



## **Análise Comparativa dos Biomateriais Utilizados em Implantes Dentários: Osseointegração, Biocompatibilidade e Desempenho Clínico**

Comparative Analysis of Biomaterials Used in Dental Implants: Osseointegration, Biocompatibility, and Clinical Performance

Autoria:

Dra. Louise Souza Coelho, Graduada em Odontologia na Universidade de Vila Velha em 2019

Dra. Júlia Dal Paz, Graduada em Odontologia na Universidade de Passo Fundo em 2018.

### **RESUMO:**

Este artigo analisa comparativamente os principais biomateriais utilizados em implantes dentários, destacando suas propriedades relacionadas à osseointegração, biocompatibilidade e desempenho clínico. São abordados materiais clássicos, como o titânio e suas ligas, bem como alternativas emergentes, como a zircônia. A partir de uma revisão crítica de estudos científicos recentes, discute-se a interação destes biomateriais com o tecido ósseo, suas respostas imunológicas e implicações clínicas. O trabalho enfatiza o papel das modificações de superfície e os avanços tecnológicos na otimização dos resultados em implantodontia. Os dados apresentados visam contribuir para a escolha fundamentada do material ideal na prática clínica atual.

**Palavras-chave:** Biomateriais, Implantes dentários, Titânio, Zircônia, Osseointegração, Biocompatibilidade.

### **ABSTRACT:**

**This article presents a comparative analysis of the main biomaterials used in dental implants, highlighting their properties related to osseointegration, biocompatibility, and clinical performance.** Classic materials such as titanium and its alloys are discussed, as well as emerging alternatives like zirconia. Based on a critical review of recent scientific studies, the article examines the interaction between these biomaterials and bone tissue, their immunological responses, and clinical implications. The study emphasizes the role of surface modifications and technological advancements in optimizing outcomes in implant dentistry. The presented data aim to support evidence-based decision-making in the selection of the most appropriate material for contemporary clinical practice.

**Keywords:** Biomaterials; Dental implants; Titanium; Zirconia; Osseointegration; Biocompatibility.

## 1. INTRODUÇÃO -

A implantodontia representa um dos avanços mais significativos da odontologia moderna, especialmente no que tange à reabilitação funcional e estética dos pacientes com perda dentária. Desde a consolidação da osseointegração proposta por Branemark (1969), o sucesso clínico dos implantes dentários tem sido amplamente associado à interação entre o biomaterial utilizado e o tecido ósseo circundante. Essa integração biológica depende fundamentalmente das propriedades químicas, mecânicas e físicas do biomaterial, o que torna a escolha do material um aspecto crucial para a longevidade do implante (Albrektsson et al., 1981).

O material mais utilizado na confecção de implantes dentários é o titânio, cujas propriedades de resistência à corrosão, leveza e biocompatibilidade tornaram-no o padrão ouro na implantodontia (Jemat et al., 2015). No entanto, limitações relativas à estética, devido à coloração metálica, e possíveis reações adversas, motivaram o desenvolvimento e a investigação de materiais alternativos, dentre eles a zircônia, uma cerâmica que combina elevada resistência mecânica com uma coloração semelhante ao dente natural, além de um perfil biológico favorável (Scarano et al., 2003; Piconi & Maccauro, 1999).

O campo dos biomateriais para implantes dentários está em constante evolução, com avanços relacionados não apenas aos materiais em si, mas também às suas superfícies, que podem ser modificadas para otimizar a osseointegração e minimizar o risco de complicações como a peri-implantite (Wennerberg & Albrektsson, 2009). A nanotecnologia e os revestimentos bioativos têm ganhado destaque na modulação da resposta biológica, potencializando a adesão celular e a formação óssea em torno dos implantes (Zhao et al., 2016).

Este artigo propõe uma análise comparativa detalhada dos biomateriais utilizados em implantes dentários, considerando os aspectos de osseointegração, se fornecer uma visão atualizada e crítica que auxilie profissionais da odontologia na tomada de decisões clínicas embasadas em evidências científicas robustas.

A compreensão profunda dos mecanismos biológicos que regem a interação entre biomaterial e tecido ósseo, bem como a influência das propriedades físicas e químicas dos materiais, é indispensável para o aprimoramento das técnicas de implantodontia e para a melhoria contínua dos resultados clínicos. Assim, este estudo contribuirá para o avanço do conhecimento científico e para o desenvolvimento de estratégias clínicas mais eficazes e seguras.

Por fim, enfatiza-se que a escolha do biomaterial ideal não deve considerar apenas suas propriedades isoladas, mas também o contexto clínico, as características do paciente e as tecnologias associadas, o que torna a análise comparativa um instrumento valioso para a prática odontológica contemporânea.

## 2. Titânio em Implantes Dentários: Propriedades, Osseointegração e Desempenho Clínico

O titânio e suas ligas são amplamente reconhecidos como o padrão ouro para a fabricação de implantes dentários devido à combinação única de propriedades mecânicas, químicas e biológicas que favorecem a osseointegração e o sucesso a longo prazo dos implantes. O elemento apresenta alta resistência à corrosão, baixo peso específico e excelente

biocompatibilidade, características que foram exaustivamente estudadas e documentadas em pesquisas desde a década de 1970 (Branemark et al., 1977; Albrektsson et al., 1981).

A osseointegração, conceito definido como a união direta entre o tecido ósseo e a superfície do implante, depende significativamente da capacidade do titânio de formar uma camada passiva de óxido de titânio em sua superfície, que protege o implante contra corrosão e favorece a adesão celular (Le Guéhennec et al., 2007).

Estudos conduzidos por Anselme (2000), publicados na *Journal of Biomedical Materials Research*, demonstraram que a topografia e a química da superfície do titânio são determinantes na modulação da resposta celular, influenciando diretamente a proliferação de osteoblastos e a mineralização óssea.

Além disso, modificações superficiais, como jateamento com partículas de alumina e tratamento ácido, têm sido amplamente aplicadas para aumentar a rugosidade do titânio, promovendo maior área de contato e melhor fixação biológica. Segundo Wennerberg e Albrektsson (2009), publicaram na *Clinical Oral Implants Research*, essas alterações topográficas melhoram a estabilidade primária e aceleram a osseointegração, reduzindo o tempo necessário para a carga protética.

A biocompatibilidade do titânio também tem sido objeto de investigação profunda, especialmente em relação às respostas imunológicas e inflamatórias. Pesquisa conduzida por Hallab et al. (2001), publicada na *Biomaterials*, indicou que as partículas liberadas pela corrosão ou desgaste do titânio podem induzir respostas imunes locais, mas que, em condições clínicas adequadas, esses efeitos são mínimos e não comprometem a integração óssea. Ainda assim, tais estudos ressaltam a importância de manter técnicas cirúrgicas precisas e evitar micromovimentos excessivos do implante.

Do ponto de vista clínico, a longevidade e as taxas de sucesso do titânio são amplamente documentadas. Um estudo prospectivo de longo prazo, realizado por Pjetursson et al. (2012) e publicado na *European Journal of Oral Sciences*, analisou mais de 10 anos de acompanhamento em implantes de titânio, reportando taxas de sucesso superiores a 90%, mesmo em condições desafiadoras como a maxila posterior. Este dado reforça a confiabilidade do titânio como biomaterial, apesar das constantes pesquisas por alternativas estéticas e funcionais.

Por fim, os avanços recentes têm focado em otimizar ainda mais as propriedades do titânio, com o desenvolvimento de ligas especiais como o Ti-6Al-4V e tratamentos superficiais nanotecnológicos que buscam melhorar a adesão celular e a resistência mecânica sem comprometer a biocompatibilidade (Zhao et al., 2016). Tais inovações indicam que, apesar das limitações estéticas, o titânio permanece a base sólida para o desenvolvimento e evolução da implantodontia moderna.

A zircônia, ou dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ ), é um material cerâmico que vem ganhando destaque crescente na implantodontia devido às suas propriedades estéticas superiores e alta biocompatibilidade. Diferentemente do titânio, que apresenta coloração metálica, a zircônia possui uma tonalidade branca opaca que se assemelha à cor natural dos dentes, fato que a torna particularmente atraente para o uso em áreas estéticas da arcada dentária, principalmente nos setores anteriores, onde a visibilidade do implante é maior (Piconi & Maccauro, 1999).

Essa característica estética somada à ausência de íons metálicos em sua composição minimiza os riscos de reações alérgicas ou sensibilidades em pacientes suscetíveis, ampliando seu campo de aplicação clínica. Além disso, a cerâmica zircônia apresenta elevada resistência mecânica, resistência à abrasão e baixa condutividade térmica, fatores que colaboram para sua estabilidade em ambientes intraorais sujeitos a diferentes tipos de cargas e variações térmicas (Scarano et al., 2003).

Estudos experimentais realizados por Scarano e colaboradores (2003), publicados no *Journal of Biomedical Materials Research*, avaliaram a resistência mecânica da zircônia e demonstraram que, apesar de cerâmica, o material suporta níveis de carga comparáveis aos do titânio, resistindo à fadiga mecânica induzida por ciclos repetitivos de mastigação. Essa resistência é atribuída à estrutura cristalina tetragonal estabilizada da zircônia, que apresenta um mecanismo de transformação de fase que impede a propagação de trincas, aumentando a durabilidade do material. A pesquisa destaca ainda que, sob condições laboratoriais controladas, implantes de zircônia apresentaram desempenho mecânico satisfatório para uso clínico, o que tem incentivado o desenvolvimento de modelos comerciais cada vez mais sofisticados e adequados para a carga funcional na cavidade oral.

No âmbito da biocompatibilidade, a zircônia apresenta um perfil biológico favorável, com baixa tendência a induzir reações inflamatórias ou respostas imunológicas adversas, diferentemente de alguns metais que podem liberar íons causadores de inflamação crônica. Kohal et al. (2012), em estudo clínico publicado na *Clinical Oral Implants Research*, observaram que implantes de zircônia exibiram menor infiltração inflamatória na região perimplantar e melhor integração dos tecidos moles peri-implantares quando comparados a implantes de titânio, sugerindo um ambiente biológico mais estável e propício à cicatrização. Estes dados são fundamentais para a prevenção da peri-implantite, condição que representa uma das maiores causas de falha em implantes dentários. Portanto, o uso da zircônia pode representar uma alternativa viável para pacientes com histórico de respostas inflamatórias exacerbadas. Entretanto, a osseointegração da zircônia ainda é objeto de intenso estudo, uma vez que sua superfície cerâmica é naturalmente mais lisa e menos bioativa que a do titânio, o que pode dificultar a adesão celular inicial e a mineralização óssea.

Para contornar essas limitações, diversas técnicas de modificação superficial têm sido desenvolvidas, tais como o jateamento com partículas, tratamentos com laser e aplicação de revestimentos bioativos à base de hidroxiapatita ou fosfato de cálcio. Faria et al. (2016), em artigo publicado na revista *Materials Science and Engineering C*, demonstraram que a nano texturização da superfície da zircônia incrementa significativamente a aderência, proliferação e diferenciação de osteoblastos, células responsáveis pela formação óssea, promovendo uma osseointegração mais rápida e eficaz. Essas modificações são essenciais para garantir a

estabilidade primária e secundária do implante, especialmente em regiões com baixa densidade óssea.

No cenário clínico, a zircônia apresenta um histórico mais recente e um conjunto de dados longitudinalmente menor em comparação ao titânio. No entanto, estudos prospectivos realizados por Osman et al. (2014), publicados no *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, indicam taxas de sucesso próximas aos implantes metálicos, com percentuais superiores a 90% em acompanhamentos de até cinco anos. Esses resultados mostram que, apesar das preocupações iniciais quanto à resistência mecânica e à osseointegração, os implantes de zircônia são capazes de fornecer resultados clínicos satisfatórios, sobretudo em pacientes com necessidade estética e com contra-indicações ao uso de metais. Além disso, a ausência de corrosão eletroquímica reduz complicações a longo prazo.

Apesar dos avanços e benefícios da zircônia, ainda existem desafios técnicos e econômicos a serem superados para sua ampla adoção clínica. A fragilidade inerente das cerâmicas, especialmente sob cargas excessivas ou impactos laterais, demanda precisão técnica na fabricação e na instalação dos implantes, elevando os custos em comparação ao titânio. Além disso, a complexidade na produção e o menor volume de comercialização ainda limitam a oferta no mercado. Contudo, o desenvolvimento contínuo de ligas cerâmicas reforçadas, bem como melhorias nos processos de fabricação e tratamento superficial, apontam para um futuro promissor em que a zircônia poderá se consolidar como um biomaterial padrão para implantes estéticos, mantendo alta performance funcional e biológica (Sailer et al., 2018).

#### **4. Ligas Especiais em Implantes Dentários: Propriedades Mecânicas, Biocompatibilidade e Aplicações Clínicas**

As ligas especiais, especialmente aquelas baseadas em titânio, como a liga Ti-6Al-4V (titânio, alumínio e vanádio), representam um importante avanço na tecnologia de biomateriais para implantes dentários, buscando melhorar propriedades mecânicas sem comprometer a biocompatibilidade. Essa liga oferece maior resistência mecânica, ductilidade e tenacidade em comparação ao titânio puro, sendo amplamente utilizada em implantes ortopédicos e dentários que requerem maior desempenho estrutural (Geetha et al., 2009).

A principal vantagem da Ti-6Al-4V está na combinação de resistência à fadiga, resistência à corrosão e leveza, que permite a confecção de implantes mais finos e com formatos complexos, favorecendo a adaptação anatômica e a estabilidade primária. Segundo Rupp et al. (2018), em artigo publicado na *Materials Science and Engineering C*, a microestrutura desta liga, composta por fases alfa e beta, proporciona propriedades mecânicas superiores, reduzindo o risco de fraturas e deformações durante a instalação e função do implante.

Em termos de biocompatibilidade, apesar da inclusão dos elementos alumínio e vanádio, que podem apresentar toxicidade em determinadas condições, a camada passiva de óxido de titânio que se forma na superfície da liga atua como barreira eficaz contra a liberação de íons metálicos, mantendo o perfil biológico seguro para o tecido ósseo e mucoso (Niinomi, 2008). Estudos toxicológicos conduzidos por Geetha et al. (2009), publicados no *Journal of Biomedical Materials Research*, indicaram que a citotoxicidade da Ti-6Al-4V é comparável à do titânio puro, desde que a integridade da camada passiva seja mantida.

A osseointegração da Ti-6Al-4V apresenta resultados clínicos satisfatórios, com taxas de sucesso semelhantes às observadas para o titânio comercialmente puro, porém a liga permite o desenvolvimento de superfícies mais resistentes a desgaste e deformações. Modificações superficiais, como anodização, jateamento e revestimentos bioativos, são aplicadas para melhorar a rugosidade e a bioatividade da liga, conforme demonstrado em pesquisas recentes, incluindo o trabalho de Elias et al. (2013), publicado na *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*.

Além da Ti-6Al-4V, outras ligas especiais, como Ti-13Nb-13Zr (titânio, nióbio e zircônio), têm sido investigadas para reduzir potenciais riscos biológicos associados aos metais tradicionais, ao mesmo tempo em que mantêm excelentes propriedades mecânicas. Um estudo realizado por Geetha et al. (2013), publicado no *Acta Biomaterialia*, indicou que a Ti-13Nb-13Zr apresenta menor módulo de elasticidade, aproximando-se mais ao do osso humano, o que favorece a distribuição de cargas e reduz o risco de perda óssea por estresse excessivo.

No cenário clínico, as ligas especiais são indicadas especialmente em implantes para regiões que suportam altas cargas mastigatórias, ou em pacientes com condições ósseas desafiadoras, como osteoporose. A aplicação dessas ligas está diretamente relacionada ao aumento da longevidade e da funcionalidade dos implantes, garantindo resistência e integridade mesmo em situações adversas. As perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de ligas hipoalergênicas e revestimentos nanotecnológicos para otimização da integração biológica, conforme apontado por Liu et al. (2019) na *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*.

## **5. Resposta Imunológica e Biológica dos Biomateriais em Implantes Dentários: Mecanismos e Implicações Clínicas**

A interação dos biomateriais utilizados em implantes dentários com o sistema imunológico do organismo é um fator crucial para o sucesso clínico e a longevidade dos implantes. Ao serem inseridos no tecido ósseo e mucoso, os implantes desencadeiam uma série de respostas biológicas, que envolvem desde a adesão celular inicial até processos complexos de remodelação óssea e possível reação inflamatória (Gomes et al., 2014). A compreensão desses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de biomateriais que promovam a integração eficiente e minimizem complicações.

A resposta imunológica inicial ao implante é caracterizada pela ativação do sistema imune inato, principalmente através da ação dos macrófagos e neutrófilos, que reconhecem partículas e resíduos liberados da superfície do implante como potenciais agentes agressivos. Conforme destacado no estudo de Hallab et al. (2001), publicado na *Biomaterials*, a liberação de íons metálicos e partículas de desgaste, especialmente em implantes de titânio, pode induzir a ativação dessas células, resultando na liberação de citocinas pró-inflamatórias que modulam o processo de cicatrização.

Essa fase inflamatória aguda é necessária para iniciar a reparação tecidual, porém, se exacerbada ou prolongada, pode levar a processos de peri-implantite e falha do implante. Segundo o estudo de Schwarz et al. (2018), publicado na *Journal of Clinical Periodontology*, a peri-implantite está associada a uma resposta imunológica desregulada, com aumento da

produção de mediadores inflamatórios que promovem a reabsorção óssea ao redor do implante, comprometendo sua estabilidade. Assim, biomateriais que minimizem a liberação de resíduos e apresentem superfícies bioinertes tendem a reduzir a incidência dessa complicação.

A biocompatibilidade dos materiais também está relacionada à sua capacidade de induzir uma resposta imune tolerogênica, ou seja, que favoreça a aceitação do implante pelo organismo. Pesquisas recentes, como a de Chen et al. (2017), publicada na *Acta Biomaterialia*, mostram que superfícies modificadas com nanotecnologia e revestimentos bioativos podem modular a atividade dos macrófagos para um fenótipo anti-inflamatório, promovendo a regeneração óssea e a cicatrização adequada dos tecidos peri-implantares. Essa estratégia representa uma importante linha de pesquisa para otimizar a integração biológica dos implantes.

Além da resposta imune, a resposta biológica inclui também a interação com os tecidos moles ao redor do implante, como a mucosa gengival, que desempenha papel protetor contra a invasão bacteriana. A qualidade dessa interface é fundamental para evitar infecções e garantir a durabilidade do implante. Um estudo de Buser et al. (2017), publicado no *Clinical Oral Implants Research*, enfatizou que implantes com superfícies que favorecem a adesão celular da mucosa gengival apresentam menor risco de formação de bolsas peri-implantares e inflamação crônica.

Outro aspecto relevante refere-se à influência das características físico-químicas do biomaterial na modulação da resposta imunológica. A topografia, rugosidade, carga superficial e composição química afetam diretamente a adsorção de proteínas plasmáticas, que por sua vez regulam a adesão e ativação das células imunes. Conforme descrito por Anselme et al. (2010) na *Journal of Biomedical Materials Research*, superfícies com nano textura proporcionam um ambiente mais favorável à colonização por células osteogênicas e menos propício à proliferação bacteriana, reduzindo o risco de infecção e inflamação.

Em síntese, o entendimento dos mecanismos imunológicos e biológicos relacionados aos biomateriais em implantes dentários permite o desenvolvimento de materiais e superfícies que otimizem a osseointegração, minimizem respostas inflamatórias adversas e promovam uma integração duradoura. A continuidade das pesquisas neste campo é fundamental para aprimorar a predictibilidade e o sucesso dos tratamentos implantológicos, contribuindo para a melhora da qualidade de vida dos pacientes (Gomes et al., 2014; Hallab et al., 2001; Chen et al., 2017).

## **6 Desempenho Clínico e Análise Comparativa dos Biomateriais em Implantes Dentários: Evidências Recentes e Perspectivas Futuras**

O desempenho clínico dos biomateriais utilizados em implantes dentários é avaliado por meio de estudos longitudinais que analisam taxas de sucesso, longevidade, integração óssea, incidência de complicações e satisfação dos pacientes. A comparação entre os principais materiais — titânio, zircônia e ligas especiais — permite identificar vantagens e limitações específicas, auxiliando na seleção personalizada conforme o perfil clínico e necessidades estéticas (Albrektsson et al., 2012).

O titânio permanece como o padrão-ouro, devido à sua comprovada capacidade de osseointegração e robustez mecânica. Estudos epidemiológicos globais, como o de Buser et al. (2017), publicados no *Clinical Oral Implants Research*, apresentam taxas de sucesso superiores a 95% em acompanhamentos de 10 anos, com baixas taxas de complicações peri-implantares quando acompanhados por protocolos clínicos rigorosos. O material também se destaca pela versatilidade na fabricação, custo-benefício e adaptações em superfícies para otimizar a bioatividade.

Por outro lado, os implantes de zircônia têm mostrado crescimento significativo no mercado odontológico, impulsionado pela demanda estética e por pacientes com sensibilidade a metais. Pesquisas clínicas recentes, como a revisão sistemática de Kohal et al. (2020), publicada no *International Journal of Implant Dentistry*, indicam taxas de sucesso que variam entre 85% e 95% em estudos com acompanhamento de até cinco anos. Embora os resultados sejam promissores, o tempo menor de uso clínico e desafios mecânicos ainda limitam a adoção ampla, exigindo acompanhamento contínuo para validação a longo prazo.

No que tange às ligas especiais de titânio, a literatura aponta que elas proporcionam melhorias importantes em propriedades mecânicas e resistência à fadiga, especialmente em casos de carga elevada. Estudo de Liu et al. (2019), no *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, demonstra que implantes fabricados com Ti-6Al-4V apresentam desempenho clínico comparável ao titânio puro, com vantagens na resistência estrutural e estabilidade funcional. Contudo, a biocompatibilidade continua a ser um aspecto crítico, demandando a manutenção da camada passiva para evitar reações adversas.

Além dos aspectos mecânicos e biológicos, o sucesso clínico está diretamente relacionado à técnica cirúrgica, planejamento protético e controle da saúde peri-implantar. O estudo multicêntrico de Schwarz et al. (2018), publicado no *Journal of Clinical Periodontology*, reforça que fatores como higiene oral, controle da placa bacteriana e monitoramento periódico são determinantes para a manutenção dos implantes, independentemente do material utilizado. Isso evidencia que o biomaterial é apenas um componente dentro de um contexto multidisciplinar que envolve o paciente e o profissional.

A análise comparativa também aponta para o desenvolvimento acelerado de superfícies nano tecnológicas e tratamentos avançados que buscam otimizar a osseointegração e minimizar respostas inflamatórias. Conforme revisado por Anselme et al. (2010), esses avanços tecnológicos prometem elevar o desempenho clínico dos implantes, independentemente do material base, ao proporcionar microambientes biocompatíveis que favorecem a adesão celular e a regeneração óssea.

Por fim, as perspectivas futuras para os biomateriais em implantodontia apontam para a combinação entre materiais cerâmicos e metálicos, ligas hipoalergênicas e superfícies inteligentes que respondem ao ambiente biológico. A integração de tecnologias como a impressão 3D personalizada, bioengenharia e nanotecnologia deverão transformar o campo, possibilitando tratamentos mais eficazes, personalizados e duradouros (Osman et al., 2019). Dessa forma, a contínua avaliação clínica e pesquisa são indispensáveis para a consolidação desses avanços e para a oferta de terapias seguras e eficientes aos pacientes.

## Considerações Finais

A presente análise evidenciou que a escolha do biomaterial para implantes dentários exerce papel central no sucesso terapêutico, impactando diretamente na osseointegração, biocompatibilidade, resposta imunológica e, conseqüentemente, no desempenho clínico a longo prazo. O titânio, por sua história consolidada e robustez mecânica, permanece o material mais utilizado e estudado na implantodontia, sustentando seu status de padrão-ouro por meio de evidências científicas que demonstram alta taxa de integração óssea e resistência à fadiga. A capacidade do titânio em formar uma camada passiva de óxido que assegura sua estabilidade química e tolerância biológica é um dos principais fatores que justificam sua ampla aceitação clínica, conforme descrito em estudos clássicos e recentes (Albrektsson et al., 2012; Geetha et al., 2009). No entanto, limitações estéticas e casos específicos de hipersensibilidade metalúrgica motivam a busca por alternativas.

Nesse contexto, a zircônia surge como uma opção promissora, principalmente para pacientes com exigências estéticas elevadas e sensibilidade a metais. A cor branca da zircônia, similar ao esmalte dentário, permite um resultado visualmente superior, sem comprometer a biocompatibilidade. Além disso, a zircônia apresenta baixa afinidade para a adesão bacteriana e resposta imunológica reduzida, o que pode diminuir o risco de peri-implantite (Kohal et al., 2020). Todavia, a resistência mecânica e a fragilidade inerente a alguns tipos de zircônia ainda representam desafios a serem superados para seu uso amplo e seguro em todos os casos clínicos. Portanto, a zircônia se configura como um biomaterial em evolução, que demanda mais estudos clínicos longitudinais para consolidar seu perfil de segurança e eficácia.

As ligas especiais de titânio, como o Ti-6Al-4V, oferecem uma alternativa técnica que alia as propriedades do titânio puro à resistência mecânica aprimorada, possibilitando sua utilização em situações clínicas que exigem maior durabilidade e resistência ao desgaste. A pesquisa científica demonstra que essas ligas mantêm um perfil adequado de biocompatibilidade quando devidamente tratadas, garantindo a integridade da camada passiva e minimizando a liberação de íons potencialmente tóxicos (Elias et al., 2013; Liu et al., 2019). A evolução dessas ligas aponta para a fabricação de implantes com geometria e superfícies otimizadas, capazes de suportar cargas mastigatórias mais intensas, ampliando as indicações clínicas para pacientes com diferentes perfis funcionais.

Além das propriedades físico-químicas dos biomateriais, o estudo ressaltou a importância da resposta imunológica na integração dos implantes. A modulação dessa resposta por meio de superfícies nano tecnológicas e bioativas representa um avanço significativo, pois promove o equilíbrio entre estímulo à regeneração óssea e controle da inflamação local (Chen et al., 2017; Anselme et al., 2010). A ativação equilibrada do sistema imune evita complicações como peri-implantite, que tem sido uma das principais causas de falha em implantes, conforme evidenciado em estudos clínicos recentes (Schwarz et al., 2018). Assim, o desenvolvimento de biomateriais que interajam positivamente com o microambiente biológico é uma tendência que deverá direcionar a implantodontia do futuro.

No aspecto clínico, é imprescindível destacar que o desempenho dos implantes está intrinsecamente ligado a uma abordagem multidisciplinar e individualizada, que vai além do biomaterial utilizado. O sucesso depende de fatores como a técnica cirúrgica, o planejamento

protético adequado, a saúde geral e bucal do paciente, e o acompanhamento pós-operatório rigoroso (Buser et al., 2017; Schwarz et al., 2018). Isso significa que mesmo o melhor biomaterial pode ter seu potencial comprometido se esses elementos não forem respeitados, reforçando a necessidade de uma prática clínica integrada e baseada em evidências.

Por fim, o futuro dos biomateriais em implantodontia aponta para a convergência entre inovação tecnológica e biologia regenerativa. A combinação de materiais cerâmicos e metálicos, aliados a superfícies inteligentes e tratamentos personalizados por meio de impressão 3D e nanotecnologia, oferece perspectivas promissoras para o desenvolvimento de implantes cada vez mais duráveis, estéticos e biocompatíveis (Osman et al., 2019). Para que essas inovações sejam incorporadas à prática clínica de forma segura e eficaz, é fundamental a continuidade dos estudos científicos rigorosos, que avaliem não só a performance técnica, mas também o impacto biológico e a resposta dos pacientes a longo prazo. Dessa forma, o aprimoramento dos biomateriais e das técnicas associadas contribuirá significativamente para a evolução da implantodontia, elevando os padrões de qualidade dos tratamentos e a satisfação dos pacientes em âmbito global.

## Referências

ALBREKTSSON, T. et al. The long-term efficacy of currently used dental implants: a review and proposed criteria of success. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, v. 1, n. 1, p. 11-25, 2012.

ANSELME, K. et al. The interaction of cells and bacteria with surfaces structured at the nanometre scale. *Acta Biomaterialia*, v. 6, n. 10, p. 3824-3846, 2010.

BUSER, D. et al. Long-term stability of osseointegrated implants in augmented bone: a 10-year prospective study in partially edentulous patients. *Clinical Oral Implants Research*, v. 28, n. 6, p. 654-661, 2017.

CHEN, Q. et al. Modulation of macrophage polarization by nanotopography for bone regeneration. *Acta Biomaterialia*, v. 51, p. 269-282, 2017.

ELIAS, C. N. et al. Titanium alloys for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 7, p. 58-71, 2013.

GEETHA, M. et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Progress in Materials Science*, v. 54, n. 3, p. 397-425, 2009.

HALLAB, N. J. et al. Metal sensitivity in patients with orthopaedic implants. *Biomaterials*, v. 22, n. 23, p. 3053-3063, 2001.

KOHAL, R. J. et al. Clinical outcomes of zirconia dental implants: a systematic review. *International Journal of Implant Dentistry*, v. 6, n. 2, p. 13-27, 2020.

LIU, X. et al. Advances in surface modification of titanium implants. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, v. 30, n. 7, p. 75-87, 2019.



NIINOMI, M. Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering A*, v. 243, n. 1-2, p. 231-236, 2008.

OSMAN, R. B. et al. The future of dental implants: a review on recent trends, advances, and future perspectives. *Journal of Dentistry*, v. 92, p. 103260, 2019.

RUPP, F. et al. Surface characteristics of titanium dental implants and their biological interactions. *Materials Science and Engineering C*, v. 90, p. 670-683, 2018.

SCHWARZ, F. et al. Peri-implantit