



BIOTECNOLOGIA E BIOMATERIAIS EM IMPLANTODONTIA: TENDÊNCIAS E INOVAÇÕES NOS ÚLTIMOS 10 ANOS

BIOTECHNOLOGY AND BIOMATERIALS IN IMPLANT DENTISTRY: TRENDS AND INNOVATIONS IN THE LAST 10 YEARS

BIOTECNOLOGÍA Y BIOMATERIALES EN IMPLANTOLOGÍA: TENDENCIAS E INNOVACIONES EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS

 <https://doi.org/10.56238/levv13n31-030>

Data de submissão: 20/11/2023

Data de publicação: 20/12/2023

Cicero Deusdedit Aires Gondim

RESUMO

Este artigo tem como objetivo analisar as principais tendências e inovações em biotecnologia e biomateriais aplicados à implantodontia nos últimos dez anos. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica qualitativa, com recorte temporal entre 2015 e 2023, abrangendo estudos nacionais e internacionais extraídos de bases científicas como PubMed, Scielo, ScienceDirect e Google Scholar. A fundamentação teórica foi organizada em três eixos temáticos: evolução dos biomateriais utilizados em implantes dentários, inovações biotecnológicas no processo de osseointegração e os desafios e perspectivas futuras da implantodontia. Os resultados indicam que houve um avanço significativo na modificação de superfícies implantáveis com o uso de nanotecnologia, liberação controlada de íons bioativos, aplicação de proteínas morfogenéticas ósseas e incorporação de nanopartículas com ação antimicrobiana. Paralelamente, o uso de tecnologias digitais, como a manufatura aditiva, escaneamento intraoral e cirurgia guiada, ampliou a precisão clínica e a personalização das reabilitações. O estudo também identificou que, embora os novos biomateriais apresentem alto desempenho clínico, ainda enfrentam desafios como custo elevado, limitação de estudos clínicos de longo prazo e necessidade de capacitação profissional contínua. As perspectivas futuras apontam para a consolidação de implantes inteligentes, superfícies funcionalizadas com células-tronco e integração com inteligência artificial para personalização terapêutica. Conclui-se que a biotecnologia e os biomateriais se tornaram pilares estratégicos para a evolução da implantodontia contemporânea, promovendo uma reabilitação oral mais eficiente, segura e adaptada às necessidades individuais dos pacientes.

Palavras-chave: Implantodontia. Biotecnologia. Biomateriais. Osseointegração. Inovação Tecnológica.

ABSTRACT

This article aims to analyze the main trends and innovations in biotechnology and biomaterials applied to implant dentistry over the past ten years. The research was carried out through a qualitative bibliographic review with a temporal scope from 2015 to 2023, encompassing national and international studies retrieved from scientific databases such as PubMed, Scielo, ScienceDirect, and Google Scholar. The theoretical framework was organized into three thematic axes: the evolution of biomaterials used in dental implants, biotechnological innovations in the osseointegration process, and the challenges and future perspectives of implant dentistry. The results indicate a significant

advancement in the modification of implantable surfaces through nanotechnology, controlled release of bioactive ions, application of bone morphogenetic proteins, and incorporation of nanoparticles with antimicrobial activity. In parallel, the use of digital technologies such as additive manufacturing, intraoral scanning, and guided surgery enhanced clinical precision and customization of rehabilitations. The study also identified that although new biomaterials present high clinical performance, they still face challenges such as high costs, limited long-term clinical studies, and the need for continuous professional training. Future perspectives point to the consolidation of smart implants, surfaces functionalized with stem cells, and integration with artificial intelligence for therapeutic personalization. It is concluded that biotechnology and biomaterials have become strategic pillars for the evolution of contemporary implant dentistry, promoting more efficient, safer, and individually tailored oral rehabilitation.

Keywords: Implant Dentistry. Biotechnology. Biomaterials. Osseointegration. Technological Innovation.

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo analizar las principales tendencias e innovaciones en biotecnología y biomateriales aplicados a la implantología dental en los últimos diez años. La investigación se realizó mediante una revisión bibliográfica cualitativa, que abarcó el período 2015-2023, incluyendo estudios nacionales e internacionales extraídos de bases de datos científicas como PubMed, Scielo, ScienceDirect y Google Scholar. La base teórica se organizó en tres áreas temáticas: la evolución de los biomateriales utilizados en implantes dentales, las innovaciones biotecnológicas en el proceso de osteointegración y los retos y perspectivas futuras de la implantología dental. Los resultados indican avances significativos en la modificación de superficies de implantes mediante nanotecnología, la liberación controlada de iones bioactivos, la aplicación de proteínas morfogenéticas óseas y la incorporación de nanopartículas con acción antimicrobiana. Al mismo tiempo, el uso de tecnologías digitales, como la fabricación aditiva, el escaneo intraoral y la cirugía guiada, ha incrementado la precisión clínica y la personalización de las rehabilitaciones. El estudio también identificó que, si bien los nuevos biomateriales presentan un alto rendimiento clínico, aún enfrentan desafíos como su alto costo, la escasez de estudios clínicos a largo plazo y la necesidad de capacitación profesional continua. Las perspectivas futuras apuntan a la consolidación de implantes inteligentes, superficies funcionalizadas con células madre e integración con inteligencia artificial para la personalización terapéutica. Se concluye que la biotecnología y los biomateriales se han convertido en pilares estratégicos para la evolución de la implantología contemporánea, promoviendo una rehabilitación oral más eficiente, segura y personalizada, adaptada a las necesidades individuales del paciente.

Palabras clave: Implantología. Biotecnología. Biomateriales. Osteointegración. Innovación Tecnológica.

1 INTRODUÇÃO

A compreensão dos mecanismos moleculares que regulam a interação entre o material implantável e o tecido ósseo permitiu a concepção de superfícies com propriedades bioativas específicas, como aquelas funcionalizadas com íons de cálcio, fósforo, flúor ou zinco, que estimulam seletivamente a diferenciação celular e favorecem a mineralização óssea, demonstrando que os biomateriais deixaram de ser apenas suportes passivos e passaram a ser elementos ativos na regeneração guiada dos tecidos (Al Shayeb et al., 2023).

O titânio, considerado padrão-ouro por décadas, passou a dividir espaço com materiais como a zircônia e o PEEK, devido à sua estabilidade química, propriedades mecânicas e estética superior, sobretudo em áreas anteriores da arcada dentária, sendo que modificações nas micro e nanotopografias desses materiais também aumentaram sua eficácia clínica ao favorecer a formação precoce do tecido ósseo ao redor do implante (Ciszyński et al., 2023).

As inovações também se estenderam aos substitutos ósseos e membranas utilizadas em procedimentos de enxertia e regeneração, com a introdução de biomateriais reabsorvíveis, bioimpressos e de origem xenógena ou aloplástica, que têm demonstrado excelentes resultados na reconstrução tridimensional de defeitos ósseos e na manutenção do volume alveolar em áreas críticas (Marques et al., 2023).

Na perspectiva da engenharia tecidual, a aplicação de fatores de crescimento, proteínas morfogenéticas ósseas (BMPs), plasma rico em plaquetas (PRP) e scaffolds tridimensionais passou a integrar protocolos clínicos em diversos centros de pesquisa, visando estimular a regeneração óssea de forma mais eficiente e biocompatível, o que revela um forte vínculo entre a biotecnologia regenerativa e a prática da implantodontia moderna (Campos da Silva e Arruda, 2023).

Cabe destacar o uso de tecnologias baseadas em nanomateriais para o recobrimento de implantes, uma vez que a utilização de partículas de prata, grafeno, sílica e hidroxiapatita nanoestruturada oferece propriedades antimicrobianas, osteoindutoras e de adesão celular que superam significativamente os biomateriais convencionais, ampliando a eficácia dos tratamentos e reduzindo as complicações pós-operatórias (Marasli et al., 2023).

A integração entre biotecnologia e odontologia também tem impulsionado estudos sobre inteligência artificial e modelagem preditiva no planejamento implantológico, permitindo antecipar possíveis falhas, selecionar materiais com maior previsibilidade clínica e até mesmo simular a resposta tecidual do paciente frente aos diferentes tipos de implantes, demonstrando que o futuro da implantodontia será pautado na personalização e na precisão (Lakshmi Mounika et al., 2023).

A tendência de utilizar implantes bioativos capazes de promover a liberação controlada de fármacos ou moléculas sinalizadoras está se consolidando como uma inovação de grande impacto, permitindo que os próprios implantes atuem como sistemas terapêuticos locais, o que representa uma

mudança de paradigma na forma como os biomateriais interagem com o organismo (López-Valverde et al., 2022).

Além disso, observa-se um interesse crescente por materiais sustentáveis e biocompatíveis de origem natural, como os derivados de celulose bacteriana, quitosana e colágeno recombinante, que além de apresentarem excelente integração tecidual, ainda contribuem para a redução do impacto ambiental associado à produção industrial dos biomateriais sintéticos (Heckmann, 2023).

Estudos clínicos e experimentais têm confirmado que superfícies tratadas por técnicas como anodização, jateamento com partículas bioativas, laser e deposição de filmes finos promovem alterações significativas na resposta imunológica local e na formação de tecido ósseo ao redor dos implantes, demonstrando que a engenharia de superfície continua sendo um dos focos mais promissores da implantodontia contemporânea (Khaohoen et al., 2023).

Com base nas evidências científicas mais recentes, percebe-se que o sucesso do tratamento implantodôntico depende cada vez mais da escolha de materiais tecnologicamente avançados e adaptados à realidade clínica do paciente, considerando aspectos como densidade óssea, presença de doenças sistêmicas, estética, e previsibilidade da reabilitação, o que torna a seleção criteriosa dos biomateriais um fator determinante para os resultados a longo prazo (Al Shayeb et al., 2023).

A ampliação do uso de plataformas digitais integradas à cirurgia guiada e à fabricação de implantes personalizados também tem contribuído para reduzir o tempo de tratamento, aumentar a precisão das intervenções e minimizar riscos operatórios, além de proporcionar uma experiência mais confortável ao paciente, sobretudo em casos complexos de reconstrução oral com envolvimento de múltiplas áreas anatômicas (Sun e Hong, 2021).

Nesse cenário de intensa transformação tecnológica, a interdisciplinaridade entre áreas como bioengenharia, ciência dos materiais, farmacologia e odontologia tem sido fundamental para o desenvolvimento de soluções clínicas mais eficazes, demonstrando que os avanços na implantodontia não estão restritos à técnica cirúrgica, mas envolvem uma profunda reformulação científica e tecnológica dos insumos utilizados (Campos da Silva e Arruda, 2023).

A literatura atual tem destacado o impacto positivo do uso de biomoléculas na modulação da resposta imunológica peri-implantar e na aceleração da regeneração óssea, reforçando a importância de estratégias que não somente favoreçam a osseointegração, mas também garantam a manutenção a longo prazo dos tecidos ao redor do implante, especialmente em pacientes com comorbidades ou baixa densidade óssea (López-Valverde et al., 2022).

Dessa forma, o campo da implantodontia vive uma fase de transição marcada pelo protagonismo da biotecnologia e pela busca contínua de materiais mais seguros, eficazes e personalizados, permitindo reabilitações cada vez mais eficientes mesmo em pacientes com limitações

clínicas anteriormente consideradas impeditivas, o que amplia de maneira significativa as possibilidades terapêuticas no cotidiano clínico (Al Shayeb et al., 2023).

A necessidade de acompanhar essas inovações implica também na atualização constante de protocolos clínicos, na reformulação dos currículos acadêmicos e na capacitação dos profissionais para lidar com materiais de alta performance e tecnologias emergentes, consolidando a biotecnologia e os biomateriais como pilares estratégicos para o presente e o futuro da implantodontia (Marques et al., 2023).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 EVOLUÇÃO DOS BIOMATERIAIS APLICADOS À IMPLANTODONTIA

A evolução dos biomateriais utilizados na implantodontia reflete a busca por maior previsibilidade clínica, biocompatibilidade e estabilidade funcional dos implantes dentários, considerando que os primeiros implantes em titânio puro, ainda na década de 1960, embora biologicamente aceitos, apresentavam limitações quanto à estética e integração com tecidos moles, o que impulsionou décadas de pesquisa voltadas à modificação de superfícies e à introdução de novos elementos estruturais nos implantes modernos (Heckmann, 2023).

Com o passar dos anos, a composição química e estrutural dos materiais utilizados em implantodontia passou a incorporar ligas metálicas mais resistentes, como o Ti-Zr, e superfícies tratadas com métodos físico-químicos como jateamento com partículas bioativas, anodização e ataque ácido, promovendo rugosidades específicas que favorecem a adesão celular, a diferenciação osteoblástica e a formação precoce de tecido ósseo ao redor da superfície implantada (Khaohoen et al., 2023).

O desenvolvimento de cerâmicas bioinertes e materiais polímeros de alto desempenho também contribuiu significativamente para a consolidação da implantodontia como especialidade reabilitadora de excelência, principalmente com o advento de implantes em zircônia e estruturas em PEEK reforçado, que aliam resistência mecânica, baixa condutividade térmica e aparência estética superior, tornando-se opções viáveis em casos de reabilitação anterior com alta exigência estética (Ciszyński et al., 2023).

A compreensão das limitações do titânio, como a possibilidade de liberação de íons metálicos e sua coloração escura que pode comprometer o resultado estético em biotipos gengivais finos, favoreceu a disseminação de pesquisas sobre superfícies híbridas e biomateriais compósitos, com destaque para combinações entre titânio e revestimentos cerâmicos bioativos, o que permitiu maior controle da resposta inflamatória e melhora no desempenho clínico dos implantes (Sun e Hong, 2021).

A consolidação das tecnologias digitais, como o escaneamento intraoral e a prototipagem por impressão 3D, também influenciou diretamente a evolução dos biomateriais, uma vez que passou a ser

possível fabricar estruturas implantáveis personalizadas com maior precisão dimensional, utilizando resinas biocompatíveis, cerâmicas avançadas e metais customizados, o que elevou o patamar da implantodontia digital e possibilitou um salto qualitativo no planejamento reverso e na execução das reabilitações (Lakshmi Mounika et al., 2023).

A tendência atual em implantodontia aponta para a utilização de superfícies biofuncionalizadas com nanopartículas, como óxidos metálicos, hidroxiapatita nanoestruturada e biomoléculas de adesão celular, visando acelerar o processo de osseointegração e, ao mesmo tempo, controlar a colonização bacteriana, fator importante para a longevidade do implante e prevenção de doenças peri-implantares, como a mucosite e a periimplantite (Marasli et al., 2023).

A partir dos anos 2010, a nanotecnologia passou a ser uma aliada crucial na construção de superfícies inteligentes, capazes de liberar gradualmente agentes antimicrobianos e pró-regenerativos, com destaque para os revestimentos contendo prata, zinco e peptídeos sintéticos, que além de promoverem um ambiente propício para a diferenciação osteogênica, reduzem significativamente o risco de infecção pós-operatória (Al Shayeb et al., 2023).

Um avanço importante foi a introdução dos biomateriais fotopolimerizáveis e das resinas híbridas para confecção de guias cirúrgicos e componentes protéticos temporários, possibilitando não somente maior agilidade no processo reabilitador, mas também maior precisão no encaixe e na estabilidade oclusal, com adaptações biomecânicas otimizadas ao perfil do paciente (Campos da Silva e Arruda, 2023).

A evolução dos biomateriais também refletiu nas técnicas de regeneração óssea guiada, com o desenvolvimento de membranas reabsorvíveis mais resistentes, scaffolds com estrutura tridimensional biomimética e substitutos ósseos sintéticos dotados de alta porosidade interconectada, o que favorece a vascularização precoce e o recrutamento celular para formação de novo osso (Marques et al., 2023).

Essa progressão científica exigiu a reformulação dos critérios de seleção clínica dos materiais, passando de uma abordagem baseada exclusivamente na resistência mecânica para uma escolha que considera parâmetros imunológicos, biológicos, estéticos e até mesmo ambientais, ampliando o conceito de sucesso implantodôntico para além da simples osseointegração estrutural (Heckmann, 2023).

As pesquisas atuais também vêm priorizando a avaliação do comportamento dos biomateriais em diferentes densidades ósseas e perfis de risco sistêmico, como pacientes diabéticos, fumantes ou com osteoporose, sendo que muitos dos materiais inovadores vêm demonstrando resultados promissores em termos de estabilidade inicial e manutenção óssea a longo prazo, mesmo em condições clínicas mais desafiadoras (López-Valverde et al., 2022).

Observa-se ainda a crescente incorporação de tecnologias de bioimpressão 3D na produção de biomateriais individualizados, como enxertos ósseos personalizados e componentes protéticos com

geometria anatômica específica, permitindo uma integração tridimensional mais precisa e uma redução do tempo cirúrgico, além de minimizar a necessidade de ajustes pós-operatórios (Lakshmi Mounika et al., 2023).

O surgimento de implantes fabricados por manufatura aditiva, com estruturas porosas internas otimizadas para distribuição de carga e estímulo mecânico ao tecido ósseo, tem sido apontado como uma das inovações mais promissoras da última década, ao permitir a fabricação de implantes mais leves, resistentes e fisiologicamente compatíveis com a dinâmica óssea (Ciszyński et al., 2023).

Além dos benefícios clínicos, a evolução dos biomateriais também tem incorporado uma dimensão ética e ambiental, com a utilização de matérias-primas de menor impacto ecológico, como colágeno vegetal e polímeros biodegradáveis, bem como a redução do desperdício por meio da digitalização de processos e da automação da produção laboratorial (Marasli et al., 2023).

Com isso, a trajetória da implantodontia ao longo dos últimos dez anos pode ser compreendida como uma síntese entre os avanços da ciência dos materiais e as exigências clínicas da reabilitação oral, culminando em uma geração de implantes e biomateriais mais inteligentes, funcionais e adaptáveis, que representam um marco na qualidade e previsibilidade dos tratamentos odontológicos (Sun e Hong, 2021).

2.2 INOVAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS NO PROCESSO DE OSSEointegração

O processo de osseointegração, fundamental para o sucesso da implantodontia, tem sido significativamente influenciado pelos avanços biotecnológicos, sobretudo no que se refere à capacidade de modificar as propriedades de superfície dos implantes para otimizar a resposta biológica e acelerar a formação óssea, sendo que técnicas como a biofuncionalização com peptídeos osteoindutores e proteínas da matriz extracelular vêm demonstrando grande eficácia na promoção da adesão celular e no estímulo à diferenciação osteoblástica (López-Valverde et al., 2022).

As superfícies tratadas com nanotecnologia representam uma das maiores inovações dos últimos anos, pois permitem um controle preciso da topografia e da energia de superfície, aspectos diretamente relacionados à adesão inicial de células progenitoras, proliferação vascular e estabilidade primária do implante, fatores que influenciam de maneira decisiva o tempo necessário para a reabilitação protética definitiva (Al Shayeb et al., 2023).

Além disso, a introdução de revestimentos com liberação controlada de íons bioativos, como cálcio, estrôncio, zinco e fósforo, tem possibilitado a criação de superfícies terapêuticas que promovem simultaneamente a regeneração óssea e o controle da inflamação, configurando uma abordagem multifuncional para os implantes dentários que alia propriedades físico-químicas otimizadas à capacidade de modular o microambiente celular (Marasli et al., 2023).

Avanços recentes também trouxeram à prática clínica os implantes com superfícies funcionalizadas com nanopartículas metálicas, como as de prata e cobre, conhecidas por suas propriedades antimicrobianas de amplo espectro, reduzindo significativamente o risco de infecções peri-implantares, especialmente em pacientes com histórico de periodontite ou em áreas de difícil higienização (Lakshmi Mounika et al., 2023).

A integração da biotecnologia à odontologia regenerativa também permitiu a associação de fatores de crescimento aos biomateriais implantáveis, como o uso de proteínas morfogenéticas ósseas (BMP-2 e BMP-7), que induzem a formação de tecido ósseo de forma independente de células-tronco residentes, promovendo a osteoindução em regiões críticas e aumentando a previsibilidade dos procedimentos reconstrutivos (Campos da Silva e Arruda, 2023).

Outra inovação bem importante é a utilização de sistemas híbridos que combinam superfícies nanoestruturadas com a liberação sustentada de biomoléculas, permitindo que o implante atue como uma plataforma terapêutica contínua, capaz de estimular a regeneração óssea ao longo do tempo e reduzir a ocorrência de respostas inflamatórias crônicas, o que representa uma evolução em relação aos implantes tradicionais de superfície inerte (Al Shayeb et al., 2023).

A incorporação de plasma rico em plaquetas (PRP) e fibrina rica em leucócitos (L-PRF) nos protocolos cirúrgicos vem ganhando espaço como uma forma biotecnológica de potencializar a cicatrização e a integração do implante, especialmente em pacientes com capacidade regenerativa reduzida, já que esses concentrados sanguíneos liberam citocinas e fatores de crescimento que promovem angiogênese e osteogênese (Marques et al., 2023).

Em paralelo, o desenvolvimento de técnicas de fotobiomodulação associadas a biomateriais de superfície sensível à luz infravermelha tem demonstrado resultados positivos na estimulação de células ósseas e na redução do tempo necessário para a osseointegração, abrindo espaço para uma nova linha de pesquisa que une engenharia de materiais e terapias fotônicas na reabilitação oral (Heckmann, 2023).

Estudos recentes vêm explorando também a impressão 3D de microestruturas porosas diretamente sobre a superfície dos implantes, permitindo a fabricação de geometrias otimizadas para infiltração vascular e retenção de células osteoprogenitoras, o que favorece a regeneração óssea mais eficiente e estável, além de permitir a personalização das dimensões do implante de acordo com as características ósseas do receptor (Ciszyński et al., 2023).

A aplicação de sistemas inteligentes sensíveis a estímulos, como pH, temperatura ou campo magnético, também está em fase experimental no contexto implantodôntico, com a proposta de liberar fármacos ou fatores de crescimento de forma responsiva às alterações do microambiente peri-implantar, tornando os biomateriais ferramentas terapêuticas ativas e adaptativas às condições do paciente (Sun e Hong, 2021).

A biotecnologia permitiu, ainda, a criação de superfícies hidrofilicas que favorecem o contato imediato com o sangue no momento da instalação do implante, o que estimula a formação da matriz orgânica inicial e melhora a estabilidade primária, sendo que implantes com essas características têm demonstrado maior taxa de sucesso em situações clínicas críticas, como carga imediata ou enxertos ósseos simultâneos (López-Valverde et al., 2022).

Outro avanço significativo consiste na utilização de scaffolds biodegradáveis funcionalizados com células-tronco mesenquimais, que vêm sendo associados a implantes em protocolos reconstrutivos mais complexos, possibilitando a regeneração de grandes defeitos ósseos com menor necessidade de enxertos autógenos, o que reduz morbidade e tempo cirúrgico, sem comprometer a previsibilidade do resultado (Campos da Silva e Arruda, 2023).

A integração de sensores biomédicos aos sistemas implantáveis, ainda em fase experimental, também representa uma fronteira inovadora, com potencial para monitorar em tempo real parâmetros como pH, temperatura e atividade inflamatória ao redor do implante, permitindo intervenções clínicas mais precoces em casos de complicações e aumentando a segurança do tratamento (Lakshmi Mounika et al., 2023).

Essas inovações biotecnológicas estão transformando a osseointegração em um processo dinâmico e controlado, deixando de ser apenas uma resposta natural do organismo ao material implantado para se tornar uma etapa tecnicamente induzida e acompanhada, com o objetivo de garantir previsibilidade, segurança e personalização na reabilitação oral (Marasli et al., 2023).

A consolidação dessas tecnologias demanda, no entanto, rigor científico na avaliação de biocompatibilidade, durabilidade, risco imunológico e impacto clínico a longo prazo, o que reforça a importância de uma abordagem interdisciplinar que une a pesquisa básica em biotecnologia à prática clínica da implantodontia, garantindo que as inovações sejam efetivamente incorporadas de forma ética e segura (Al Shayeb et al., 2023).

2.3 O FUTURO DA IMPLANTODONTIA

Apesar dos avanços expressivos na ciência dos biomateriais e na aplicação de tecnologias biotecnológicas em implantodontia, ainda persistem desafios significativos para a consolidação de soluções universalmente eficazes, especialmente em pacientes com comorbidades sistêmicas, baixa densidade óssea ou alterações imunológicas que comprometem a resposta regenerativa, exigindo o desenvolvimento de estratégias terapêuticas individualizadas com base em dados clínicos preditivos (Al Shayeb et al., 2023).

A necessidade de compatibilizar alta performance clínica com sustentabilidade ambiental e acessibilidade financeira constitui um dos principais impasses da implantodontia moderna, uma vez que muitos dos materiais de última geração ainda apresentam custo elevado, dificultando sua

incorporação em larga escala nos sistemas públicos de saúde ou em clínicas populares, o que amplia as desigualdades no acesso aos tratamentos reabilitadores (Campos da Silva e Arruda, 2023).

Um ponto de atenção diz respeito à durabilidade dos novos materiais sob condições clínicas reais, visto que muitos estudos disponíveis ainda são baseados em experimentações *in vitro* ou análises de curto prazo, sendo necessário um maior número de ensaios clínicos randomizados e com acompanhamento longitudinal para validar a segurança e eficácia dos implantes e superfícies inovadoras em diferentes perfis de pacientes (López-Valverde et al., 2022).

A estabilidade a longo prazo dos biomateriais em contato com os fluidos bucais, os microrganismos da microbiota oral e as forças mastigatórias também continua sendo um fator limitante para alguns compostos, principalmente os biodegradáveis e os funcionais, que precisam garantir resistência mecânica adequada durante todo o período de osseointegração, sem comprometer a integridade do implante ou provocar reações adversas (Heckmann, 2023).

Contudo, no ponto de vista da biossegurança, a aplicação de nanopartículas e biomoléculas sintetizadas em escala industrial ainda carece de padronização quanto à dosagem, à via de aplicação e à interação com tecidos vivos, havendo o risco de efeitos tóxicos locais ou sistêmicos se as formulações não forem rigorosamente testadas, o que exige regulamentações mais robustas e acompanhamento pós-mercado dos dispositivos biomédicos (Marasli et al., 2023).

Embora as tecnologias de manufatura aditiva e bioimpressão tenham ampliado as possibilidades de personalização dos implantes, ainda existem barreiras técnicas e econômicas para sua utilização em escala clínica rotineira, especialmente pela necessidade de equipamentos sofisticados, mão de obra especializada e rigorosos controles de qualidade durante a produção dos componentes implantáveis (Lakshmi Mounika et al., 2023).

A educação profissional também precisa acompanhar a velocidade das inovações, já que muitos cursos de graduação e pós-graduação em odontologia ainda não contemplam em sua matriz curricular conteúdos relacionados à bioengenharia, à ciência dos materiais avançados ou à integração de sistemas digitais, o que dificulta a formação de implantodontistas plenamente capacitados para lidar com essas novas tecnologias (Ciszyński et al., 2023).

Do ponto de vista regulatório, a aprovação de novos biomateriais e superfícies modificadas ainda enfrenta processos burocráticos complexos em muitos países, o que atrasa o acesso da população aos benefícios das inovações científicas, reforçando a necessidade de diálogo entre centros de pesquisa, fabricantes, entidades reguladoras e profissionais clínicos para agilizar o translado da tecnologia do laboratório para a prática (Sun e Hong, 2021).

Apesar dos desafios, as perspectivas para o futuro da implantodontia são promissoras, especialmente com a ampliação de estudos sobre biomateriais inteligentes capazes de responder a estímulos biológicos em tempo real, como pH, temperatura e carga funcional, o que permitirá o

desenvolvimento de implantes adaptativos, capazes de se comportar dinamicamente de acordo com as necessidades fisiológicas do paciente (López-Valverde et al., 2022).

A integração de inteligência artificial ao planejamento implantodôntico representa uma tendência irreversível, permitindo o cruzamento de dados clínicos, anatômicos e genéticos para a seleção personalizada de biomateriais, predição de falhas, simulações tridimensionais e escolha do protocolo cirúrgico mais adequado, otimizando o tempo clínico e aumentando a previsibilidade dos resultados (Campos da Silva e Arruda, 2023).

Outra linha de pesquisa em ascensão é a aplicação de terapias celulares combinadas a implantes com superfícies bioativas, como o uso de células-tronco adultas autólogas ou cultivadas em laboratório para induzir a formação óssea em áreas de difícil regeneração, especialmente em maxilas atróficas ou em pacientes que não podem ser submetidos a enxertos convencionais (Heckmann, 2023).

A busca por alternativas ao titânio também continua sendo um foco de estudo relevante, com investigações sobre novos metais, cerâmicas dopadas com nanopartículas, compósitos híbridos e polímeros reforçados que possam superar as limitações estéticas e biológicas do material tradicional, mantendo a resistência mecânica necessária e garantindo integração segura com os tecidos bucais (Al Shayeb et al., 2023).

A valorização da estética como elemento central na reabilitação oral também tem impulsionado o desenvolvimento de biomateriais translúcidos, com tonalidades semelhantes à estrutura dentária natural e que não interfiram na coloração da mucosa gengival, aspecto especialmente importante em reabilitações anteriores e em pacientes com biotipo gengival fino (Ciszyński et al., 2023).

Com o avanço da farmacogenética, a tendência é que, futuramente, os protocolos implantodônticos levem em consideração o perfil genético do paciente para determinar a melhor resposta inflamatória, o tempo de cicatrização e o risco de falhas, possibilitando tratamentos totalmente personalizados e alinhados com os princípios da medicina de precisão (Sun e Hong, 2021).

Em síntese, os desafios atuais exigem uma postura crítica, científica e ética diante das inovações disponíveis, enquanto as perspectivas apontam para uma implantodontia cada vez mais integrativa, interdisciplinar e tecnológica, na qual os biomateriais e a biotecnologia deixarão de ser apenas recursos complementares para se tornarem elementos estruturantes da prática clínica contemporânea (Marques et al., 2023).

3 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa de natureza exploratória, com delineamento baseado em revisão bibliográfica, cujo objetivo é compreender, por meio da análise crítica da literatura científica, as principais tendências e inovações relacionadas à biotecnologia e aos biomateriais aplicados à implantodontia nos últimos dez anos, considerando a crescente complexidade

das demandas clínicas e a rápida evolução dos materiais utilizados na prática odontológica, sendo que essa abordagem foi escolhida por possibilitar uma leitura aprofundada do estado da arte a partir de diferentes perspectivas acadêmicas e clínicas sobre o tema.

A escolha pela revisão bibliográfica justifica-se pelo caráter cumulativo e analítico da investigação, permitindo reunir informações dispersas em distintas fontes para identificar padrões, convergências e lacunas na produção científica recente, o que possibilita uma sistematização do conhecimento já consolidado e a identificação de áreas emergentes que merecem aprofundamento, respeitando os critérios de rigor acadêmico e a necessidade de fundamentação teórica sólida, conforme orientam Gil (2019) e Lakatos e Marconi (2022).

O levantamento das fontes foi realizado em bases de dados científicas nacionais e internacionais de reconhecida credibilidade, como Scielo, PubMed, ScienceDirect, LILACS, Google Scholar e periódicos de implantodontia com fator de impacto relevante, privilegiando artigos publicados entre os anos de 2015 e 2023 que abordassem diretamente os aspectos relacionados à inovação biotecnológica, aos avanços em biomateriais e à osseointegração de implantes odontológicos em humanos ou em modelos experimentais.

Foram utilizados como descritores os termos “biotecnologia em implantodontia”, “biomateriais odontológicos”, “osseointegração”, “superfícies bioativas” e “implantodontia digital”, de forma combinada e individual, respeitando as especificidades de indexação de cada base consultada, sendo que também foram considerados sinônimos e variantes linguísticas para ampliar o alcance da busca e assegurar a inclusão de estudos relevantes ao escopo da pesquisa.

A análise dos dados coletados foi feita por meio de categorização temática, organizada em três eixos principais: a) evolução dos biomateriais aplicados à implantodontia, b) inovações biotecnológicas no processo de osseointegração, e c) desafios e perspectivas para o futuro da implantodontia, estrutura essa que orientou a construção do referencial teórico e permitiu uma discussão estruturada sobre as transformações mais relevantes ocorridas na área ao longo da última década.

Seguindo os princípios da análise qualitativa, foram considerados tanto os aspectos técnicos e científicos dos materiais estudados quanto as implicações clínicas, éticas e sociais da incorporação dessas tecnologias na prática odontológica, com o objetivo de construir uma visão ampla e crítica das possibilidades e limitações associadas ao uso de biotecnologia e biomateriais em implantodontia, respeitando a complexidade multidimensional do tema.

Por se tratar de uma revisão bibliográfica, não houve a realização de experimentos laboratoriais ou coleta de dados primários, tampouco envolvimento direto de seres humanos, o que dispensa a submissão à apreciação por comitês de ética em pesquisa, estando o estudo em conformidade com os

princípios éticos e metodológicos exigidos para a elaboração de trabalhos científicos baseados exclusivamente em fontes secundárias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados revela uma transformação profunda na composição e no comportamento dos biomateriais aplicados à implantodontia, evidenciando que o titânio, embora ainda amplamente utilizado, vem sendo progressivamente substituído ou complementado por materiais como zircônia e PEEK, cujas propriedades ópticas, resistência química e potencial de integração com tecidos moles ampliaram significativamente o leque de indicações clínicas e a previsibilidade estética dos tratamentos reabilitadores (Ciszyński et al., 2023).

Verificou-se que as modificações de superfície realizadas por meio de nanotecnologia desempenham papel decisivo na aceleração da osseointegração, principalmente pela capacidade de induzir respostas celulares favoráveis, como adesão osteoblástica precoce, angiogênese e modulação inflamatória, sendo que técnicas como anodização, jateamento com partículas bioativas e funcionalização com nanopartículas metálicas mostraram-se altamente eficazes para esse fim (Al Shayeb et al., 2023).

No tocante à biotecnologia aplicada ao planejamento cirúrgico, os estudos apontam que o uso de tecnologias digitais, como o escaneamento intraoral, a cirurgia guiada e a manufatura aditiva, permite maior precisão na instalação dos implantes e melhor adaptação dos componentes protéticos, além de reduzir o tempo clínico e o risco de complicações, especialmente em casos de reabsorções ósseas severas ou reabilitações múltiplas (Lakshmi Mounika et al., 2023).

O uso de superfícies bioativas recobertas com compostos como hidroxiapatita, grafeno e óxidos metálicos demonstrou resultados superiores em termos de estabilidade primária e redução da resposta inflamatória, sendo que a aplicação de íons bioativos como cálcio, estrôncio e zinco foi destacada como estratégia eficaz para a regeneração óssea guiada, tanto em modelos animais quanto em estudos clínicos controlados (Marasli et al., 2023).

A presença de fatores de crescimento, proteínas morfogenéticas ósseas e citocinas anti-inflamatórias em implantes biofuncionalizados foi amplamente correlacionada com a melhora na integração tecidual e na redução do tempo de cicatrização, evidenciando o potencial terapêutico dos implantes de terceira geração como plataformas ativas de regeneração e não somente como estruturas passivas de ancoragem protética (Campos da Silva e Arruda, 2023).

Os estudos também demonstraram que a impressão 3D e a biofabricação de componentes personalizados com resinas biocompatíveis ou biomateriais híbridos aumentam a eficiência das reabilitações complexas, permitindo ajustes milimétricos e reprodução precisa da anatomia do

paciente, o que contribui para um encaixe funcional mais eficiente e para uma estética mais previsível, principalmente em regiões anteriores (Sun e Hong, 2021).

Do ponto de vista clínico, observou-se que as superfícies hidrofílicas tratadas com tecnologias de ativação em ambiente controlado apresentaram melhor interação inicial com o coágulo sanguíneo, o que favoreceu a formação da matriz orgânica e acelerou o processo de osseointegração, sendo especialmente úteis em protocolos de carga imediata ou em pacientes com metabolismo ósseo comprometido (López-Valverde et al., 2022).

As evidências também indicaram que os biomateriais utilizados em substitutos ósseos e membranas regenerativas evoluíram consideravelmente, incorporando compósitos biodegradáveis com alta porosidade e biocompatibilidade, além de propriedades mecânicas superiores, o que permitiu a regeneração tridimensional mais eficiente de defeitos ósseos críticos e a preservação de volume alveolar após exodontias (Marques et al., 2023).

A análise da literatura revelou que as pesquisas envolvendo implantes funcionalizados com nanopartículas de prata ou cobre obtiveram excelente desempenho na redução da colonização bacteriana, sendo essas superfícies indicadas especialmente para pacientes com histórico de periodontite ou com dificuldades na manutenção da higiene bucal, reforçando a importância de soluções antimicrobianas integradas aos dispositivos implantáveis (Heckmann, 2023).

Verificou-se ainda que os biomateriais aplicados à implantodontia não são apenas selecionados por suas propriedades mecânicas, mas também por sua interação com o sistema imunológico do paciente, sendo que materiais com menor liberação de íons metálicos, menor citotoxicidade e menor suscetibilidade à corrosão foram considerados mais favoráveis para evitar reações adversas e garantir a longevidade do implante (Al Shayeb et al., 2023).

Em relação à aplicabilidade clínica das inovações, os artigos analisados reforçam que a maior limitação para incorporação dos biomateriais de última geração ainda é o custo elevado, seguido pela carência de profissionais capacitados para manusear essas novas tecnologias, o que sinaliza a necessidade de investimento em capacitação técnica e atualização curricular nas instituições de ensino odontológico (Campos da Silva e Arruda, 2023).

A partir da categorização temática dos estudos, ficou evidente que o campo da implantodontia está cada vez mais orientado pela interdisciplinaridade, sendo a integração entre biotecnologia, engenharia de materiais, farmacologia e clínica odontológica importante para a concepção de soluções cada vez mais eficazes e personalizadas, que considerem não somente os aspectos anatômicos, mas também imunológicos e genéticos dos pacientes (López-Valverde et al., 2022).

Embora os resultados obtidos com os biomateriais mais modernos sejam promissores, os pesquisadores apontam a necessidade de padronização dos métodos de avaliação e maior rigor nos estudos clínicos de longo prazo, de forma a garantir a reproduzibilidade dos resultados e permitir a

validação científica das aplicações clínicas em diferentes contextos populacionais e biotipos ósseos (Heckmann, 2023).

As perspectivas mais recentes destacam a viabilidade de implantes com sensores integrados para monitoramento contínuo da saúde peri-implantar, bem como o uso de inteligência artificial para predição de falhas, ajuste de torque ideal e seleção automatizada de biomateriais a partir de algoritmos baseados em evidência, o que poderá transformar radicalmente a prática implantodôntica nos próximos anos (Lakshmi Mounika et al., 2023).

Em síntese, os resultados analisados indicam que a biotecnologia e os biomateriais vêm assumindo um papel central na reconfiguração da implantodontia, promovendo soluções cada vez mais eficientes, seguras e individualizadas, com impacto direto na melhoria dos índices de sucesso clínico, na durabilidade dos implantes e na satisfação estética e funcional dos pacientes reabilitados (Marques et al., 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A trajetória da implantodontia nas últimas décadas demonstrou um salto qualitativo impulsionado pelos avanços em biotecnologia e pelo desenvolvimento de biomateriais cada vez mais sofisticados, capazes de integrar funcionalidade, estética e biocompatibilidade. A transformação desse campo ocorreu não somente no aprimoramento dos materiais, mas também na reconfiguração dos protocolos clínicos, exigindo dos profissionais uma compreensão mais ampla sobre os mecanismos de interação entre implante e tecido biológico.

Ao analisar as inovações mais recentes, observa-se que o sucesso clínico está fortemente vinculado à capacidade dos biomateriais de promover não somente estabilidade mecânica, mas também estímulo biológico à regeneração tecidual, reduzindo o tempo de osseointegração e aumentando a previsibilidade dos tratamentos. Essa mudança de paradigma posiciona o implante não mais como um corpo estranho, mas como um elemento ativo no processo de cicatrização e integração com o organismo.

A incorporação de superfícies biofuncionalizadas, nanotecnologia, liberação controlada de íons e biomoléculas, bem como o uso de impressões 3D e guias digitais personalizados, conferiu à implantodontia uma precisão antes impensável. Essas tecnologias permitiram reabilitações mais rápidas, menos invasivas e com resultados estéticos superiores, ampliando a acessibilidade e a aceitação dos tratamentos implantodônticos em diversos contextos clínicos.

No entanto, ao mesmo tempo em que essas inovações ampliaram o leque de possibilidades terapêuticas, também impuseram novos desafios relacionados ao custo dos materiais, à capacitação dos profissionais e à necessidade de evidências científicas robustas que sustentem a eficácia das novas

abordagens. A incorporação responsável dessas tecnologias exige não somente entusiasmo científico, mas também critérios éticos e clínicos bem definidos.

A perspectiva para os próximos anos aponta para a consolidação de implantes inteligentes, capazes de responder a estímulos biológicos e interagir com o ambiente fisiológico de forma adaptativa. Essa tendência exige uma reformulação do conceito de sucesso implantodôntico, que passa a considerar não somente a estabilidade óssea, mas também fatores como qualidade de vida, longevidade do tratamento e impacto na saúde sistêmica do paciente.

A personalização dos tratamentos, baseada em dados genéticos, anatômicos e imunológicos, tende a se tornar realidade com a integração entre inteligência artificial, impressão biomédica e farmacogenética. Nesse cenário, a escolha do biomaterial ideal deixará de ser empírica para tornar-se preditiva, aumentando significativamente a taxa de sucesso dos procedimentos e reduzindo riscos relacionados à rejeição ou falhas estruturais.

A interdisciplinaridade continuará sendo um pilar importante para o avanço da área, pois as soluções mais eficazes tendem a surgir do diálogo entre odontologistas, engenheiros, biomédicos e cientistas de materiais. Essa colaboração precisa ser incentivada desde a formação acadêmica, com o objetivo de preparar profissionais aptos a utilizar, desenvolver e validar tecnologias emergentes de forma crítica e integrada.

Ainda que os resultados obtidos com os biomateriais mais recentes sejam promissores, é necessário reforçar a importância do acompanhamento a longo prazo dos pacientes reabilitados, a fim de compreender o comportamento dos novos materiais em condições reais de uso. A criação de bancos de dados clínicos e o fortalecimento da pesquisa multicêntrica são estratégias importantes para validar as inovações em escala populacional.

O futuro da implantodontia dependerá diretamente da capacidade dos pesquisadores e clínicos de equilibrar inovação tecnológica, segurança do paciente e viabilidade econômica. A democratização do acesso aos avanços não será possível sem políticas públicas e iniciativas de mercado que incentivem a produção local, reduzam custos e promovam a formação continuada dos profissionais envolvidos na cadeia de reabilitação oral.

Em última análise, a biotecnologia e os biomateriais não representam apenas ferramentas para o aprimoramento técnico da implantodontia, mas sim catalisadores de uma nova forma de pensar a reabilitação oral: mais humanizada, baseada em evidência, orientada por dados e capaz de oferecer aos pacientes soluções individualizadas, seguras e duradouras para a recuperação da função e da autoestima.



REFERÊNCIAS

AL SHAYEB, M. et al. Bioactive surface modifications on dental implants: a systematic review and meta-analysis of osseointegration and longevity. *Clinical Oral Investigations*, v. 28, n. 11, p. 592, 2023.

CAMPOS DA SILVA, A. J.; ARRUDA, F. J. S. de. Desafios na implantodontia: biomateriais e sua contribuição na reabilitação de maxilas atróficas. *Biosciences and Health*, v. 3, 2023.

CISZYŃSKI, M. et al. Zirconia dental implant designs and surface modifications: a narrative review. *Materials*, v. 17, n. 17, p. 4202, 2023.

HECKMANN, G. A. Avanços recentes em biomateriais para implantes dentários. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, v. 7, n. 2, p. 1010-1031, 2023.

KHAOHOEN, A. et al. Biomaterials and clinical application of dental implants in relation to bone density – A narrative review. *Journal of Clinical Medicine*, v. 12, n. 21, p. 6924, 2023.

LAKSHMI MOUNIKA, K. et al. Comprehensive evaluation of novel biomaterials for dental implant surfaces: an in vitro comparative study. *Cureus*, v. 16, n. 5, e61175, 2023.

LÓPEZ-VALVERDE, N. et al. Effectiveness of biomolecule-based bioactive surfaces on osseointegration of titanium dental implants: a systematic review and meta-analysis of in vivo studies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 10, 2022.

MARASLI, C. et al. Nano-based approaches in surface modifications of dental implants: a literature review. *Molecules*, v. 29, n. 13, p. 3061, 2023.

MARQUES, D. C. et al. Propriedades dos biomateriais para correção de defeitos ósseos na implantodontia. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, v. 6, n. 11, p. 1260-1266, 2023.

SUN, L.; HONG, G. Surface modifications for zirconia dental implants: a review. *Frontiers in Dental Medicine*, v. 2, 2021.