implantes nZnO/MTC-Ti em promover a osseointegração mais rápida e inibir infecções bacterianas.

**Legendas:** Não especificado (NE); Arginina-glicina-aspartato (RGD); nanopartículas de fosfato de cálcio dopadas com Mg (CaPNPs); complexo ativador transcrito (TAT) (MCPRT)/siRNA CKIP-1; polilisina (PLL); Hidroxiapatita (HA); Revestimento de diamante nanocristalino (Ti6Al4V); Hidroxiapatita nanoestruturada altamente cristalina (nHA); Hidroxiapatita dopada com zinco (ZnHAp); Fosfato de titânio dopado com cálcio (CaTiP); Ataque ácido (SLA), oxidação por microarco (MAO) e SL-MAO; Discos de nanoestruturas de titânio (TNS); adesivo mexilhão proteína (MAP); Malha flexível de fibra de titânio (TFM); Uma liga convencional de implante de Ti (Ti6Al4V); Nanopartículas de ZnO em estrutura metalo-orgânica contendo Ti (nZnO / MTC-Ti).  
**Fonte:** Ribeiro TBB, et al., 2025.

## DISCUSSÃO

Visando o aprimoramento das características mecânicas e biológicas dos IDs, estudos envolvendo modificações nas superfícies de implantes vêm sendo desenvolvidos com o foco principal de aumentar o contato entre osso e implante, especialmente em áreas de tecido ósseo de baixa densidade. Essas abordagens visam direcionar a diferenciação das células-tronco mesenquimais para linhagens osteoprogenitoras, conduzindo o processo de reparo e neoformação óssea (DAS S, et al., 2019).

No entanto, é importante destacar que os implantes Ti muitas vezes podem falhar na osseointegração desejada devido à sua insatisfatória osteocondutividade de superfície, conforme observado por Huang TB, et al. (2019). Devido ao baixo estímulo à atividade biológica e ao potencial osteoindutor, os implantes de Ti geralmente demandam um tempo considerável para alcançar a completa maturidade da osseointegração (AJAMI E, et al., 2021).

Com o intuito de abordar de maneira eficaz os riscos de uma osseointegração insatisfatória ou de uma infecção, é essencial que o *design* dos IDs incorpore simultaneamente duas propriedades: osteoindutoras e antibacterianas, capazes de criar um ambiente imunológico ósseo favorável ao redor dos implantes (CÓRDOBA A, et al., 2018; ALIKHANI M, et al., 2017). Para superar essas questões, a modificação da microestrutura e a liberação dinâmica de componentes dos materiais dos implantes desempenham funções cruciais na relação entre a presença de microrganismos e células aderidas no ambiente peri-implantar (WEN Z, et al., 2023).

## Revestimos com hidroxiapatita

No estudo conduzido por Almeida D, et al. (2023), foi realizado um comparativo do desempenho biológico entre um novo revestimento nanoestruturado de hidroxiapatita (HA), chamado Epikut Plus, e um revestimento formado por uma dupla superfície de ataque ácido (DAA), Epikut. Foi observado por meio das análises biomecânicas que não houve diferenças significativas no sucesso da osseointegração entre as duas superfícies. No entanto, as análises histológicas revelaram uma diferença considerável em favor da superfície de HA nanoestruturada.

Tais achados corroboram com dados de Das S, et al. (2019), os quais observaram uma resposta biológica óssea mais robusta e benéfica, resultando em uma notável promoção da osseointegração em comparação com os implantes metálicos disponíveis comercialmente, quando se trata de implantes de titânio osteogênicos com revestimento nanofibrilar. Sob a mesma ótica, os resultados de Liu L, et al. (2020) indicam que o novo revestimento de Si-nHA tem potencial para mitigar os desafios da osseointegração, tornando-o uma escolha promissora como revestimento para IDs.

Sob outra perspectiva, em um estudo conduzido por Mistry S, et al. (2021), foi utilizada hidroxiapatita dopada com zinco (ZnHAp) em implantes de Ti6Al4V tratados hidrotermicamente (HT) e usinados (grupo controle). Observou-se que as superfícies de Ti mostraram boas características de segurança e uma osseointegração forte, embora mais tardia. Considerando a segurança e a eficácia a longo prazo, os autores concluíram que o tratamento hidrotérmico é um método excelente para a modificação da superfície de implantes de Ti, facilitando tanto a osseointegração precoce quanto a duradoura.

De Oliveira PGFP, et al. (2020) utilizaram nano-hidroxiapatita, o qual mostrou, através de análises microtomográficas e de expressão gênica, vantagens na instalação de implantes com revestimento de nano-hidroxiapatita na estimulação óssea. Os autores destacaram que essas vantagens estão relacionadas com a formação de osso novo em animais diabéticos, quando comparados às superfícies usinadas e às superfícies duplamente gravadas com ácido.

Outra abordagem visando o aprimoramento do desempenho biológico dos IDs envolve a modificação da superfície do implante com moléculas bioativas, com o propósito de controlar a resposta do organismo hospedeiro. Foi o que evidenciou o estudo de Córdoba A, et al. (2018), os quais demonstraram que superfícies de implantes nanorrevestidas com quercetina reduzem a atividade dos osteoclastos *in vitro* e *in vivo*, melhorando consideravelmente os parâmetros da osseointegração quando comparadas às superfícies não revestidas.

## Biocompatibilidade e regeneração óssea

No estudo conduzido por Yin D, et al. (2019), da mesma forma que no estudo de Wen Z, et al. (2023), também foram utilizados Sprague-Dawley. Na pesquisa, os discos TNS e a superfície do produto foram revestidos com MAP. Os resultados destacaram que o desenvolvimento de um implante composto TNS-MAP eficaz, que incorpora a excelente biocompatibilidade e as vantagens dos materiais originais TNS e MAP, sugere um novo material de implante com potencial para aplicação tanto na odontologia quanto na ortopedia.

Já no estudo de Tang R, et al. (2022), o material usado foi a arginina-glicina-aspartato enxertada com nanopartículas de fosfato de cálcio dopadas com Mg (CaPNP's) (RGD) e complexo ativador transcrito (TAT) (MCPRT)/siRNA CKIP-1 e PLL. Com base nesses dados, a criação de revestimentos bioativos de liberação lenta surge como uma estratégia eficaz para promover a formação precoce de osseointegração. No entanto, observou-se que sua aplicação clínica é limitada devido ao risco de danos por forças de cisalhamento em superfícies densas de implantes durante o procedimento de implantação.

No estudo de Li J, et al. (2022), foi utilizada malha flexível de fibra de titânio (TFM). Foram utilizados 28 implantes cilíndricos de Ti customizados com e sem camada de dois tipos diferentes de TFM, os quais foram fabricados e instalados bilateralmente nos côndilos femorais. Concluindo, os implantes TFM-22 exibiram uma maior densidade e espessura de trabéculas na área ao redor do implante.

O material utilizado por He W, et al. (2019) foi o SLA, MAO e SL-MAO. Ele utilizou cães da raça beagle, nos quais instalou discos de titânio puro (TA2) com diâmetro de 30 mm e espessura de 0,2 mm em cada fêmur. Nesse estudo, a técnica de modificação superficial SL-MAO aprimorou as características da superfície dos implantes de Ti, resultando em uma melhor formação óssea ao redor dos implantes e uma osseointegração mais eficaz.

Sob outra perspectiva, Huang TB, et al. (2019) utilizaram ácido clorídrico 5,8 mol/L e solução de ácido sulfúrico 8,96 mol/L a 80 °C, os quais utilizaram esse material em 30 coelhos brancos da raça Nova Zelândia. Os resultados desse estudo indicaram que o lítio foi efetivamente incorporado na superfície SLA por meio de um tratamento hidrotérmico. Em comparação com a superfície SLA convencional, a superfície SLA-Li continha partículas em escala nanométrica, enquanto a SLA normal apresentava apenas poros microscópicos.

Consequentemente, nota-se que os implantes de Ti modificados com o revestimento CaTip representam superfícies promissoras para aplicações ortopédicas e odontológicas, destacando-se como candidatos potenciais para futuros implantes nesses campos. Conforme evidenciado nos resultados, a técnica de modificação de superfície otimizou as propriedades superficiais dos implantes de Ti, resultando em uma melhoria significativa na formação óssea e na osseointegração de novos implantes peri-implantares.

### **Parâmetros de osseointegração**

A osseointegração entre o implante e o tecido ósseo estabelece a base para o sucesso a longo prazo da terapia implantar (SCARANO A, et al., 2019; DE OLIVEIRA PGFP, et al., 2021; VĂRUȚ RM et al., 2020). Nesse sentido, um estudo realizado por Tang R, et al. (2022) evidenciou que a incorporação de uma estrutura porosa e a liberação lenta de siRNA para inibir a proteína quinase-2 da caseína (CKIP-2), um regulador negativo da formação óssea, pode promover melhorias nos parâmetros da osseointegração. Além disso, nos últimos anos, houve um aumento no interesse por matrizes de biomateriais que podem induzir a transição de macrófagos M1 patológicos para macrófagos M2 pró-cicatrização, após pesquisas sobre o tema. Esse interesse é essencial para reduzir a presença de macrófagos M1 e aumentar a quantidade de macrófagos M2 associados ao processo de reparo. As estratégias para conferir às matrizes essa habilidade de polarização de macrófagos foram categorizadas principalmente em métodos físicos, químicos e biológicos, conforme discutido por Toita R, et al. (2022).

Na mesma linha de pesquisa, Wheelis SE, et al. (2022) conduziram um estudo utilizando pinos de dentina com rosca de titânio comercialmente puro. Os animais utilizados foram ratos Lewis, e os implantes foram inseridos na maxila. O revestimento IonL-Phe demonstrou osseointegração bem-sucedida em todos os grupos de animais testados, mostrando potencial para prevenir falhas em situações conhecidas por serem desafiadas pela presença de bactérias.

Em outro estudo, realizado por Wen Z, et al. (2023), também utilizando ratos, foram utilizados implantes nZnO/MTC-Ti na fossa alveolar. Os autores concluíram que a eficácia desses implantes em promover uma osseointegração mais rápida e inibir infecções bacterianas destaca um enorme potencial para mitigar os riscos associados à carga imediata/precoce e à peri-implantite em IDs.

Um dos requisitos fundamentais para o sucesso de um implante na reabilitação oral é o estabelecimento de um sólido contato com o osso, bem como a garantia da densidade e qualidade adequadas do osso circundante. No estudo de Nemcakova I, et al. (2022), o revestimento utilizado foi de diamante nanocristalino no Ti6Al4V. Na amostra, o foco foram osteoblastos humanos, para os quais foi utilizada uma liga convencional de implante de Ti (Ti6Al4V), na forma de parafusos autocortantes.

A partir dos dados obtidos, observou-se que a funcionalização da superfície do revestimento O-NCD com BMP-7 demonstra ser uma promissora modificação para implantes ósseos metálicos, visando à melhoria da osseointegração. Nesse mesmo sentido, a biofuncionalização da superfície dos implantes com peptídeos inibidores de TGF- $\beta$ 1, P17 e P144, demonstrou melhorias significativas tanto em parâmetros quantitativos quanto qualitativos relacionados à osseointegração, como destacado na pesquisa de Cirera A, et al. (2020).

Já Scarano A, et al. (2019), utilizaram como material de revestimento ácido duplo revestido com colágeno do tipo I. Os resultados obtidos destacam que as superfícies revestidas com colágeno melhoram a bioatividade, o índice de contato osso-implante e a densidade óssea ao redor do implante dentário em comparação com os implantes de controle. Essa melhoria sugere vantagens clínicas, incluindo a possibilidade de encurtar o período de cicatrização do implante.

Assim, nota-se que a modificação do Ti com revestimento de determinados materiais tem amplo potencial de uso em aplicações tanto ortopédicas quanto odontológicas (SCHMITT CM et al., 2016). Percebe-se, por meio dos estudos, que a introdução de íons Ca demonstrou aumentar significativamente a adesão e proliferação de osteoblastos, acelerando ainda mais a maturação e mineralização dessas células em estudos tanto *in vitro* quanto *in vivo* (LI J, et al., 2022; ZHANG XM, et al., 2019).

Por exemplo, no estudo de Mistry S, et al. (2020), os resultados dos experimentos indicam que os implantes ZnHAp apresentaram características eficazes, como maior energia livre superficial, rugosidade e bioatividade, promovendo uma osseointegração precoce em comparação com os implantes simples. Além disso, os resultados radiográficos, histológicos e de interface corroboraram essas descobertas.

No entanto, apesar da forte osseointegração devido à sua maior bioatividade, neste estudo foram observadas várias características inseguras associadas ao revestimento por pulverização de plasma, incluindo mudanças de fase durante a pulverização, espessura desigual do revestimento e, mais crucialmente, rachaduras consistentes, desgaste e alta afinidade microbiana dos revestimentos. Esses fatores podem limitar a osseointegração a longo prazo, especialmente em condições como a osteoporose (YAO Y, et al., 2020).

Alguns estudos desenvolveram um revestimento de HA nanoestruturado incorporado com Si (Si-nHA) para IDs (SHEIKH Z, et al., 2015; ZAKRZEWSKI W, et al., 2020; LIU L, et al., 2020). Como resultado, a estrutura em nanoescala melhorou a adesão celular, bem como a diferenciação osteogênica e angiogênica. Em um estudo *in vivo*, idealizado por Almeida D, et al. (2023), tanto o nHA quanto os revestimentos Si-nHA promoveram significativamente a regeneração óssea e a osseointegração osso-implante em comparação com o revestimento original de HA, especialmente em condições diabéticas.

### **Contribuições e limitações da pesquisa**

Este estudo pode contribuir para a compreensão aprofundada do desempenho dos revestimentos de IDs, abordando taxas de sobrevivência, sucesso clínico e níveis de perda óssea perimplantar. Além disso, possibilita aos cirurgiões-dentistas uma avaliação mais criteriosa das vantagens e desvantagens dos diversos protocolos descritos na literatura científica, enriquecendo seus conhecimentos sobre os materiais que possam otimizar os parâmetros de osseointegração, mitigando o risco de infecções bacterianas e promovendo maior durabilidade dos implantes.

Apesar da ampla revisão literária, muitos estudos carecem de amostras significativas nos grupos avaliados e de um tempo de análise adequado. Essa limitação pode impactar a síntese de resultados de longo prazo, indicando a necessidade de estudos clínicos mais avançados para avaliar essas respostas em humanos.

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os estudos apresentaram respostas satisfatórias em termos de melhoria da qualidade de osseointegração por meio de materiais de revestimento de superfície de IDs, promovendo a sua durabilidade, reduzindo insucesso cirúrgico devido a indisponibilidade de osseointegração, bem como a promoção de um menor tempo de reparo ósseo. Observou-se ainda que a HA apresentou uma prevalência como material de escolha, resultando em parâmetros adequados para a instalação de IDs, conduzindo o processo de reparo e neoformação óssea.

### **REFERÊNCIAS**

1. AJAMI E, et al. Early bone healing on hydroxyapatite-coated and chemically-modified hydrophilic implant surfaces in an ovine model. *Int J Mol Sci*, 2021; 22(17): 9361.

2. ALENEZI A, et al. Osseointegration effects of local release of strontium ranelate from implant surfaces in rats. *J Mater Sci Mater Med*, 2019; 30: 1-12.
3. ALIKHANI M, et al. High frequency acceleration: A new tool for alveolar bone regeneration. *JSM Dent Surg*, 2017; 2(4).
4. ALMEIDA D, et al. In vivo osseointegration evaluation of implants coated with nanostructured hydroxyapatite in low density bone. *PLoS One*, 2023; 18(2).
5. AMLER MH, JOHNSON PL, SALMAN I. Histological and histochemical investigation of human alveolar socket healing in undisturbed extraction wounds. *J Am Dent Assoc*, 1960; 61(1): 32-44.
6. BRÅNEMARK PI, et al. Intra-osseous anchorage of dental prostheses: I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg*, 1969; 3(2): 81-100.
7. CAI B, et al. Bioinspired fabrication of calcium-doped TiP coating with nanofibrous microstructure to accelerate osseointegration. *Bioconjug Chem*, 2020; 31(6): 1641-50.
8. CHEN HT, et al. Osseointegrating and phase-oriented micro-arc-oxidized titanium dioxide bone implants. *J Appl Biomater Funct Mater*, 2021; 19: 22808000211006878.
9. CIRERA A, et al. Osseointegration around dental implants biofunctionalized with TGF $\beta$ -1 inhibitor peptides: An in vivo study in beagle dogs. *J Mater Sci Mater Med*, 2020; 31: 1-15.
10. CÓRDOBA A, et al. Quercitrin nanocoated implant surfaces reduce osteoclast activity in vitro and in vivo. *Int J Mol Sci*, 2018; 19(11): 3319.
11. DAS S, et al. Accentuated osseointegration in osteogenic nanofibrous coated titanium implants. *Sci Rep*, 2019; 9(1): 17638.
12. DE AVILA ED, VAN OIRSCHOT BA, VAN DEN BEUCKEN JJ. Biomaterial-based possibilities for managing peri-implantitis. *J Periodontal Res*, 2020; 55(2): 165-73.
13. DE OLIVEIRA PGFP, et al. Influence of nano-hydroxyapatite coating implants on gene expression of osteogenic markers and micro-CT parameters. An in vivo study in diabetic rats. *J Biomed Mater Res A*, 2021; 109(5): 682-94.
14. DING M, et al. Early osseointegration of micro-arc oxidation coated titanium alloy implants containing Ag: a histomorphometric study. *BMC Oral Health*, 2022; 22(1): 628.
15. ERCOLE FF, MELO LS, ALCOFORADO CL. Revisão integrativa versus revisão sistemática. *Reme Rev Min Enferm*, 2014; 18(1): 09-11.
16. HE W, et al. Enhancing osseointegration of titanium implants through large-grit sandblasting combined with micro-arc oxidation surface modification. *J Mater Sci Mater Med*, 2019; 30: 1-11.
17. HUANG TB, et al. Effect of the Wnt signal-RANKL/OPG axis on the enhanced osteogenic integration of a lithium incorporated surface. *Biomater Sci*, 2019; 7(3): 1101-16.
18. LI J, et al. Histological evaluation of titanium fiber mesh-coated implants in a rabbit femoral condyle model. *Dent Mater*, 2022; 38(4): 613-21.
19. LIU J, KERNS DG. Suppl 1: Mechanisms of guided bone regeneration: A review. *Open Dent J*. 2014; 8: 56.
20. LIU L, et al. The synergistic promotion of osseointegration by nanostructure design and silicon substitution of hydroxyapatite coatings in a diabetic model. *J Mater Chem B*, 2020; 8(14): 2754-67.
21. ŁUKASZEWSKA-KUSKA M, et al. Effects of a hydroxyapatite coating on the stability of endosseous implants in rabbit tibiae. *Dent Med Probl*, 2019; 56(2): 123-9.
22. MISTRY S, et al. Surface characteristics of titanium dental implants with improved microdesigns: An in vivo study of their osseointegration performance in goat mandible. *J Biomater Appl*, 2021; 35(7): 799-813.
23. NEMCAKOVA I, et al. Coating Ti6Al4V implants with nanocrystalline diamond functionalized with BMP-7 promotes extracellular matrix mineralization in vitro and faster osseointegration in vivo. *Sci Rep*, 2022; 12(1): 5264.
24. SANTOS CM, PIMENTA CA, NOBRE MR. A estratégia PICO para a construção da pergunta de pesquisa e busca de evidências. *Rev Latino-Am Enfermagem*, 2007; 15: 508-11.
25. SCARANO A, et al. Biomimetic surfaces coated with covalently immobilized collagen type I: An x-ray photoelectron spectroscopy, atomic force microscopy, micro-CT and histomorphometrical study in rabbits. *Int J Mol Sci*, 2019; 20(3): 724.
26. SCHMITT CM, et al. In vivo evaluation of biofunctionalized implant surfaces with a synthetic peptide (P-15) and its impact on osseointegration. A preclinical animal study. *Clin Oral Implants Res*, 2016; 27(11): 1339-48.
27. SHEIKH Z, SIMA C, GLOGAUER M. Bone replacement materials and techniques used for achieving vertical alveolar bone augmentation. *Materials (Basel)*, 2015; 8(6): 2953-93.
28. SOUZA MT, SILVA MD, CARVALHO R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)*, 2010; 8: 102-6.
29. TANG R, et al. A novel CKIP-1 SiRNA slow-release coating on porous titanium implants for enhanced osseointegration. *Biomater Adv*, 2022; 137: 212864.

30. TOITA R, KANG JH, TSUCHIYA A. Phosphatidylserine liposome multilayers mediate the M1-to-M2 macrophage polarization to enhance bone tissue regeneration. *Acta Biomater*, 2022; 154: 583-96.
31. VĂRUTĂ RM, et al. Calcium fructoborate coating of titanium-hydroxyapatite implants by chemisorption deposition improves implant osseointegration in the femur of New Zealand White rabbit experimental model. *Rom J Morphol Embryol*, 2020; 61(4): 1235.
32. WEN Z, et al. Mesoporous TiO<sub>2</sub> coatings regulate ZnO nanoparticle loading and Zn<sup>2+</sup> release on titanium dental implants for sustained osteogenic and antibacterial activity. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023; 15(12): 15235-49.
33. WHEELIS SE, et al. Effects of dicationic imidazolium-based ionic liquid coatings on oral osseointegration of titanium implants: A biocompatibility study in multiple rat demographics. *Genes (Basel)*, 2022; 13(4): 642.
34. YAO Y, et al. Sclerostin antibody stimulates periodontal regeneration in large alveolar bone defects. *Sci Rep*, 2020; 10(1): 16217.
35. YIN D, et al. Effect of mussel adhesive protein coating on osteogenesis in vitro and osteointegration in vivo to alkali-treated titanium with nanonetwork structures. *Int J Nanomedicine*, 2019; 14: 3831-43.
36. ZAKRZEWSKI W, et al. Selected nanomaterials' application enhanced with the use of stem cells in acceleration of alveolar bone regeneration during augmentation process. *Nanomaterials (Basel)*, 2020; 10(6): 1216.
37. ZHANG XM, et al. Ta-coated titanium surface with superior bacteriostasis and osseointegration. *Int J Nanomedicine*, 2019; 14: 8693-706.