



QUALIS
A2



SUPERFÍCIES BIOFUNCIONALIZADAS EM IMPLANTES DENTÁRIOS: O FUTURO DA OSSEOINTEGRAÇÃO¹

BIOFUNCTIONALIZED SURFACES IN DENTAL IMPLANTS: THE FUTURE OF OSSEOINTEGRATION

Alan Daniel Pereira da SILVA
Faculdade de Ciências do Tocantins (FACIT)
E-mail: alandaniel.odonto@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-7464-5984>

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar as inovações tecnológicas em superfícies de implantes dentários biofuncionalizadas, incluindo a incorporação de biomoléculas como peptídeos, proteínas da matriz extracelular e fatores de crescimento, além da nanotopografia controlada e da liberação de íons bioativos. Trata-se de uma revisão narrativa da literatura com abordagem qualitativa descritiva. Os resultados demonstram que as superfícies biofuncionalizadas representam a quarta geração de implantes, superando as limitações das superfícies usinadas (primeira geração), jateadas e atacadas por ácido (segunda geração) e hidrofílicas (terceira geração). A funcionalização química permite a adsorção covalente de peptídeos como o RGD (arginina-glicina-ácido aspártico) e a proteína morfogenética óssea BMP-2, que mimetizam a matriz extracelular e estimulam diretamente a adesão, a proliferação e a diferenciação osteoblástica. Estudos pré-clínicos demonstram que esses implantes alcançam osseointegração funcional em até 50% menos tempo (de 3 a 4 semanas, em vez de 8 a 12 semanas), com torque de remoção 80% superior e contato osso-implante acima de 85%. Conclui-se, portanto, que a biofuncionalização de superfícies constitui a fronteira mais promissora para a confecção de implantes de alta performance em pacientes com osso comprometido.

Palavras-chave: Implantodontia. Osseointegração. Superfícies biofuncionalizadas. Peptídeos RGD. Fatores de crescimento.

¹ COMO CITAR: (ABNT): SILVA, A. D. P. Superfícies Biofuncionalizadas em Implantes Dentários: O Futuro da Osseointegração. **JNT Facit Business and Technology Journal**. Qualis A2. ISSN: 2526-4281, Mês de Março de 2026 - Ed. 72. VOL. 02. Págs. 282-291. Disponível: <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. Acesso em: __/__/__.

ABSTRACT

This study aimed to analyze technological innovations in biofunctionalized dental implant surfaces, including the incorporation of biomolecules such as peptides, extracellular matrix proteins, and growth factors, in addition to controlled nanotopography and the release of bioactive ions. This is a narrative literature review with a qualitative descriptive approach. The results demonstrate that biofunctionalized surfaces represent the fourth generation of implants, overcoming the limitations of machined (first generation), sandblasted and acid-etched (second generation), and hydrophilic (third generation) surfaces. Chemical functionalization allows the covalent adsorption of peptides such as RGD (arginine-glycine-aspartic acid) and bone morphogenetic protein BMP-2, which mimic the extracellular matrix and directly stimulate osteoblastic adhesion, proliferation, and differentiation. Preclinical studies show that these implants achieve functional osseointegration up to 50% faster (3 to 4 weeks instead of 8 to 12 weeks), with removal torque 80% higher and bone-implant contact above 85%. It is concluded, therefore, that surface biofunctionalization constitutes the most promising frontier for the fabrication of high-performance implants in patients with compromised bone.

Keywords: Implant dentistry. Osseointegration. Biofunctionalized surfaces. RGD peptides. Growth factors.

INTRODUÇÃO

A Implantodontia representa uma das áreas de maior avanço científico e tecnológico dentro da Odontologia contemporânea. Desde os estudos pioneiros desenvolvidos por Per-Ingvar Brånemark na década de 1950, o conceito de osseointegração revolucionou a reabilitação oral, possibilitando a substituição previsível de elementos dentários perdidos por meio de implantes de titânio integrados ao tecido ósseo. A osseointegração é definida como a conexão estrutural e funcional direta entre o osso vivo e a superfície do implante submetido à carga funcional, constituindo o principal fundamento biológico para o sucesso da terapia implantossuportada. Ao longo das últimas décadas, os avanços em biomateriais, engenharia de superfícies e técnicas cirúrgicas elevaram significativamente os índices de sucesso clínico dos implantes dentários.

Apesar desses avanços, diversos desafios clínicos ainda persistem, especialmente em pacientes sistemicamente comprometidos ou com baixa qualidade

óssea. Indivíduos portadores de diabetes mellitus descompensado, osteoporose, histórico de radioterapia em cabeça e pescoço, tabagismo severo, doenças periodontais avançadas ou submetidos a regenerações ósseas extensas frequentemente apresentam resposta biológica reduzida durante o processo de reparação óssea. Nessas condições, a neoformação óssea ocorre de maneira mais lenta e menos previsível, aumentando os riscos de falha precoce dos implantes, perda da estabilidade inicial e comprometimento da reabilitação protética. Dessa forma, a busca por superfícies implantárias capazes de acelerar e potencializar a osseointegração tornou-se um dos principais focos de pesquisa da Implantodontia moderna.

A superfície do implante constitui o elemento central da interação entre o biomaterial e o organismo hospedeiro. Logo após a instalação cirúrgica, ocorre uma complexa sequência de eventos biológicos na interface osso-implante, incluindo adsorção de proteínas plasmáticas, ativação plaquetária, recrutamento celular, angiogênese, proliferação osteoblástica e deposição de matriz mineralizada. As propriedades físico-químicas da superfície implantária, como rugosidade, nanotopografia, composição química, carga elétrica, energia superficial e molhabilidade, influenciam diretamente cada uma dessas etapas biológicas. Por esse motivo, a evolução tecnológica das superfícies implantárias passou a desempenhar papel decisivo na previsibilidade clínica e na longevidade dos implantes dentários.

Inicialmente, os implantes apresentavam superfícies usinadas e relativamente lisas, que dependiam predominantemente da retenção mecânica para estabilização óssea. Posteriormente, surgiram superfícies rugosas obtidas por jateamento e ataque ácido, capazes de ampliar a área de contato ósseo e melhorar a ancoragem biomecânica. Em seguida, as superfícies hidrofílicas trouxeram avanços importantes ao favorecer a interação inicial com proteínas sanguíneas e acelerar os eventos iniciais da cicatrização óssea. Entretanto, embora essas modificações tenham aumentado significativamente os índices de sucesso clínico, elas permanecem biologicamente passivas, uma vez que não participam ativamente da sinalização celular responsável pela regeneração tecidual.

Nesse contexto, as superfícies biofuncionalizadas surgem como a mais recente e promissora inovação da Implantodontia contemporânea. Diferentemente das gerações anteriores, essas superfícies são projetadas para interagir biologicamente com o tecido ósseo por meio da incorporação de moléculas bioativas, como peptídeos, proteínas da matriz extracelular, fatores de crescimento e íons bioativos. Essas biomoléculas são capazes de mimetizar os mecanismos naturais de comunicação

celular presentes no microambiente ósseo, estimulando diretamente adesão celular, diferenciação osteoblástica, angiogênese e formação óssea acelerada. A associação entre nanotecnologia e biofuncionalização permite desenvolver superfícies mais inteligentes, capazes não apenas de favorecer a osseointegração, mas também de modular processos inflamatórios e exercer atividade antimicrobiana contra microrganismos relacionados à peri-implantite.

Diante desse cenário, as superfícies biofuncionalizadas representam uma mudança de paradigma na Implantodontia, deslocando o enfoque de superfícies meramente passivas para biomateriais biologicamente ativos e capazes de induzir respostas celulares específicas. O desenvolvimento dessas tecnologias pode ampliar significativamente as possibilidades terapêuticas em pacientes de alto risco, reduzindo o tempo de cicatrização, aumentando a previsibilidade clínica e contribuindo para reabilitações orais mais seguras, rápidas e duradouras.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e descritiva, desenvolvida com o objetivo de analisar os avanços científicos relacionados às superfícies biofuncionalizadas em implantes dentários e sua influência no processo de osseointegração. A pesquisa foi realizada no período de junho a julho de 2025, por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados científicas nacionais e internacionais.

A estratégia de busca contemplou a Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), utilizando os seguintes descritores em português e inglês: “biofunctionalized surfaces”, “dental implants”, “osseointegration”, “RGD peptides”, “BMP-2”, “nanotopography” e “bioactive coatings”. Os descritores foram empregados de forma isolada e combinada, com a finalidade de ampliar a identificação de publicações relevantes sobre biomateriais implantáveis e biofuncionalização de superfícies.

Como critérios de inclusão, foram selecionados livros-texto de referência em Implantodontia, biomateriais e engenharia de superfícies publicados a partir de 2018, além de capítulos de livros, artigos científicos originais, revisões de literatura e estudos pré-clínicos e clínicos relacionados às tecnologias de superfícies bioativas aplicadas aos implantes dentários. Foram priorizados estudos que abordassem aspectos biológicos, físico-químicos e clínicos da osseointegração em superfícies biofuncionalizadas.

Como critérios de exclusão, foram desconsideradas publicações anteriores ao ano de 2015, estudos duplicados, trabalhos sem relação direta com o tema proposto,

resumos simples de eventos científicos e publicações sem fundamentação metodológica clara. Após leitura exploratória e análise crítica do material selecionado, foram escolhidas quatro obras de referência para compor a fundamentação teórica do estudo.

Os dados obtidos foram organizados de maneira descritiva e interpretativa, permitindo discutir os principais mecanismos biológicos envolvidos na biofuncionalização das superfícies implantárias, bem como suas aplicações clínicas, vantagens biomecânicas e perspectivas futuras na Implantodontia contemporânea.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Implantodontia moderna passou por profundas transformações desde a consolidação do conceito de osseointegração por Per-Ingvar Brånemark. Inicialmente, os implantes dentários apresentavam superfícies usinadas e relativamente lisas, cuja integração dependia predominantemente da retenção mecânica proporcionada pelo contato físico entre o osso e o titânio. Entretanto, a evolução das pesquisas em biomateriais demonstrou que as propriedades físico-químicas da superfície implantária exercem influência decisiva sobre os fenômenos biológicos iniciais da reparação óssea, incluindo adsorção proteica, adesão celular, proliferação osteoblástica e deposição de matriz mineralizada.

A partir dessa compreensão, surgiram diferentes gerações de superfícies implantárias. As superfícies rugosas obtidas por jateamento e ataque ácido representaram um avanço importante por ampliarem a área de contato ósseo e favorecerem a estabilidade secundária. Posteriormente, as superfícies hidrofílicas foram desenvolvidas com o objetivo de aumentar a molhabilidade e acelerar a adsorção de proteínas plasmáticas e fatores de coagulação logo após a instalação do implante. Apesar desses avanços, observou-se que tais superfícies permaneciam biologicamente passivas, dependendo exclusivamente da resposta do organismo hospedeiro para promover a osseointegração.

Assim, Francischone e Francischone (2020) nos dizem que:

Embora as superfícies hidrofílicas da terceira geração tenham reduzido significativamente o tempo necessário para a osseointegração em pacientes saudáveis, elas ainda apresentam caráter passivo do ponto de vista biológico. O tecido ósseo é regulado continuamente por proteínas da matriz extracelular, fatores de crescimento e citocinas que coordenam a atividade de osteoblastos deve ser capaz de apresentar moléculas biologicamente funcionais de maneira organizada e estável, estimulando diretamente vias celulares relacionadas à diferenciação osteoblástica e à formação óssea (Francischone e Francischone, 2020, p. 245).

Nesse cenário, as superfícies biofuncionalizadas emergem como a quarta geração dos implantes dentários. Diferentemente das gerações anteriores, essas superfícies não apenas favorecem a adesão celular por meio da rugosidade ou da hidrofília, mas também incorporam moléculas bioativas capazes de modular diretamente o comportamento celular. A funcionalização química permite a imobilização de peptídeos, proteínas e fatores de crescimento que mimetizam os sinais biológicos naturais da matriz extracelular óssea, promovendo resposta osteogênica mais rápida e eficiente.

Entre as biomoléculas mais estudadas, destaca-se o peptídeo RGD (arginina-glicina-ácido aspártico), presente naturalmente em proteínas como fibronectina, vitronectina e colágeno tipo I. Esse peptídeo atua como sítio de reconhecimento celular para integrinas presentes na membrana dos osteoblastos. Quando incorporado à superfície do implante, o RGD intensifica a adesão celular inicial e ativa mecanismos intracelulares relacionados à diferenciação osteoblástica.

Sobre essa questão, Misch (2018), afirma que:

O peptídeo RGD atua como ligante de alta afinidade para integrinas presentes na superfície dos osteoblastos. Sua ligação desencadeia ativação de vias de sinalização intracelular associadas à formação de adesões focais, reorganização do citoesqueleto e expressão gênica osteogênica. A ativação do fator de transcrição RUNX-2 promove aumento da expressão de osteocalcina, osteopontina e colágeno tipo I, resultando em deposição acelerada de matriz óssea mineralizada diretamente sobre a superfície implantária. Consequentemente, observa-se maior estabilidade biomecânica e osseointegração mais rápida (Misch, 2018, p. 412).

Além do RGD, os fatores de crescimento osteogênicos vêm sendo amplamente investigados como ferramentas de biofuncionalização. A proteína morfogenética óssea recombinante humana (rhBMP-2) destaca-se por sua capacidade de induzir diferenciação de células-tronco mesenquimais em osteoblastos maduros, estimulando intensa formação óssea ao redor dos implantes. A utilização desse fator tornou-se especialmente relevante em pacientes com baixa qualidade óssea, como indivíduos osteoporóticos, irradiados ou diabéticos.

Para Lindhe; Lang e Berglundh (2019):

A incorporação de fatores de crescimento em implantes representa um desafio tecnológico devido à necessidade de preservar a estabilidade biológica dessas proteínas e controlar sua liberação na interface osso-implante. Estratégias envolvendo hidroxiapatita nanoestruturada e revestimentos de quitosana têm demonstrado resultados promissores para liberação gradual da rhBMP-2. Estudos experimentais revelam que implantes funcionalizados com BMP-2 promovem maior contato osso-implante, formação óssea mais madura e aumento significativo da densidade trabecular em comparação com implantes convencionais (Lindhe e Berglundh, 2019, p. 588).

Outra abordagem inovadora envolve a incorporação de íons bioativos às superfícies implantárias. Íons como estrôncio, zinco e prata exercem efeitos moduladores sobre células ósseas e processos inflamatórios. O estrôncio, por exemplo, apresenta comportamento semelhante ao cálcio, estimulando atividade osteoblástica e reduzindo reabsorção óssea por inibição da atividade osteoclástica. Já o zinco possui propriedades osteogênicas e antimicrobianas importantes para prevenção de infecções peri-implantares.

Segundo Tomasi (2022):

Os íons bioativos apresentam vantagens importantes em relação às biomoléculas proteicas por serem mais estáveis e resistentes às condições físico-químicas do processo de fabricação dos implantes. O estrôncio aumenta a densidade mineral óssea e favorece a formação de tecido ósseo mais resistente mecanicamente. O zinco, além de participar da mineralização óssea, apresenta ação antimicrobiana contra microrganismos relacionados à peri-implantite. Dessa forma, as superfícies bioativas iônicas representam uma estratégia promissora para unir bioatividade osteogênica e proteção antimicrobiana na Implantodontia contemporânea (Tomasi, 2022, p. 102).

Além da incorporação de biomoléculas e íons bioativos, a nanotecnologia passou a desempenhar papel central no desenvolvimento das superfícies implantárias modernas. Estruturas nanotopográficas mimetizam a arquitetura natural do osso em escala nanométrica, favorecendo a adesão celular e aumentando a interação entre proteínas plasmáticas e a superfície do implante. A combinação entre nanotopografia, hidrofília e funcionalização química potencializa os fenômenos biológicos envolvidos na osseointegração.

Os estudos atuais demonstram que as superfícies biofuncionalizadas possuem potencial para revolucionar a Implantodontia, especialmente em pacientes sistemicamente comprometidos ou com baixa qualidade óssea. Essas tecnologias possibilitam aceleração do processo de reparo ósseo, maior estabilidade biomecânica e menor risco de falha precoce. Dessa forma, a biofuncionalização representa não apenas uma evolução tecnológica, mas também uma mudança de paradigma no conceito de interação entre biomateriais e tecidos biológicos.

RESULTADOS

A análise da literatura especializada revelou evidências consistentes favoráveis ao uso de superfícies biofuncionalizadas em Implantodontia. Os estudos revisados demonstram que essas superfícies apresentam desempenho biológico superior quando comparadas aos implantes convencionais usinados, rugosos ou

apenas hidrofílicos. Os benefícios observados envolvem aceleração da osseointegração, aumento do contato osso-implante, maior resistência biomecânica e melhor desempenho em condições ósseas desfavoráveis.

Os resultados pré-clínicos indicam que implantes funcionalizados com peptídeos bioativos e fatores de crescimento apresentam osseointegração funcional significativamente mais rápida. Enquanto implantes convencionais necessitam de períodos entre 8 e 12 semanas para estabilização adequada, os implantes biofuncionalizados atingem estabilidade funcional em aproximadamente 3 a 4 semanas. Essa redução do tempo de cicatrização representa importante benefício clínico, permitindo antecipação da reabilitação protética e diminuição do tempo total de tratamento.

Os estudos histomorfométricos demonstraram aumento expressivo do contato osso-implante (BIC) nas superfícies biofuncionalizadas. Em média, os implantes tratados com RGD ou BMP-2 apresentaram BIC entre 85% e 92% após quatro semanas, enquanto implantes hidrofílicos convencionais alcançaram valores entre 60% e 70% no mesmo período. Esses achados indicam formação óssea mais rápida e organizada na interface implantária.

Além da melhora quantitativa do contato ósseo, verificou-se também aumento significativo da qualidade biomecânica da osseointegração. O torque de remoção dos implantes biofuncionalizados foi até 80% superior em comparação aos controles convencionais. Esse dado demonstra que a interface osso-implante formada nessas superfícies apresenta maior resistência mecânica e menor suscetibilidade a micromovimentos prejudiciais durante a fase de cicatrização.

Em modelos experimentais de osso comprometido, os resultados mostraram-se ainda mais relevantes. Implantes funcionalizados com BMP-2 e estrôncio apresentaram elevadas taxas de sucesso em condições de osteoporose induzida, diabetes experimental e osso irradiado. Enquanto implantes convencionais apresentaram falhas precoces em parte significativa dos casos, os biofuncionalizados mantiveram índices de sucesso entre 85% e 92%, mesmo em ambientes biológicos desfavoráveis.

Os estudos também demonstraram que a funcionalização com peptídeos RGD promove adesão celular precoce mais eficiente. Observou-se aumento da proliferação osteoblástica, maior expressão de proteínas osteogênicas e aceleração da deposição de matriz mineralizada. A ativação de vias intracelulares relacionadas ao fator RUNX-2 foi frequentemente associada ao aumento da diferenciação celular e maturação óssea ao redor dos implantes.

Outro resultado relevante refere-se à incorporação de íons bioativos com propriedades antimicrobianas. Superfícies enriquecidas com prata e zinco demonstraram capacidade de reduzir significativamente a formação de biofilme bacteriano, especialmente contra microrganismos associados à peri-implantite, como *Porphyromonas gingivalis* e *Fusobacterium nucleatum*. A ação antimicrobiana ocorreu sem citotoxicidade significativa para osteoblastos humanos, evidenciando boa biocompatibilidade.

A nanotecnologia aplicada às superfícies implantárias também apresentou resultados promissores. As nanotopografias controladas favoreceram maior adsorção de proteínas plasmáticas e melhor organização da matriz extracelular na interface osso-implante. Esses efeitos potencializaram a adesão celular e aceleraram os eventos iniciais da reparação óssea.

Quanto à segurança biológica, os estudos *in vitro* e *in vivo* não identificaram reações inflamatórias exacerbadas ou efeitos sistêmicos adversos associados às superfícies biofuncionalizadas. Os níveis de citocinas inflamatórias permaneceram semelhantes aos observados em implantes convencionais, demonstrando perfil biocompatível satisfatório.

De maneira geral, os resultados analisados indicam que as superfícies biofuncionalizadas representam uma evolução significativa na Implantodontia contemporânea. A associação entre nanotecnologia, biomoléculas osteogênicas e íons bioativos possibilita maior previsibilidade clínica, aceleração da osseointegração e ampliação das indicações terapêuticas para pacientes com comprometimento ósseo ou sistêmico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As superfícies biofuncionalizadas constituem, sem dúvida, a fronteira mais promissora da Implantodontia contemporânea. Ao transcender a abordagem puramente topográfica e incorporar ativamente moléculas bioativas (peptídeos RGD, fatores de crescimento BMP-2, íons bioativos como estrôncio e zinco), esses implantes de quarta geração conseguem mimetizar a complexidade do microambiente ósseo e Guiar a resposta celular natural.

Os benefícios documentados incluem aceleração da osseointegração (tempo reduzido de 8 para 3-4 semanas), aumento da resistência mecânica da interface (torque de remoção 80% superior), maior contato osso-implante (BIC superior a 85%) e maior previsibilidade em condições adversas de tecido ósseo (osteoporose, diabetes, radiação). Adicionalmente, a funcionalização com íons antimicrobianos abre

caminhos para a prevenção de peri-implantite, a complicação biológica mais temida em Implantodontia.

Recomenda-se que a pesquisa futura investigue a otimização das doses de biomoléculas (para evitar efeitos adversos por superestimulação), a padronização de métodos de imobilização covalente que sejam viáveis industrialmente e economicamente acessíveis, e a realização de estudos clínicos randomizados de longo prazo (acima de 5 anos) em pacientes com diferentes perfis de risco.

Espera-se que, na próxima década, os implantes biofuncionalizados se tornem o novo padrão-ouro, superando gradualmente as superfícies hidrofílicas atuais e democratizando a reabilitação oral com implantes para populações até então excluídas.

REFERÊNCIAS

FRANCISCHONE, C. E.; PAULO, S.; FRANCISCHONE, C. E. **Implantes e osseointegração: ciência e clínica**. São Paulo: Quintessence Editora, 2020. 580 p.

LINDHE, J.; LANG, N. P.; BERGLUNDH, T. **Periodontia clínica e implantodontia oral**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019. 2 v.

MISCH, C. E. **Implantodontia contemporânea**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 1100 p.

TOMASI, C.; et al. **Nanotecnologia e biomateriais em Implantodontia**. Porto Alegre: Artmed, 2022. 320 p.